

Dr GRADIMIR V. MILOVANOVIC

NUMERIČKA ANALIZA

II deo

345679

Naučna knjiga

NUMERIČKA ANALIZA
II DEO

Dr GRADIMIR V. MILOVANOVIC

NUMERIČKA ANALIZA

II deo

TREĆE IZDANJE

Naučna knjiga
BEOGRAD, 1991.

Dr Gradimir V. Milovanović
NUMERIČKA ANALIZA, II deo

Izdavač

IDP „Naučna knjiga“
Beograd, Uzun-Mirkova 5

Recenzenti:

Dr Petar M. Vasić
Dr Dobrilo Tošić

Za izdavača:

Dr Blažo Perović

Urednik:

Branislav Derić

Tehnički urednik:

Gordana Krstić

Korice:

Miloš Majstorović

Tiraž: 500 primeraka

ISBN 86-23-20238-4

Štampa: Štamparsko-izdavačko preduzeće „Bakar“ - Bor

Sadržaj

PREDGOVOR

VII

6. INTERPOLACIJA I APROKSIMACIJA 1

6.1. OPSTI PROBLEM APROKSIMACIJE FUNKCIJA 1

6.1.1. Uvod 1

6.1.2. Tipovi aproksimacionih funkcija 1

6.1.3. Kriterijumi za aproksimaciju 3

6.1.4. Weierstrassova i Bernsteinova teorema 5

6.2. INTERPOLACIJA FUNKCIJA 10

6.2.1. Čebiševljevi sistemi 10

6.2.2. Lagrangeova interpolacija 12

6.2.3. Newtonova interpolacija sa podeljenim razlikama 22

6.2.4. Račun konačnih razlika 27

6.2.5. Newtonove interpolacione formule 32

6.2.6. Interpolacione formule sa centralnim razlikama 37

6.2.7. Konvergencija interpolacionih procesa 43

6.2.8. Hermiteova interpolacija 51

6.2.9. Trigonometrijska interpolacija 58

6.2.10. Algoritmi za izračunavanje trigonometrijskih suma 65

6.2.11. Splajn funkcije i interpolacija pomoću splajnova 70

6.2.12. Konstrukcija kubnog splajna 73

6.2.13. Ekstremalna i aproksimativna svojstva kubnog splajna 81

6.2.14. Pronyeva interpolacija 86

6.3. PROBLEM NAJBOLJIH APROKSIMACIJA 88

6.3.1. Osnovni pojmovi 89

6.3.2. Srednje-kvadratna aproksimacija 93

6.3.3. Srednje-kvadratna aproksimacija sa ograničenjima 99

6.3.4. Ekonomizacija stepenih redova 105

6.3.5. Diskretna srednje-kvadratna aproksimacija 108

4.3.6. Čebiševljeva mini-max aproksimacija 118

6.4. LITERATURA 122

7. NUMERIČKO DIFERENCIranJE I NUMERIČKA INTEGRACIJA 125

- 7.1. NUMERIČKO DIFERENCIranJE 125
 - 7.1.1. Osnovni pojmovi 125
 - 7.1.2. Formule za numeričko diferenciranje 126
- 7.2. NUMERIČKA INTEGRACIJA
 - 7.2.1. Uvodne napomene 134
 - 7.2.2. Klase formula i stepen tačnosti 136
 - 7.2.3. Newton-Cotesove formule 140
 - 7.2.4. Uopštene kvadraturene formule 146
 - 7.2.5. Metodi za ocenu ostatka u kvadraturnim formulama 150
 - 7.2.6. Neki metodi za povećavanje tačnosti kvadraturnih formula 154
 - 7.2.7. Richardsonova ekstrapolacija i Rombergova integracija 158
 - 7.2.8. Gauss-Christoffelove kvadraturene formule 164
 - 7.2.9. Gauss-Christoffelove formule za klasične težinske funkcije 170
 - 7.2.10. Opšti metod konstrukcije Gauss-Christoffelovih formula 177
 - 7.2.11. Gauss-Christoffelove kvadrature na polukrugu 183
 - 7.2.12. Modifikovane Gaussove formule 186
 - 7.2.13. Formule Kronrodovog tipa 190
 - 7.2.14. Čebiševljeve kvadraturene formule 192
 - 7.2.15. Konturna integracija analitičkih funkcija u kompleksnoj ravni 195
 - 7.2.16. Integracija brzo oscilatornih funkcija 200
 - 7.2.17. Konvergencija kvadraturnih procesa 203
- 7.3. LITERATURA 205

Predgovor

Ova knjiga predstavlja nastavak autorovog udžbenika NUMERIČKA ANALIZA, I deo, Naučna knjiga, Beograd, 1988. U odnosu na prvo izdanje, koje se pojavilo 1985. godine, u ovom izdanju učinjene su neznatne izmene u tekstu i ispravljene uočene štamparske greške. Knjiga je podeljena u dve glave, koje su označene kao šesta i sedma, s obzirom da prvi deo sadrži pet glava. Organizacija knjige je ista kao i organizacija prvog dela. Naime, glave su podeljene na poglavlja, a poglavlja na odeljke. Numeracija objekata (definicija, teorema, formula i sl.) u okviru jednog odeljka izvršena je pomoću tri broja od kojih prvi ukazuje na poglavlje, drugi na odeljak, a treći na redni broj tog objekta u posmatranom odeljku. Na taj način je uspostavljena jednoznačna numeracija objekata u okviru jedne glave. Poslednje poglavlje u svakoj glavi predstavlja spisak citirane i korišćene literature.

Šesta glava je posvećena problemu aproksimacije funkcije jedne promenljive. Značajno mesto u izlaganju zauzimaju interpolacioni procesi. Pored interpolacije algebarskim polinomima, razmatrane su i interpolacije pomoću trigonometrijskih polinoma, eksponencijalnih funkcija i splajnova. Posebno poglavlje je posvećeno problemu najboljih aproksimacija (srednje kvadratne aproksimacije, mini-max aproksimacije i sl.).

U sedmoj glavi se izlažu metodi numeričkog diferenciranja i numeričke integracije. Poseban tretman dat je savremenim metodima konstrukcije Gauss-Christoffelovih kvadratura za neklasične težinske funkcije. Takođe, dat je pregled nekih klasa modifikovanih Gaussovih kvadratura (na primer, Kronrod-ove šeme), kao i osnovi teorije Čebiševljevih kvadratura. Posebni odeljci su posvećeni metodima za konturnu integraciju analitičkih funkcija u kompleksnoj ravni i metodima za integraciju brzo oscilatornih funkcija.

Knjiga je prvenstveno namenjena studentima tehničkih i prirodno-matematičkih fakulteta, na kojima se predeaje ova naučna disciplina. Autor se nada da će knjiga biti od koristi i svima onima koji u svojoj praksi koriste numeričke metode.

Svima onima koji su na neki način pomogli u toku izrade rukopisa, autor se najtoplije zahvaljuje.

U Nišu, 28.09.1988.

Gradimir V. Milovanović

Interpolacija i aproksimacija

6.1. OPŠTI PROBLEM APROKSIMACIJE FUNKCIJA

U ovom poglavlju se izlažu osnovni principi teorije aproksimacija funkcije realne promenljive i pokazuju aproksimaciona svojstva algebarskih polinoma.

6.1.1. Uvod

Problemima zamene jedne funkcije f , definisane na izvesnom skupu X , drugom funkcijom ϕ bavi se posebna oblast numeričke matematike - teorija aproksimacija.

Neka je funkcija ϕ , koju nazivamo aproksimacionom funkcijom, takva da zavisi od $n+1$ parametara a_0, a_1, \dots, a_n , tj.

$$\phi(x) = \phi(x; a_0, a_1, \dots, a_n).$$

Problem aproksimacije funkcije f , funkcijom ϕ svodi se na odredjivanje parametara $a_i = \bar{a}_i$ po nekom kriterijumu. U zavisnosti od izabranog kriterijuma razlikujemo razne vrste aproksimacija.

6.1.2. Tipovi aproksimacionih funkcija

Jedan od osnovnih problema u teoriji aproksimacija predstavlja izbor opšteg oblika za funkciju ϕ . U ovom odeljku navešćemo nekoliko standardnih oblika, koji se najčešće koriste u primenama. U principu sve aproksimacione funkcije mogu se podeliti na linearne i nelinearne aproksimacione funkcije.

Opšti oblik linearne aproksimacione funkcije je

$$(1.2.1) \quad \phi(x) = a_0 \phi_0(x) + a_1 \phi_1(x) + \dots + a_n \phi_n(x),$$

pri čemu sistem funkcija $\{\phi_k\}$ ispunjava određene osobine. Ovde se pojam linearne funkcije odnosi na linearnost po parametrima a_i ($i = 0, 1, \dots, n$).

U specijalnom slučaju, kada je $\phi_k(x) = x^k$ ($k = 0, 1, \dots, n$), tj.

$$\phi(x) = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n,$$

govorimo o aproksimaciji algebarskim polinomima.

U slučaju, kada je $\{\phi_k\} = \{1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots\}$ govorimo o aproksimaciji trigonometrijskim polinomima (ili o trigonometrijskoj aproksimaciji).

Ako se uzme

$$\phi_k(x) = (x-x_k)^m = \begin{cases} (x-x_k)^m & (x \geq x_k), \\ 0 & (x < x_k), \end{cases}$$

gde je m fiksiran prirodan broj, imamo tzv. aproksimaciju pomoću splajnova*.

Od nelinearnih aproksimacionih funkcija, navešćemo samo

dve:

1^o Eksponencijalna aproksimaciona funkcija

$$\phi(x) = \phi(x; c_0, b_0, \dots, c_r, b_r) = c_0 e^{c_0 x} + \dots + c_r e^{b_r x},$$

gde je $n+1 = 2(r+1)$, tj. $n = 2r+1$.

2^o Racionalna aproksimaciona funkcija

$$\phi(x) = \phi(x; b_0, \dots, b_r, c_0, \dots, c_s) = \frac{b_0 + b_1 x + \dots + b_r x^r}{c_0 + c_1 x + \dots + c_s x^s},$$

gde je $n = r+s+1$.

* Na engleskom: *spline*. Na našem jeziku se ne može naći odgovarajući prevod, pa ćemo koristiti u daljem tekstu reč *splajn*. U ruskom i nemačkom jeziku, *takodje*, nije nadjen odgovarajući prevod.

6.1.3. Kriterijumi za aproksimaciju

U ovoj glavi razmatraćemo najvažnije vrste aproksimacija koje se sreću u primenama. Tako ćemo razmotriti

- 1^o Interpolaciju,
- 2^o Srednje-kvadratnu aproksimaciju,
- 3^o Mini-max aproksimaciju.

Neka je funkcija f data na segmentu $[a, b]$ skupom parova (x_k, f_k) ($k=0, 1, \dots, n$), gde je $f_k \equiv f(x_k)$. Ako je za aproksimaciju funkcije f funkcijom ϕ , kriterijum za izbor parametara a_0, a_1, \dots, a_n dat sistemom jednačina

$$(1.3.1) \quad \phi(x_k; a_0, a_1, \dots, a_n) = f_k \quad (k=0, 1, \dots, n),$$

imamo tzv. problem interpolacije funkcije. Funkciju ϕ , u ovom slučaju, nazivamo interpolacionom funkcijom, a tačke x_k ($k=0, 1, \dots, n$) interpolacionim čvorovima.

Problem interpolacije može biti znatno složeniji od pomenutog. Jedan opštiji problem se javlja kada su pored vrednosti funkcije f u interpolacionim čvorovima poznate i vrednosti njenih izvoda.

Interpolacionim problemima biće posvećeno poglavlje 6.2.

Aproksimacije 2^o i 3^o spadaju u grupu tzv. najboljih aproksimacija. Kod ovih aproksimacija kriterijum za određivanje parametara aproksimacione funkcije se svodi na minimizaciju norme greške $\delta_n(x) = f(x) - \phi(x)$ u izvesnom prostoru X . U zavisnosti od izabranog prostora X i norme u njemu, imaćemo razne vrste najboljih aproksimacija. Ove aproksimacije mogu biti diskretne ili kontinualne. Diskretne aproksimacije su one kod kojih se informacije o funkciji f uzimaju samo sa diskretnog skupa tačaka. U tom slučaju funkcija f se može tretirati kao element nekog konačno-dimenzionalnog prostora. U protivnom, ako je X beskonačno-dimenzionalan prostor, imamo tzv. kontinualnu aproksimaciju. Najčešće je to prostor $L^r(a, b)$ ($r \geq 1$) sa uobičajenom normom

$$(1.3.2) \quad \|f\|_r = \left(\int_a^b |f(x)|^r dx \right)^{1/r}.$$

Minimizacijom norme $\|f - \phi\|_r$ po aproksimacionim parametrima a_i ($i = 0, 1, \dots, n$) dobijamo tzv. najbolju L^r aproksimaciju funkcije f na potprostoru $X_n \subset X$, koji je definisan kao lineal nad funkcijama $\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n$, tj. $X_n = L(\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n)$. Najbolju aproksimaciju označavamo sa $\phi^*(x)$. Od posebnog su interesa slučajevi, kada je $r = 1$, $r = 2$ i $r = +\infty$. Ovim problemima biće posvećeno poglavlje 6.3. Slučaj $r = 2$ biće razmatran u odnosu na opštiju normu, kod koje je uključena težinska funkcija $p: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^+$

$$\|f\|_2 = \left(\int_a^b p(x) f(x)^2 dx \right)^{1/2}.$$

Slučaj $r = +\infty$ može se razmatrati kao granični slučaj u (1.3.2) kada $r \rightarrow +\infty$. Tada je

$$(1.3.3) \quad \|f\|_\infty = \max_{a \leq x \leq b} |f(x)|.$$

Norma (1.3.3) je, kao što vidimo, standardna norma prostora neprekidnih funkcija $C[a, b]$, koju nazivamo često uniformnom normom. Najbolja L^∞ aproksimacija ϕ^* , koja se dobija iz sledećeg minimizacionog problema

$$\min_{a_i} \|f - \phi\|_\infty = \min_{a_i} \left(\max_{a \leq x \leq b} |f(x) - \phi(x)| \right) = \|f - \phi^*\|_\infty$$

zove se najbolja uniformna aproksimacija ili najbolja mini-max aproksimacija. Često se kaže samo mini-max aproksimacija. Konstrukcijom polinomske mini-max aproksimacije bavićemo se u odeljku 6.3.6. Potprostor X_n je, u tom slučaju, skup svih algebarskih polinoma ne višeg stepena od n , koji obično označavamo sa \mathcal{P}_n . Sa \mathcal{P}_n^* ($\in \mathcal{P}_n$) označavamo polinom najbolje mini-max aproksimacije za datu funkciju $f \in C[a, b]$. Polinom \mathcal{P}_n^* zovemo jednostavno mini-max polinomom. Veličinu $E_n(f)$, definisanu pomoću

$$E_n(f) = \min_{P_n \in \mathcal{P}_n} \|f - P_n\|_\infty = \|f - \mathcal{P}_n^*\|_\infty,$$

nazivamo veličinom najbolje aproksimacije. U mnogim ekstremalnim

problemima teorije aproksimacija pojavljuje se veličina $E_n(f)$ (videti, na primer, [1], [13], [33]).

6.1.4. Weierstrassova i Bernsteinova teorema

Od svih tipova aproksimacionih funkcija najčešće se koriste algebarski polinomi, kako zbog jednostavnosti, tako i zbog dobrih svojstava. Naime, na konačnom segmentu $[a, b]$ algebarski polinomi su vrlo dobri aproksimacioni elementi, na šta ukazuje sledeća teorema:

Teorema 1.4.1. (Weierstrass). Ako $f \in C[a, b]$, tada za svako $\epsilon > 0$ postoji prirodan broj n i polinom $P_n \in \mathcal{P}_n$ takav da je, za svako $x \in [a, b]$,

$$(1.4.1) \quad |f(x) - P_n(x)| \leq \epsilon.$$

Ova teorema kazuje da se za svaku neprekidnu funkciju može naći polinom koji je proizvoljno "blizak" toj funkciji u smislu uniformne norme. Tvrdjenje teoreme ima samo egzistencijalni karakter i ne daje metod konstrukcije takvog polinoma P_n . Međutim, ova teorema se može dobiti kao posledica Bernsteinove teoreme, koja ima i konstruktivni karakter. Pre nego što formulišemo i dokažemo Bernsteinovu teoremu, navešćemo neke pojmove.

Definicija 1.4.1. Neka je funkcija $x \mapsto f(x)$ definisana za $x \in [a, b]$ i neka je za svako $\delta \in [0, b-a]$

$$(1.4.2) \quad \omega(f; \delta) = \sup_{|x-y| \leq \delta} |f(x) - f(y)|.$$

Veličina $\omega(f; \delta)$ se naziva modul neprekidnosti funkcije f .

Ako funkcija f zadovoljava Lipschitzov uslov na $[a, b]$, tj. ako je

$$|f(x) - f(y)| \leq L|x-y| \quad (\forall x, y \in [a, b]),$$

gde je L pozitivna konstanta*, tada iz (1.4.2) sleduje

$$\omega(f; \delta) \leq L\delta.$$

Primetimo da za $f \in C[a, b]$ imamo

$$(1.4.3) \quad \lim_{\delta \rightarrow 0} \omega(f; \delta) = 0.$$

Naime, ako je f neprekidna funkcija na $[a, b]$, tada je ona i uniformno neprekidna, pa sleduje (1.4.3).

Ne umanjujući opštost u daljem razmatranju uzimamo $[a, b] = [0, 1]$.

Definicija 1.4.2. Neka $f \in C[0, 1]$ i neka je

$$P_{n,k}(x) = \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k}.$$

Polinom $B_n \in \mathcal{P}_n$, definisan pomoću

$$B_n(f; x) = \sum_{k=0}^n P_{n,k}(x) f\left(\frac{k}{n}\right),$$

naziva se Bernsteinov polinom za funkciju f .

Dakle, Bernsteinov polinom se konstruiše u ekvidistantnim tačkama (čvorovima) $x_k = \frac{k}{n}$ ($k = 0, 1, \dots, n$).

Da bismo dokazali izvesne jednakosti, podjimo od binomne formule

$$(\alpha + \beta)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \alpha^{n-k} \beta^k.$$

Diferenciranjem nalazimo

$$\frac{\partial}{\partial \beta} (\alpha + \beta)^n = n(\alpha + \beta)^{n-1} = \sum_{k=1}^n k \binom{n}{k} \alpha^{n-k} \beta^{k-1},$$

* L se naziva Lipschitzova konstanta.

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} (\alpha + \beta)^n = n(n-1)(\alpha + \beta)^{n-2} = \sum_{k=2}^n k(k-1) \binom{n}{k} \alpha^{n-k} \beta^{k-2}.$$

Stavljajući $\alpha = 1-x$ i $\beta = x$, na osnovu prethodnog dobijamo

$$B_n(1; x) = \sum_{k=0}^n p_{n,k}(x) = 1,$$

$$B_n(x; x) = \sum_{k=0}^n \frac{k}{n} p_{n,k}(x) = x,$$

$$B_n(x^2; x) = \sum_{k=0}^n \frac{k^2}{2} p_{n,k}(x) = \frac{n-1}{n} x^2 + \frac{x}{n}.$$

Dokazaćemo sada Bernsteinovu teoremu.

Teorema 1.4.2. Ako $f \in C[0,1]$, tada za svako $x \in [0,1]$ i svako $n \in \mathbb{N}$, važi nejednakost

$$|f(x) - B_n(f; x)| \leq \frac{9}{4} \omega\left(f; \frac{1}{\sqrt{n}}\right).$$

Dokaz. Neka su tačke x_k date pomoću

$$x_k = \frac{k}{n} \quad (k \in I = \{0, 1, \dots, n\}).$$

za dato $x \in [0,1]$ i δ , definišimo indeksne skupove

$$M = \{k \mid |x - x_k| \leq \delta (k \in I)\} \quad \text{i} \quad V = I \setminus M.$$

Tada, na osnovu prethodnog, imamo

$$f(x) - B_n(f; x) = \sum_{k=0}^n (f(x) - f(x_k)) p_{n,k}(x) = S_1(x) + S_2(x),$$

gde smo sa $S_1(x)$ i $S_2(x)$ definisali sume

$$S_1(x) = \sum_{k \in M} \dots \quad \text{i} \quad S_2(x) = \sum_{k \in V} \dots$$

S obzirom na definiciju 1.4.1 imamo

$$|S_1(x)| \leq \omega(f; \delta) \cdot \sum_{k \in I} p_{n,k}(x) \leq \omega(f; \delta) \sum_{k \in I} p_{n,k}(x) = \omega(f; \delta).$$

Da bismo odredili granicu za $|S_2(x)|$, postupimo na sledeći način. Neka je p najveće celo od $\frac{|x-x_k|}{\delta}$, tj. $p = \left[\frac{|x-x_k|}{\delta} \right]$. Između tačaka x i x_k umetnimo ekvidistantno p tačaka: c_1, c_2, \dots, c_p , tako da je sada dužina svakog podintervala $|x-x_k|/(p+1) < \delta$.

Kako je

$$f(x) - f(x_k) = (f(x) - f(c_1)) + (f(c_1) - f(c_2)) + \dots + (f(c_{p-1}) - f(c_p)) + (f(c_p) - f(x_k)),$$

imamo

$$|f(x) - f(x_k)| \leq (p+1)\omega(f; \delta) \leq \left(\frac{|x-x_k|}{\delta} + 1 \right) \omega(f; \delta).$$

Tada je

$$\begin{aligned} |S_2(x)| &\leq \omega(f; \delta) \sum_{k \in V} \left(\frac{|x-x_k|}{\delta} + 1 \right) p_{n,k}(x) \\ &= \omega(f; \delta) \left(\sum_{k \in V} \frac{|x-x_k|}{\delta} p_{n,k}(x) + \sum_{k \in V} p_{n,k}(x) \right) \\ &\leq \omega(f; \delta) \left(\frac{1}{\delta^2} \sum_{k \in V} (x-x_k)^2 p_{n,k}(x) + \sum_{k \in V} p_{n,k}(x) \right). \end{aligned}$$

Kako je

$$\sum_{k \in I} (x-x_k)^2 p_{n,k}(x) = x^2 - 2x \cdot x + \frac{n-1}{n} x^2 + \frac{x}{n} = \frac{x(1-x)}{n} \leq \frac{1}{4n},$$

na osnovu prethodnog, imamo

$$|S_2(x)| \leq \omega(f; \delta) \left(\frac{1}{\delta^2} \sum_{k \in I} (x-x_k)^2 p_{n,k}(x) + \sum_{k \in I} p_{n,k}(x) \right) \leq \omega(f; \delta) \left(\frac{1}{4n\delta^2} + 1 \right).$$

Dakle,

$$|f(x) - B_n(f;x)| \leq |S_1(x)| + |S_2(x)| \leq \omega(f;\delta) \left(2 + \frac{1}{4n\delta^2}\right).$$

Ako stavimo $\delta = \frac{1}{\sqrt{n}}$ dobijamo tvrdjenje teoreme.

Ako je broj n izabran dovoljno veliki, tako da je $\omega(f; \frac{1}{\sqrt{n}}) \leq \frac{4}{9} \epsilon$, iz teoreme 1.4.2 dobijamo Weierstrassovu teoremu za funkciju $f \in C[0,1]$. Jedan polinom P_n u (1.4.1) je tada $B_n(f;x)$. Primitimo da se modul neprekidnosti može učiniti dovoljno malim, s obzirom na (1.4.3).

Posledica 1.4.1. Ako funkcija f zadovoljava Lipschitzov uslov na $[0,1]$ sa konstantom L , tada je za svako $x \in [0,1]$

$$|f(x) - B_n(f;x)| \leq \frac{9L}{4\sqrt{n}}.$$

Primerba 1.4.1. U radu [35], D.D. Stancu je dokazao da za $f \in C[0,1]$ važi jednakost

$$R_n(f;x) = f(x) - B_n(f;x) = -\frac{x(1-x)}{n} \sum_{k=0}^{n-1} p_{n-1,k}(x) \left[x, \frac{k}{n}; f \right],$$

gde je $[x,y,z;f]$ oznaka za podeljenu razliku drugog reda (videti odeljak 6.2.3). Ako su podeljene razlike drugog reda funkcije f ograničene, tada važi nejednakost

$$|R_n(f,x)| \leq \frac{x(1-x)}{n} M_2(f),$$

gde je $M_2(f)$ najmanja gornja granica apsolutne vrednosti podeljene razlike drugog reda funkcije f na $[0,1]$.

6.2. INTERPOLACIJA FUNKCIJA

Ovo poglavlje je posvećeno jednom od najvažnijih problema teorije aproksimacija - interpolaciji funkcija. Pored praktičnog značaja, interpolacija ima veliki teorijski značaj za konstrukciju numeričkih metoda za rešavanje mnogih problema (na primer, numeričko diferenciranje, numerička integracija i slično).

6.2.1. Čebiševljevi sistemi

Neka je funkcija f data svojim vrednostima $f_k = f(x_k)$ u tačkama $x_k \in [a, b]$ ($k = 0, 1, \dots, n$). Posmatrajmo linearni interpolacioni problem, tj. interpolaciju funkcijom (1.2.1). U tom slučaju sistem jednačina (1.3.1) se svodi na sistem linearnih jednačina po parametrima a_i ($i = 0, 1, \dots, n$)

$$a_0 \phi_0(x_k) + a_1 \phi_1(x_k) + \dots + a_n \phi_n(x_k) = f_k \quad (k = 0, 1, \dots, n),$$

tj.

$$(2.1.1) \quad \begin{bmatrix} \phi_0(x_0) & \phi_1(x_0) & \dots & \phi_n(x_0) \\ \phi_0(x_1) & \phi_1(x_1) & & \phi_n(x_1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_0(x_n) & \phi_1(x_n) & & \phi_n(x_n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}.$$

Da bi navedeni interpolacioni problem imao jedinstveno rešenje potrebno je da matrica sistema (2.1.1) bude regularna.

Primer 2.1.1.1. Neka je $\phi_0(x) = 1$ i $\phi_1(x) = x^2$ i $X = [-1, 1]$. Odgovarajuća matrica sistema (2.1.1), u ovom slučaju, je

$$\begin{bmatrix} 1 & x_0^2 \\ 1 & x_1^2 \end{bmatrix}.$$

Interpolacioni problem

- (a) ima jedinstveno rešenje ako je $|x_0| \neq |x_1|$;
- (b) ima beskonačno mnogo rešenja ako je $x_0 = -x_1$ i
 $f(x_0) = f(x_1)$;
- (c) nema rešenje ako je $x_0 = -x_1$ i $f(x_0) \neq f(x_1)$.

Neka su interpolacioni čvorovi takvi da je

$$a \leq x_0 < x_1 < \dots < x_n \leq b.$$

Razmotrićemo uslove pod kojima je matrica sistema (2.1.1) regularna. Uslov da je sistem funkcija $\{\phi_k\}$ linearno nezavisan je potreban, ali ne i dovoljan, što pokazuje sledeći primer:

Primer 2.1.1.1. Sistem funkcija $\{1, \sin x\}$ je linearno nezavisan, ali je za $x_0 + x_1 = \pi$,

$$\begin{vmatrix} 1 & \sin x_0 \\ 1 & \sin x_1 \end{vmatrix} = 0.$$

Iz osobina determinanta sleduje da sistemu funkcija $\{\phi_k\}$ treba nametnuti takve uslove, pod kojima ne postoji linearna kombinacija

$$a_0 \phi_0(x) + a_1 \phi_1(x) + \dots + a_n \phi_n(x)$$

koja ima $n+1$ različitih nula na $[a, b]$. Sistemi funkcija sa ovom osobinom nazivaju se Čebiševljevi sistemi (skraćeno T-sistemi). O T-sistemima postoji izvanredna monografija [24].

Teorema 2.1.1.1. Ako su funkcije $\phi_k: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ($k = 0, 1, \dots, n$) $n+1$ puta diferencijabilne i ako je za svako $k = 0, 1, \dots, n$ Wronsky-eva determinanta W_k različita od nule, tj.

$$W_k = \begin{vmatrix} \phi_0(x) & \phi_1(x) & \dots & \phi_k(x) \\ \phi_0'(x) & \phi_1'(x) & & \phi_k'(x) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_0^{(k)}(x) & \phi_1^{(k)}(x) & & \phi_k^{(k)}(x) \end{vmatrix} \neq 0,$$

sistem funkcija $\{\phi_k\}$ je Čebiševljev sistem.

6.2.2. Lagrangeova interpolacija

Neka je funkcija f data svojim vrednostima $f_k \equiv f(x_k)$ u tačkama x_k ($k=0,1,\dots,n$). Ne umanjujući opštnost pretpostavimo da je

$$(2.2.1) \quad a \leq x_0 < x_1 < \dots < x_n \leq b.$$

Ako tačke x_k uzmemo za interpolacione čvorove i stavimo $\phi_k(x) = x^k$ ($k=0,1,\dots,n$) imamo problem interpolacije funkcije f algebarskim polinomom. Označimo ovaj polinom sa P_n , tj.

$$P_n(x) = \phi(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n.$$

Teorema 2.2.1. Polinom P_n je jedinstven i može se predstaviti u obliku

$$(2.2.2) \quad P_n(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) L_k(x),$$

gde je

$$L_k(x) = \frac{(x-x_0) \dots (x-x_{k-1})(x-x_{k+1}) \dots (x-x_n)}{(x_k-x_0) \dots (x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1}) \dots (x_k-x_n)}$$

Dokaz. S obzirom da je determinanta matrice sistema (2.1.1), u posmatranom slučaju, Vandermonde ova, tj.

$$\begin{vmatrix} 1 & x_0 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & & x_1^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_n & & x_n^n \end{vmatrix} = \prod_{i>j} (x_i - x_j),$$

i s obzirom na pretpostavku (2.2.1), zaključujemo da je polinom P_n jedinstven. Dokaz jedinstvenosti smo mogli izvesti dokazujući da je sistem funkcija $\{1, x, x^2, \dots, x^n\}$ Čebiševljev sistem. Zaista, na osnovu teoreme 2.1.1 to sleduje, jer je Wronskyeva determinanta $W_k = 0!1!2!\dots k! \neq 0$ ($k=0,1,\dots,n$).

Da bismo dokazali formulu (2.2.2) dovoljno je primetiti sledeće:

1^o Svi polinomi L_k su ne višeg stepena od n , tj. $\deg(L_k) \leq n$ za svako k ,

2^o $L_k(x_i) = \delta_{ik}$ (δ_{ik} - Kroneckerova delta),

3^o $P_n(x_k) = f(x_k)$ za svako k ,

4^o $\deg(P_n) \leq n$.

Formula (2.2.2) naziva se Lagrangeova interpolaciona formula, a polinom P_n Lagrangeov interpolacioni polinom.

Definisanjem polinoma ω pomoću

$$(2.2.3) \quad \omega(x) = (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n),$$

polinomi L_k se mogu predstaviti u kondenzovanijem obliku

$$L_k(x) = \frac{\omega(x)}{(x-x_k)\omega'(x_k)} \quad (k=0,1,\dots,n).$$

Primer 2.2.1. Za skup podataka

x_k	-1	0	2	3
$f(x_k)$	-1	2	10	35

$$F_3(x) = (-1) \frac{(x-0)(x-2)(x-3)}{(-1-0)(-1-2)(-1-3)} + 2 \frac{(x+1)(x-2)(x-3)}{(0+1)(0-2)(0-3)}$$

$$+ 10 \frac{(x+1)(x-0)(x-3)}{(2+1)(2-0)(2-3)} + 35 \frac{(x+1)(x-0)(x-2)}{(3+1)(3-0)(3-2)},$$

$$\text{tj. } P_3(x) = \frac{5}{3}x^3 - \frac{4}{3}x^2 + 2.$$

Sledeća teorema daje ocenu greške kod Lagrange ove interpolacije.

Teorema 2.2.2. Neka $f \in C^{n+1}[a,b]$ i $x_i \in [a,b]$ ($i = 0, 1, \dots, n$). Ta da postoji $\xi \in (a,b)$ takvo da se greška Lagrange ovog interpolacionog polinoma može predstaviti u obliku

$$(2.2.4) \quad R_n(f;x) = f(x) - P_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \omega(x).$$

Dokaz. Posmatrajmo pomoćnu funkciju F , definisanu sa

$$(2.2.5) \quad F(x) = f(x) - P_n(x) - K_n \omega(x),$$

koja se anulira u tačkama x_0, x_1, \dots, x_n . Neka je \bar{x} proizvoljna tačka iz $[a,b]$ i takva da je $\bar{x} \neq x_i$ ($i = 0, 1, \dots, n$). Odredićemo konstantu K_n u (2.2.5) tako da se $F(x)$ anulira i u tački \bar{x} . S obzirom da je $\bar{x} \neq x_i$ ($i = 0, 1, \dots, n$), ovakva vrednost za K_n postoji. Naime,

$$K_n = \frac{f(\bar{x}) - P_n(\bar{x})}{\omega(\bar{x})}$$

Kako funkcija F na $[a,b]$ ima bar $(n+2)$ različite nule, to na osnovu Rolle ove teoreme sukcesivno zaključujemo da u (a,b)

$F'(x)$ ima bar $(n+1)$ različitih nula,

\vdots

$F^{(n+1)}(x)$ ima bar jednu nulu.

Neka je $\xi \in (a,b)$ nula funkcije $F^{(n+1)}$. Tada iz (2.2.5)

sleduje

$$F^{(n+1)}(\xi) = f^{(n+1)}(\xi) - 0 - K_n^{(n+1)}! = 0,$$

$$\text{odakle je } K_n = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}.$$

Na osnovu prethodnog zaključujemo da je

$$R_n(f; \bar{x}) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \omega(\bar{x}).$$

Kako je \bar{x} proizvoljna tačka iz $[a, b]$, dokaz teoreme je završen.

Primer 2.2.2. Neka je $x \mapsto P_5(x)$ Lagrangeov interpolacioni polinom formiran na osnovu vrednosti funkcije $x \mapsto \sin x$ u tačkama $x_k = \frac{\pi}{10} k$ ($k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$). Tada je

$$\sin x - P_5(x) = \frac{-\sin \xi}{6!} x \left(x - \frac{\pi}{10}\right) \left(x - \frac{2\pi}{10}\right) \left(x - \frac{3\pi}{10}\right) \left(x - \frac{4\pi}{10}\right) \left(x - \frac{5\pi}{10}\right),$$

gde je $0 < \xi < \frac{\pi}{2}$.

Neka je $M_k = \max_{x \in [a, b]} |f^{(k)}(x)|$ ($k \in \mathbb{N}$).

Teorema 2.2.3. Neka $f \in C^{n+1}[a, b]$, $x_k - x_{k-1} = h = \text{const}$ ($k = 1, \dots, n$),

$x_0 = a$, $x_n = b$. Tada je

$$|R_n(f; x)| = |f(x) - P_n(x)| < \frac{h^{n+1}}{4(n+1)!} M_{n+1}.$$

Dokaz. Ako stavimo $x = x_0 + ph$ ($p \in [0, n]$) imamo

$$\omega(x) = p(p-1) \dots (p-n)h^{n+1}.$$

Kako funkcija $p \mapsto F_n(p) = |p(p-1) \dots (p-n)|$ na segmentu $[0, n]$ dosti-

že maksimalnu vrednost kada $p \in (0,1)$ (ili $p \in (n-1,n)$), važi

$$\max_{p \in [0, n]} F_n(p) < \max_{p \in (0,1)} |p(p-1)| \max_{p \in (0,1)} |(p-2)\dots(p-n)| < \frac{1}{4} n!,$$

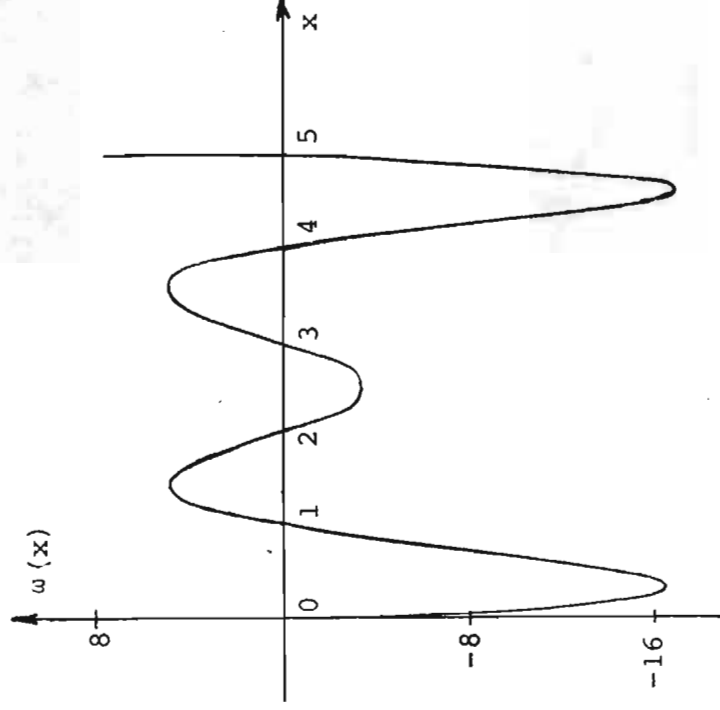
odakle neposredno sleduje tvrdjenje teoreme.

U specijalnom slučaju za $n=2$ i $n=3$, mogu se dobiti tačnije granice za grešku $R_n(f,x)$, nego što daje teorema 2.2.3, s obzirom da je

$$\max_{p \in [0,2]} F_2(p) = \frac{2\sqrt{3}}{9} \quad \text{i} \quad \max_{p \in [0,3]} F_3(p) = 1.$$

Dakle; imamo

$$|R_2(f;x)| \leq \frac{\sqrt{3}}{27} h^3 M_3 \quad \text{i} \quad |R_3(f;x)| \leq \frac{h^4}{24} M_4.$$



Sl. 2.2.1

Nije teško primetiti da za funkciju $\omega(x)$, u slučaju ekvidistantnih čvorova, važi

$$\omega\left(\frac{n}{2} + x\right) = (-1)^{n+1} \omega\left(\frac{n}{2} - x\right).$$

Na sl. 2.2.1 prikazan je grafik funkcije $\omega(x)$ za $h=1$ i $n=5$.

Primer 2.2.3. Odredićemo sada sa kojom tačnošću se može izračunati vrednost $\log 11.5$ korišćenjem Lagrange ovog polinoma P_3 ako su poznate vrednosti

$$\log 10, \log 11, \log 12, \log 13.$$

S obzirom da je $M_4 = \max_{x \in [10, 13]} \left| -\frac{6}{4} x \right| = 6 \cdot 10^{-4}$ imamo

$$\begin{aligned} |\log 11.5 - P_3(11.5)| &\leq \frac{M_4}{4!} |(11.5-10)(11.5-11)(11.5-12)(11.5-13)| \\ &= 1.41 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Inače, za proizvoljno $x \in (10, 13)$ važi ocena

$$|\log x - P_3(x)| \leq \frac{1}{24} \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 2.5 \cdot 10^{-5}$$

Uvodeći pretpostavku da je funkcija f regularna u nekoj oblasti G kompleksne ravni C može se naći jedna ocena greške (ostatka) kod Lagrange ove interpolacione formule.

Teorema 2.2.4. Neka je $f: G \rightarrow C$ regularna funkcija, $[a, b] \subset G \subset C$, $f(t) \in R$ za $t \in [a, b]$ i interval $I(x)$ definisan pomoću

$$I(x) = [\min(x_0, x), \max(x_n, x)],$$

pri čemu interpolacioni čvorovi zadovoljavaju uslov (2.2.1). Neka je, dalje, Γ zatvorena kriva u G , takva da $I(x) \subset \text{intr } \Gamma$, L dužina krive Γ ,

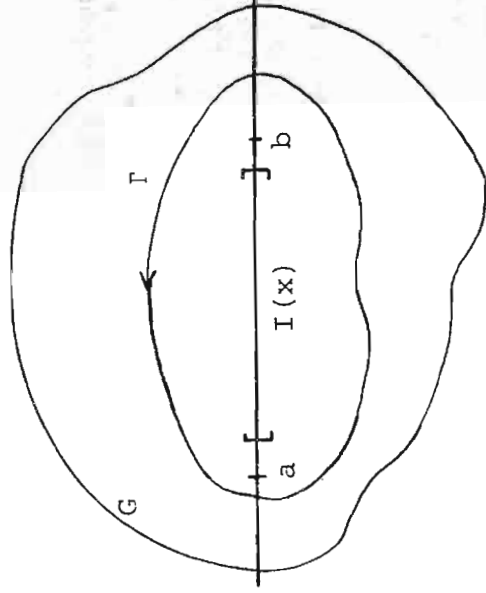
$$M = \max_{z \in \Gamma} |f(z)| \quad \text{i} \quad r(x) = \min_{\substack{t \in I(x) \\ z \in C}} |z - t|$$

Tada važi

$$(2.2.6) \quad |R_n(f; x)| = |f(x) - P_n(x)| \leq \frac{LM}{2\pi r(x)^{n+2}} |\omega(x)|.$$

Dokaz. Neka $t \in I(x)$. Na osnovu Cauchy eve integralne formule za regularne funkcije važi

$$f^{(n+1)}(t) = \frac{(n+1)!}{2\pi i} \oint_{\Gamma} \frac{f(z)}{(z-t)^{n+2}} dz.$$



Imajući u vidu uvedene pretpostavke (videti, takodje, sl. 2.2.2), zaključujemo da je

$$|f^{(n+1)}(t)| \leq \frac{(n+1)!}{2\pi} \cdot \frac{M}{r(x)^{n+2}} L.$$

Najzad, na osnovu (2.2.4) i poslednje nejednakosti dobijamo (2.2.6).

Sl. 2.2.2

Razmotrimo sada problem optimalnog izbora interpolacionih čvorova kod interpolacije funkcija iz klase

$$CM = \{f \in C^{n+1}[-1, 1] \wedge |f^{(n+1)}(x)| \leq M \ (\forall x \in [-1, 1])\}.$$

Naime, odredićemo interpolacione čvorove x_0, x_1, \dots, x_n tako da ve-ličina

$$(2.2.7) \quad \sup_{f \in CM} \max_{x \in [-1, 1]} |R_n(f; x)|$$

ima najmanju vrednost. Tada je, na osnovu (2.2.4),

$$(2.2.8) \quad \max_{x \in [-1, 1]} |R_n(f; x)| \leq \frac{M}{(n+1)!} \max_{x \in [-1, 1]} |\omega(x)|.$$

Primitimo da u poslednjoj nejednakosti nastupa jednakost ako je f polinom

$$f(x) = \frac{M}{(n+1)!} x^{n+1} + c_0 x^n + c_1 x^{n-1} + \dots + c_n,$$

gde su c_i ($i = 0, 1, \dots, n$) proizvoljni realni koeficijenti.

S obzirom da desna strana u nejednakosti (2.2.8) ne zavisi od f , to je

$$\sup_{f \in C^M} \max_{x \in [-1, 1]} |R_n(f; x)| \leq \frac{M}{(n+1)!} \max_{x \in [-1, 1]} |\omega(x)|$$

Problem koji smo postavili, očigledno se svodi na određivanje polinoma

$$x \mapsto \omega(x) = (x-x_0)(x-x_1) \dots (x-x_n),$$

čije nule leže u $[-1, 1]$ i za koji je $\max_{x \in [-1, 1]} |\omega(x)|$ minimalan.

Rešenje poslednjeg problema dato je u odeljku 2.2.14 (teorema 2.14.1):

$$\omega(x) = \frac{1}{2^n} T_{n+1}(x) = \frac{1}{2^n} \cos[(n+1)\arccos x].$$

Dakle, interpolacioni čvorovi pri kojima veličina (2.2.7) ima najmanju vrednost su nule Čebiševljevog polinoma $(n+1)$ -og stepena T_{n+1} , tj.

$$(2.2.9) \quad x_k = \cos \frac{2k+1}{2(n+1)} \pi \quad (k = 0, 1, \dots, n)$$

Interpolacija kod koje su interpolacioni čvorovi uzeti kao u (2.2.9) naziva se Čebiševljevom interpolacijom.

Razmotrimo sada jedan interesantan slučaj koji se javlja u praksi. Naime, vrlo često kod konstrukcije interpolacionog polinoma $P_n(x)$, umesto sa tačnim ordinatama $f_k = f(x_k)$, prinudjeni smo da radimo sa nekim približnim vrednostima \tilde{f}_k ($k = 0, 1, \dots, n$).

U tom slučaju dobićemo umesto $P_n(x)$, neki polinom $\tilde{P}_n(x)$, pri čemu važi

$$\tilde{P}_n(x) - P_n(x) = \sum_{k=0}^n (\tilde{f}_k - f_k) L_k(x).$$

Ako je maksimalna apsolutna greška u ordinatama ε , tj. ako je $\max_{0 \leq k \leq n} |\tilde{f}_k - f_k| \leq \varepsilon$, na osnovu prethodnog imamo

$$(2.2.10) \quad |\tilde{P}_n(x) - P_n(x)| \leq \varepsilon \sum_{k=0}^n |L_k(x)|.$$

Ove greške dolaze do izražaja ako je n dovoljno veliko. Ovakav zaključak sleduje na osnovu nejednakosti (G.Faber, S.N.Bernstein):

$$\max_{a \leq x \leq b} \sum_{k=0}^n |L_k(x)| \geq \frac{\log(n+1)}{8\sqrt{\pi}}.$$

Kada nije potreban opšti izraz za interpolacioni polinom, već samo vrednost za neko konkretno x , koristi se Aitken ova šema, koja se sastoji u sukcesivnoj primeni sledećih izraza:

$$A_k = f(x_k) \quad (k = 0, 1, \dots, n);$$

$$A_{k-1, k} = \frac{1}{x_k - x_{k-1}} \begin{vmatrix} A_{k-1} & x_{k-1}^{-x} \\ A_k & x_k^{-x} \end{vmatrix} \quad (k = 1, \dots, n);$$

$$\vdots$$

$$A_{0, 1, \dots, n} = \frac{1}{x_n - x_0} \begin{vmatrix} A_{0, 1, \dots, n-1} & x_0^{-x} \\ A_{1, 2, \dots, n} & x_n^{-x} \end{vmatrix}$$

pri čemu je

$$P_n(x) = A_{0, 1, \dots, n}.$$

Primer 2.2.4. Odredićemo približno $f(27)$ na osnovu sledećih podataka

x	14	17	31	35
f(x)	68,7	64,0	44,0	39,1

primenom Aitkenove šeme.

Imamo redom

$$A_{0,1} = \frac{1}{17-14} \begin{vmatrix} 68,7 & 14-27 \\ 64,0 & 17-27 \end{vmatrix} = 48,33,$$

$$A_{1,2} = \frac{1}{31-17} \begin{vmatrix} 64,0 & 17-27 \\ 44,0 & 31-27 \end{vmatrix} = 49,72,$$

$$A_{2,3} = \frac{1}{35-31} \begin{vmatrix} 44,0 & 31-27 \\ 39,1 & 35-27 \end{vmatrix} = 48,90,$$

$$A_{0,1,2} = \frac{1}{31-14} \begin{vmatrix} 48,33 & 14-27 \\ 49,72 & 31-27 \end{vmatrix} = 49,39,$$

$$A_{1,2,3} = \frac{1}{35-17} \begin{vmatrix} 49,72 & 17-27 \\ 48,90 & 35-37 \end{vmatrix} = 49,26.$$

Najzad,

$$f(27) = P_3(27) = A_{0,1,2,3} = \frac{1}{35-14} \begin{vmatrix} 49,39 & 14-27 \\ 49,26 & 35-27 \end{vmatrix} = 49,31.$$

Primer 2.2.5. Na osnovu vrednosti funkcije $x \mapsto f(x) = e^x$ u tačkama $x_0 = 0,40$ i $x_1 = 0,42$, Aitkenovom šemom odredićemo vrednost ove funkcije za $x = 0,411$. Odgovarajuće vrednosti funkcije u datim tačkama uzećemo sa pet značajnih cifara, tj.

$$f_0 = 1.4918 \quad \text{i} \quad f_1 = 1.5220.$$

Imamo

$$e^{0.411} \cong A_{0,1} = \frac{1}{0.42-0.40} \begin{vmatrix} 1.4918 & -0.011 \\ 1.5220 & 0.009 \end{vmatrix} \cong 1.5084.$$

U praksi se često javlja zadatak određivanja vrednosti argumenta na osnovu zadate vrednosti funkcije. Ovaj zadatak se rešava metodima inverzne interpolacije.

Ako je data funkcija monotona, zadatak inverzne interpolacije najjednostavnije se rešava međusobnom zamenom vrednosti funkcije i argumenta, a zatim konstrukcijom interpolacionog polinoma.

Primer 2.2.6. Odredimo približno nulu funkcije f , čije su vrednosti date u primeru 2.2.1. Lagrange ov interpolacioni polinom za funkciju $y \mapsto f^{-1}(y)$ je

$$P_3(y) = (-1) \frac{(y-2)(y-10)(y-35)}{(-1-2)(-1-10)(-1-35)} + 0 \frac{(y+1)(y-10)(y-35)}{(2+1)(2-10)(2-35)} + 2 \frac{(y+1)(y-2)(y-35)}{(10+1)(10-2)(10-35)} + 3 \frac{(y+1)(y-2)(y-10)}{(35+1)(35-2)(35-10)}$$

odakle, za $y=0$, dobijamo nulu funkcije f

$$x \approx P_3(0) = -0.6508.$$

Primer 2.2.1. U problemima inverzne interpolacije pogodno je koristiti se Aitkenovim metodom,

6.2.3. Newtonova interpolacija sa podeljenim razlikama

Za funkciju f datu svojim vrednostima $f_k \equiv f(x_k)$ u tačkama x_k ($k=0,1,\dots,n$), definišaćemo najpre podeljene razlike.

Definicija 2.3.1. Količnik

$$\frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

naziva se podeljena razlika prvog reda (funkcije f u tačkama x_0 i x_1) i označava sa $[x_0, x_1; f]$.

Podeljena razlika reda r definiše se rekurzivno pomoću

$$(2.3.1) \quad [x_0, x_1, \dots, x_r; f] = \frac{[x_1, \dots, x_r, f] - [x_0, \dots, x_{r-1}, f]}{x_r - x_0},$$

pri čemu je $[x; f] \equiv f(x)$.

Relacija (2.3.1) omogućava konstrukciju tablice podeljenih razlika

$$\begin{array}{l} x_0 \quad f_0 \quad [x_0, x_1; f] \\ x_1 \quad f_1 \quad [x_1, x_2; f] \quad [x_0, x_1, x_2; f] \\ x_2 \quad f_2 \quad [x_2, x_3; f] \quad [x_1, x_2, x_3; f] \\ x_3 \quad f_3 \\ \vdots \\ \vdots \end{array}$$

Može se pokazati da podeljena razlika reda r ima osobinu linearnosti, tj. da je

$$[x_0, x_1, \dots, x_r; c_1 f + c_2 g] = c_1 [x_0, \dots, x_r; f] + c_2 [x_0, \dots, x_r; g],$$

gde su c_1 i c_2 proizvoljne konstante.

Kako je, na osnovu definicije 2.3.1,

$$[x_0, x_1; f] = \frac{f(x_0)}{x_0 - x_1} + \frac{f(x_1)}{x_1 - x_0},$$

indukcijom se lako pokazuje da važi formula

$$[x_0, x_1, \dots, x_r; f] = \sum_{i=0}^r \frac{f(x_i)}{\omega'(x_i)},$$

gde je $\omega(x) = (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_r)$.

Matematičkom indukcijom se takođe može dokazati sledeći rezultat:

Teorema 2.3.1. Neka $f \in C^n[a, b]$ i neka je ispunjen uslov (2.2.1). Tada, za svako $r \leq n$, važi formula

$$[x_0, x_1, \dots, x_r; f] = \int_0^1 \int_0 \dots \int_0^{t_{r-1}} f^{(r)}(x_0 + \sum_{i=1}^r (x_i - x_{i-1})t_i) dt_1 dt_2 \dots dt_r.$$

Primerba 2.3.1. Primenujući teoremu o srednjoj vrednosti integrala, iz poslednje jednakosti sleduje

$$\begin{aligned} [x_0, x_1, \dots, x_r; f] &= f^{(r)}(\xi) \int_0^1 \int_0 \dots \int_0^{t_{r-1}} dt_1 dt_2 \dots dt_r \\ &= \frac{1}{r!} f^{(r)}(\xi) \quad (a < \xi < b). \end{aligned}$$

Uzimajući u poslednjoj jednakosti da $x_i \rightarrow x_0$ ($i = 1, \dots, r$) zaključujemo da

$$(2.3.2) \quad [x_0, x_1, \dots, x_r; f] \rightarrow \frac{1}{r!} f^{(r)}(x_0).$$

Izrazićemo sada vrednost funkcije $f(x_r)$ ($r \leq n$) pomoću podeljenih razlika $[x_0, \dots, x_i; f]$ ($i = 0, 1, \dots, r$).

Za $r = 1$, na osnovu definicije 2.3.1. imamo

$$f(x_1) = f(x_0) + (x_1 - x_0) [x_0, x_1; f].$$

Slično je, za $r = 2$,

$$\begin{aligned} f(x_2) &= f(x_1) + (x_2 - x_1) [x_1, x_2; f] \\ &= (f(x_0) + (x_1 - x_0) [x_0, x_1; f]) + (x_2 - x_1) ([x_0, x_1; f] + \\ &\quad + (x_2 - x_0) [x_0, x_1, x_2; f]), \end{aligned}$$

$$tj, \quad f(x_2) = f(x_0) + (x_2 - x_0) [x_0, x_1; f] + (x_2 - x_0)(x_2 - x_1) [x_0, x_1, x_2; f].$$

U opštem slučaju važi

$$(2.3.3) \quad f(x_r) = f(x_0) + (x_r - x_0) [x_0, x_1; f] + (x_r - x_0)(x_r - x_1) [x_0, x_1, x_2; f] \\ + \dots + (x_r - x_0)(x_r - x_1) \dots (x_r - x_{r-1}) [x_0, x_1, \dots, x_r; f].$$

Korišćenjem podeljenih razlika može se konstruisati interpolacioni polinom za skup podataka $(x_k, f(x_k))$ ($k = 0, \dots, n$). Naime, ovaj polinom ima oblik

$$P_n(x) = f(x_0) + (x - x_0) [x_0, x_1; f] + (x - x_0)(x - x_1) [x_0, x_1, x_2; f] \\ + \dots + (x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1}) [x_0, x_1, \dots, x_n; f]$$

i naziva se Newtonov interpolacioni polinom.

Da bismo dokazali poslednju formulu dovoljno je primetiti da je $\deg(P_n(x)) \leq n$ i da je $P_n(x_r) = f(x_r)$ ($r = 0, 1, \dots, n$). Poslednje tvrdjenje sleduje iz (2.3.3).

S obzirom na jedinstvenost algebarskog interpolacionog polinoma zaključujemo da je Newtonov interpolacioni polinom ekvivalentan sa Lagrangeovim. Primitimo da konstrukcija Newtonovog interpolacionog polinoma zahteva prethodno formiranje tablice podeljenih razlika, što nije bio slučaj kod Lagrange ove interpolacije. S druge strane, kada hoćemo da smanjimo grešku u interpolaciji uvodjenjem novog interpolacionog čvora, Newtonov polinom je znatno pogodniji od Lagrange ovog, jer ne zahteva ponavljanje celog računskog postupka. Naime, kod Newtonove interpolacije imamo

$$P_{n+1}(x) = P_n(x) + (x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_n) [x_0, x_1, \dots, x_{n+1}; f].$$

Teorema 2.3.2. Ako funkcija f ima konačne vrednosti u tačkama x_0, x_1, \dots, x_n, x , važi formula

$$(2.3.4) \quad R_n(x; f) = f(x) - P_n(x) = \omega(x) [x_0, x_1, \dots, x_n, x; f],$$

gde je $\omega(x) = (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n)$.

Dokaz. Stavimo $r = n+1$ i $x_r = x$, Tada iz (2.3.3) sleduje

$$f(x) = P_n(x) + (x-x_0)\dots(x-x_n) [x_0, x_1, \dots, x_n, x; f],$$

čime je dokaz završen.

Primerba 2.3.2. Kako je na osnovu primerbe 2.3.1

$$[x_0, x_1, \dots, x_n, x; f] = \frac{1}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi) \quad (a < \xi < b),$$

ostatak (2.3.4) se može svesti na Lagrangeov oblik.

Primerba 2.3.3. Ako u Newtonovom interpolacionom polinomu P_n uzmemo da $x_i \rightarrow x_0$ ($i = 1, \dots, n$), na osnovu (2.3.2) zaključujemo da se on svodi na Taylorov polinom.

Primer 2.3.1.1. Na osnovu vrednosti funkcije $x \rightarrow \operatorname{ch} x$

k	0	1	2	3
x_k	0.0	0.2	0.5	1.0
$f(x_k)$	1.0000000	1.0200668	1.1276260	1.5430806

imamo sledeću tablicu podeljenih razlika

k	$[x_k, x_{k+1}; f]$	$[x_k, x_{k+1}, x_{k+2}; f]$	$[x_k, x_{k+1}, x_{k+2}, x_{k+3}; f]$
0	0.1003338		
1	0.3585307	0.5163938	
2	0.8309093	0.5904733	
3			0.0740795

odakle je Newtonov interpolacioni polinom

$$P_3(x) = 1. + 0.1003338x + 0.5163938x(x-0.2) + 0.0740795x(x-0.2)(x-0.5).$$

Na primer, za $x = 0.3$, imamo

$$\text{ch } 0.3 \simeq P_3(0.3) = 1.0451474.$$

Dobijeni rezultat je tačan na prve tri decimalne.

6.2.4. Račun konačnih razlika

U ranijem izlaganju (videti odeljak 1.3.1) koristili smo se operatorom konačne razlike, definisanog na skupu funkcija sa

$$(2.4.1) \quad \Delta f(x) = f(x+h) - f(x) \quad (h = \text{const} > 0),$$

a na skupu nizova pomoću

$$\Delta Y_k = Y_{k+1} - Y_k.$$

Ako se eksplicitno želi istaći korak h u definiciji (2.4.1), tada se u oznaci operatora u indeksu piše h , tj. Δ_h .

U odeljku 1.3.1 takodje smo videli kako se definiše iterirani operator, tj. stepen operatora Δ . Naime,

$$\Delta^k f(x) = \Delta^{k-1} f(x+h) - \Delta^{k-1} f(x) \quad (k \in \mathbb{N}),$$

$$\Delta^0 f(x) = f(x).$$

Na osnovu ove definicije, matematičkom indukcijom, lako se dokazuju formule

$$(2.4.2) \quad \Delta^k f(x) = \sum_{i=0}^k (-1)^i \binom{k}{i} f(x+(k-i)h),$$

$$(2.4.3) \quad f(x+kh) = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \Delta^i f(x).$$

Pored operatora Δ , u numeričkoj analizi, uvodi se još nekoliko standardnih operatora, koji se nazivaju operatori kona-

čne razlike ili diferencni operatori. Sa ovim operatorima spro-
vodi se formalni račun zasnovan na pravilima algebre i analize,
i kao takav se često pokazuje kao elegantno sredstvo za formira-
nje raznih aproksimacionih formula. Ovaj račun naziva se račun
konačnih razlika.

Na skupu neprekidnih funkcija definišaćemo operatore:

$$1^{\circ} \quad Ef(x) = f(x+h) \quad (\text{operator pomeranja}),$$

$$2^{\circ} \quad \Delta f(x) = f(x+h) - f(x) \quad (\text{operator prednje razlike}),$$

$$3^{\circ} \quad \nabla f(x) = f(x) - f(x-h) \quad (\text{operator zadnje razlike}),$$

$$4^{\circ} \quad \delta f(x) = f(x + \frac{h}{2}) - f(x - \frac{h}{2}) \quad (\text{operator centralne razlike}),$$

$$5^{\circ} \quad \mu f(x) = \frac{1}{2}(f(x + \frac{h}{2}) + f(x - \frac{h}{2})) \quad (\text{operator usrednjavanja}),$$

$$6^{\circ} \quad If(x) = f(x) \quad (\text{identički operator}),$$

$$7^{\circ} \quad Jf(x) = \int_x^{x+h} f(t)dt \quad (\text{operator integracije}).$$

tor

$$8^{\circ} \quad Df(x) = f'(x) \quad (\text{operator diferenciranja}).$$

Na skupu diferencijabilnih funkcija definišimo i opera-

Reći ćemo da su dva operatora A i B jednaka ako je
 $Af(x) = Bf(x)$ za svaku funkciju f za koju su operatori A i B
definisani.

Jedan od osnovnih problema koji se nameće je nalaženje
veza između pojedinih operatora. Pre nego što predjemo na re-
šavanje ovog problema, ukazaćemo na neke opšte osobine.

Sa L označimo skup prethodno definisanih operatora, tj.

$$L = \{E, \Delta, \nabla, \delta, \mu, I, D, J\}.$$

a) Svaki operator A ∈ L je linearan, tj. važi

$$A(\lambda_1 f(x) + \lambda_2 g(x)) = \lambda_1 Af(x) + \lambda_2 Ag(x),$$

za svako realno λ_1 i λ_2 i svako f i g iz domena definisanosti operatora A .

b) Za $A, B \in L$, važi komutativnost $AB = BA$, tj.

$$A(Bf(x)) = B(Af(x)).$$

c) Ako operator $A \in L$ ima inverzni operator A^{-1} , tada je

$$AA^{-1} = A^{-1}A = I.$$

Primer 2.4.1.1. Dokažimo osobinu b), na primer, za operatore Δ i E . Imamo

$$\begin{aligned} \Delta(Ef(x)) &= \Delta(f(x+h)) = f(x+2h) - f(x+h) = Ef(x+h) - Ef(x) \\ &= E(f(x+h)) - f(x) = E(\Delta f(x)). \end{aligned}$$

Primer 2.4.2. Neka je $g(x) = Ef(x) = f(x+h)$. Tada je $f(x) = g(x-h)$, tj. $f(x) = E^{-1}g(x)$. Dakle, operator E^{-1} je pomerajući unazad.

Ako definišemo zbir operatora $C = A + B$ pomoću

$$Cf(x) = (A + B)f(x) = Af(x) + Bf(x),$$

važe pravila

$$A + B = B + A,$$

$$A(B + C) = AB + AC,$$

$$(A+B) + C = A + (B + C).$$

Kako je $E^k f(x) = E(E^{k-1} f(x)) = f(x+kh)$ ($k \in \mathbb{N}$), tj. kako iterirani operator E^k primenjen na $f(x)$ daje $f(x+kh)$, logično se nameće definisanje stepena operatora za proizvoljni izložilac sledećom jednakošću

$$E^p f(x) = f(x + ph) \quad (p \in \mathbb{R}).$$

Predjimo sada na utvrđivanje formalnih veza između jedinih operatora.

1. Kako je

$$\Delta f(x) = f(x+h) - f(x) = Ef(x) - 1f(x) = (E-1)f(x),$$

imamo

$$\Delta = E - 1 \quad \text{ili} \quad E = 1 + \Delta.$$

Primenom binomne formule na desne strane u poslednjim jednakostima dobijamo

$$\Delta^k = (E-1)^k = \sum_{i=0}^k (-1)^i \binom{k}{i} E^{k-i}, \quad E^k = (1+\Delta)^k = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \Delta^i,$$

odakle formalno sleduju formule (2.4.2) i (2.4.3).

2. Kako je

$$E^{1/2}f(x) = f\left(x + \frac{h}{2}\right) \quad \text{ili} \quad E^{-1/2}f(x) = f\left(x - \frac{h}{2}\right),$$

važe jednakosti

$$\delta f(x) = E^{1/2}f(x) - E^{-1/2}f(x) \quad \text{ili} \quad \mu f(x) = \frac{1}{2}(E^{1/2}f(x) + E^{-1/2}f(x)),$$

tj.

$$\delta = E^{1/2} - E^{-1/2} \quad \text{ili} \quad \mu = \frac{1}{2}(E^{1/2} + E^{-1/2}).$$

3. Važi

$$J\Delta f(x) = J(f'(x)) = \int_x^{x+h} f'(t) dt = f(x+h) - f(x) = \Delta f(x),$$

tj.

$$J\Delta = \Delta.$$

Na osnovu prethodne jednakosti, zaključujemo da važi

$$\Delta D^{-1} = J D D^{-1} = J.$$

$$4. \quad \nabla = 1 - E^{-1}.$$

$$5. \quad \Delta^r = E^r \nabla^r = E^r / 2^r \delta^r.$$

$$6. \quad E^{1/2} = (1 + \frac{1}{4} \delta^2)^{1/2} + \frac{1}{2} \delta, \quad \mu = (1 + \frac{1}{4} \delta^2)^{1/2},$$

pri čemu operator $(1 + \frac{1}{4} \delta^2)^{1/2}$ treba shvatiti kao operator čiji

je iterirani operator $[(1 + \frac{1}{4} \delta^2)^{1/2}]^2$ jednak $1 + \frac{1}{4} \delta^2$.

7. Za nalaženje veze između E i D pretpostavimo da je funkcija f proizvoljan broj puta diferencijabilna. Tada imamo

$$Ef(x) = f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!} f''(x) + \dots,$$

tj.

$$Ef(x) = 1f(x) + hDf(x) + \frac{h^2}{2!} D^2f(x) + \dots$$

$$= (1 + hD + \frac{h^2}{2!} D^2 + \dots)f(x)$$

$$= e^{hD} f(x),$$

odakle zaključujemo da važi

$$E = e^{hD} \quad \text{i} \quad D = \frac{1}{h} \log(1 + \Delta) = \frac{1}{h} (\Delta - \frac{\Delta^2}{2} + \frac{\Delta^3}{3} - \dots).$$

8. Kako je $\delta f(x) = E^{1/2} f(x) - E^{-1/2} f(x)$ i $E = e^{hD}$, imamo

$$\delta = E^{1/2} - E^{-1/2} = e^{hD/2} - e^{-hD/2} = 2 \operatorname{sh} \frac{hD}{2}.$$

Slično,

$$\mu = \frac{1}{2} (E^{1/2} + E^{-1/2}) = \operatorname{ch} \frac{hD}{2}.$$

$$9. \quad E = (1 - \nabla)^{-1} = 1 + \nabla + \nabla^2 + \dots.$$

$$10. \quad (1 + \frac{1}{4} \delta^2)^{1/2} = 1 + \frac{1}{8} \delta^2 - \frac{1}{128} \delta^4 + \dots.$$

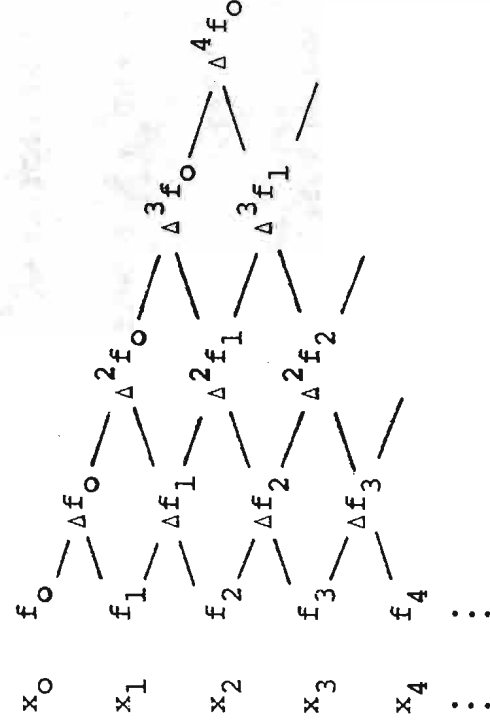
$$11. \quad E^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}\delta + \frac{1}{8}\delta^2 + \dots$$

6.2.5. Newtonove interpolacione formule

Primenom računa konačnih razlika mogu se izvesti različite interpolacione formule u ekvidistantnim čvorovima. U ovom odeljku daćemo samo Newtonove interpolacione formule.

Neka je funkcija f data na $[a, b]$ parovima vrednosti (x_k, f_k) , gde je $f_k = f(x_k)$ i $x_k = x_0 + kh$ ($k = 0, 1, \dots, n$).

Za dati skup podataka može se formirati tablica konačnih razlika. Na sl. 2.5.1 data je tablica formirana primenom operatora Δ .



Sl. 2.5.1

Neka je $x = x_0 + ph$ ($0 \leq p \leq n$), tj. $p = \frac{x - x_0}{h}$. Kako je

$$E^p = (1 + \Delta)^p = \sum_{k=0}^{+\infty} \binom{p}{k} \Delta^k,$$

imamo

$$E^p f_0 = \sum_{k=0}^{+\infty} \binom{p}{k} \Delta^k f_0 = \sum_{k=0}^n \binom{p}{k} \Delta^k f_0 + R_n(f; x),$$

tj.

$$(2.5.1) \quad f(x_0 + ph) = \sum_{k=0}^n \binom{p}{k} \Delta^k f_0 + R_n(f; x),$$

gde je ostatak $R_n \equiv R_n(f; x)$, s obzirom na jedinstvenost interpolacionog polinoma, isti kao kod Lagrange ove interpolacione formule, tj.

$$R_n(f; x) = \frac{h^{n+1}}{(n+1)!} p(p-1) \dots (p-n) f^{(n+1)}(\xi),$$

gde je ξ tačka iz intervala (x_0, x_n) .

Polinom

$$(2.5.2) \quad P_n(x) = \sum_{k=0}^n \binom{p}{k} \Delta^k f_0 \quad (ph = x - x_0),$$

dobijen na ovaj način, naziva se prvi Newtonov interpolacioni polinom. Primitimo da se ovaj polinom može definisati i rekurentno pomoću

$$P_k(x) = P_{k-1}(x) + \binom{p}{k} \Delta^k f_0 \quad (k = 1, \dots, n),$$

polazeći od $P_0(x) = f_0$.

Polinom (2.5.2) se može predstaviti i u razvijenoj

obliku

$$P_n(x) = f_0 + p \Delta f_0 + \frac{p(p-1)}{2!} \Delta^2 f_0 + \dots + \frac{p(p-1) \dots (p-n+1)}{n!} \Delta^n f_0,$$

tj.

$$P_n(x) = f_0 + \frac{\Delta f_0}{h} (x - x_0) + \frac{\Delta^2 f_0}{2! h^2} (x - x_0)(x - x_1) + \dots + \frac{\Delta^n f_0}{n! h^n} (x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1}).$$

Prvi Newtonov interpolacioni polinom se koristi u slučajevima kada se interpolacija izvodi na početku intervala, tj.

$$\Delta^2 f_{k-2}, \Delta^2 f_{k-1}, \Delta^2 f_k,$$

$$\Delta^3 f_{k-3}, \Delta^3 f_{k-2}, \Delta^3 f_{k-1}, \Delta^3 f_k, \text{ itd.}$$

Štaviše, greška u razlici $\Delta^m f_{k-m+i}$ ($i = 0, 1, \dots, m$) je $\binom{m}{i} (-1)^i \varepsilon$.

Znajući ovaj zakon rasprostiranja greške u tablici konačnih razlika, moguće je, u nekim slučajevima, naći izvor greške i otклонiti ga (videti [15]).

Sa numeričkog stanovišta Newtonovi interpolacioni polinomi nisu naročito pogodni, pa se u praksi koriste uglavnom interpolacioni polinomi sa centralnim razlikama.

6.2.6. Interpolacione formule sa centralnim razlikama

U ovom odeljku razmotrićemo jednu opštu klasu interpolacionih formula, koja kao partikularne slučajeve sadrži Newtonove interpolacione formule.

Neka je funkcija f tabelirana na skupu tačaka

$$G_m = \{x_0^{-mh}, \dots, x_0^{-2h}, x_0^{-h}, x_0, x_0+h, x_0+2h, \dots, x_0+mh\},$$

gde je m fiksiran prirodan broj i $h = \text{const} > 0$. Sa f_k označimo vrednost funkcije u tački $x_k = x_0 + kh$ ($k = 0, \pm 1, \dots, \pm m$).

Tablicu koja sadrži sve moguće razlike (diference) funkcije f na skupu G_m nazivaćemo centralnom tablicom razlika (diferenci). Tako na skupu G_3 imamo sledeće centralne tablice:

1° Centralnu tablicu prednjih razlika (sl. 2.6.1),

2° Centralnu tablicu centralnih razlika (sl. 2.6.2).

x_{-3}	f_{-3}	Δf_{-3}					
x_{-2}	f_{-2}	Δf_{-2}	$\Delta^2 f_{-3}$	$\Delta^3 f_{-3}$	$\Delta^4 f_{-3}$	$\Delta^5 f_{-3}$	$\Delta^6 f_{-3}$
x_{-1}	f_{-1}	Δf_{-1}	$\Delta^2 f_{-2}$	$\Delta^3 f_{-2}$	$\Delta^4 f_{-2}$	$\Delta^5 f_{-2}$	
x_0	f_0	Δf_0	$\Delta^2 f_{-1}$	$\Delta^3 f_{-1}$	$\Delta^4 f_{-1}$	$\Delta^5 f_{-1}$	
x_1	f_1	Δf_1	$\Delta^2 f_0$	$\Delta^3 f_0$	$\Delta^4 f_0$		
x_2	f_2	Δf_2	$\Delta^2 f_1$				
x_3	f_3						

Sl. 2.6.1

x_{-3}	f_{-3}	$\delta f_{-5/2}$	$\delta^2 f_{-2}$	$\delta^3 f_{-3/2}$	$\delta^4 f_{-1}$	$\delta^5 f_{-1/2}$	$\delta^6 f_0$
x_{-2}	f_{-2}	$\delta f_{-3/2}$	$\delta^2 f_{-1}$	$\delta^3 f_{-1/2}$	$\delta^4 f_0$	$\delta^5 f_{1/2}$	
x_{-1}	f_{-1}	$\delta f_{-1/2}$	$\delta^2 f_0$	$\delta^3 f_{1/2}$	$\delta^4 f_1$		
x_0	f_0	$\delta f_{1/2}$	$\delta^2 f_1$	$\delta^3 f_{3/2}$			
x_1	f_1	$\delta f_{3/2}$	$\delta^2 f_2$				
x_2	f_2	$\delta f_{5/2}$					
x_3	f_3						

Sl. 2.6.2

Imajući u vidu jednakosti

$$\Delta^r f_k = \nabla^r E^r f_k = \nabla^r f_{k+r}, \quad \Delta^r f_k = \delta^r E^{r/2} f_k = \delta^r f_{k+r/2} \quad (r=1,2,\dots),$$

vidimo da se iz tablice prednjih razlika lako dolazi do tablice zadnjih razlika, ili tablice centralnih razlika, prostim pomeranjem indeksa.

Ako uvedemo smenu $x=x_0+ph$ i stavimo $f_p = f(x)$, prva Newtonova interpolaciona formula (2.5.1) se može predstaviti kao

$$(2.6.1) \quad f_p = f_0 + \binom{p}{1} \Delta f_0 + \binom{p}{2} \Delta^2 f_0 + \binom{p}{3} \Delta^3 f_0 + \dots,$$

a pomoću operatora centralne razlike u obliku

$$f_p = f_0 + \binom{p}{1} \delta f_{1/2} + \binom{p}{2} \delta^2 f_1 + \binom{p}{3} \delta^3 f_{3/2} + \dots$$

Posmatrajmo opšti član $\binom{p}{q} \Delta^q f_0$ u formuli (2.6.1). Među-
sobnim množenjem jednakosti

$$\binom{p}{q} = \binom{p+1}{q+1} - \binom{p}{q+1} \quad \text{i} \quad \Delta^q f_{k+1} - \Delta^q f_k = \Delta^{q+1} f_k,$$

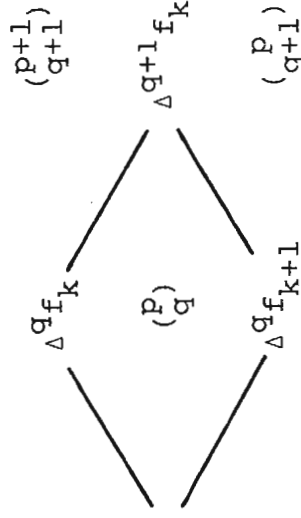
dobijamo

$$\binom{p}{q} \Delta^q f_{k+1} - \binom{p}{q} \Delta^q f_k = \binom{p+1}{q+1} \Delta^{q+1} f_k - \binom{p}{q+1} \Delta^{q+1} f_k,$$

tj.

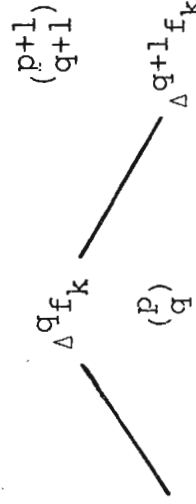
$$(2.6.2) \quad \binom{p}{q} \Delta^q f_{k+1} + \binom{p}{q+1} \Delta^{q+1} f_k = \binom{p}{q} \Delta^q f_k + \binom{p+1}{q+1} \Delta^{q+1} f_k.$$

Poslednjoj jednakosti može se pridružiti dijagram



koji se naziva romboidni dijagram. Smisao ovog pridruživanja je da se kretanjem od krajnjeg levog do krajnjeg desnog teme-
na romba po bilo kojoj grani (gornjoj ili donjoj), uz usputno "težinsko" sabiranje veličina na koje nailazimo, dobija isti rezultat. Član koji uzimamo u zbir formiramo na sledeći način:

Ako krećući se po grani romboidnog dijagrama najdremo na diferencu dolazeći po uzlaznoj (silaznoj) putanji, tada tu diferencu množimo binomnim koeficijentom koji se nalazi ispod (iznad) te putanje. Tako putanji



odgovara zbir $\binom{p}{q} \Delta^q f_k + \binom{p+1}{q+1} \Delta^{q+1} f_k$.

Od opisanih rombova moguće je sastaviti romboidnu mrežu (sl. 2.6.3).

Osim uzlaznih i silaznih putanja mogu se formirati i horizontalne putanje, na primer,

$$1, \Delta f_0, \binom{p}{2}, \Delta^3 f_{-1}, \dots$$

Ako se krećemo po takvoj putanji član koji se uzima u zbir jednak je proizvodu odgovarajućeg člana na koji se naiđe na putanji i aritmetičke sredine članova iznad i ispod njega. Tako za prethodno navedenu putanju imamo zbir

$$\frac{1}{2}(f_0 + f_1) + \frac{1}{2} \left[\binom{p}{1} + \binom{p-1}{1} \right] \Delta f_0 + \frac{1}{2} \binom{p}{2} (\Delta^2 f_{-1} + \Delta^2 f_0) + \dots$$

Svakoju putanji u romboidnoj mreži odgovara jedna interpolaciona formula. Prvoj Newtonovoj formuli odgovara putanja

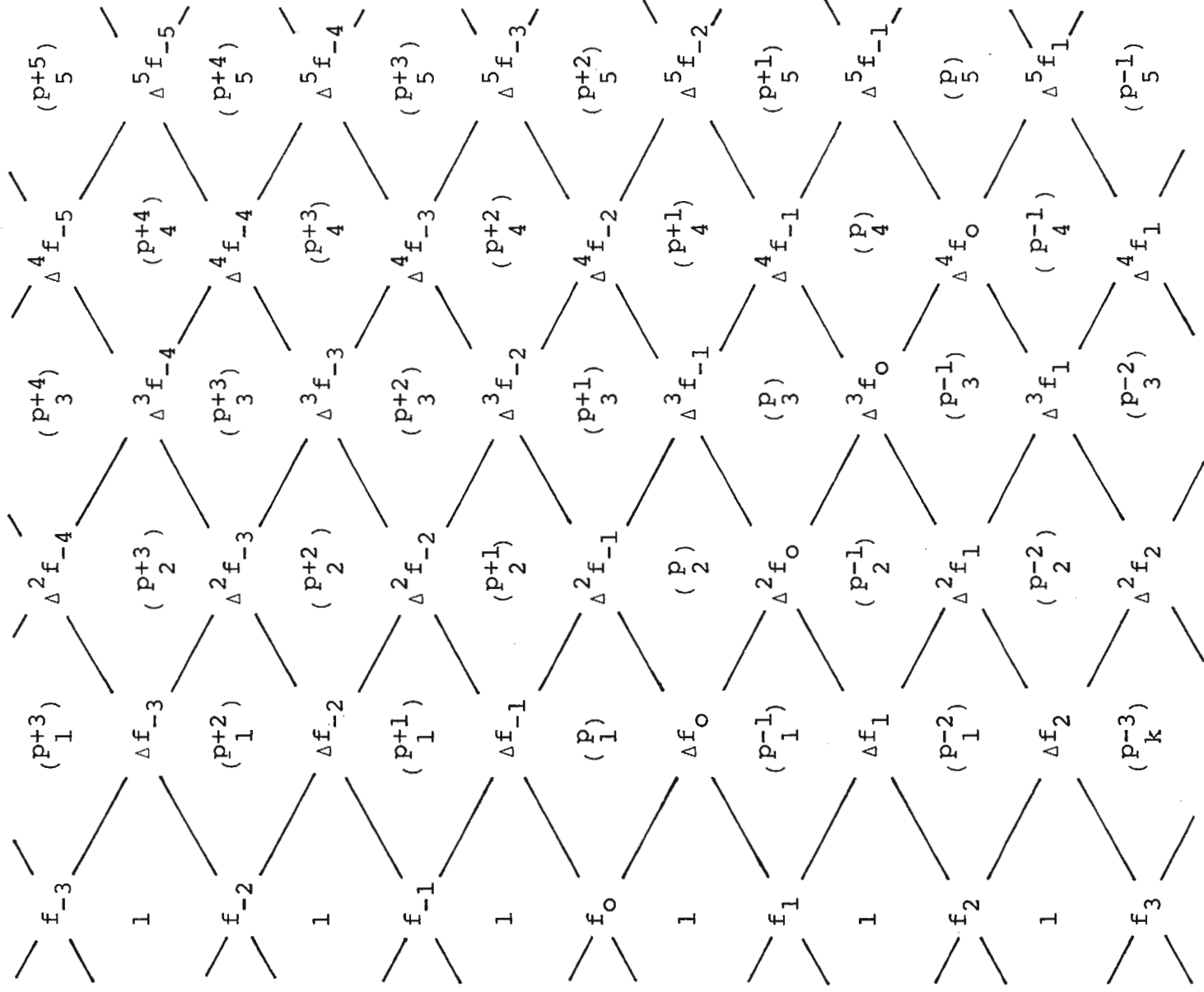
$$(2.6.3) \quad f_0, \Delta f_0, \Delta^2 f_0, \Delta^3 f_0, \dots$$

Sa numeričkog stanovišta, za interpolaciju funkcije u tački x , pogodne su interpolacione formule koje koriste informaciju o vrednostima funkcije u interpolacionim čvorovima koji se nalaze, kako ispred, tako i iza vrednosti x , što nije bio slučaj sa Newtonovim formulama.

U daljem tekstu dajemo pregled važnijih interpolacionih formula:

1^o Prva Newtonova interpolaciona formula odgovara putanji (2.6.3) i data je pomoću (2.6.1).

2^o Druga Newtonova interpolaciona formula odgovara putanji



Sl. 2.6.3

$$f_0, \Delta f_{-1}, \Delta^2 f_{-2}, \Delta^3 f_{-3}, \dots$$

i data je pomoću

$$f_p = f_0 + \binom{p}{1} \Delta f_{-1} + \binom{p+1}{2} \Delta^2 f_{-2} + \binom{p+2}{3} \Delta^3 f_{-3} + \dots$$

Primetimo da je ovde drugi Newtonov polinom konstruisan u tački x_0 , a ne u x_n kao u odeljku 6.2.5.

3° Prva Gaussova interpolaciona formula odgovara putanji

$$f_0, \Delta f_0, \Delta^2 f_{-1}, \Delta^3 f_{-1}, \Delta^4 f_{-2}, \dots$$

i data je pomoću

$$f_p = f_0 + \binom{p}{1} \Delta f_0 + \binom{p}{2} \Delta^2 f_{-1} + \binom{p+1}{3} \Delta^3 f_{-1} + \binom{p+1}{4} \Delta^4 f_{-2} + \dots$$

4° Druga Gaussova interpolaciona formula odgovara putanji

$$f_0, \Delta f_{-1}, \Delta^2 f_{-1}, \Delta^3 f_{-2}, \Delta^4 f_{-2}, \dots$$

i može se predstaviti u obliku

$$f_p = f_0 + \binom{p}{1} \Delta f_{-1} + \binom{p+1}{2} \Delta^2 f_{-1} + \binom{p+1}{3} \Delta^3 f_{-2} + \binom{p+2}{4} \Delta^4 f_{-2} + \dots$$

5° Stirlingova interpolaciona formula odgovara putanji

$$f_0, \binom{p}{1}, \Delta^2 f_{-1}, \binom{p+1}{3}, \Delta^4 f_{-2}, \dots$$

i shodno ranije datim pravilima može se predstaviti u obliku

$$f_p = f_0 + \frac{1}{2} (\Delta f_{-1} + \Delta f_0) \binom{p}{1} + \frac{1}{2} \left(\binom{p+1}{2} + \binom{p}{2} \right) \Delta^2 f_{-1} + \frac{1}{2} (\Delta^3 f_{-2} + \Delta^3 f_{-1}) \binom{p+1}{3} + \left(\binom{p+2}{4} + \binom{p+1}{4} \right) \Delta^4 f_{-2} + \dots$$

Primetimo da se Stirlingova formula dobija kao aritmetička sredina prve i druge Gaussove interpolacione formule.

6° Besselova interpolaciona formula odgovara horizontalnoj putanji

Teorema 2.7.1. Za svaki interpolacioni proces na $[a,b]$ postoji neprekidna funkcija f za koju $P_n(x)$ ne konvergira ravnomerno ka $f(x)$.

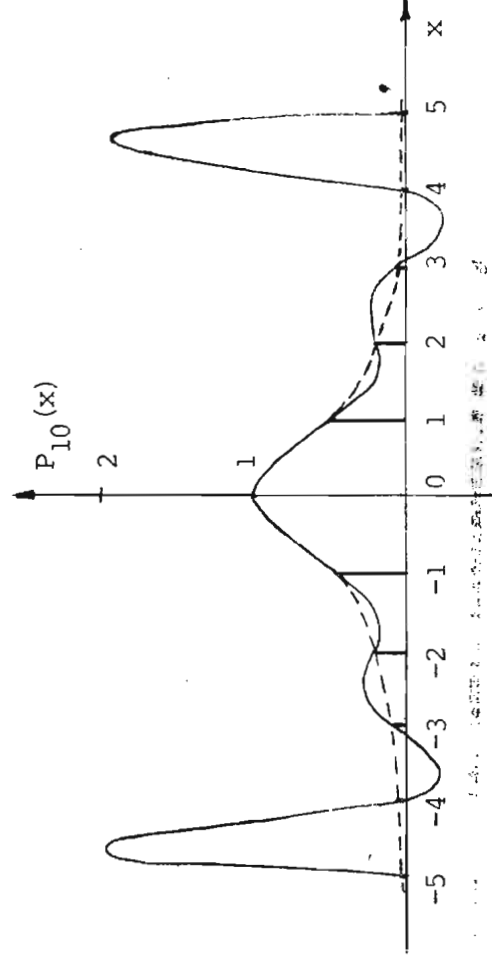
Rezultat se može formulirati i u smislu da ne postoji trougaona matrica čvorova X takva da odgovarajući interpolacioni proces konvergira ravnomerno za svaku neprekidnu funkciju. Međutim, može se pokazati da se za svaku neprekidnu funkciju na $[a,b]$ može naći trougaona matrica čvorova X takva da odgovarajući interpolacioni proces ravnomerno konvergira. Ovo je rezultat Marcinkiewicza.

Na jedan karakterističan primer, koji je u vezi sa teoremom 2.7.1, ukazao je Runge. Naime, ako je na $[a,b] = [-5,5]$ dat interpolacioni proces sa ekvidistantnim čvorovima

$$x_k^{(n)} = -5 + \frac{10}{n} k \quad (k = 0, 1, \dots, n),$$

može se pokazati da za $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$ imamo

$$\max_{-5 \leq x \leq 5} |f(x) - P_n(x)| \rightarrow +\infty \quad (n \rightarrow +\infty).$$



Sl. 2.7.1

Na sl. 2.7.1 prikazan je interpolacioni polinom za $n = 10$.

Postavlja se pitanje za kakvu će klasu funkcija svaki interpolacioni proces biti konvergentan. Odgovor na ovo pitanje daje sledeća teorema.

Teorema 2.7.2. Ako je f cela funkcija, tj. ako je regularna u celoj kompleksnoj ravni C i $f(t) \in R$ za $t \in [a, b]$, tada svaki interpolacioni proces ravnomerno konvergira, tj.

$$(2.7.3) \quad \max_{a \leq x \leq b} |f(x) - P_n(x)| \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow +\infty).$$

Dokaz. Pokažimo najpre da za svako $q > 0$ egzistira neko $c \geq 0$, tako da je za svako $n \in N$

$$(2.7.4) \quad \max_{a \leq x \leq b} |f(x) - P_n(x)| \leq cq^{n+1}.$$

Jasno je da će konvergencija (2.7.3) biti prisutna, na osnovu (2.7.4), ako izaberemo $q < 1$.

Da bismo dokazali (2.7.4) iskoristićemo tvrdjenje teoreme 2.2.4, pri čemu je sada $G = C$, jer je funkcija f cela. U tom slučaju za proizvoljno izabrano $q > 0$, možemo izabrati konturu Γ tako da je

$$\frac{b-a}{q} \leq r,$$

gde je r rastojanje intervala $[a, b]$ od krive Γ , tj.

$$r = d([a, b], \Gamma) = \min_{\substack{t \in [a, b] \\ z \in \Gamma}} |t - z|.$$

Tada, na osnovu (2.2.6), imamo

$$(2.7.5) \quad |f(x) - P_n(x)| \leq \frac{LM}{2\pi r^{n+2}} |\omega_n(x)|,$$

gde je L dužina krive Γ i $M = \max_{z \in \Gamma} |f(z)|$. Kako je $|\omega_n(x)| \leq (b-a)^{n+1}$

za svako $x \in [a, b]$, na osnovu (2.7.5), zaključujemo da je

$$|f(x) - P_n(x)| \leq \frac{LM}{2\pi r} \left(\frac{b-a}{r}\right)^{n+1} \leq \frac{LM}{2\pi r} q^{n+1},$$

što znači da (2.7.4) važi ako za c uzmemo $c = \frac{LM}{2\pi T}$. Ovim je dokaz teoreme završen.

U vezi sa konvergencijom interpolacionih procesa su Lebesgueova funkcija i Lebesgueova konstanta. Pomoću svake vrste matrice (2.7.1) može da se definiše operator $P_n: C[a,b] \rightarrow C[a,b]$, pomoću $P_n f = P_n(f;x)$. Dakle, svakoj neprekidnoj funkciji na $[a,b]$, ovaj operator pridružuje interpolacioni polinom $P_n(x) = P_n(f;x)$, koji je, takodje, element prostora $C[a,b]$.

Operator P_n je linearan, jer je aditivan $P_n(f+g) = P_n f + P_n g$ i homogen $P_n(cf) = cP_n f$. Ako je f polinom ne višeg stepena od n , tada je $P_n f = f$.

U prostoru $C[a,b]$ možemo definisati i jednu funkcionalu pomoću interpolacionog polinoma, uzimanjem jedne fiksne tačke $x \in [a,b]$. Tu funkcionalu ćemo označavati sa $P_n(\cdot, x)$.

Definicija 2.7.3. Funkciju $\lambda_n: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}_+$, definisanu tako da je njena vrednost u tački x jednaka normi funkcionele $P_n(\cdot, x)$, tj.

$$\lambda_n(x) = \|P_n(\cdot, x)\| \quad (x \in [a,b]),$$

nazivamo Lebesgueovom funkcijom.

Definicija 2.7.4. Normu operatora $P_n: C[a,b] \rightarrow C[a,b]$, definisanog pomoću $P_n f = P_n(f;x)$, nazivamo konstantom Lebesguea i označavamo sa λ_n .

Na osnovu prethodnih definicija neposredno zaključujemo da za svako $f \in C[a,b]$ važe nejednakosti

$$(2.7.6) \quad \begin{aligned} |P_n(f;x)| &\leq \lambda_n(x) \|f\| \quad (x \in [a,b]), \\ \|P_n f\| &\leq \lambda_n \|f\|, \end{aligned}$$

gde je $\|f\| = \max_{a \leq x \leq b} |f(x)|$.

Korišćenjem interpolacionih čvorova $x_k^{(n)}$ ($k = 0, 1, \dots, n$) lako se mogu naći eksplisitni izrazi za $\lambda_n(x)$ i λ_n :

$$(2.7.7) \quad \lambda_n(x) = \sum_{k=0}^n |L_{n,k}(x)| = \sum_{k=0}^n \left| \frac{\omega_n(x)}{(x-x_k^{(n)}) \omega_n'(x_k^{(n)})} \right|,$$

$$(2.7.8) \quad \lambda_n = \max_{a \leq x \leq b} \lambda_n(x).$$

Zaista, ako podjemo od Lagrangeove interpolacione formule (2.7.2) dobijamo

$$|P_n(f;x)| \leq \|f\| \sum_{k=0}^n |L_{n,k}(x)|,$$

$$(2.7.9) \quad \|P_n(\cdot;x)\| \leq \sum_{k=0}^n |L_{n,k}(x)|,$$

gde je x fiksirana tačka iz $[a,b]$. Definišimo sada neprekidnu funkciju $t \mapsto \bar{f}(t)$, takvu da je $\bar{f}(x_k^{(n)}) = \operatorname{sgn} L_{n,k}(x)$ ($k=0,1,\dots,n$), da je linearna na $[x_{k-1}^{(n)}, x_k^{(n)}]$ ($k=1,\dots,n$) i da je konstantna na $[a, x_0^{(n)}]$ i $[x_n^{(n)}, b]$. Tada je $\|\bar{f}\| = 1$ i

$$(2.7.10) \quad P_n(\bar{f};x) = \sum_{k=0}^n (\operatorname{sgn} L_{n,k}(x)) L_{n,k}(x) = \sum_{k=0}^n |L_{n,k}(x)|,$$

pa iz (2.7.6) za $f = \bar{f}$, sleduje

$$\lambda_n(x) = \|P_n(\cdot;x)\| \geq \sum_{k=0}^n |L_{n,k}(x)|,$$

što zajedno sa (2.7.9) daje (2.7.7).

Primetimo da je funkcija $\lambda_n(x)$ neprekidna. Sa \bar{x} označimo onu tačku iz $[a,b]$ za koju je $\max_{a \leq x \leq b} \lambda_n(x) = \lambda_n(\bar{x})$ i u (2.7.10) stavimo takvo \bar{x} . Tada imamo

$$(2.7.11) \quad \lambda_n = \|P_n\| \geq \|P_n(\bar{f};\bar{x})\| = \lambda_n(\bar{x}) = \max_{a \leq x \leq b} \lambda_n(x),$$

pri čemu smo koristili i drugu nejednakost u (2.7.6) za $f = \bar{f}$ ($\|\bar{f}\| = 1$).

S druge strane, na osnovu prve nejednakosti u (2.7.6), imamo

$$\|P_n f\| = \max_{a \leq x \leq b} |P_n(f, x)| \leq \max_{a \leq x \leq b} \lambda_n(x) \cdot \|f\|,$$

odakle zaključujemo da za normu operatora P_n važi ocena

$$(2.7.12) \quad \lambda_n = \|P_n\| \leq \max_{a \leq x \leq b} \lambda_n(x).$$

Iz nejednakosti (2.7.11) i (2.7.12) sleduje (2.7.8).

Primer 2.7.1. Lebesgueova funkcija kod Čebiševljeve interpolacije na $[-1, 1]$ je

$$\lambda_n(x) = \sum_{k=0}^n \left| \frac{T_{n+1}(x)}{(x-x_k) T'_{n+1}(x_k)} \right|,$$

gde je T_{n+1} Čebiševljev polinom, a $x_k^{(n)}$ njegove nule određene sa (2.2.9). Ako stavimo $x = \cos \theta$ i $\theta_k = \frac{(2k+1)\pi}{2(n+1)}$ ($k = 0, 1, \dots, n$), imamo

$$\lambda_n(x) = \frac{|\cos(n+1)\theta|}{n+1} \sum_{k=0}^n \left| \frac{\sin \theta_k}{\cos \theta - \cos \theta_k} \right|$$

tj.

$$(2.7.13) \quad \lambda_n(x) = \frac{|\cos(n+1)\theta|}{2(n+1)} \sum_{k=0}^n \left| \operatorname{ctg} \frac{\theta+\theta_k}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\theta-\theta_k}{2} \right|.$$

Može se pokazati (videti, na primer, [33, str. 94-96]) da se maksimum u (2.7.13) postiže za $\theta = 0$, tj. $x = 1$, tako da imamo

$$\lambda_n = \lambda_n(1) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2}.$$

Jedna ocena za Lebesgueovu konstantu λ_n može da se da u obliku

$$\lambda_n < \frac{2}{\pi} \log n + 4.$$

Za dokaz ove nejednakosti u kojoj se konstanta 4 može poboljšati, treba razmotriti jednakost

$$\pi \lambda_n = \frac{\pi}{n+1} \sum_{k=0}^n h(\theta_k) + \frac{\pi}{n+1} \sum_{k=0}^n \frac{2}{\theta_k},$$

gde je $h(\theta) = \operatorname{ctg}(\theta/2) - 2/\theta$. Kako je $h(\theta) < 0$ na $(0, \pi)$ imamo

$$\lambda_n \leq \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^n \frac{1}{2k+1} < \frac{2}{\pi} \log n + 4.$$

Primerba 2.7.1. Nejednakost (2.2.10) se može iskazati u obliku

$$|\tilde{P}_n(f, x) - P_n(f, x)| \leq \lambda_n(x) \varepsilon.$$

Kao što smo prethodno napomenuli Lebusgueova funkcija i konstanta su u uskoj vezi sa konvergencijom interpolacionih procesa. Da bismo sagledali ovu vezu, paralelno posmatrajmo niz polinoma najbolje aproksimacije $\{P_n^*\}_{n \in \mathbb{N}_0}$ i odgovarajuću veličinu najbolje aproksimacije

$$E_n(f) = \min_{p \in \mathcal{P}_n} \|f - p\| = \|f - P_n^*\|,$$

gde je $\|\cdot\|$ norma u $C[a, b]$, tj. $\|f\| = \max_{a \leq x \leq b} |f(x)|$ i \mathcal{P}_n skup svih algebarskih polinoma ne višeg stepena od n . S obzirom da $P_n^* \in \mathcal{P}_n$, polinom najbolje aproksimacije P_n^* je nepokretna tačka za prethodno uvedeni operator $P_n: C[a, b] \rightarrow C[a, b]$, jer je $P_n(P_n^*; x) = P_n^*(x)$.

Teorema 2.7.3. Neka $f \in C[a, b]$. Ako je u nekoj tački $x = \bar{x} \in [a, b]$ ispunjen uslov

$$(2.7.14) \quad E_n(f) \lambda_n(\bar{x}) \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow +\infty),$$

tada je u toj tački interpolacioni proces za funkciju f konvergentan. Ako sem toga

$$(2.7.15) \quad E_n(f) \lambda_n \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow +\infty),$$

interpolacioni proces ravnomerno konvergira.

Dokaz. Primitimo, najpre, da $E_n(f) \rightarrow 0$, kada $n \rightarrow +\infty$. Kako je

$$\begin{aligned}
|f(\bar{x}) - P_n(f; \bar{x})| &= |f(\bar{x}) - P_n^*(\bar{x}) + P_n^*(\bar{x}) - P_n(f; \bar{x})| \\
&\leq |f(\bar{x}) - P_n^*(\bar{x})| + |P_n(f; \bar{x}) - P_n^*(\bar{x})| \\
&= |f(\bar{x}) - P_n^*(\bar{x})| + |P_n(f; \bar{x}) - P_n(P_n^*; \bar{x})| \\
&= |f(\bar{x}) - P_n^*(\bar{x})| + |P_n(f - P_n^*; \bar{x})| \\
&\leq \|f - P_n^*\| + \lambda_n(\bar{x}) \|f - P_n^*\| \\
&= (1 + \lambda_n(\bar{x})) E_n(f),
\end{aligned}$$

na osnovu (2.7.14) zaključujemo da $P_n(f; \bar{x}) \rightarrow f(\bar{x})$, kada $n \rightarrow +\infty$.

Kako je

$$|f(x) - P_n(f; x)| \leq (1 + \lambda_n) E_n(f),$$

iz uslova (2.7.15) sleduje ravnomerna konvergencija interpolacionog procesa.

6.2.8. Hermiteova interpolacija

U ovom odeljku obradićemo jedan opštiji interpolacioni problem. Naime, neka su za funkciju $f: [a, b] \rightarrow R$ u interpolacionim čvorovima x_i ($i = 0, 1, \dots, m$) poznate sledeće vrednosti:

$$f(x_i), f'(x_i), \dots, f^{(k_i-1)}(x_i) \quad (i = 0, 1, \dots, m).$$

Neka je broj podataka o funkciji f jednak $n+1$, tj. $n+1 = k_0 + k_1 + \dots + k_m$. Broj k_i se naziva višestrukost interpolacionog čvora x_i .

Posmatraćemo sada samo interpolaciju algebarskim polinoma, koja je poznata kao Hermiteova interpolacija. S obzirom na broj datih podataka o funkciji f , Hermiteov interpolacioni polinom, u opštem slučaju, biće

$$H_n(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n.$$

Koeficijente a_i ($i = 0, 1, \dots, n$) određujemo rešavanjem sistema linearnih jednačina

$$(2.8.1) \quad H_n^{(j)}(x_i) = f^{(j)}(x_i) \quad (i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, k_i - 1).$$

Teorema 2.8.1. Sistem jednačina (2.8.1) ima jedinstveno rešenje.

Dokaz. Za dokaz ovog tvrdjenja dovoljno je pokazati da homogeni sistem jednačina

$$H_n^{(j)}(x_i) = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, k_i - 1)$$

ima samo trivijalno rešenje $a_i = 0$ ($i = 0, 1, \dots, n$), tj. $H_n(x) \equiv 0$.

U posmatranom slučaju, iz sistema sleduje da je x_i nula polinoma H_n višestrukosti najmanje k_i , što znači da zbir višestrukosti svih nula polinoma H_n nije manji od $n+1$ ($=k_0+k_1+\dots+k_m$). Kako je, međutim, H_n polinom stepena n , zaključujemo da on mora biti identički jednak nuli, čime je dokaz završen.

S obzirom da rešavanje sistema linearnih jednačina (2.8.11) može biti vrlo komplikovano, to se za konstrukciju Hermiteovog interpolacionog polinoma najčešće koristi jedan metod zasnovan na primeni Lagrangeove interpolacije, koji uključuje uslove (2.8.1). Naime, polinom H_n tražimo u obliku

$$(2.8.2) \quad H_n(x) = P_m(x) + (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_m)H_k(x),$$

gde je P_m Lagrangeov interpolacioni polinom dobijen samo na osnovu datih podataka o vrednosti funkcije f u interpolacionim čvorovima, tj. na osnovu parova $(x_i, f(x_i))$ ($i = 0, 1, \dots, m$), a H_k za sada nepoznati polinom čiji je stepen takav da je $k+m+1=n$. Primetimo da ovakva reprezentacija polinoma H_n zahteva određivanje polinoma H_k . S obzirom da smo iskoristili informacije o vrednosti funkcije (za određivanje P_m), na raspolaganju su nam vrednosti izvoda funkcije. Imajući u vidu interpolacioni zahtev (2.8.1), to diferenciranjem (2.8.2) dobijamo potrebne uslove za određiva-

nje polinoma H_k koji su opet tipa (2.8.1), samo sada za polinom H_k . Ovo znači da se metod konstrukcije Hermiteovog polinoma može da zasnuje rekurzivno.

Na osnovu prethodne teoreme polinom koji se na ovaj način dobija predstavlja Hermiteov interpolacioni polinom.

Ilustrovaćemo ovaj metod na jednom primeru.

Primer 2.8.1. Nadjimo Hermiteov interpolacioni polinom za funkciju f čije su vrednosti date u tabeli

x	0	1	2
$f(x)$	-1	1	9
$f'(x)$	-1	3	
$f''(x)$	10		

Kako je dato šest podataka, interpolacioni polinom, u opštem slučaju, biće petog stepena. Potražimo ga u obliku

$$(2.8.3) \quad H_5(x) = P_2(x) + x(x-1)(x-2)H_2(x),$$

gde je P_2 Lagrangeov interpolacioni polinom formiran na osnovu vrednosti funkcije f u tačkama $x=0$, $x=1$, $x=2$, tj.

$$\begin{aligned} P_2(x) &= (-1) \frac{(x-1)(x-2)}{(0-1)(0-2)} + 1 \frac{(x-0)(x-2)}{(1-0)(1-2)} + 3 \frac{(x-0)(x-1)}{(2-0)(2-1)} \\ &= 3x^2 - x - 1, \end{aligned}$$

a H_2 za sada nepoznat polinom ne višeg stepena od dva. Diferenciranjem (2.8.3) dobijamo

$$H_5'(x) = 6x-1 + (3x^2-6x+2)H_2(x) + x(x-1)(x-2)H_2'(x),$$

odakle, s obzirom na $H_5'(0) = f'(0) = -1$ i $H_5'(1) = f'(1) = 3$,

sleđuje $H_2(0) = 0$ i $H_2(1) = 2$.

Kako je, dalje,

$$H_5''(x) = 6 + 6(x-1)H_2'(x) + (6x^2 - 12x + 4)H_2''(x) + x(x-1)(x-2)H_2'''(x)$$

i $H_5''(0) = f''(0) = 10$ dobijamo $H_2'(0) = 1$.

Primenimo sada isti postupak na određivanje polinoma H_2 na osnovu podataka

$$H_2'(0) = 0, \quad H_2(1) = 2, \quad H_2'(0) = 1.$$

Dakle, imamo

$$H_2(x) = P_1(x) + x(x-1)a \quad (a = H_0(x)),$$

gde je

$$P_1(x) = 0 \frac{x-1}{0-1} + 2 \frac{x-0}{1-0} = 2x.$$

Ako stavimo $x = 0$, iz jednakosti $H_1'(x) = 2 + (2x-1)a$ nalazimo da je $a = 1$. Tada je $H_2(x) = x^2 + x$. Prema tome

$$H_5(x) = x^5 - 2x^4 - x^3 + 5x^2 - x - 1.$$

Sledeća teorema daje ocenu greške kod Hermiteove interpolacije.

Teorema 2.8.2. Neka $f \in C^{n+1}[a, b]$ i $x_i \in [a, b]$ ($i = 0, 1, \dots, m$). Ta da postoji $\xi \in (a, b)$ takvo da je

$$(2.8.4) \quad R_n(f; x) = f(x) - H_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \Omega_n(x),$$

gde je

$$\Omega_n(x) = (x-x_0)^{k_0} (x-x_1)^{k_1} \dots (x-x_m)^{k_m}.$$

Dokaz. Slično kao u dokazu teoreme 2.2.2, uvedimo pomoćnu funkciju F sa

$$F(x) = f(x) - H_n(x) - K_n \Omega_n(x).$$

Neka je \bar{x} proizvoljna tačka iz $[a, b]$ i takva da se ne poklapa ni sa jednim od interpolacionih čvorova x_i ($i = 0, 1, \dots, m$).

Pomoćna funkcija F ima nule u tačkama x_0, x_1, \dots, x_m , čiji je red višestrukosti najmanje k_0, k_1, \dots, k_m respektivno. Konstantu K_n određićemo iz uslova da funkcija F ima nulu i u tački \bar{x} . Ovakva konstanta egzistira, s obzirom da je $\Omega_n(\bar{x}) \neq 0$, i iznosi

$$(2.8.5) \quad K_n = \frac{f(\bar{x}) - H_n(\bar{x})}{\Omega_n(\bar{x})}.$$

Na osnovu Rolleove teoreme, izvod F' ima bar $m+1$ nula koje se nalaze između nula funkcije F . S druge strane, funkcija F' ima nule i u tačkama x_0, x_1, \dots, x_m , čiji je red višestrukosti najmanje $k_0-1, k_1-1, \dots, k_m-1$ respektivno. Dakle, broj nula funkcije F' na $[a, b]$ je najmanje $n+1$ ($= (k_0-1) + (k_1-1) + \dots + (k_m-1) + m+1$), pri čemu se višestruka nula uzima onoliko puta koliki je njen red višestrukosti.

Kako je $H_n^{(n+1)}(x) = 0$ i $\Omega_n^{(n+1)}(x) = (n+1)!$, iz $F^{(n+1)}(\xi) = 0$ sleduje

$$K_n = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!},$$

što zajedno sa (2.8.5) daje

$$f(\bar{x}) = H_n(\bar{x}) + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \Omega_n(\bar{x}).$$

S obzirom da je \bar{x} proizvoljna tačka iz $[a, b]$, dokaz teoreme je završen.

Za $k_0 = k_1 = \dots = k_m = 2$ ($n+1 = 2m+2$), (2.8.4) se svodi na

$$R_n(f; x) = \frac{f^{(2m+2)}(\xi)}{(2m+2)!} \omega(x)^2$$

gde je ω definisano pomoću (2.2.3). U ovom slučaju Hermiteov interpolacioni polinom može se izraziti eksplicitno pomoću

$$H_n(x) = \sum_{i=0}^m U_i(x) f(x_i) + \sum_{i=0}^m V_i(x) f'(x_i),$$

gde su

$$U_i(x) = (1 - 2L_i'(x_i)(x - x_i)) L_i(x)^2,$$

$$V_i(x) = (x - x_i) L_i(x)^2,$$

$$L_i(x) = \frac{\omega(x)}{(x - x_i) \omega'(x_i)}.$$

Polinom H_n se može predstaviti i u obliku

$$(2.8.6) \quad H_n(x) = P_0(x) + (x - x_0)^{k_0} P_1(x) + (x - x_0)^{k_0} (x - x_1)^{k_1} P_2(x) + \dots + (x - x_0)^{k_0} (x - x_1)^{k_1} \dots (x - x_{m-1})^{k_{m-1}} P_m(x),$$

gde je

$$P_i(x) = a_{i0} + a_{i1}(x - x_1) + \dots + a_{i, k_i - 1} (x - x_1)^{k_i - 1}.$$

Na osnovu (2.8.1) i (2.8.6) može se zaključiti da je

$$P_0(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \dots + \frac{f^{(k_0 - 1)}(x_0)}{(k_0 - 1)!} (x - x_0)^{k_0 - 1}.$$

Pretpostavimo sada da su poznati polinomi P_0, \dots, P_{i-1} . Tada se koeficijenti polinoma P_i mogu naći jedan za drugim sukcesivnim izračunavanjem izvoda polinoma $Q_i(x)$ u tački $x = x_i$, gde je

$$Q_i(x) = \frac{H_n(x) - P_0(x) - \sum_{j=1}^{i-1} (x - x_0)^{k_0} \dots (x - x_{j-1})^{k_{j-1}} P_j(x)}{(x - x_0)^{k_0} \dots (x - x_{i-1})^{k_{i-1}}}$$

Na osnovu (2.8.6) nije teško zaključiti da je

$$Q_i(x) = P_i(x) + (x - x_i)^{k_i} P_{i+1}(x) + \dots + (x - x_i)^{k_i} \dots (x - x_{m-1})^{k_{m-1}} P_m(x).$$

Primer 2.8.2. Odredićemo Hermiteov interpolacioni polinom za funkciju f sa sledećim podacima

x	x_0	x_1
$f(x)$	f_0	f_1
$f'(x)$	m_0	m_1
$f''(x)$	M_0	M_1

Na osnovu prethodnog imamo

$$(2.8.7) \quad H(x) = H_5(x) = P_0(x) + (x-x_0)^3 P_1(x),$$

gde su

$$P_0(x) = f_0 + m_0(x-x_0) + \frac{M_0}{2}(x-x_0)^2$$

i

$$P_1(x) = a_{10} + a_{11}(x-x_1) + a_{12}(x-x_1)^2.$$

Nadalje,

$$Q_1'(x) = \frac{H(x) - P_0(x)}{(x-x_0)^3}, \quad Q_1'(x) = \frac{H'(x) - P_0'(x)}{(x-x_0)^3} - 3 \frac{H(x) - P_0(x)}{(x-x_0)^4},$$

$$Q_1''(x) = \frac{H''(x) - P_0''(x)}{(x-x_0)^3} - 6 \frac{H'(x) - P_0'(x)}{(x-x_0)^4} + 12 \frac{H(x) - P_0(x)}{(x-x_0)^5}.$$

Tada, stavljajući $x = x_1$, nalazimo koeficijente polino-

ma P_1 :

$$a_{10} = Q_1(x_1) = \frac{1}{h^3} (f_1 - f_0 - m_0 h - \frac{M_0}{2} h^2),$$

$$a_{11} = Q_1'(x_1) = \frac{1}{h^4} (-3(f_1 - f_0) + (m_1 + 2m_0)h + \frac{M_0}{2} h^2),$$

$$a_{12} = \frac{1}{2} Q_1''(x_1) = \frac{1}{h} (6(f_1 - f_0) - 3(m_1 + m_0))h + \frac{M_1 - M_0}{2} h^2,$$

gde smo stavili $h = x_1 - x_0$.

Dakle, u opštem slučaju, polinom H , dat pomoću (2.8.7), je petog stepena. Međutim, polinom H je ne višeg stepena od trećeg ako je $a_{11} = a_{12} = 0$, tj. ako su ispunjeni uslovi

$$m_1 + 2m_0 + \frac{1}{2} M_0 h = \frac{3}{h} (f_1 - f_0),$$

(2.8.8)

$$m_1 + m_0 - \frac{1}{6} (M_1 - M_0)h = \frac{2}{h} (f_1 - f_0).$$

Tada je

$$H(x) = f_0 + m_0(x - x_0) + \frac{M_0}{2} (x - x_0)^2 + a_{10} (x - x_0)^3.$$

Napomenimo da jednakosti (2.8.8) igraju važnu ulogu kod konstrukcije kubnih splajnova (videti odeljak 6.2.12).

6.2.9. Trigonometrijska interpolacija

Kao što je rečeno u odeljku 6.1.2, trigonometrijsku aproksimaciju imamo ako za bazisne funkcije ϕ_k uzmemo trigonometrijski bazis $\{1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots\}$. Uzmimo da je broj bazisnih funkcija $n+1 = 2m+1$. Tada je aproksimaciona funkcija trigonometrijski polinom m -tog reda

$$(2.9.1) \quad \phi(x) = T_m(x) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx + b_k \sin kx),$$

gde smo aproksimacione parametre označili sa $\frac{1}{2} a_0, a_k, b_k$ ($k=1, \dots, m$). U ovom odeljku proučićemo problem trigonometrijske interpolacije sa sistemom interpolacionih čvorova datih na $[0, 2\pi)$

$$(2.9.2) \quad 0 \leq x_0 < x_1 < \dots < x_{2m} < 2\pi.$$

Neka su $f_j \equiv f(x_j)$ ($j = 0, 1, \dots, 2m$) vrednosti funkcije koju želimo interpolirati pomoću (2.9.1).

Odabrani sistem funkcija je Čebiševljev, što se može dokazati direktnim određivanjem determinante sistema jednačina (2.1.1):

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & \cos x_0 & \sin x_0 & \dots & \cos m x_0 & \sin m x_0 \\ 1 & \cos x_1 & \sin x_1 & & \cos m x_1 & \sin m x_1 \\ \vdots & & & & & \\ 1 & \cos x_{2m} & \sin x_{2m} & & \cos m x_{2m} & \sin m x_{2m} \end{vmatrix}$$

Korišćenjem formula

$$\cos kx = \frac{1}{2}(e^{ikx} + e^{-ikx}), \quad \sin kx = \frac{1}{2i}(e^{ikx} - e^{-ikx}),$$

gde je $i = \sqrt{-1}$, elementi ove determinante mogu se izraziti u eksponencijalnom obliku. Za određivanje vrednosti determinante Δ primenimo sada sledeći postupak:

- 1^o Iz kolona izvučemo zajedničke faktore $\frac{1}{2}$ i $\frac{1}{2i}$;
- 2^o Elementima druge, četvrte, ..., (2m)-te kolone dodajmo odgovarajuće elemente treće, pete, ..., (2m+1)-ve kolone respektivno;
- 3^o Iz druge, četvrte, ..., (2m)-te kolone izvučemo zajednički faktor 2;
- 4^o Od elemenata treće, pete, ..., (2m+1)-ve kolone oduzmimo odgovarajuće elemente druge, četvrte, ..., (2m)-te kolone respektivno;
- 5^o Iz treće, pete, ..., (2m+1)-ve kolone izvučemo zajednički faktor (-1);
- 6^o Iz svake vrste izvučemo odgovarajući faktor $\exp(-imx_j)$ ($j = 0, 1, \dots, 2m$);
- 7^o Odgovarajućom permutacijom kolona dobijamo Vandermonde-

ovu determinantu. Broj potrebnih transpozicija je jednak $m(m+1)$, što je uvek paran broj. Zaista, za uređenje niza $(0, 1, -1, \dots, m, -m)$ u rastući niz je potrebno

$$2m + (2m-2) + \dots + 2 = 2 \frac{m(m+1)}{2} = m(m+1)$$

transpozicija.

Prema tome, imamo

$$\Delta = \frac{(-1)^m}{2^m i^m} e^{-im(x_0 + \dots + x_{2m})} \begin{vmatrix} 1 & z_0 & z_0^2 & \dots & z_0^{2m} \\ 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & z_{2m} & z_{2m}^2 & \dots & z_{2m}^{2m} \end{vmatrix}$$

gde smo stavili $z_j = \exp(i x_j)$ ($j = 0, 1, \dots, 2m$). Na dalje,

$$\Delta = \frac{(-1)^m / 2}{2^m} e^{-im(x_0 + \dots + x_{2m})} \prod_{2m \geq k > j \geq 0} (z_k - z_j).$$

$$\text{Kako je } z_k - z_j = 2i \exp\left(i \frac{x_j + x_k}{2}\right) \sin \frac{x_k - x_j}{2} \text{ i}$$

$$\prod_{2m \geq k > j \geq 0} \alpha_{kj} = \prod_{k=1}^{2m} \prod_{j=0}^{k-1} \alpha_{kj}$$

na osnovu prethodnog imamo

$$\Delta = 2^{2m} \prod_{k=1}^{2m} \prod_{j=0}^{k-1} \left(\sin \frac{x_k - x_j}{2} \right).$$

S obzirom da interpolacioni čvorovi zadovoljavaju (2.9.2), zaključujemo da je $\Delta \neq 0$ što znači da je posmatrani sistem funkcija Čebiševljev sistem i da odgovarajući interpolacioni problem ima jedinstveno rešenje.

Slično kao kod Lagrangeove interpolacije stavimo

$$\omega_k(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{2m} \sin \frac{x-x_j}{2}.$$

Primitimo da je $\omega_k(x_j) = 0$ ($j \neq k$) i $\omega_k(x_k) \neq 0$.

Trigonometrijski interpolacioni polinom (2.9.1) može se izraziti u obliku

$$(2.9.3) \quad T_m(x) = \sum_{k=0}^{2m} f_k \frac{\omega_k(x)}{\omega_k(x_k)},$$

$$T_m(x) = \sum_{k=0}^{2m} f_k \left(\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{2m} \frac{\sin \frac{x-x_j}{2}}{\sin \frac{x_k-x_j}{2}} \right).$$

Primer 2.9.1. Na osnovu podataka

x_k	0	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$	$3\pi/2$
f_k	7	3	2	4	2

konstruisaćemo trigonometrijski interpolacioni polinom $T_2(x)$, s obzirom da je $m = (5-1)/2 = 2$.

Kako je

$$\omega_k(x) = \frac{\sin \frac{x}{2} \sin \frac{x-\frac{\pi}{3}}{2} \sin \frac{x-\frac{\pi}{2}}{2} \sin \frac{x-\frac{2\pi}{3}}{2} \sin \frac{x-\frac{3\pi}{2}}{2}}{\sin \frac{x-x_k}{2}}$$

na osnovu (2.9.3), posle sredjivanja, dobijamo

$$T_2(x) = 5 - \cos x + 3 \cos 2x.$$

Inače, numeričke vrednosti koeficijenata $a_k = \frac{f_k}{\omega_k(x_k)}$ su redom

$$\alpha_0 = 32.33161507, \alpha_1 = -48., \alpha_2 = 42.223333494,$$

$$\alpha_3 = -36.95041723, \alpha_4 = 3.031499056.$$

Razmotrimo sada jedan veoma važan slučaj kada su čvorovi dati ekvidistantno na $[0, 2\pi)$, tj. kada je $x_k = \frac{2\pi}{n}k$ ($k = 0, 1, \dots, n-1$). Sa unapred zadatim vrednostima f_k , u opštem slučaju kompleksnim, postavimo problem interpolacije pomoću trigonometrijskog polinoma

$$(2.9.4) \quad \phi(x) = c_0 + c_1 e^{xi} + c_2 e^{2xi} + \dots + c_{n-1} e^{(n-1)xi},$$

gde je $i = \sqrt{-1}$ i c_k ($k = 0, 1, \dots, n-1$) kompleksne konstante koje treba odrediti iz interpolacionog uslova

$$(2.9.5) \quad \phi(x_k) = f_k \quad (k = 0, 1, \dots, n-1).$$

Ako za svako $k \in Z$ definišemo f_k pomoću

$$f_k = f_{k+qn},$$

gde je q ceo broj takav da je $0 \leq k+qn \leq n-1$ (periodično produženje funkcije f), tada zbog periodičnosti funkcije e^{ix} zaključujemo da je

$$\phi(x_k) = f_k, \quad x_k = \frac{2\pi}{n}k \quad (k \in Z).$$

Ako stavimo

$$w = e^{ix}, \quad w_k = e^{ix_k} = \exp\left(\frac{2k\pi}{n}i\right), \quad P(w) = \phi(x),$$

(2.9.4) se svodi na

$$P(w) = c_0 + c_1 w + c_2 w^2 + \dots + c_{n-1} w^{n-1},$$

a interpolacioni uslov (2.9.5) na

$$P(w_k) = f_k \quad (k = 0, 1, \dots, n-1).$$

Primetimo da je $w_k^m = w_m^k = \exp(\frac{2km\pi}{n}i)$ ($k, m \in \mathbb{Z}$). Takođe, za svako $m \in \mathbb{Z}$, w_m je koren binomne jednačine

$$w^{n-1} = (w-1)(w^{n-1} + w^{n-2} + \dots + w + 1) = 0.$$

Kako je $w_m = 1$ za svako $m \in \mathbb{L} = \{\ell \mid \ell = np, p \in \mathbb{Z}\}$ i $w_m \neq 1$ za svako $m \in \mathbb{Z} \setminus \mathbb{L}$, zaključujemo da je

$$(2.9.6) \quad \sum_{k=0}^{n-1} w_m^k = \begin{cases} 0 & (m \in \mathbb{Z} \setminus \mathbb{L}), \\ n & (m \in \mathbb{L}). \end{cases}$$

U kompleksnom n -dimenzionalnom vektorskom prostoru \mathbb{C}^n definišimo skalarni proizvod dva vektora $\vec{f} = [f_0 f_1 \dots f_{n-1}]^T$ i $\vec{g} = [g_0 g_1 \dots g_{n-1}]^T$ pomoću (videti odeljak 2.1.3)

$$(\vec{f}, \vec{g}) = \sum_{k=0}^{n-1} f_k \bar{g}_k = \vec{g}^* \vec{f},$$

gde \vec{g}^* označava vektor koji se dobija transponovanjem vektora \vec{g} i konjugovanjem njegovih komponentata. Primitimo da su u odnosu na ovaj skalarni proizvod vektori

$$\vec{v}_p = [w_0^p w_1^p \dots w_{n-1}^p]^T \quad (p = 0, 1, \dots, n-1)$$

ortogonalni, tj. da je

$$(2.9.7) \quad (\vec{v}_p, \vec{v}_q) = 0 \quad (p \neq q), \quad (\vec{v}_p, \vec{v}_p) = n \quad (p = q).$$

Kako je

$$(\vec{v}_p, \vec{v}_q) = \sum_{k=0}^{n-1} w_k^p \bar{w}_k^q = \sum_{k=0}^{n-1} w_k^{p-q} = \sum_{k=0}^{n-1} w^{kp-q} w^{k(p-q)},$$

na osnovu (2.9.6) zaključujemo da, zaista, važi (2.9.7).

Teorema 2.9.1. Pod interpolacionim uslovom (2.9.5) koeficijenti polinoma (2.9.4) se mogu predstaviti u obliku

$$c_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f_k w_k^{-j} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f_k \exp\left(-\frac{2kj\pi}{n} i\right).$$

Dokaz. Kako je $f_k = \phi(x_k) = \sum_{j=0}^{n-1} c_j w_j^k = \sum_{j=0}^{n-1} c_j w_j^k$ imamo

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum c_j w_0^j \\ \sum c_j w_1^j \\ \vdots \\ \sum c_j w_{n-1}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0^j \\ w_1^j \\ \vdots \\ w_{n-1}^j \end{bmatrix} = \sum_{j=0}^{n-1} c_j \vec{v}_j,$$

pa je, s obzirom na ortogonalnost (2.9.7),

$$\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f_k w_k^{-j} = \frac{1}{n} (\vec{f}, \vec{v}_j) = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=0}^{n-1} c_j \vec{v}_j, \vec{v}_j \right) = c_j.$$

Jedna interesantna osobina "odsečka" interpolacionog polinoma (2.9.4)

$$\phi_r(x) = c_0 + c_1 e^{xi} + \dots + c_r e^{rx_i} \quad (0 \leq r \leq n-1)$$

može se iskazati na sledeći način:

Teorema 2.9.2. U skupu trigonometrijskih polinoma oblika

$$\psi_r(x) = d_0 + d_1 e^{xi} + \dots + d_r e^{rx_i} \quad (r \leq n-1),$$

suma

$$S(\psi_r) = \sum_{k=0}^{n-1} |f_k - \psi_r(x_k)|^2$$

dostiže minimum za $\psi_r(x) = \phi_r(x)$.

Definišimo sada veličine a_j i b_j ($j \in Z$) pomoću

$$(2.9.8) \quad a_j = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f_k \cos \frac{2kj\pi}{n}, \quad b_j = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f_k \sin \frac{2kj\pi}{n}.$$

Na osnovu teoreme 2.9.1 zaključujemo da je

$$c_{n-j} w_k^j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f_k w_k^{-(n-j)} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f_k w_k^j.$$

Takodje, važi

$$c_j = \frac{1}{2}(a_j - ib_j), \quad c_{n-j} = \frac{1}{2}(a_j + ib_j), \quad c_0 = \frac{1}{2} a_0,$$

$$c_j w_k^j + c_{n-j} w_k^{n-j} = a_j \cos jx_k + b_j \sin jx_k \quad (j = 1, \dots, n-1).$$

Prema tome, ako za dati skup podataka (x_k, f_k) ($k = 0, 1, \dots, n-1$), sa $x_k = \frac{2\pi}{n}k$, odredimo koeficijente a_j i b_j ($j = 0, 1, \dots$) pomoću (2.9.8), dobijamo interpolacioni trigonometrijski polinom:

$$(2.9.9) \quad \phi(x) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx + b_k \sin kx), \quad \text{ako je } n = 2m+1,$$

ili

$$(2.9.10) \quad \phi(x) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{m-1} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) + \frac{1}{2} a_m \cos mx,$$

ako je $n = 2m$.

Primerba 2.9.1. Ako imamo interpolaciju periodične funkcije sa periodom T (umesto 2π), tada uzimamo $x_k = \frac{T}{n}k$ ($k = 0, 1, \dots, n-1$) i

$$\phi(x) = c_0 + c_1 e^{\omega x i} + c_2 e^{2\omega x i} + \dots + c_{n-1} e^{(n-1)\omega x i},$$

gde je $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

6.2.10. Algoritmi za izračunavanje trigonometrijskih suma

U prethodnom odeljku pojavila se potreba za izračunavanjem suma oblika (2.9.8), koje se pojavljuju kod određivanja

vrednosti interpolacionih trigonometrijskih polinoma (2.9.9) i (2.9.10). Takođe, sume ovog oblika

$$(2.10.1) \quad C = C(x) = \sum_{k=0}^{n-1} f_k \cos kx, \quad S = S(x) = \sum_{k=1}^{n-1} f_k \sin kx$$

pojavljuju se u mnogim problemima nauke i tehnike (na primer, Fourierova analiza i sl.). U ovom odeljku daćemo algoritam Goertzel-Reinscha, kao i Cooley-Tukeyov algoritam, kada je $n=2^m$.

a) Goertzel-Reinschov algoritam. Osnovna ideja ovog algoritma za izračunavanje suma oblika (2.10.1) potiče od Goertzela ([16]).

Za $x \neq m\pi$ ($m \in \mathbb{Z}$), definišimo konačan niz $\{U_j\}$ pomoću

$$(2.10.2) \quad U_j = \frac{1}{\sin x} \sum_{k=j}^{n-1} f_k \sin(k-j+1)x \quad (j = 0, 1, \dots, n-1),$$

$$U_n = U_{n+1} = 0.$$

Pokažimo, najpre, da važi rekurentna relacija

$$(2.10.3) \quad U_j = f_j + 2\cos x U_{j+1} - U_{j+2} \quad (j = n-1, \dots, 1, 0).$$

Polazeći od desne strane u (2.10.3) i korišćenjem (2.10.2) nalazimo redom

$$\begin{aligned} D &= f_j + 2\cos x U_{j+1} - U_{j+2} \\ &= f_j + \frac{1}{\sin x} \left\{ \sum_{k=j+1}^{n-1} f_k \sin(k-j)x - \sum_{k=j+2}^{n-1} f_k \sin(k-j-1)x \right\} \\ &= f_j + \frac{1}{\sin x} \sum_{k=j+1}^{n-1} f_k \{2\cos x \sin(k-j)x - \sin(k-j-1)x\} \\ &= f_j + \frac{1}{\sin x} \sum_{k=j+1}^{n-1} f_k \sin(k-j+1)x = \frac{1}{\sin x} \sum_{k=j}^{n-1} f_k \sin(k-j+1)x, \end{aligned}$$

tj. $D = U_j$.

Na osnovu (2.10.2) za $j=0$ i $j=1$ nalazimo

$$U_0 = \frac{1}{\sin x} \sum_{k=0}^{n-1} f_k \sin(k+1)x = C(x) + \frac{\cos x}{\sin x} S(x)$$

$$U_1 = \frac{1}{\sin x} \sum_{k=1}^{n-1} f_k \sin kx = \frac{1}{\sin x} S(x),$$

odakle su

$$C(x) = U_0 - \cos x U_1 \quad \text{i} \quad S(x) = \sin x U_1.$$

Korišćenjem U_2 , vrednost za $C(x)$ se može predstaviti i u obliku

$$C(x) = f_0 + \cos x U_1 - U_2.$$

Goerzelov algoritam se može iskazati na sledeći način:

$$1^{\circ} \quad U_{n+1} := 0, \quad U_n := 0, \quad p := \cos x, \quad q := 2 \cdot p;$$

2^o Za $i = n-1, \dots, 1$ nalazimo

$$U_i := f_i + q \cdot U_{i+1} - U_{i+2};$$

$$3^{\circ} \quad C := f_0 + p \cdot U_1 - U_2, \quad S := \sin x \cdot U_1.$$

Ovaj algoritam zahteva $n+2$ množenja, po n sabiranja i oduzimanja i po jedno izračunavanje funkcija $\cos x$ i $\sin x$. Jedina mana ovog algoritma je što je za male vrednosti x ($|x| \ll 1$) algoritam nestabilan. Stabilnu modifikaciju ovog algoritma dao je Reinsch (videti [37, str. 64-65]), razlikujući pritom dva slučaja:

Slučaj $\cos x > 0$. Kako je

$$\begin{aligned} \Delta U_k &= U_{k+1} - U_k = U_{k+1} - (f_k + 2\cos x U_{k+1} - U_{k+2}) \\ &= (U_{k+2} - U_{k+1}) + 2(1 - \cos x)U_{k+1} - f_k \\ &= \Delta U_{k+1} + aU_{k+1} - f_k, \end{aligned}$$

gde je $a = 4\sin^2(x/2)$, prethodno dati algoritam se može modifikovati na sledeći način:

$$1^{\circ} \quad a := 4\sin^2(x/2), \quad U_{n+1} := 0, \quad \Delta U_n := 0;$$

2^o Za $k = n-1, \dots, 1, 0$ nalazimo

$$\begin{aligned} U_{k+1} &:= U_{k+2} - \Delta U_{k+1}, \\ \Delta U_k &:= \Delta U_{k+1} + a \cdot U_{k+1} - f_k; \end{aligned}$$

$$3^{\circ} \quad C := (a/2) \cdot U_1 - \Delta U_0, \quad S := \sin x \cdot U_1.$$

Slučaj $\cos x < 0$. Stavimo sada umesto diference ΔU_k zbir $\Sigma U_k = U_{k+1} + U_k$. Primitimo da je operator $\Sigma = E + 1$. Tada imamo

$$\begin{aligned}\Sigma U_k &= U_{k+1} + f_k + 2\cos x U_{k+1} - U_{k+2} \\ &= -(U_{k+2} + U_{k+1}) + 2(1+\cos x)U_{k+1} + f_k \\ &= -\Sigma U_{k+1} + bU_{k+1} + f_k,\end{aligned}$$

gde je $b = 4\cos^2(x/2)$. Modifikovani algoritam, u ovom slučaju, se može iskazati u obliku:

$$1^\circ \quad b := 4 \cdot \cos^2(x/2), \quad U_{n+1} := 0, \quad \Sigma U_n := 0;$$

2^o Za $k = n-1, \dots, 1, 0$ nalazimo

$$\begin{aligned}U_{k+1} &:= \Sigma U_k - U_k, \\ \Sigma U_k &:= f_k + b \cdot U_{k+1} - \Sigma U_{k+1};\end{aligned}$$

$$3^\circ \quad C := \Sigma U_0 - (b/2) \cdot U_1, \quad S := \sin x \cdot U_1.$$

Navedene modifikacije osnovnog algoritma poznate su kao Goertzel-Reinschov algoritam.

b) Cooley-Tukeyov algoritam. Kao što smo videli u prethodnom odeljku (teorema 2.9.1), koeficijenti polinoma (2.9.4) se mogu predstaviti u obliku

$$(2.10.4) \quad c_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f_k w_k^{-j} \quad (j = 0, 1, \dots, n-1),$$

gde je $w_k = \exp\left(\frac{2k\pi}{n}i\right)$. S druge strane, na osnovu (2.9.4) i (2.9.5), imamo

$$(2.10.5) \quad f_k = \sum_{j=0}^{n-1} c_j w_k^j \quad (k = 0, 1, \dots, n-1).$$

Par formula (2.10.4) - (2.10.5) definiše diskretnu Fourierovu transformaciju (DFT). Nizovi $\{f_k\}$ i $\{c_j\}$ su, u opštem slučaju, kompleksni.

U slučaju kada je $n = 2^m$ ($m \in \mathbb{N}$) Cooley-Tukeyov algoritam veoma efikasno izračunava DFT i tada se ona popularno naziva brza Fourierova transformacija* (BFT) (videti [10], [11]).

* Na engleskom: *Fast Fourier transform (FFT)*.

Za razliku od klasičnog načina izračunavanja suma (2.10.4), tj. (2.10.5), gde je potreban broj operacija reda $O(n^2)$, kod BFT potreban broj operacija je reda $O(n \log_2 n)$. S obzirom da su sume (2.10.4) i (2.10.5) iste po strukturi, to se isti algoritam primenjuje za njihovo izračunavanje. Ne ulazeći dublje u teoriju BFT, izložićemo ukratko osnovnu ideju.

Pretpostavimo da je $n=2^m$ i posmatrajmo (2.10.5) u obliku

$$(2.10.6) \quad f_k = \sum_{j=0}^{n-1} c_j w^{kj} \quad (k=0, 1, \dots, n-1),$$

gde je $W = \exp(2\pi i/n)$. Predstavimo sada eksponente k i j u binarnom sistemu. Tako imamo

$$k = (k_{m-1} \dots k_0)_2 = k_{m-1} 2^{m-1} + \dots + k_0 2^0$$

$$j = (j_{m-1} \dots j_0)_2 = j_{m-1} 2^{m-1} + \dots + j_0 2^0$$

gde su k_p, j_p ($p=0, 1, \dots, m-1$) cifre binarnog brojnog sistema 0 ili 1. Neka šu, dalje, $f_k = f(k_{m-1}, \dots, k_0)$ i $c_j = c(j_{m-1}, \dots, j_0)$. Tada se (2.10.6) može predstaviti u obliku

$$f_k = f(k_{m-1}, \dots, k_0) = \sum_{j_0=0}^1 \dots \sum_{j_{m-1}=0}^1 c(j_{m-1}, \dots, j_0) w^{jk}$$

Razvijanjem eksponenta od W , i imajući u vidu $\exp(2\pi i) = 1$, poslednja jednakost postaje

$$f_k = \sum_{j_0=1}^1 \dots \sum_{j_{m-2}=0}^1 c(j_{m-1}, \dots, j_0) w^{k_0 j_{m-1} 2^{m-1} + \dots + j_0}$$

Primitimo da je unutrašnja suma funkcija od j_{m-2}, \dots, j_0, k_0 i da se može predstaviti u obliku $c_1(k_0, j_{m-2}, \dots, j_0)$. Nastavljajući ovaj postupak, u p -tom koraku dobijamo funkciju

$$c_p(k_0, \dots, k_{p-1}, j_{m-p-1}, \dots, j_0) = \sum_{j_{m-p}=0}^1 c_{p-1}(k_0, \dots, k_{p-2}, j_{m-p}, \dots, j_0) w^{(k_{p-1} 2^{p-1} + \dots + k_0) j_{m-p} 2^{m-p}}$$

Najzad, poslednji korak daje, $f_k = f(k_{m-1}, \dots, k_0) = c_m(k_0, \dots, k_{m-1})$.

6.2.11. Splajn funkcije i interpolacija pomoću splajnova

Fizička naprava koju koriste crtači za crtanje glatkih krivih (posebno u brodogradnji, avionskoj industriji i sl.) naziva se na engleskom jeziku *splajn*, a piše se *spline*. Ova naprava je, ustvari, duža elastična drvena letvica (šipka) koja se može saviti tako da prodje kroz nekoliko zahtevanih tačaka čvorova

(videti sl. 2.11.1). Ako se

pretpostavi da je splajn uniformno elastičan, tada se može reći da je njegova potencijalna energija, kada je savijen, proporcionalna integralu po njegovoj dužini (krivolinijski integral po luku) od kvadrata krivine K . Dakle, ako splajn leži duž ravne krive $y = S(x)$, $a \leq x \leq b$, njegova potencijalna energija je proporcionalna integralu

Sl. 2.11.1

$$(2.11.1) \quad \int_L K(x)^2 ds = \int_a^b \frac{S''(x)^2}{(1+S'(x)^2)^{5/2}} dx$$

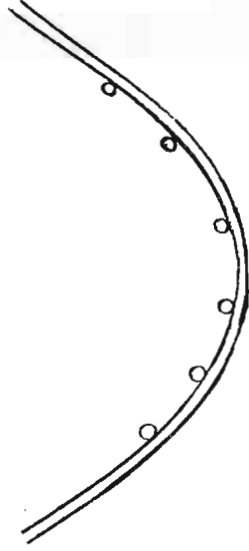
i oblik koji on zauzima je takav da minimizira (2.11.1) pod nametnutim ograničenjima.

Na sličan način definiše se i *matematički splajn*, s tim što se odbacuje član $S'(x)^2$ u (2.11.1), što je blisko prethodnom slučaju, kada je $S'(x)^2 \ll 1$. Dakle, sada treba minimizirati integral

$$(2.11.2) \quad \int_a^b S''(x)^2 dx.$$

Splajn se, međutim, može još opštije definisati uvodjenjem glatkosti višeg reda, tj. korišćenjem višeg izvoda od drugog u (2.11.2).

Prvi rezultati u vezi splajn-funkcija sreću se u radovima čiji su autori Quade i Collatz [31] (1938), Courant [12]



(1943) i Schoenberg [34] (1946). U radu Schoenberga prvi put se eksplicitno uvodi splajn-funkcija i naziva tim imenom. U skoro svim jezicima ovaj termin je usvojen. Buran razvoj splajn-funkcija i korišćenje njenih aproksimacionih svojstava započeo je šezdesetih godina. Splajnovi nalaze ogromnu primenu u numeričkoj matematici - kod interpolacije, numeričkog diferenciranja, numeričke integracije, rešavanja diferencijalnih jednačina itd. Splajnovi su se, takodje, pokazali kao rešenja mnogih klasičnih ekstremalnih problema u teoriji aproksimacija. Mi ćemo se u ovom i narednim odeljcima zadržati na problemu interpolacije pomoću splajnova, posebno tzv. kubnih splajnova. Pokazaćemo i je-dno ekstremalno svojstvo tzv. prirodnog kubnog splajna. Naime, on u odredjenoj klasi funkcija minimizira integral (2.11.2).

Neka je na segmentu $[a, b]$ data mreža čvorova

$$(2.11.3) \quad \Delta_n: a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b.$$

Sa \mathcal{P}_m označimo skup algebarskih polinoma ne višeg stepena od m .

Definicija 2.11.1. Funkcija

$$S_m(x) = S_{m,k}(x, \Delta_n)$$

se naziva polinomski splajn stepena m i defekta k ($1 \leq k \leq m$) sa čvorovima (2.11.3), ako zadovoljava uslove

- 1° $S_m \in \mathcal{P}_m$ na svakom podsegmentu $[x_{i-1}, x_i]$ ($i = 1, \dots, n$);
- 2° $S_m \in C^{m-k}[a, b]$;

Tačke x_i se zovu čvorovi splajna.

Mi ćemo u daljem radu razmatrati samo polinomske splaj-nove defekta 1, pa ćemo za $S_m(x) = S_{m,1}(x)$ reći jednostavno da je to splajn stepena m . Posebno ćemo se zadržati na jednoj važnoj vrsti splajnova, tzv. interpolacionih kubnih splajnova, kod kojih je $m = 3$. U tom cilju čvorovima mreže Δ_n pridružujemo realne brojeve f_0, f_1, \dots, f_n .

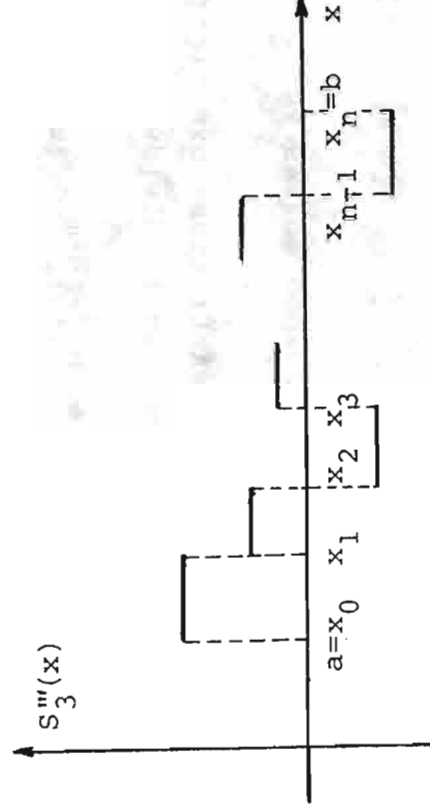
Definicija 2.11.2. Funkcija $S_3(x) = S_3(x; f)$ se naziva interpolacioni kubni splajn za funkciju f na mreži Δ_n ($n \geq 2$) ako su ispunjeni sledeći uslovi:

$$1^\circ S_3(x; f) \in \mathcal{P}_3 \text{ ako } x \in [x_{i-1}, x_i] \quad (i = 1, \dots, n);$$

$$2^\circ S_3(x; f) \in C^2[a, b];$$

$$3^\circ S_3(x_i; f) = f_i = f(x_i) \quad (i = 0, 1, \dots, n).$$

Primetimo da se uslov 3° ne pojavljuje u definiciji 2.11.1. Splajn uveden poslednjom definicijom zvaćemo jednostavno kubni splajn, izostavljajući reč interpolacioni. Napomenimo još jednom da kubni splajn interpolira funkciju f u čvorovima mreže (uslov 3°), da je neprekidan na $[a, b]$ zajedno sa svojim izvodima $S_3'(x)$ i $S_3''(x)$ (uslov 2°) i da je na svakom od podsegmenata između susednih čvorova definisan polinomom ne višeg stepena od trećeg. Na osnovu ovoq zaključujemo da je treći izvod kubnog splajna prekidan i da je deo po deo konstanta (videti sl. 2.11.2).



Sl. 2.11.2

Kao što ćemo videti u sledećem odeljku, kubni splajn ima dva slobodna parametra, koji se obično određuju na osnovu izvesnih dopunskih konturnih uslova. Tipični dopunski uslovi su:

$$(2.11.4) \quad S_3'(a) = S_3'(b), \quad S_3''(a) = S_3''(b);$$

$$(2.11.5) \quad S'_3(a) = a_n, \quad S'_3(b) = b_n;$$

$$(2.11.6) \quad S''_3(a) = A_n, \quad S''_3(b) = B_n;$$

$$(2.11.7) \quad S''_3(x_1-0) = S''_3(x_1+0), \quad S''_3(x_{n-1}-0) = S''_3(x_{n-1}+0),$$

gde su a_n, b_n, A_n, B_n zadati realni brojevi.

Uslovi (2.11.4) definišu tzv. periodični splajn. Ovi uslovi se koriste ako je, na primer, funkcija f koju interpoliramo periodična sa periodom $b-a$.

Ako je, na primer, funkcija f diferencijabilna i mi poznajemo vrednosti izvoda u krajnjim tačkama a i b , tada se koriste dopunski uslovi (2.11.5), sa $a_n = f'(a)$ i $b_n = f'(b)$, ili dopunski uslovi (2.11.6), sa $A_n = f''(a)$ i $B_n = f''(b)$. Ako je $A_n = B_n = 0$, što je čest slučaj kod modela iz mehanike, odgovarajući splajn se naziva prirodni kubni splajn.

Uslovi (2.11.7) su najsloženiji, ali oni obezbeđuju neprekidnost trećeg izvoda splajna u tačkama $x = x_1$ i $x = x_{n-1}$.

6.2.12. Konstrukcija kubnog splajna

Neka na mreži Δ_n , datoj promoću (2.11.3), imamo

$$S_3(x_i) = f_i, \quad S'_3(x_i) = m_i, \quad S''_3(x_i) = M_i \quad (i = 0, 1, \dots, n).$$

Neka je dalje $h_i = x_i - x_{i-1}$. Na osnovu podataka u tačkama x_{i-1} i x_i konstruišimo Hermiteov interpolacioni polinom i nametnimo takve uslove da njegov stepen ne bude viši od trećeg, kako bi on na podsegmentu $[x_{i-1}, x_i]$ predstavljao kubni splajn. Ovaj problem je rešen kroz primer 2.8.2. Tako za $x \in [x_{i-1}, x_i]$ možemo uzeti

$$(2.12.1) \quad S_3(x) = f_{i-1} + m_{i-1}(x-x_{i-1}) + \frac{M_{i-1}}{2}(x-x_{i-1})^2 + \frac{1}{3}(f_i - f_{i-1} - m_{i-1}h_i - \frac{M_{i-1}}{2}h_i^2)(x-x_{i-1})^3,$$

pri čemu, na osnovu (2.8.8) mora važiti

$$m_i + 2m_{i-1} + \frac{1}{2}M_{i-1}h_i = \frac{3}{h_i}(f_i - f_{i-1}),$$

(2.12.2)

$$m_i + m_{i-1} - \frac{1}{6}(M_i - M_{i-1})h_i = \frac{2}{h_i}(f_i - f_{i-1}).$$

Slično, za podsegment $[x_i, x_{i+1}]$ imamo

$$m_{i+1} + 2m_i + \frac{1}{2}M_i h_{i+1} = \frac{3}{h_{i+1}}(f_{i+1} - f_i),$$

(2.12.3)

$$m_{i+1} + m_i - \frac{1}{6}(M_{i+1} - M_i)h_{i+1} = \frac{2}{h_{i+1}}(f_{i+1} - f_i).$$

Iz sistema jednačina (2.12.2)-(2.12.3) možemo eliminirati m_{i-1} , m_i , m_{i+1} (ili M_{i-1} , M_i , M_{i+1}). Tako dobijamo

$$\frac{h_i}{6}M_{i-1} + \frac{1}{3}(h_i + h_{i+1})M_i + \frac{h_{i+1}}{6}M_{i+1} = \frac{f_{i+1} - f_i}{h_{i+1}} - \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i},$$

$$= (h_i + h_{i+1})[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}; f],$$

tj.

$$\frac{h_i}{h_i + h_{i+1}}M_{i-1} + 2M_i + \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}}M_{i+1} = 6[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}; f]$$

gde je sa $[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, f]$ označena podeljena razlika drugog reda funkcije f u tačkama x_{i-1} , x_i , x_{i+1} (videti odeljak 6.2.3).

Poslednja jednačina se može napisati za sve unutrašnje čvorove, tj. za $i = 1, 2, \dots, n-1$. Ako stavimo

$$\alpha_i = \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}}, \quad \beta_i = 1 - \alpha_i, \quad d_i = 6[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}; f]$$

na osnovu prethodnog imamo sledeći sistem linearnih jednačina

$$(2.12.4) \quad \alpha_i M_{i-1} + 2M_i + \beta_i M_{i+1} = d_i \quad (i = 1, \dots, n-1).$$

Dobijeni sistem od $n-1$ jednačina sadrži $n+1$ nepoznatih: M_0, M_1, \dots, M_n . Dakle, za potpuno određivanje splajna potrebno je zadati još dva dopunska uslova, o kojima je bilo reči u prethodnom odeljku.

Slično, eliminacijom M_{i-1}, M_i, M_{i+1} iz sistema jednačina (2.12.2)-(2.12.3) dobijamo

$$(2.12.5) \quad \alpha_i m_{i-1} + 2m_i + \beta_i m_{i+1} = d_i \quad (i = 1, \dots, n-1).$$

(i) Pretpostavimo sada da su dopunski konturni uslovi dati pomoću (2.11.6), tj. da su $M_0 = A_n$ i $M_n = B_n$.

Tada sistem (2.12.4) u matičnom obliku izgleda

$$\begin{bmatrix} 2 & \beta_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_2 & 2 & \beta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{n-2} & 2 & \beta_{n-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{n-1} & 2 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^{-\alpha} 1^n A_n \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1}^{-\beta} - 1^n B_n \end{bmatrix}$$

Rešavanjem ovog sistema dobijamo veličine M_1, M_2, \dots, M_{n-1} . Sada, na osnovu (2.12.2), nalazimo

$$m_{i-1} = \frac{1}{h_i} (f_i - f_{i-1}) - \frac{1}{6} (M_i + 2M_{i-1}) h_i,$$

$$m_i = \frac{1}{h_i} (f_i - f_{i-1}) + \frac{1}{6} (2M_i + M_{i-1}) h_i.$$

Najzad, zamenom u (2.12.1) dobijamo

$$S_3(x) = f_{i-1} + (x - x_{i-1}) \left(\frac{1}{h_i} (f_i - f_{i-1}) - \frac{1}{6} (M_i + 2M_{i-1}) h_i \right) + \frac{M_{i-1}}{2} (x - x_{i-1})^2 + \frac{1}{6h_i} (M_i - M_{i-1}) (x - x_{i-1})^3,$$

što se može predstaviti i u simetričnom obliku

$$(2.12.6) \quad S_3(x) = \frac{M_i}{6h_i} (x - x_{i-1})^3 + \frac{M_{i-1}}{6h_i} (x_i - x)^3 + \left(f_i - \frac{h_i^2 M_i}{6} \right) \frac{x - x_{i-1}}{h_i} + \left(f_{i-1} - \frac{h_i^2 M_{i-1}}{6} \right) \frac{x_i - x}{h_i},$$

gde $x \in [x_{i-1}, x_i]$.

Slično, korišćenje sistema (2.12.5), sa istim dopunskim konturnim uslovima (2.11.6), dovodi nas do nešto komplikovanijeg sistema od $n+1$ jednačina

$$(2.12.7) \quad \left\{ \begin{array}{l} 2m_0 + m_1 = \frac{3}{h_1} (f_1 - f_0) - \frac{1}{2} h_1 A_n, \\ \beta_i m_{i-1} + 2m_i + \alpha_i m_{i+1} = d_i \quad (i = 1, \dots, n-1), \\ m_{n-1} + 2m_n = \frac{3}{h_n} (f_n - f_{n-1}) + \frac{1}{2} h_n B_n. \end{array} \right.$$

Tada ekvivalentni izraz za splajn postaje

$$(2.12.8) \quad S_3(x) = \frac{m_{i-1}}{h_i} \frac{(x_i - x)^2 (x - x_{i-1})}{2} - \frac{m_i}{2} \frac{(x_i - x)(x - x_{i-1})}{h_i} + \frac{f_{i-1}}{h_i} \frac{(x_i - x)^2 (2(x - x_{i+1}) + h_i)}{3} + \frac{f_i}{h_i} \frac{(x - x_{i-1})^2 (2(x_i - x) + h_i)}{3}.$$

Ako definišemo veličine

$$(2.12.9) \quad \sigma_k = \frac{M_k - M_{k-1}}{h_k}, \quad \lambda_k = \frac{1}{6} (\sigma_{k+1} - \sigma_k),$$

kubni splajn se može iskazati u sažetom obliku jednom formulom za svako $x \in [a, b]$

$$(2.12.10) \quad S_3(x) = f_0 + m_0(x - x_0) + \frac{M_0}{2}(x - x_0)^2 + \frac{\sigma_1}{6}(x - x_0)^3 + \sum_{k=1}^{n-1} \lambda_k (x - x_k)^3,$$

gde je

$$m_0 = \frac{1}{h_1} (f_1 - f_0) - \frac{1}{6} (M_1 + 2M_0) h_1,$$

a funkcija $(x - x_k)^3$ definisana pomoću

$$(x - x_k)_+^3 = \begin{cases} 0, & x < x_k, \\ (x - x_k)^3, & x \geq x_k. \end{cases}$$

(ii) Ako su dopunski konturni uslovi dati pomoću (2.11.5), tj. $m_0 = a_n$ i $m_n = b_n$, pogodno je koristiti sistem jednačina (2.12.5), koji u matricnom obliku izgleda

$$(2.12.11) \quad \begin{bmatrix} 2 & \alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2 & 2 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{n-2} & 2 & \alpha_{n-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{n-1} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{n-2} \\ m_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 - \beta_1 a_n \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1} - \alpha_{n-1} b_n \end{bmatrix}$$

Rešavanjem ovog sistema dobijamo veličine m_1, m_2, \dots, m_{n-1} , a zatim iz prve jednačine u (2.12.2) veličinu M_{i-1} , koja se pojavljuje u (2.12.1).

Moguće je, međjutim, koristiti i sistem (2.12.4). Tada će odgovarajući sistem po M_0, \dots, M_n biti

$$\left\{ \begin{aligned} 2M_0 + M_1 &= \frac{6}{h_1} \left(\frac{f_1 - f_0}{h_1} - a_n \right), \\ \alpha_i M_{i-1} + 2M_i + \beta_i M_{i+1} &= d_i \quad (i = 1, \dots, n-1), \\ M_{n-1} + 2M_n &= \frac{6}{h_n} \left(b_n - \frac{f_n - f_{n-1}}{h_n} \right). \end{aligned} \right.$$

(iii) U slučaju periodičnih uslova (2.11.4), imamo sistem jednačina

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_i M_{i-1} + 2M_i + \beta_i M_{i+1} &= d_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), \\ M_0 = M_n, \quad M_{n+1} = M_1, \quad h_{n+1} &= h_1, \end{aligned} \right.$$

ili, što je ekvivalentno,

$$(2.12.12) \quad \left\{ \begin{array}{l} \beta_i m_{i-1} + 2m_i + \alpha_i m_{i+1} = c_i \quad (i=1, 2, \dots, n), \\ m_0 = m_n, \quad m_{n+1} = m_1, \quad h_{n+1} = h_1, \end{array} \right.$$

gde je

$$(2.12.13) \quad c_i = 3\beta_i [x_{i-1}, x_i, f] + 3\alpha_i [x_i, x_{i+1}, f] \quad (i=1, \dots, n-1).$$

(iv) Granični uslovi (2.11.7) su najkomplikovaniji. Može se pokazati da je odgovarajući sistem jednačina dat pomoću

$$\left\{ \begin{array}{l} (2 + \frac{h_1}{h_2})M_1 + \frac{h_2 - h_1}{h_2} M_2 = d_1, \\ \alpha_i M_{i-1} + 2M_i + \beta_i M_{i+1} = d_i \quad (i = 2, \dots, n-2), \\ \frac{h_{n-1} - h_n}{h_{n-1}} M_{n-2} + (2 + \frac{h_n}{h_{n-1}})M_{n-1} = d_{n-1}, \end{array} \right.$$

dok su

$$\left\{ \begin{array}{l} M_0 = (1 + \frac{h_1}{h_2})M_1 - \frac{h_1}{h_2} M_2, \\ M_n = (1 + \frac{h_n}{h_{n-1}})M_{n-1} - \frac{h_n}{h_{n-1}} M_{n-2}. \end{array} \right.$$

Nešto komplikovaniji sistem biće ukoliko se određuju veličine m_i :

$$(2.12.14) \quad \left\{ \begin{array}{l} (1+p)m_1 + pm_2 = \beta_1 \frac{f_1 - f_0}{h_1} + \alpha_1 (3+2p) \frac{f_2 - f_1}{h_2}, \\ \beta_i m_{i-1} + 2m_i + \alpha_i m_{i+1} = c_i \quad (i = 2, \dots, n-2), \\ qm_{n-2} + (1+q)m_{n-1} = \beta_{n-1} (3+2q) \frac{f_{n-1} - f_{n-2}}{h_{n-1}} + \alpha_{n-1} \frac{f_n - f_{n-1}}{h_n} \end{array} \right.$$

i

$$\left\{ \begin{aligned} m_0 &= p^2 m_2 + (p^2 - 1)m_1 + 2 \left(\frac{f_1 - f_0}{h_1} - p^2 \frac{f_2 - f_1}{h_2} \right), \\ m_n &= q^2 m_{n-2} + (q^2 - 1)m_{n-1} + 2 \left(\frac{f_n - f_{n-1}}{h_n} + q^2 \frac{f_{n-2} - f_{n-1}}{h_{n-1}} \right), \end{aligned} \right.$$

gde su $p = h_1/h_2$ i $q = h_n/h_{n-1}$.

U svim slučajevima važe opšti izrazi za kubni splajn dati pomoću (2.12.6), (2.12.8), (2.12.10).

Primer 2.12.1. Konstruisaćemo interpolacioni kubni splajn za funkciju $x \mapsto f(x) = \sin \pi x$ na $[0, 1]$ uzimajući ekvidistantne čvorove $x_k = 0.25k$ ($k = 0, 1, 2, 3, 4$).

Ovde imamo ekvidistantnu mrežu čvorova sa korakom $h=1/4$. Vrednosti funkcije f u čvorovima mreže su

$$f_0 = f(0) = 0, \quad f_1 = f(1/4) = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad f_2 = f(1/2) = 1,$$

$$f_3 = f(3/4) = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad f_4 = f(1) = 0.$$

Kako je $f''(0) = f''(1) = 0$, za određivanje splajna S_3 korišćemo dopunske konturne uslove $S_3''(0) = S_3''(1) = 0$, tj. $M_0 = M_4 = 0$. Dakle, konstruisaćemo prirodni kubni splajn za funkciju f .

Sada imamo

$$d_i = 6[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, f] = \frac{6}{2h}([x_i, x_{i+1}, f] - [x_{i-1}, x_i, f]),$$

tj.

$$d_i = \frac{3}{h}((f_{i+1} - f_i) - (f_i - f_{i-1})) = \frac{3}{h} \Delta^2 f_{i-1},$$

odakle, s obzirom na vrednosti f_k , nalazimo

$$d_1 = 48\Delta^2 f_0 = 48(1 - \sqrt{2}), \quad d_2 = 48\Delta^2 f_1 = 48(\sqrt{2} - 2),$$

$$d_3 = 48\Delta^2 f_2 = 48(1 - \sqrt{2}).$$

Kako je $h_i = h = 1/4$, imamo $\alpha_i = \beta_i = 1/2$, pa sistem za određivanje nepoznatih M_i ($i = 1, 2, 3$) postaje

$$\begin{bmatrix} 2 & 1/2 & 0 \\ 1/2 & 2 & 1/2 \\ 0 & 1/2 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = 48 \begin{bmatrix} 1 - \sqrt{2} \\ \sqrt{2} - 2 \\ 1 - \sqrt{2} \end{bmatrix}.$$

Rešavanjem nalazimo $M_1 = M_3 = \frac{48}{7} (6 - 5\sqrt{2})$ i $M_2 = \frac{48}{7} (6\sqrt{2} - 10)$.

Na osnovu (2.12.9) imamo

$$\sigma_1 = 4M_1, \quad \sigma_2 = 4(M_2 - M_1), \quad \sigma_3 = 4(M_3 - M_2), \quad \sigma_4 = -4M_3,$$

i

$$\lambda_1 = \frac{2}{3}(M_2 - 2M_1), \quad \lambda_2 = \frac{2}{3}(M_3 - 2M_2 + M_1), \quad \lambda_3 = \frac{2}{3}(-2M_3 + M_2),$$

tj.

$$\lambda_1 = \lambda_3 = \frac{64}{7}(8\sqrt{2} - 11) \approx 2.868192,$$

$$\lambda_2 = \frac{64}{7}(16 - 11\sqrt{2}) \approx 4.056236.$$

Saglasno (2.12.10) imamo za $0 \leq x \leq 1$

$$S_3(x) \approx 3.1344447x - 4.89631x^3 + \lambda_1(x - 0.25)^3 + \lambda_2(x - 0.5)^3 + \lambda_3(x - 0.75)^3 +$$

U tabeli 2.12.1 date su vrednosti za $S_3(x)$ i odgovarajuća greška $e(x) = \sin \pi x - S_3(x)$, uzimajući x sa korakom 0.05. Nije teško zaključiti da je $S_3(1-x) = S_3(x)$, pa je dovoljno tabelu sačiniti samo za x sa segmenta $[0, 0.5]$.

Vrednosti za $S_3(x)$ zaokružljene su na četiri decimale. U poslednjoj koloni tabele broj u zagradi označava decimalni eksponent, na primer $3.2(-4) = 3.2 \cdot 10^{-4}$.

Tabela 2.12.1

x	$S_3(x) = S_3(1-x)$	e(x)
0.00	0.0000	0.
0.05	0.1561	3.2(-4)
0.10	0.3085	4.7(-4)
0.15	0.4536	3.5(-4)
0.20	0.5877	6.6(-5)
0.25	0.7071	0.
0.30	0.8085	5.3(-4)
0.35	0.8900	1.0(-3)
0.40	0.9501	9.6(-4)
0.45	0.9873	4.2(-4)
0.50	1.0000	0.

Iz tabele vidimo da je maksimalna greška kod ove aproksimacije približno 10^{-3} .

6.2.13. Ekstremalna i aproksimativna svojstva kubnog splajna

Neka je data mreža čvorova Δ_n pomoću (2.11.3) i neka su čvorovima pridruženi realni fiksní brojevi f_0, f_1, \dots, f_n . Sa F označimo klasu dvaput neprekidno-diferencijabilnih funkcija na $[a, b]$, čije su vrednosti u čvorovima mreže x_i jednake datim vrednostima f_i , a njihovi drugi izvodi u krajnjim tačkama segmenta jednaki nuli. Naime,

$$F = \{g \mid g \in C^2[a, b], g(x_i) = f_i \ (i=0, 1, \dots, n), g''(a) = g''(b) = 0\}.$$

Primetimo da prirodni kubni splajn S_3 pripada ovoj klasi funkcija i interpolira svaku funkciju iz F.

Za funkcije iz klase F često se definiše norma pomoću

$$(2.13.1) \quad \|g\| = \left(\int_a^b |g''(x)|^2 dx \right)^{1/2}$$

Sledeću ekstremalnu osobinu prirodnog kubnog splajna dokazao je J.C.Holliday [21].

Teorema 2.13.1. U klasi F , prirodni kubni splajn S_3 minimizira normu (2.13.1), tj.

$$(2.13.2) \quad \|S_3\| \leq \|g\| \quad \text{za svako } g \in F.$$

Dokaz. Primitimo najpre da je

$$\begin{aligned} 0 \leq \|g - S_3\|^2 &= \int_a^b g''(x)^2 dx - 2 \int_a^b g''(x) S_3''(x) dx + \int_a^b S_3''(x)^2 dx \\ &= \|g\|^2 - \|S_3\|^2 - 2 \int_a^b (g''(x) - S_3''(x)) S_3''(x) dx. \end{aligned}$$

Da bismo dokazali nejednakosti (2.13.2) dovoljno je dokazati da je integral na desnoj strani u poslednjoj formuli jednak nuli. Njegovom dekompozicijom dobijamo

$$I(a, b) = \int_a^b (g''(x) - S_3''(x)) S_3''(x) dx = \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} (g''(x) - S_3''(x)) S_3''(x) dx.$$

Sada, stavljanjem $u = S_3''(x)$ i $dv = (g''(x) - S_3''(x)) dx$ i primenom parcijalne integracije na integral sa desne strane u poslednjoj jednakosti, dobijamo

$$I(x_{i-1}, x_i) = S_3''(x) (g'(x) - S_3'(x)) \Big|_{x_{i-1}}^{x_i} - \int_{x_{i-1}}^{x_i} (g'(x) - S_3'(x)) S_3'''(x) dx.$$

Kako je $S_3'''(x) = C = \text{const}$, kada $x \in (x_{i-1}, x_i)$, i $g(x_i) = f_i$, zaključujemo da je integral na desnoj strani u prethodnoj formuli jednak nuli, tako da je sada

$$I(a, b) = \sum_{i=1}^n [S_3''(x) (g'(x) - S_3'(x))]_{x_{i-1}}^{x_i},$$

tj.

$$I(a,b) = S_3''(b) (g'(b) - S_3'(b)) - S_3''(a) (g'(a) - S_3'(a)).$$

Najzad, zbog $S_3''(a) = S_3''(b) = 0$, zaključujemo da je $I(a,b) = 0$, čime je teorema dokazana.

Ukazaćemo sada na neka aproksimativna svojstva i konvergenciju kubnog splajna.

Najpre stavimo

$$u_i = u_i(x) = \frac{1}{h_i} (x_i - x)^2 (x - x_{i-1}),$$

$$v_i = v_i(x) = \frac{1}{h_i} (x_i - x) (x - x_{i-1})^2,$$

$$w_i = w_i(x) = \frac{1}{h_i} \left(x - \frac{x_i + x_{i-1}}{2} \right) \left((x_i - x)^2 + 4(x_i - x)(x - x_{i-1}) + (x - x_{i-1})^2 \right).$$

Tada korišćenjem (2.12.8) greška $R(x) = f(x) - S_3(x, f)$ za $x_{i-1} \leq x \leq x_i$ se može predstaviti u obliku

$$\begin{aligned} R(x) = & m_i v_i - m_{i-1} u_i + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{h_i} w_i \right) (f(x) - f(x_{i-1})) \\ & + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{h_i} w_i \right) (f(x) - f(x_i)). \end{aligned}$$

Za mrežu čvorova (2.11.3) definišimo veličinu

$$\|\Delta_n\| = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i - x_{i-1}|.$$

Ako $x \in [x_{i-1}, x_i]$ primetimo da je

$$\left| \frac{1}{2} - \frac{1}{h_i} w_i \right| + \left| \frac{1}{2} + \frac{1}{h_i} w_i \right| = 1.$$

Na osnovu prethodnog i korišćenjem definicije modula neprekidnosti dobijamo sledeću ocenu

$$|R(x)| \leq \max(|m_i|, |m_{i-1}|) (u_i + v_i) + \omega(f; \|\Delta_n\|).$$

Kako je $u_i + v_i = \frac{1}{4} \frac{h_i}{h_i} (x_i - x_{i-1}) \leq \frac{1}{4} h_i$ imamo

$$(2.13.3) \quad |R(x)| \leq \frac{1}{4} h_i \max(|m_i|, |m_{i-1}|) + \omega(f; \|\Delta_n\|).$$

Slično se mogu dokazati i sledeće nejednakosti za izvode

$$(2.13.4) \quad |R'(x)| \leq \max(|m_i - f'(x_i)|, |m_{i-1} - f'(x_{i-1})|) + 2\omega(f; \|\Delta_n\|)$$

i

$$(2.13.5) \quad |R''(x)| \leq \max(|f''(x_i) - M_i|, |f''(x_{i-1}) - M_{i-1}|) + \omega(f''; \|\Delta_n\|).$$

Pretpostavimo sada da je mreža Δ_n data pomoću jedne vrste matrice X iz definicije 2.7.1, tj. da je

$$(2.13.6) \quad \Delta_n: a = x_0^{(n)} < x_1^{(n)} < \dots < x_n^{(n)} = b.$$

Kratkoće radi mi ćemo izostavljati gornji indeks.

Teorema 2.13.2. Neka $f \in C[a, b]$ i neka je $S_3(x; f)$ interpolacioni kubni splajn na mreži (2.13.6), koji zadovoljava jedan od uslova (2.11.5)-2.11.7), ili uslov (2.11.4) ukoliko je f još i periodična sa periodom $b-a$. Tada, za svako $x \in [a, b]$, važi

$$(2.13.7) \quad |f(x) - S_3(x; f)| \leq \frac{3}{4} D_n \|\Delta_n\| + q_n + \omega(f, \|\Delta_n\|),$$

gde je $D_n = \max_{1 \leq k \leq n} |x_{k-1}, x_k; f|$, a q_n , u zavisnosti od dopunskih konturnih uslova, ima oblik:

1^o Za periodične uslove (2.11.4), $q_n = 0$;

2^o Za uslove (2.11.5), $q_n = \frac{1}{4} \max(|a_n|, |b_n|) \cdot \|\Delta_n\|$;

3^o Za uslove (2.11.6), $q_n = \frac{1}{4} \max(h_1 |A_n|, h_n |B_n|) \cdot \|\Delta_n\|$;

4^o Za uslove (2.11.7),

$$q_n = \begin{cases} 7 \max(1, p^3, q^3) & (a \leq x \leq x_1 \vee x_{n-1} \leq x \leq b), \\ \max(3, 2p+1)D_n & (x_1 \leq x \leq x_{n-1}), \end{cases}$$

gde su $p = h_1/h_2$ i $q = h_n/h_{n-1}$.

Dokaz. S obzirom na nejednakost (2.13.3), za dokaz ove teoreme dovoljno je oceniti veličinu $\max_i |m_i|$, koja ustvari predstavlja normu $\|\vec{m}\|_\infty$, gde je \vec{m} vektor rešenja jednog od sistema jednačina (2.12.12), (2.12.11), (2.12.7), (2.12.14), što redom odgovara dopunskim konturnim uslovima (2.11.4) i (2.11.7).

Na primer, kod periodičnih uslova (2.11.4), sistem (2.12.12), po m_1, \dots, m_n ($m_0 = m_n, m_{n+1} = m_1$), ima matricu i vektor slobodnih članova oblika

$$A = \begin{bmatrix} 2 & \alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \beta_1 \\ \beta_2 & 2 & \alpha_2 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & \beta_{n-1} & 2 & \alpha_{n-1} \\ \alpha_n & 0 & 0 & & 0 & \beta_n & 2 \end{bmatrix}, \quad \vec{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ c_{n-1} \\ c_n \end{bmatrix}$$

gde su c_i dati pomoću (2.12.13).

Na osnovu teoreme 1.6.8, iz odeljka 4.1.6, važi

$\|\vec{m}\|_\infty \leq \frac{1}{a} \|\vec{c}\|_\infty$, ako je

$$\min_{1 \leq i \leq n} \{ |a_{ii}| - \sum_{j \neq i} |a_{ij}| \} = a > 0.$$

Evidentno, u ovom slučaju imamo $a = 1$. Dalje imamo

$$\|\vec{c}\|_\infty = \max_i |c_i| = 3 \max_i |\beta_i [x_{i-1}, x_i; f]| + \alpha_i [x_i, x_{i+1}; f],$$

tj.

$$\|\vec{c}\|_\infty \leq 3(\beta_i + \alpha_i) \max_i |x_{i-1}, x_i; f| = 3D_n.$$

Dakle, $\|\vec{m}\|_\infty \leq 3D_n$. Sada, iz (2.13.3) sleduje

$$(2.13.8) \quad |f(x) - S_3(x, f)| \leq \frac{3}{4} D_n \|\Delta_n\| + \omega(f; \|\Delta_n\|),$$

što predstavlja (2.13.7) sa $q_n = 0$ (slučaj 1^o). Primitimo da iz (2.13.8) sleduje konvergencija kubnog splajna ka neprekidnoj funkciji f , kada $n \rightarrow \infty$ i $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$.

Slično se dokaz sprovodi i za ostale dopunske konturne uslove.

6.2.14. Pronyeva interpolacija

Neka je funkcija f data na skupu ekvidistantnih tačaka parovima vrednosti $\{(x_k, f_k)\}_{k=0,1,\dots,2n-1}$. Kako je $x_k - x_{k-1} = h = \text{const}$ ($k=1, \dots, 2n-1$), smenom $x = x_0 + kh$, dati skup podataka možemo zameniti skupom $\{(k, f_k)\}_{k=0,1,\dots,2n-1}$.

Postavimo interpolacioni problem

$$(2.14.1) \quad \phi(k) = f_k \quad (k = 0, 1, \dots, 2n-1),$$

sa aproksimacionom funkcijom oblika

$$\phi(k) = C_1 \phi_1(k) + C_2 \phi_2(k) + \dots + C_n \phi_n(k),$$

gde je ϕ rešenje linearne diferencne jednačine reda n sa konstantnim koeficijentima

$$(2.14.2) \quad \phi(k+n) + a_n \phi(k+n-1) + \dots + a_2 \phi(k+1) + a_1 \phi(k) = 0.$$

S obzirom na (2.14.1), iz (2.14.2), za $k=0, 1, \dots, 2n-1$, sleduje sistem linearnih jednačina

$$(2.14.3) \quad \begin{aligned} f_0 a_1 + f_1 a_2 + \dots + f_{n-1} a_n &= -f_n, \\ f_1 a_1 + f_2 a_2 + \dots + f_n a_n &= -f_{n+1}, \\ &\vdots \\ f_{n-1} a_1 + f_n a_2 + \dots + f_{2n-2} a_n &= -f_{2n-1}. \end{aligned}$$

Dakle, korišćenjem interpolacionog uslova (2.14.1), i zahvaljujući ekvidistantnosti podataka, uspeli smo da dodjemo do sistema jednačina za određivanje koeficijenata diferencne jednačine (2.14.2).

Ako je determinanta

$$\begin{vmatrix} f_0 & f_1 & \dots & f_{n-1} \\ f_1 & f_2 & & f_n \\ \vdots & & & \\ f_{n-1} & f_n & & f_{2n-2} \end{vmatrix} \neq 0,$$

rešenje sistema (2.14.3) je jedinstveno.

Određjivanjem korena r_1, r_2, \dots, r_n karakteristične jednačine

$$r^n + a_n r^{n-1} + \dots + a_2 r + a_1 = 0,$$

nalazimo partikularna rešenja diferencne jednačine (2.14.2), $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ (videti odeljak 1.3.1 u I delu). Ovim se postavljene interpolacioni problem svodi na linearni problem. Naime, konstante C_1, C_2, \dots, C_n se mogu odrediti, na primer, iz sistema linearnih jednačina

$$(2.14.4) \quad C_1 \phi_1(k) + C_2 \phi_2(k) + \dots + C_n \phi_n(k) = f_k \quad (k=0, 1, \dots, n-1).$$

Najzad, imajući u vidu smenu $x = x_0 + kh$, dobijamo interpolacionu funkciju

$$\Psi(x) = \phi\left(\frac{x-x_0}{h}\right) = C_1 \phi_1\left(\frac{x-x_0}{h}\right) + C_2 \phi_2\left(\frac{x-x_0}{h}\right) + \dots + C_n \phi_n\left(\frac{x-x_0}{h}\right)$$

kojom je interpoliran skup podataka $\{(x_k, f_k)\}_{k=0, 1, \dots, 2n-1}$. Ova kva interpolacija nosi naziv Pronyeva (eksponencijalna) interpolacija ([30]). Problemi vezani za egzistenciju interpolacione funkcije izlaze iz okvira ove knjige. Jedan interesantan prilaz u određjivanju funkcije ϕ dao je P.B. Madić u [29].

Primer 2.8.1. Za skup podataka

k	0	1	2	3	4	5	6	7
x_k	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
f_k	8	2	4	0	-3	-5	-7.75	-10.375

imamo $2n-1 = 7$, tj. $n=4$, i korak $h=0.5$. Sistem linearnih jednačina (2.14.3) za određjivanje koeficijenata diferencne jednačine

postaje

$$\begin{aligned}8a_1 + 2a_2 + 4a_3 + 0a_4 &= 3, \\2a_1 + 4a_2 + 0a_3 - 3a_4 &= 5, \\4a_1 + 0a_2 - 2a_3 - 5a_4 &= 7.75, \\0a_1 - 3a_2 - 5a_3 - 7.75a_4 &= 10.375,\end{aligned}$$

odakle je $a_1 = a_3 = 0.25$, $a_2 = 0$, $a_4 = -1.5$. Kako se karakteristična jednačina

$$r^4 - 1.5r^3 + 0.25r^2 + 0.24 = 0$$

može predstaviti u obliku

$$(r-1)^2(r^2 + 0.5r + 0.25) = 0,$$

imamo $r_1 = r_2 = 1$, $r_{3,4} = (-1 \pm i\sqrt{3})/4$, pa je

$$\phi(k) = C_1 + C_2 k + 2^{-k} \left(C_3 \cos \frac{2\pi k}{3} + C_4 \sin \frac{2\pi k}{3} \right).$$

Najzad, iz (2.14.4) sleduje

$$C_1 = \frac{376}{49}, \quad C_2 = -\frac{18}{7}, \quad C_3 = \frac{16}{49}, \quad C_4 = -\frac{592}{49\sqrt{3}}$$

pa je tražena interpolaciona funkcija data sa

$$\psi(x) = \phi(2x) = \frac{4}{49} \left(94 - 63x + 4^{1-x} \left(\cos \frac{4\pi x}{3} - \frac{37}{\sqrt{3}} \sin \frac{4\pi x}{3} \right) \right).$$

Primerba 2.14.1. Interesantno je da ovaj tip aproksimacije -Prony-eva interpolacija- nije dovoljno našao mesta u primenama.

6.3. PROBLEM NAJBOLJIH APROKSIMACIJA

Ovo poglavlje je posvećeno aproksimacijama koje se najviše pojavljuju u primenama u raznim oblastima nauke i tehnike. Tu se, pre svega, obrađuju srednje-kvadratne aproksimacije koje su najjednostavnije za primenu. Razmatra se i slučaj srednje-kvadratne aproksimacije sa ograničenjem. Pored kontinualne aproksimacije data je i diskretna srednje-kvadratna aproksimacija, ili metod najmanjih kvadrata, kako se popularno naziva. Posebna pažnja je posvećena određivanju parametara u tzv. empirijskim formulama, što

je veoma važno u nekim eksperimentalnim naukama. U posebnoj odeljku je izložena srednje-kvadratna aproksimacija polinomske funkcije sa Čebiševljevom težinom, poznata kao ekonomizacija stepenih redova.

U poslednjem odeljku se izlaže mini-max aproksimacija neprekidne funkcije na $[a, b]$ polinomskom aproksimacionom funkcijom. Za odgovarajući diskretni analogon ukazano je kako se može rešiti metodom linearnog programiranja.

6.3.1. Osnovni pojmovi

Neka je funkcija $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ data skupom parova vrednosti (x_j, f_j) ($j = 0, 1, \dots, m$), gde je $f_j \equiv f(x_j)$. Razmotrićemo problem aproksimacije funkcije f linearnom aproksimacionom funkcijom (videti odeljak 6.1.2)

$$\phi(x) \equiv \phi(x; a_0, \dots, a_n) = \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x),$$

pri čemu je $m > n$ *. Postupajući kao kod interpolacije, u ovom slučaju, dolazimo do tzv. preodređenog sistema jednačina

$$(3.1.1) \quad \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x_j) = f_j \quad (j = 0, 1, \dots, m),$$

koji, u opštem slučaju, nema rešenje, tj. sve jednačine sistema (3.1.1) ne mogu biti istovremeno zadovoljene.

Ako definišemo δ_n pomoću

$$(3.1.2) \quad \delta_n(x) = f(x) - \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x),$$

moguće je tražiti "rešenje" sistema (3.1.1) takvo da je

$$(3.1.3) \quad \|\delta_n^*\|_r = \min_i \|\delta_n\|_r,$$

gde je

*) Za $m = n$ imamo interpolaciju.

$$\|\delta_n\|_r = \left(\sum_{j=0}^m |\delta_n(x_j)|^r \right)^{1/r} \quad (r \geq 1),$$

Jednakost (3.1.3) daje kriterijum za određivanje parametara a_0, a_1, \dots, a_n u aproksimacionoj funkciji ϕ . Veličinu $\|\delta_n^*\|_r$, koja uvek egzistira, nazivamo veličinom najbolje aproksimacije u ℓ^r . Optimalne vrednosti parametara $a_i = \bar{a}_i$ ($i = 0, 1, \dots, n$) u smislu (3.1.3) daju najbolju ℓ^r aproksimacionu funkciju

$$\phi^*(x) = \sum_{i=0}^n \bar{a}_i \phi_i(x).$$

Najčešće se, u praksi, uzima:

$$1^{\circ} \quad r=1, \quad \|\delta_n\|_1 = \sum_{j=0}^m |\delta_n(x_j)| \quad (\text{najbolja } \ell^1 \text{ aproksimacija}),$$

$$2^{\circ} \quad r=2, \quad \|\delta_n\|_2 = \left(\sum_{j=0}^m \delta_n(x_j)^2 \right)^{1/2} \quad (\text{srednje-kvadratna}$$

aproksimacija),

$$3^{\circ} \quad r=+\infty, \quad \|\delta_n\|_{\infty} = \max_{0 \leq j \leq m} |\delta_n(x_j)| \quad (\text{Čebiševljeva}$$

mini-max aproksimacija).

Analogno prethodnom, može se razmatrati problem najbolje aproksimacije funkcije f u prostoru $L^r(a,b)$. Ovde je (videti odlak 6.1.3)

$$\|\delta_n\|_r = \left(\int_a^b |\delta_n(x)|^r dx \right)^{1/r} \quad (1 \leq r < +\infty)$$

i

$$\|\delta_n\|_{\infty} = \max_{a \leq x \leq b} |\delta_n(x)|.$$

Uvodjenjem težinske funkcije $p:(a,b) \rightarrow \mathbb{R}^+$ može se razmatrati opštiji slučaj srednje-kvadratnih aproksimacija, pri čemu su odgovarajuće norme za diskretan i kontinualan slučaj date sa

$$(3.1.4) \quad \|\delta_n\|_2 = \|\delta_n\|_{2,p} = \left(\sum_{j=0}^m p(x_j) \delta_n(x_j)^2 \right)^{1/2}$$

i

$$(3.1.5) \quad \|\delta_n\|_2 = \|\delta_n\|_{2,p} = \left(\int_a^b p(x) \delta_n(x)^2 dx \right)^{1/2}$$

respektivno.

Primer 3.1.1.1. Funkciju $x \mapsto f(x) = x^{1/3}$ aproksimirajmo funkcijom $x \mapsto \phi(x) = a_0 + a_1 x$ u prostoru

$$1^{\circ} L^1(0,1), \quad 2^{\circ} L^2(0,1), \quad 3^{\circ} L^{\infty}(0,1).$$

Ovde je $\delta_1(x) = x^{1/3} - a_0 - a_1 x \quad (0 \leq x \leq 1)$.

1° Najbolju $L^1(0,1)$ aproksimaciju dobijamo minimizacijom norme

$$\|\delta_1\|_1 = \int_0^1 |x^{1/3} - a_0 - a_1 x| dx.$$

Kako je $\frac{\partial \delta_1}{\partial a_0} = -1$ i $\frac{\partial \delta_1}{\partial a_1} = -x$, optimalne vrednosti parametara a_0

i a_1 određujemo iz sistema jednačina

$$(3.1.6) \quad \begin{array}{l} \int_0^1 \operatorname{sgn} \delta_1(x) dx = 0, \\ \int_0^1 x \operatorname{sgn} \delta_1(x) dx = 0. \end{array}$$

S obzirom da se može uzeti da δ_1 menja znak na $[0,1]$ u tačkama x_1 i x_2 (videti sl. 3.1.1), to se sistem jednačina (3.1.6) svodi na sistem

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{2}, \quad x_2^2 - x_1^2 = \frac{1}{2},$$

odakle sleduje $x_1 = \frac{1}{4}$ i $x_2 = \frac{3}{4}$.

Dakle, problem određivanja najbolje $L^1(0,1)$ aproksima-

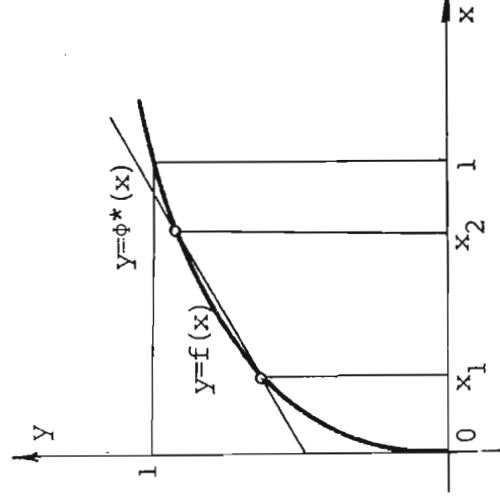
cije se svodi na interpolacioni problem, tj. na odredjivanje interpolacionog polinoma ϕ^* koji zadovoljava uslove

$$\phi^*(1/4) = f(1/4) = \sqrt[3]{\frac{1}{4}}, \quad \phi^*(3/4) = f(3/4) = \sqrt[3]{\frac{3}{4}}.$$

Prema tome, imamo

$$\phi^*(x) = \frac{2}{3\sqrt[3]{4}} (\sqrt[3]{3} - 1)x + \frac{1}{2\sqrt[3]{4}} (3 - \sqrt[3]{3})$$

$$\approx 0.55720x + 0.49066.$$



Sl. 3.1.1.1

2° Neka je

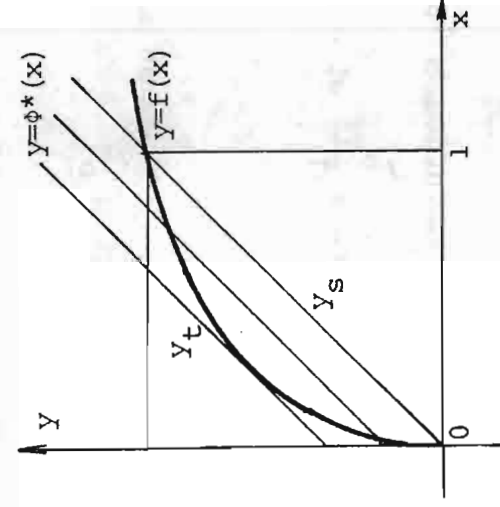
$$I(a_0, a_1) = \|\delta_1\|_2^2 = \int_0^1 (x^{1/3} - a_0 - a_1 x)^2 dx.$$

Tada iz uslova

$$\frac{\partial I}{\partial a_0} = -2 \int_0^1 (x^{1/3} - a_0 - a_1 x) dx = 0,$$

$$\frac{\partial I}{\partial a_1} = -2 \int_0^1 x(x^{1/3} - a_0 - a_1 x) dx = 0,$$

sleduje



Sl. 3.1.2

$$a_0 + \frac{1}{2} a_1 = \frac{3}{4}, \quad \frac{1}{2} a_0 + \frac{1}{3} a_1 = \frac{3}{7},$$

tj. $a_0 = \bar{a}_0 = \frac{3}{7}$, $a_1 = \bar{a}_1 = \frac{9}{14}$. Dakle, najbolja srednje-kvadratna

aproksimacija je data sa

$$\phi^*(x) = \frac{3}{7} + \frac{9}{14}x \cong 0.42857 + 0.64286x.$$

³ Za određivanje najbolje mini-max aproksimacije iskoristićemo sledeći prost geometrijski postupak. Kroz krajnje tačke krive $y = f(x) = x^{1/3}$ ($0 \leq x \leq 1$) postavimo sečicu, a zatim tangentu krive koja je paralelna sa ovom sečicom (videti sl. 3.1.2). Odgovarajuće jednačine ovih pravih su redom

$$y = y_s = x \quad \text{i} \quad y = y_t = x + \frac{2\sqrt{3}}{9}.$$

Nije teško zaključiti da je tražena najbolja mini-max aproksimacija data sa

$$\phi^*(x) = \frac{1}{2}(y_s + y_t) = x + \frac{\sqrt{3}}{9}x + 0.19245,$$

pri čemu je veličina najbolje aproksimacije $\|\delta_1^*\|_\infty = \frac{\sqrt{3}}{9}$. Primetimo da je

$$-\delta_1(0) = \delta_1(\sqrt{3}/9) = -\delta_1(1) = \|\delta_1^*\|_\infty.$$

6.3.2. Srednje-kvadratna aproksimacija

U ovom odeljku razmatraćemo problem srednje-kvadratne aproksimacije funkcije $f: [a, b] \rightarrow R$ pomoću linearne aproksimacione funkcije

$$\phi(x) = \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x),$$

gde je $\{\phi_i\}$ sistem linearno nezavisnih funkcija iz prostora $L^2(a, b)$, u kome je skalarni proizvod uveden pomoću

$$(f, g) = \int_a^b p(x) f(x) g(x) dx \quad (f, g \in L^2(a, b)),$$

gde je $p: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^+$ data težinska funkcija.

Koristeći se oznakama i rezultatima iz prethodnog odeljka, za dobijanje najbolje srednje-kvadratne aproksimacije za f , zaključujemo da je potrebno minimizirati normu (3.1.5) po parametrima a_i ($i = 0, 1, \dots, n$).

Ako stavimo $I(a_0, a_1, \dots, a_n) = \|\delta_n\|^2 = (\delta_n, \delta_n)$, tada iz

$$\frac{\partial I}{\partial a_j} = 2 \int_a^b p(x) (f(x) - \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x)) (-\phi_j(x)) dx = 0 \quad (j = 0, 1, \dots, n)$$

sleđuje sistem jednačina za određivanje aproksimacionih parametara

$$\sum_{i=0}^n (\phi_i, \phi_j) a_i = (f, \phi_j) \quad (j = 0, 1, \dots, n).$$

Ovaj sistem se može predstaviti i u matricnom obliku

$$\begin{bmatrix} (\phi_0, \phi_0) & (\phi_1, \phi_0) & \dots & (\phi_n, \phi_0) \\ (\phi_0, \phi_1) & (\phi_1, \phi_1) & & (\phi_n, \phi_1) \\ \vdots & & & \\ (\phi_0, \phi_n) & (\phi_1, \phi_n) & & (\phi_n, \phi_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f, \phi_0) \\ (f, \phi_1) \\ \vdots \\ (f, \phi_n) \end{bmatrix}.$$

Matrica ovog sistema je poznata kao Gramova matrica. Može se pokazati da je ova matrica regularna ako je sistem funkcija $\{\phi_i\}$ linearno nezavisan, što znači da u tom slučaju postoji jedinstveno rešenje datog aproksimacionog problema.

Sistem jednačina (3.2.1) se može jednostavno rešiti ako je sistem funkcija $\{\phi_i\}$ ortogonalan. Naime, tada matrica ovog sistema postaje dijagonalna pa su rešenja sistema data sa

$$a_i = \bar{a}_i = \frac{(f, \phi_i)}{(\phi_i, \phi_i)} \quad (i = 0, 1, \dots, n). \quad (3.2.2)$$

Pokažimo sada da pri ovako izabranim parametrima a_i ($i = 0, 1, \dots, n$) funkcija I , zaista dostiže minimum. Naime, kako je

$$\frac{\partial^2 I}{\partial a_j \partial a_k} = 2(\phi_k, \phi_j) = 2\|\phi_k\|^2 \delta_{kj},$$

gde je δ_{kj} Kroneckerova delta, imamo

$$d^2 I = 2 \sum_{i=0}^n \|\phi_k\|^2 da_k^2 > 0,$$

što dokazuje pomenuto tvrdjenje.

Dakle, najbolja srednje-kvadratna aproksimacija funkcije f na potprostoru $X_n = L(\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n)$, gde je $\{\phi_i\}$ ortogonalan sistem funkcija, data je sa

$$(3.2.3) \quad \phi^*(x) = \sum_{i=0}^n \frac{(f, \phi_i)}{\|\phi_i\|^2} \phi_i(x).$$

Jedna važna klasa srednje -kvadratnih aproksimacija je aproksimacija algebarskim polinomima. U tom slučaju ortogonalnu bazu potprostora X_n konstruišemo Gram-Schmidtovim postupkom ortogonalizacije, polazeći, na primer, od prirodne baze $\{1, x, x^2, \dots, x^n\}$ (videti odeljak 2.1.4) ili pak korišćenjem opštih metoda izloženih u odeljcima 2.2.5, 2.2.6 i 2.2.7. Opšta teorija ortogonalnih polinoma izložena je u poglavlju 2.2.

Primer 3.2.1. Za funkciju $x \mapsto f(x) = |x|$ na segmentu $[-1, 1]$ odredimo u skupu polinoma ne višeg stepena od trećeg najbolju srednje-kvadratnu aproksimaciju sa težinskom funkcijom $x \mapsto p(x) = (1-x^2)^{3/2}$.

Sistem ortogonalnih polinoma sa ovom težinskom funkcijom konstruisan je u primeru 1.4.2 (odeljak 2.1.4), pri čemu je

$$\phi_0(x) = 1, \quad \phi_1(x) = x, \quad \phi_2(x) = x^2 - \frac{1}{6}, \quad \phi_3(x) = x^3 - \frac{3}{8}x$$

$$\|\phi_0\| = \sqrt{\frac{3\pi}{8}}, \quad \|\phi_1\| = \frac{\sqrt{\pi}}{4}, \quad \|\phi_2\| = \frac{1}{8}\sqrt{\frac{5\pi}{6}}, \quad \|\phi_3\| = \frac{\sqrt{3\pi}}{32}.$$

Sledeća teorema se odnosi na slabu konvergenciju (konvergenciju po normi) srednje-kvadratne aproksimacije neprekidnih funkcija.

Teorema 3.2.2. Neka $f \in C[a, b]$. Tada je

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \|f - \phi_n^*\|^2 = 0$$

i

$$\sum_{i=0}^{+\infty} a_i^{-2} \|Q_i\|^2 = \|f\|^2 \text{ (Parsevalova jednakost).}$$

Dokaz. Pretpostavimo suprotno, tj. da je $\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n = \delta > 0$ i izaberimo $\varepsilon > 0$, takvo da je

$$\varepsilon^2 = \delta / (2C_0) \quad (C_0 = \int_a^b p(x) dx > 0).$$

Na osnovu Weierstrassove teoreme 1.4.1 postoji polinom P_m takav da je $|f(x) - P_m(x)| \leq \varepsilon$, za svako $x \in [a, b]$. Tada imamo

$$\|f - P_m\|_m^2 = \int_a^b p(x) (f(x) - P_m(x))^2 dx \leq \varepsilon^2 C_0 = \frac{\delta}{2}.$$

S druge strane, za najbolju srednje-kvadratnu aproksimaciju u klasi polinoma \mathcal{P}_m važi

$$I_m = \|f - \phi_m^*\|_m^2 \leq \|f - P_m\|_m^2.$$

Kako je niz I_m nerastući, na osnovu prethodnog zaključujemo da je

$$\delta \leq I_m \leq \frac{\delta}{2},$$

što je kontradikcija. Dakle, mora biti $\delta = 0$. Imajući u vidu (3.2.4) zaključujemo da važi Parsevalova jednakost.

Na osnovu teoreme 3.2.2 ne može se ništa zaključiti o uniformnoj konvergenciji $\phi_n^*(x)$ ka $f(x)$ na $[a, b]$. Zaista, ako stavimo $R_n(x) = f(x) - \phi_n^*(x)$, imamo

$$R_n(x) = f(x) - \sum_{i=0}^n \frac{Q_i(x)}{\|Q_i\|^2} (f, Q_i) = f(x) - \int_a^b p(t) f(t) K_n(x, t) dt,$$

gde smo stavili

$$K_n(x, t) = \sum_{i=0}^n \frac{Q_i(x)Q_i(t)}{\|Q_i\|^2}.$$

Primetimo da je, zbog ortogonalnosti niza $\{Q_i\}$, $\int_a^b p(t)K_n(x, t)dt = 1$.

Tada se greška može izraziti u obliku

$$R_n(x) = \int_a^b p(t)(f(x) - f(t))K_n(x, t)dt,$$

odakle vidimo da od prirode jezgra $K_n(x, t)$ i funkcije $f(x)$ zavisi da li ćemo imati uniformnu konvergenciju $\phi_n^*(x)$ ka $f(x)$ na $[a, b]$, tj. da li će $R_n(x) \rightarrow 0$, kada $n \rightarrow +\infty$, za svako $x \in [a, b]$. Tako, pod izvesnim uslovima za f , može se utvrditi uniformna konvergencija ka $f(x)$. Na primer, ako je težinska funkcija $p(x) = 1$, važi sledeća teorema:

Teorema 3.2.3. Ako $f \in C^2[-1, 1]$, tada za svako $x \in [-1, 1]$ i svako $\varepsilon > 0$ postoji dovoljno veliko n da je

$$|R_n(x)| = |f(x) - \phi_n^*(x)| \leq \varepsilon/\sqrt{n}.$$

Slično se za srednje-kvadratne aproksimacije sa Čebišev-jevom težinom $p(x) = (1-x^2)^{-1/2}$ može pokazati da je $|R_n(x)| = O(1/n)$ za svako $x \in [-1, 1]$.

Primer 3.2.2. U skupu polinoma ne višeg stepena od prvog, najbolja srednje-kvadratna aproksimacija za funkciju $x \mapsto \sin x$ na segmentu $[0, \pi/2]$ sa težinom $p(x) = 1$ je

$$\phi^*(x) = \frac{1}{\pi^2}(8\pi - 24) + \frac{1}{\pi^3}(96 - 24\pi)x.$$

Ukoliko se za težinsku funkciju uzme $p(x) = x$ dobija se

$$\phi^*(x) = \frac{1}{\pi^3}(384 - 120\pi) + \frac{1}{\pi^4}(384\pi - 1152).$$

6.3.3. Srednje-kvadratna aproksimacija sa ograničenjima

U ovom odeljku razmatraćemo srednje-kvadratne aproksimacije sa Gegenbauerovom težinskom funkcijom $x \mapsto p(x) = (1-x^2)^{\lambda - \frac{1}{2}}$ na $[-1, 1]$ za realne funkcije koje pripadaju izvesnim klasama funkcija, na primer,

$$FP = \{f \mid f(-x) = f(x), f(1) = 0, f \in L^2[-1, 1]\}$$

i

$$FN = \{ f \mid f(-x) = -f(x), f(1) = 0, f \in L^2[-1, 1] \},$$

pri čemu se aproksimacionim funkcijama nameću ograničenja takva da i one pripadaju istim klasama funkcija. Ovakve aproksimacije sa ograničenjima se često zahtevaju u primenama.

Primetimo, najpre, da je FP klasa parnih, a FN klasa neparnih funkcija, čije su vrednosti jednake nuli u tačkama $x=1$ i $x=-1$.

Mađa je moguće razmatrati i opštiji slučaj aproksimacije sa drugim težinskim funkcijama i sa nizom drugih ograničenja, u ovom odeljku, kao što je već rečeno, razmatraćemo samo slučaj kada je $p(x)$ Gegenbauerova težinska funkcija, i kada su ograničenja nad aproksimacionom funkcijom samo takva da pripada istoj klasici funkcija kao i funkcija f .

Dakle, skalarni proizvod je

$$(3.3.1) \quad (f, g) = \int_{-1}^1 p(x) f(x) g(x) dx \quad (p(x) = (1-x^2)^{\lambda - \frac{1}{2}}, \lambda > -\frac{1}{2}).$$

Neka je dalje \mathcal{P}_m skup svih algebarskih polinoma ne višeg stepena od m i takav da polinomi pripadaju skupu FP ako je m parno, a skupu FN ako je m neparno.

Za funkciju $f \in FP$ (ili FN) odredićemo sada srednje-kvadratnu aproksimaciju u klasi \mathcal{P}_{2n} (ili \mathcal{P}_{2n+1}) u odnosu na normu induciranu skalarnim proizvodom (3.3.1). Tako imamo da su aproksimacije ϕ_{2n} i ϕ_{2n+1} redom rešenja sledeća dva minimizaciona problema:

$$(3.3.2) \quad \min_{\phi \in \mathcal{P}_{2n}} \|f - \phi\|, \quad \text{kada } f \in FP,$$

i

$$(3.3.3) \quad \min_{\phi \in \mathcal{P}_{2n+1}} \|f - \phi\|, \quad \text{kada } f \in FN.$$

U opštem slučaju, kada f nije ni parna ni neparna funkcija, ali zadovoljava uslov $f(-1) = f(1) = 0$, srednje-kvadratna aproksimacija ψ_m (u klasi polinoma stepena ne višeg od m), koja zadovoljava uslove $\psi_m(-1) = \psi_m(1) = 0$, jednostavno se dobija kao

$$\psi_m(x) = \phi_{2n}(x) + \phi_{2n+1}(x), \quad \text{kada je } m=2n+1,$$

$$\psi_m(x) = \phi_{2n}(x) + \phi_{2n-1}(x), \quad \text{kada je } m=2n,$$

gde su ϕ_{2n} i ϕ_{2n+1} rešenja problema (3.3.2) i (3.3.3), što sleduje iz reprezentacije

$$f(x) = \frac{1}{2}(f(x) + f(-x)) + \frac{1}{2}(f(x) - f(-x)).$$

Izložićemo sada neke od rezultata do kojih su došli Milovanović i Wrigge ([27]).

Teorema 3.3.1. Ako $f \in FP$, tada je srednje-kvadratna aproksimacija u klasi \mathcal{P}_{2n} data sa

$$\phi_{2n}(x) = \Lambda(\lambda) \sum_{k=1}^n a_{n,k}(\lambda) (1-x^2)^k, \quad \Lambda(\lambda) = \frac{\Gamma(\lambda+1)}{\sqrt{\pi} \Gamma(\lambda + \frac{1}{2})},$$

gde su

$$a_{n,k}(\lambda) = \frac{(-1)^k}{(\lambda + \frac{1}{2})_{k+1}} \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^k}{(\lambda + \frac{1}{2})_{k+1}} \sum_{m=0}^n \frac{2^{m+\lambda}}{\lambda} (f, C_{2m}^\lambda) \alpha_{m,k}^{(n)}(\lambda) \quad (\lambda \neq 0),$$

i

$$\alpha_{n,k}^{(n)}(\lambda) = \begin{cases} -\binom{n}{k} (n+\lambda+1)_k (\lambda + \frac{1}{2}), & m < k, \\ \binom{m}{k} (m+\lambda)_k (\lambda+k+\frac{1}{2}) - \binom{n}{k} (n+\lambda+1)_k (\lambda + \frac{1}{2}), & m \geq k. \end{cases}$$

Kada je $\lambda=0$ imamo

$$a_{n,k}(0) = \frac{(-1)^k}{(\frac{1}{2})_{k+1}} \sum_{m=0}^n \theta_m (f, T_{2m}^0) \alpha_{m,k}^{(n)}(0),$$

gde je $\theta_0=1$ i $\theta_m=2$ za $m \geq 1$.

Primerba 3.3.1. Aproksimacija sa ograničenjem $\phi_{2n}(x)$ se može predstaviti u obliku

$$(3.3.4) \quad \phi_{2n}(x) = \check{\phi}_{2n}(x) - \check{\phi}_{2n}(1) \frac{S_0(x)}{S_0(1)} \quad (S_0(x) = \Lambda(\lambda) C_{2n}^{\lambda+1}(x)),$$

gde je $\check{\phi}_{2n}$ odgovarajuća srednje-kvadratna aproksimacija bez ograničenja (videti (3.2.3))

$$(3.3.5) \quad \check{\phi}_{2n}(x) = \sum_{k=0}^n \frac{(f, C_{2k}^\lambda)}{h_{2k}} C_{2k}^\lambda(x).$$

Ovde je h_{2k} kvadrat norme Gegenbauerovog polinoma $C_{2k}^\lambda(x)$, tj.

$$h_{2k} = \|C_{2k}^\lambda\|^2 = \frac{\lambda}{(2k+\lambda)\Lambda(\lambda)} C_{2k}^\lambda(1) \quad (\Lambda(\lambda) \text{ je definisano u teoremi}).$$

Dokaz teoreme 3.3.1. Neka $f \in FP$ i neka je $\lambda \neq 0$. U cilju nalaženja minimuma veličine $\|f - \phi_{2n}\|$ pod ograničenjem $\phi_{2n}(1) = 0$, predstavimo ϕ_{2n} kao linearnu kombinaciju Gegenbauerovih polinoma $C_{2k}^\lambda(x)$ i razmotrimo pomoćnu funkciju $D = D(d_0, d_1, \dots, d_n)$, definisanu pomoću

$$D = \int_{-1}^1 (f(x) - \sum_{k=0}^n d_k C_{2k}^\lambda(x))^2 p(x) dx + \mu \sum_{k=0}^n d_k C_{2k}^\lambda(1),$$

gde je μ Lagrangeov multiplikator, čiju vrednost treba odrediti. Drugim rečima, imamo tipičan zadatak uslovnog ekstremuma. Tada iz

$$\frac{\partial D}{\partial d_i} = -2(f, C_{2i}^\lambda) + 2h_{2i} d_i + C_{2i}^\lambda(1) = 0 \quad (i=0, 1, \dots, n)$$

sleđuje

$$(3.3.6) \quad d_i = \frac{1}{h_{2i}} \left\{ (f, C_{2i}^\lambda) - \frac{1}{2} \mu C_{2i}^\lambda(1) \right\} \quad (i=0, 1, \dots, n),$$

gde je h_{2i} kvadrat norme polinoma $C_{2i}^\lambda(x)$.

Na osnovu ograničenja $\phi_{2n}(1) = 0$ nalazimo da je

$$\frac{1}{2} \mu = \sum_{k=0}^n \frac{(f, C_{2k}^\lambda)}{h_{2k}} C_{2k}^\lambda(1) \Big/ \sum_{k=0}^n \frac{(C_{2k}^\lambda(1))^2}{h_{2k}}.$$

Korišćenjem Christoffel-Darbouxovog identiteta, ili pak rekurentne relacije

$$C_{2k+2}^{\lambda+1}(x) = C_{2k}^{\lambda+1}(x) + \frac{2k+2+\lambda}{\lambda} C_{2k+2}^\lambda(x),$$

može se dokazati identitet

$$(3.3.7) \quad S_0(x) = \sum_{k=0}^n \frac{C_{2k}^\lambda(x) C_{2k}^\lambda(1)}{h_{2k}} = \Lambda(\lambda) C_{2n}^{\lambda+1}(x),$$

na osnovu koga imamo da je

$$(3.3.8) \quad \frac{1}{2} \mu = \frac{\check{\phi}_{2n}(1)}{S_0(1)},$$

gde je $\check{\phi}_{2n}$ dato sa (3.3.5). Sada, primetimo da formula (3.3.4) sleđuje iz (3.3.5), (3.3.6) i (3.3.8).

Korišćenjem reprezentacije Gegenbauerovih polinoma pomoću hipergeometrijske funkcije (videti odeljak 2.2.13, I deo knjige) dobijamo

$$\check{\phi}_{2n}(x) = \sum_{m=0}^n \frac{(f, C_{2m}^\lambda)}{h_{2m}} C_{2m}(1) {}_2F_1(-m, m+\lambda; \lambda + \frac{1}{2}; 1-x^2)$$

i

$$S_0(x) = S_0(1) {}_2F_1(-n, n+\lambda+1; \lambda + \frac{3}{2}; 1-x^2),$$

tj.

$$\check{\phi}_{2n}(x) = \Lambda(\lambda) \sum_{m=0}^n \frac{2m+\lambda}{\lambda} (f, C_{2m}^\lambda) \sum_{k=0}^m (-1)^k \binom{m}{k} \frac{\binom{m+\lambda}{k}}{\binom{\lambda+\frac{1}{2}}{k}} (1-x^2)^k$$

$$= \Lambda(\lambda) \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (1-x^2)^k}{\binom{\lambda+\frac{1}{2}}{k}} \sum_{m=k}^n \frac{2m+\lambda}{\lambda} (f, C_{2m}^\lambda) \binom{m}{k} (m+\lambda)^k$$

i

$$\frac{S_0(x)}{S_0(1)} = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k \binom{n}{k}}{\binom{\lambda+\frac{3}{2}}{k}} \frac{\binom{n+\lambda+1}{k}}{\binom{\lambda+\frac{3}{2}}{k}} (1-x^2)^k.$$

Na osnovu prethodnog i formule (3.3.4) dobijamo tvrdjenje teoreme za $\lambda \neq 0$. Primetimo da je $a_{n,0}(\lambda) = 0$. Slučaj $\lambda = 0$ jednostavno se pokazuje prelaskom na graničnu vrednost kada $\lambda \rightarrow 0$.

Zadržaćemo se sada na poredjenju aproksimacija sa ograničenjem i bez ograničenja. Pre svega, primetimo da je $\phi_{2n}(x_k) = \check{\phi}_{2n}(x_k)$, gde je x_k proizvoljna nula polinoma $C_{2n}^{\lambda+1}$. Pod pretpostavkom da $f \in \mathcal{P}_{2n}$, definišimo

$$D^* = \min_{\phi \in \mathcal{P}_{2n}} \|f - \phi\|^2 = \|f - \phi_{2n}\|^2 \quad \text{i} \quad \check{D}^* = \min_{\phi \in \pi_{2n}} \|f - \phi\|^2 = \|\check{\phi}_{2n}\|^2,$$

gde je π_{2n} skup svih realnih polinoma stepena ne višeg od $2n$. Primetimo da je \mathcal{P}_{2n} podskup od π_{2n} . Korišćenjem standardnih izračunavanja i ograničenja $\phi_{2n}(1) = 0$, dobijamo

$$D^* = (f - \phi_{2n}, f - \phi_{2n}) = \|f\|^2 - \sum_{k=0}^n d_k^2 h_{2k} > 0,$$

gde je d_k dato sa (3.3.6) i (3.3.8). Primetimo takođe da važi sledeća jednakost:

Pomoću ovih formula, polinom (3.4.1) se može predstaviti u obliku

$$(3.4.2) \quad P_n(x) = c_0 T_0(x) + c_1 T_1(x) + \dots + c_n T_n(x).$$

Označimo sa \mathcal{P}_m skup svih algebarskih polinoma ne višeg stepena od m . Uzimajući samo prvih $m+1$ ($m < n$) članova u razvoju (3.4.2) dobijamo polinom

$$(3.4.3) \quad Q_m(x) = c_0 T_0(x) + c_1 T_1(x) + \dots + c_m T_m(x),$$

koji predstavlja aproksimaciju za P_n u skupu \mathcal{P}_m .

S obzirom da Čebiševljevi polinomi zadovoljavaju nejednakost $|T_k(x)| \leq 1$ ($-1 \leq x \leq 1$), za grešku aproksimacije važi

$$|P_n(x) - Q_m(x)| \leq |c_{m+1}| + \dots + |c_n| \quad (-1 \leq x \leq 1).$$

Navedeni postupak aproksimacije naziva se Lanczosova ekonomizacija. Sledeća teorema daje odgovor na pitanje o kakvoj se aproksimaciji radi.

Teorema 3.4.1. Polinom Q_m , određen sa (3.4.3) predstavlja u skupu \mathcal{P}_m najbolju srednje-kvadratnu aproksimaciju sa Čebiševljevom težinskom funkcijom $p(x) = (1-x^2)^{-\frac{1}{2}}$ za polinom P_n na segmentu $[-1, 1]$.

Dokaz. Ako stavimo

$$(f, g) = \int_{-1}^1 (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} f(x) g(x) dx,$$

na osnovu (3.4.2), vidimo da za koeficijente u razvoju (3.4.3) važi

$$(P_n, T_k) = c_k (T_k, T_k) \quad (k=0, 1, \dots, m),$$

odakle, upoređivanjem sa (3.2.5), sleduje tvrdjenje teoreme.

Na osnovu dokazane teoreme zaključujemo da je

$$\min_{p \in \mathcal{P}_m} \int_{-1}^1 (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} (P_n(x) - p(x))^2 dx = \int_{-1}^1 (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} (P_n(x) - Q_m(x))^2 dx.$$

U daljem tekstu navodimo dva primera.

Primer 3.4.1. Postupkom ekonomizacije aproksimirajmo $x \mapsto x^6$ ($|x| < 1$) pomoću polinoma ne višeg stepena od dva.

Kako je $x^6 = \frac{1}{32}(10T_0 + 15T_2 + 6T_4 + T_6)$, odsecanjem poslednja dva člana dobijamo polinom $Q_2(x) = \frac{10}{32} + \frac{15}{32}(2x^2 - 1) = \frac{15}{16}x^2 - \frac{5}{32}$, pri čemu je apsolutna greška manja od $\frac{7}{32}$, tj. važi $|x^6 - Q_2(x)| \leq \frac{7}{32}$ kada $x \in [-1, 1]$.

Na osnovu razvoja po Legendreovim polinomima (srednje-kvadratna aproksimacija sa težinom $p(x) = 1$), dobija se sledeća aproksimacija

$$x^6 \approx \frac{1}{7}P_0(x) + \frac{10}{21}P_2(x) = \frac{5}{7}x^2 - \frac{2}{21} \quad (-1 \leq x \leq 1)$$

sa apsolutnom greškom ne većom od $8/21$. Primetimo da je u ovom slučaju učinjena veća greška, jer je $8/21 > 7/32$. U primeru 3.6.2 (odeljak 6.3.6) videćemo da postoji polinom drugog stepena za koji je ova greška još manja, tačnije rečeno, najmanja.

Primer 3.4.2. Posmatrajmo aproksimaciju funkcije $x \mapsto e^x$ Taylorovim polinomom petog stepena, tj.

$$e^x \approx P_5(x) = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{24}x^4 + \frac{1}{120}x^5.$$

Za grešku ove aproksimacije, na segmentu $[-1, 1]$, važi ocenano

$$|E_5(x)| = |e^x - P_5(x)| = \frac{e^{\theta x} |x|^6}{720} < \frac{e}{720} < 0.0038,$$

s obzirom da $\theta \in (0, 1)$. Razvojem polinoma P_5 po Čebiševljevim polinomima dobijamo

$$P_5(x) = \frac{81}{64}T_0(x) + \frac{217}{192}T_1(x) + \frac{13}{48}T_2(x) + \frac{17}{384}T_3(x) + \frac{1}{192}T_4(x) + \frac{1}{1920}T_5(x)$$

odakle, odsecanjem poslednja dva člana, sleduje

$$Q_3(x) = \frac{1}{384}(382 + 383x + 208x^2 + 68x^3),$$

pri čemu za ukupnu grešku aproksimacije važi

$$|e^x - Q_3(x)| < \frac{e}{720} + \frac{1}{192} + \frac{1}{1920} \approx 0.0095 \quad (-1 \leq x \leq 1).$$

Ako bismo funkciju $x \mapsto e^x$ na segmentu $[-1, 1]$ direktno aproksimirali srednje-kvadratnom aproksimacijom sa Čebiševljevom težinom $p(x) = (1-x^2)^{-\frac{1}{2}}$, polinomom trećeg stepena, dobili bismo

$$e^x \approx 1.266066T_0 + 1.130318T_1 + 0.271495T_2 + 0.044337T_3,$$

tj.

$$e^x \approx 0.994571 + 0.997307x + 0.542990x^2 + 0.177348x^3.$$

Naime, koeficijenti u ovom razvoju su dati pomoću

$$a_k = \frac{(e^x, T_k)}{(T_k, T_k)} = \frac{1}{\|T_k\|^2} \int_{-1}^1 (1-x^2)^{-\frac{k}{2}} e^x T_k(x) dx = \frac{1}{\|T_k\|^2} \int_0^\pi e^{\cos\theta} \cos k\theta d\theta,$$

tj.

$$a_0 = I_0(1), \quad a_k = 2I_k(1) \quad (k=1, 2, 3),$$

gde su I_k modifikovane Besselove funkcije prve vrste (videti, na primer [28]).

6.3.5. Diskretna srednje-kvadratna aproksimacija

U prethodnim odeljcima proučavali smo problem najbolje aproksimacije funkcija u prostoru $L^2(a,b)$. Sada ćemo razmatrati jedan partikularni slučaj problema, sa kojim smo započeli uvodni odeljak 6.3.1. Naime, neka je funkcija $f: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}$ data na skupu parova vrednosti $\{(x_j, f_j)\}_{j=0,1,\dots,m}$, gde je $f_j \equiv f(x_j)$. Razmotrićemo problem najbolje aproksimacije ove funkcije linearnom aproksimacionom funkcijom

$$(3.5.1) \quad \phi(x) = \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x) \quad (n < m)$$

u smislu minimizacije norme (3.1.4), gde je $p: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}_+$ data težinska funkcija i δ_n definisano pomoću (3.1.2).

Ako uvedemo matricnu notaciju

$$X = \begin{bmatrix} \phi_0(x_0) & \phi_1(x_0) & \dots & \phi_n(x_0) \\ \phi_0(x_1) & \phi_1(x_1) & & \phi_n(x_1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_0(x_m) & \phi_1(x_m) & & \phi_n(x_m) \end{bmatrix}, \quad \vec{f} = \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix}, \quad \vec{a} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix},$$

$$P = \text{diag}(p(x_0), p(x_1), \dots, p(x_m)), \quad \vec{v} = \vec{f} - X\vec{a},$$

kvadrat norme, definisane pomoću (3.1.4), se može predstaviti u obliku

$$(3.5.2) \quad F = \|\delta_n\|_2^2 = \|\delta_n\|_2^2 = \sum_{j=0}^m p(x_j) \delta_n(x_j)^2 = \vec{v}^T P \vec{v}.$$

Za nalaženje najbolje diskretne srednje-kvadratne aproksimacije (3.5.1) potrebno je minimizirati veličinu F , definisanu pomoću (3.5.2). Tako, na osnovu

$$\frac{\partial F}{\partial a_i} = 2 \sum_{j=0}^m p(x_j) \delta_n(x_j) \frac{\partial \delta_n(x_j)}{\partial a_i} = 0 \quad (i=0,1,\dots,n)$$

dobijamo tzv. normalni sistem jednačina

$$(3.5.3) \quad \sum_{j=0}^m p(x_j) \delta_n(x_j) \phi_i(x_j) = 0 \quad (i=0,1,\dots,n)$$

za određivanje parametara a_i ($i=0,1,\dots,n$). Shodno uvedenim oznakama, poslednji sistem jednačina se može predstaviti u matricnom obliku

$$X^T P \vec{v} = \vec{0},$$

tj.

$$(3.5.4) \quad X^T P X \vec{a} = X^T P \vec{f}.$$

Primitimo da se normalni sistem jednačina (3.5.3), tj. (3.5.4), dobija iz preodređenog sistema jednačina (3.1.1), predstavljenog u matricnom obliku

$$X \vec{a} = \vec{f},$$

jednostavnim množenjem matricom $X^T P$ sa leve strane.

Dijagonalna matrica P , koja se naziva težinskom matricom, ima smisao takav da se vrednostima funkcije f_j sa većom tačnošću dodeljuju veće težine $p_j = p(x_j)$. Ovo je posebno važno kod aproksimacije eksperimentalnih podataka, koji su prilikom merenja dobijeni sa različitim tačnošću. Na primer, ako su merenja izvedena sa različitim disperzijama čiji je odnos poznat, to se težine p_j biraju obrnuto proporcionalno disperzijama, tj. tako da je

$$P_0 : P_1 : \dots : P_m = \frac{1}{\sigma_0^2} : \frac{1}{\sigma_1^2} : \dots : \frac{1}{\sigma_m^2}.$$

Ako su, pak, merenja izvedena sa istom tačnošću, ali je pri svakoj vrednosti argumenta x_j izvedena serija od m_j merenja, i za f_j uzeta aritmetička sredina dobijenih rezultata u seriji, to

se za težine uzima broj merenja u seriji, tj. $p_j = m_j$ ($j=0, 1, \dots, m$). Najčešće se, međutim uzima da su sve težine jednake, tj. da je P jedinična matrica reda $m+1$. U tom slučaju (3.5.4) se svodi na

$$(3.5.5) \quad X^T X \vec{a} = X^T \vec{f}.$$

Vektor traženih koeficijenata \vec{a} određujemo iz (3.5.4), odnosno (3.5.5). Na primer, iz (3.5.5) sleduje

$$\vec{a} = (X^T X)^{-1} X^T \vec{f}.$$

U slučaju da je sistem bazisnih funkcija izabran kao $\phi_i(x) = x^i$ ($i=0, 1, \dots, n$) imamo

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & & x_1^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_m & x_m^2 & & x_m^n \end{bmatrix}.$$

Posmatrani slučaj diskretne srednje-kvadratne aproksimacije vrlo često se naziva metod najmanjih kvadrata. Posebno je interesantan slučaj kada je $n=1$, tj. kada je aproksimaciona funkcija oblika $\phi(x) = a_0 + a_1 x$. Tada sistem jednačina (3.5.4) postaje

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix},$$

gde su

$$s_{11} = \sum_{j=0}^m p_j, \quad s_{12} = s_{21} = \sum_{j=0}^m p_j x_j, \quad s_{22} = \sum_{j=0}^m p_j x_j^2,$$

$$b_0 = \sum_{j=0}^m p_j f_j, \quad b_1 = \sum_{j=0}^m p_j x_j f_j.$$

Traženi aproksimacioni parametri su tada

$$a_0 = \frac{1}{D}(s_{22}b_0 - s_{12}b_1), \quad a_1 = \frac{1}{D}(s_{11}b_1 - s_{21}b_0),$$

gde je $D = s_{11}s_{22} - s_{12}^2$.

Primer 3.5.1. Metodom najmanjih kvadrata nadjimo parametre a_0 i a_1 u aproksimacionoj funkciji $\phi(x) = a_0 + a_1 x$ za sledeći skup parova

$\{(1.1, 2.5), (1.9, 3.2), (4.2, 4.5), (6.1, 6.0)\}$.

Uzmimo da je težinska matrica P jednaka jediničnoj matrici. Ovdje možemo direktno iskoristiti prethodne formule. Međutim, ne zavisno od toga, krenimo od preodređenog sistema jednačina

$$\begin{bmatrix} 1 & 1.1 \\ 1 & 1.9 \\ 1 & 4.2 \\ 1 & 6.1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.5 \\ 3.2 \\ 4.5 \\ 6.0 \end{bmatrix}.$$

Množenjem matricom $X^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.1 & 1.9 & 4.2 & 6.1 \end{bmatrix}$ sa leve strane do-

lazimo do normalno sistema jednačina

$$\begin{bmatrix} 4 & 13.3 \\ 13.3 & 59.67 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16.2 \\ 64.33 \end{bmatrix}$$

odakle je

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{61.79} \begin{bmatrix} 59.67 & -13.3 \\ -13.3 & 4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 16.2 \\ 64.33 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.7974591 \\ 0.6774559 \end{bmatrix}.$$

Dakle, $\phi(x) \approx 1.797 + 0.677x$.

U slučaju kada je $n > 1$, metod najmanjih kvadrata postaje komplikovan, s obzirom da se tada teže rešava dobijeni sistem linearnih jednačina. Ovaj sistem bi se mogao jednostavno rešiti ako je, na primer, njegova matrica dijagonalna, što će biti slučaj kada je $\{\phi_k\}$ ortogonalan sistem polinoma. Naravno, ovde se radi o diskretnim ortogonalnim polinomima koji su tretirani u odeljku 2.2.15, I deo knjige. Dakle, treba uzeti $\phi_k(x) = Q_k^{(N)}(x)$ ($k=0, 1, \dots, N$), gde je $N-1=m$ i skalarni proizvod definisan pomoću

$$(f, g) = [f, g]_N = \sum_{i=0}^{N-1} p_i f(x_i) g(x_i).$$

Kao što je poznato, niz ortogonalnih polinoma je moguće dobiti Stieltjesovom procedurom, tj. moguće je odrediti koeficijente $\beta_k^{(N)}$ i $\gamma_k^{(N)}$ u rekurentnoj relaciji (2.15.5) (odeljak 2.2.15).

Slično izvodjenju kontinualne srednje-kvadratne aproksimacije dobijamo aproksimacionu funkciju u obliku

$$\phi(x) = \sum_{i=0}^n a_i Q_i^{(N)}(x),$$

gde su aproksimacioni parametri dati sa

$$a_k = \frac{[f, Q_k^{(N)}]_N}{\|Q_k^{(N)}\|^2} \quad (k=0, 1, \dots, n) \quad (3.5.6)$$

Posebno, kada su tačke x_i ekvidistantne (što ne umanjujući opštost može da se uzme $x_i = i$ ($i=0, 1, \dots, N-1$)) i težine jednake međusobno (na primer, $p_i = 1/N$), imamo slučaj tzv. diskretnih Čebiševljevih polinoma, kod kojih su koeficijenti tročlane rekurentne relacije eksplicitno poznati (videti odeljak 2.2.15). Srednje-kvadratne aproksimacije se u tom slučaju jednostavno nalaze.

Primer 3.5.2. U skupu polinoma ne višeg stepena od trećeg nadjimo srednje-kvadratnu aproksimaciju za funkciju $t \mapsto \sin \pi t$ na $[-1, 1]$ korišćenjem njenih vrednosti u tačkama $t_0 = -1$, $t_1 = -0.5$, $t_2 = 0$, $t_3 = 0.5$ i $t_4 = 1$. Kako su vrednosti argumenta ekvidistantne, pri određivanju aproksimacije možemo koristiti diskretne Čebiševljeve polinome, uz prethodno uvođenje smene $x = 2(t+1)$. Tada se tačke t_i preslikavaju na tačke $x_i = i$ ($i=0, 1, 2, 3, 4$). Odgovarajuće vrednosti funkcije su redom $f_0 = 0$, $f_1 = -1$, $f_2 = 0$, $f_3 = 1$, $f_4 = 0$. Tada imamo da je

$$(3.5.7) \quad s_k = [f, Q_k^{(5)}]_5 = \frac{1}{5} (Q_k^{(5)}(3) - Q_k^{(5)}(1)),$$

gde su ortogonalni polinomi $Q_k^{(5)}(x)$ (videti primer 2.15.1, odeljak 2.2.15) dati pomoću

$$Q_0^{(5)}(x) = 1, \quad Q_1^{(5)}(x) = x - 2, \quad Q_2^{(5)}(x) = x^2 - 4x + 2,$$

$$Q_3^{(5)}(x) = x^3 - 6x^2 + \frac{43}{5}x - \frac{6}{5}, \quad \text{itd.}$$

Kako je $\|Q_k^{(5)}\|^2 = \gamma_0^{(5)} \gamma_1^{(5)} \dots \gamma_k^{(5)}$, gde su koeficijenti rekurentne relacije $\gamma_0^{(5)} = 1$, $\gamma_1^{(5)} = 2$, $\gamma_2^{(5)} = 7/5$, $\gamma_3^{(5)} = 36/35$, korišćenjem (3.5.7) i (3.5.6) dobijamo sledeće rezultate:

$$\|Q_0^{(5)}\|^2 = 1, \quad \|Q_1^{(5)}\|^2 = 2, \quad \|Q_2^{(5)}\|^2 = 14/5, \quad \|Q_3^{(5)}\|^2 = 72/25;$$

$$s_0 = 0, \quad s_1 = 2/5, \quad s_2 = 0, \quad s_3 = -24/25;$$

$$a_0 = 0, \quad a_1 = 1/5, \quad a_2 = 0, \quad a_3 = -1/3.$$

Prema tome, tražena aproksimacija je

$$\phi(x) = \frac{1}{5}(x-2) - \frac{1}{3}(x^3 - 6x^2 + \frac{43}{5}x - \frac{6}{5}),$$

što vraćanjem na staru promenljivu t daje

$$\sin \pi t = \psi(t) = \phi(2t+2) = \frac{8}{3}(t-t^3).$$

U mnogim oblastima nauke i tehnike gde se radi sa eksperimentalnim podacima, često se javlja problem određivanja parametara u tzv. empirijskim formulama koje izražavaju funkcionalnu zavisnost između dve ili više veličina. Na primer, neka je funkcionalna zavisnost data pomoću

$$y = f(x; a_0, a_1, \dots, a_n),$$

gde su a_i ($i=0, 1, \dots, n$) parametri koje treba odrediti na osnovu tablice vrednosti funkcije dobijene merenjem:

x	x_0	x_1	...	x_m
y	y_0	y_1	...	y_m

Naravno, dobijeni eksperimentalni podaci su opterećeni slučajnim greškama merenja ili, kako se popularno kaže, prisustvom "šuma" u eksperimentu. Određjivanje parametara a_i ($i=0, 1, \dots, n$) je sa stanovišta teorije aproksimacija moguće samo ako je $m \geq n$. Jasno je da u slučaju $m=n$ imamo interpolaciju, koja je u opštem slučaju nelinearna, što zavisi od oblika funkcije f . Dakle, ovde imamo tipičan aproksimacioni problem, gde je f aproksimaciona funkcija. Zbog prisustva pomenutog "šuma" u podacima, određivanje aproksimacionih parametara sa većom tačnošću (i pouzdanošću) zahteva veću količinu informacija o funkcionalnoj zavisnosti f , tj. veći broj podataka u prethodnoj tabeli. Najčešće se određivanje parametara sprovodi metodom najmanjih kvadrata, tj. minimizacijom veličine F definisane pomoću

$$(3.5.8) \quad F = \sum_{j=0}^m (y_j - f(x_j; a_0, a_1, \dots, a_n))^2,$$

ili pomoću

$$F = \sum_{j=0}^m p_j (y_j - f(x_j; a_0, a_1, \dots, a_n))^2,$$

gde su uključene težine p_j , o čijem izboru je bilo reči ranije.

Ako je funkcionalna veza od više promenljivih, na primer,

$$z = f(x, y; a_0, a_1, \dots, a_n),$$

za određivanje aproksimacionih parametara se minimizira veličina

$$F = \sum_{j=0}^m p_j (z_j - f(x_j, y_j; a_0, a_1, \dots, a_n))^2.$$

Ako je f linearna aproksimaciona funkcija (po parametrima a_0, a_1, \dots, a_n), tj. oblika (3.5.1), problem se rešava na način kako je to već ranije izloženo. Međutim, ako je f nelinearna aproksimaciona funkcija, tada je odgovarajući normalni sistem jednačina

$$(3.5.9) \quad \frac{\partial F}{\partial a_i} = 0 \quad (i=0, 1, \dots, n)$$

nelinearan. Za njegovo rešavanje se tada zahteva primena nekog metoda, poput metoda Newton-Kantoroviča (videti odeljak 5.2.2, I deo knjige), čime se postupak određivanja aproksimacionih parametara dosta komplikuje. U cilju lakšeg i bržeg određivanja parametara postoje neki uprošćeni metodi transformacije ovakvih problema na linearne aproksimacione probleme. Naime, osnovna ideja je da se uvođenjem izvesnih smena

$$(3.5.10) \quad X = g(x), \quad Y = h(y)$$

nelinearni problem svede na linearni.

Na primer, neka je $y = f(x; a_0, a_1) = a_0 e^{a_1 x}$. Tada, logaritmovanjem i uvođenjem smena

$$X = x, \quad Y = \log Y, \quad b_0 = \log a_0, \quad b_1 = a_1,$$

problem se svodi na linearan, jer je sada $Y = b_0 + b_1 X$. Dakle, minimizacijom veličine ($p_j = 1$)

$$(3.5.11) \quad G = G(b_0, b_1) = \sum_{j=0}^m (y_j - b_0 - b_1 x_j)^2,$$

gde su $X_j = x_j$ i $Y_j = \log y_j$ ($j=0, 1, \dots, n$), određujemo parametre b_0

i b_1 , a zatim

$$a_0 = e^{b_0} \quad \text{i} \quad a_1 = b_1.$$

Ovakav postupak, međutim, ne dovodi do istih parametara koji se dobijaju minimizacijom funkcije

$$F = F(a_0, a_1) = \sum_{j=0}^m (y_j - a_0 e^{a_1 x_j})^2.$$

Štaviše, dobijene vrednosti mogu i znatno da odstupaju. Ova činjenica nastupa zato što se rešava problem različit od postavljenog, imajući u vidu nelinearnu transformaciju koju smo izvršili ($Y = \log y$). Međutim, za mnoge potrebe ovako dobijeni parametri su zadovoljavajući.

Navešćemo sada još neke tipične funkcionalne zavisnosti gde je moguća jednostavna transformacija promenljivih:

$$1^{\circ} \quad y = a_0 x^{a_1}, \quad X = \log x, \quad Y = \log y, \quad b_0 = \log a_0, \quad b_1 = a_1;$$

$$2^{\circ} \quad y = \frac{1}{a_0 + a_1 x}, \quad X = x, \quad Y = \frac{1}{y}, \quad b_0 = a_0, \quad b_1 = a_1;$$

$$3^{\circ} \quad y = \frac{x}{a_0 + a_1 x}, \quad X = \frac{1}{x}, \quad Y = \frac{1}{y}, \quad b_0 = a_0, \quad b_1 = a_1;$$

$$4^{\circ} \quad y = \frac{1}{a_0 + a_1 e^{-x}}, \quad X = e^{-x}, \quad Y = \frac{1}{y}, \quad b_0 = a_0, \quad b_1 = a_1.$$

Primer 3.5.3. Neka su rezultati merenja veličina x i y dati u tabeli

x	4.48	4.98	5.60	6.11	6.62	7.42
y	4.15	1.95	1.31	1.03	0.74	0.63

i neka je $Y = \frac{1}{a_0 + a_1 X}$ (oblik 2^o). Tada uvodjenjem smene $X=x$, $Y=1/y$, nalazimo metodom najmanjih kvadrata aproksimacionu funkciju $\phi(X) \approx 0.468X - 1.843$, odakle je

$$Y \approx \frac{1}{0.468x - 1.843}.$$

Na osnovu prethodnog može se zaključiti da u zavisnosti od f treba odabrati pogodnu smenu (3.5.10) koje bi omogućile da se

$$Y = f(x; a_0, a_1, \dots, a_n)$$

svede na linearan oblik, na primer, polinomskog tipa

$$(3.5.12) \quad Y = b_0 + b_1 X + \dots + b_n X^n.$$

Jasno je da funkcije g i h moraju imati inverzne funkcije, tako da je (3.5.12), u stvari, ekvivalentno sa

$$h^{-1}(Y) = f(g^{-1}(X); a_0, a_1, \dots, a_n),$$

pri čemu parametri b_i zavise od parametara a_i na relativno jednostavan način.

Pokazaćemo sada kako se upotrebom težina mogu dobiti tačnije vrednosti parametara a_i , nego što ih daje minimizacija funkcije

$$(3.5.13) \quad G = \sum_{j=0}^m (Y_j - b_0 - b_1 X_j - \dots - b_n X_j^n)^2.$$

Naime, podjimo od formule (3.5.8) napisane u obliku

$$(3.5.14) \quad F = \sum_{j=0}^m (h^{-1}(Y_j) - h^{-1}(b_0 + b_1 X_j + \dots + b_n X_j^n))^2$$

i pretpostavimo da je funkcija h diferencijabilna i strogo monotona. Tada za izvod inverzne funkcije važi

$$\frac{dh^{-1}(Y)}{dY} = \frac{1}{h'(Y)}$$

Primenom Lagrangeove teoreme ζ s dnujoj vrednosti, (3.5.14) se svodi na

$$(3.5.15) \quad F = \sum_{j=0}^m P_j (Y_j - b_0 - b_1 X_j - \dots - b_n X_j^n)^2,$$

gde je $P_j = \left(\frac{dh^{-1}(\eta_j)}{dY} \right)^2$ i η_j tačka između Y_j i $\bar{Y}_j (= b_0 + b_1 X_j + \dots + b_n X_j^n)$ ($j=0, 1, \dots, m$). Pretpostavljajući da su odstupanja Y_j od \bar{Y}_j mala, može se približno uzeti $\eta_j = Y_j$, tj.

$$P_j = \left(\frac{dh^{-1}(y_j)}{dy} \right)^2 = \left(\frac{1}{h'(y_j)} \right)^2.$$

Prema tome, tačniji parametri će se dobiti ako se umesto (3.5.13), minimizira (3.5.15), sa prethodno dobijenim težinama. Tako u slučaju eksponencijalne funkcije $y = a_0 e^{a_1 x}$, umesto minimizacije (3.5.11), treba minimizirati veličinu

$$\sum_{j=0}^m y_j^2 (y_j - b_0 - b_1 x_j)^2,$$

jer je $h(y) = \log y$, tj. $h'(y_j) = 1/y_j$. Naravno, ni u ovom slučaju se ne dobijaju apsolutno tačni rezultati, koji odgovaraju rešenju normalnog (nelinearnog) sistema jednačina (3.5.9).

Korišćenjem ovako dobijenih vrednosti parametara \tilde{a}_i ($i=0, 1, \dots, n$) možemo konstruisati iterativni proces koji će konvergirati ka tačnim vrednostima parametara \bar{a}_i ($i=0, 1, \dots, n$). Ako sa $a^{(k)} = (a_0^{(k)}, a_1^{(k)}, \dots, a_n^{(k)})$ označimo tačku približnih vrednosti parametara u k -toj iteraciji, i startujemo sa $a_i^{(k)} := \tilde{a}_i$ ($i=0, 1, \dots, n$), iterativni proces će biti oblika

$$a_i^{(k+1)} = a_i^{(k)} + \alpha_i^{(k)} \quad (i=0, 1, \dots, n),$$

gde korekcije $\alpha_i^{(k)}$ određujemo minimizacijom funkcije

$$F_k(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) = \sum_{j=0}^m (z_j - \sum_{v=0}^n A_v^{(j)} \alpha_v)^2.$$

Funkciju F_k definišemo kao sumu kvadrata grešaka linearizovane funkcije. Linearizaciju sprovodimo razvojem funkcije $f(x_j; \bar{a})$, gde je $\bar{a} = (\bar{a}_0, \bar{a}_1, \dots, \bar{a}_n)$, u okolini tačke $a^{(k)}$, uz zadržavanje samo linearnih članova, tj.

$$f(x_j; \bar{a}) \approx f(x_j; a^{(k)}) + \sum_{v=0}^n A_v^{(j)} (\bar{a}_v - a_v^{(k)}),$$

gde je $A_v^{(j)}$ parcijalni izvod od $f(x_j; \bar{a})$ po a_v u tački $a^{(k)}$. U definiciji F_k nije teško primetiti da je $z_j = y_j - f(x_j; a^{(k)})$ ($j=0, 1, \dots, n$).

6.3.6. Čebiševljeva mini-max aproksimacija

U ovom odeljku daćemo osnovne rezultate koji se odnose na mini-max aproksimaciju funkcije $f \in C[a, b]$ algebarskim polinomima. Dobar deo tih rezultata može biti prenet i na opštije tipove aproksimacionih funkcija.

Sa \mathcal{P}_n označavaćemo skup svih algebarskih polinoma ne višeg stepena od n . Pred nama se postavlja problem određivanja polinoma $P_n = P_n^*(\epsilon \mathcal{P}_n)$, koji minimizira normu $\|f - P_n\|_\infty$ (videti odeljak 6.1.3). Dakle, treba rešiti sledeći minimizacioni problem

$$E_n(f) = \min_{P_n \in \mathcal{P}_n} \left(\max_{a \leq x \leq b} |f(x) - P_n(x)| \right) = \max_{a \leq x \leq b} |f(x) - P_n^*(x)|.$$

$E_n(f)$ je veličina najbolje aproksimacije.

Algebarski polinomi su veoma dobri aproksimacioni elementi na konačnom segmentu $[a, b]$ (videti Weierstrassovu i Bernsteinovu teoremu, odeljak 6.1.4) i zato se vrlo često koriste u mini-max aproksimacijama, ali i u aproksimacijama uopšte. Weierstrassova teorema daje egzistenciju polinoma dovoljno visokog stepena koji proizvoljno malo odstupa od neprekidne funkcije na $[a, b]$. Sledeća teorema, međutim, daje kriterijum na osnovu koga se može tvrditi da li je neki polinom najbolja mini-max aproksimacija date neprekidne funkcije na $[a, b]$ u klasi algebarskih polinoma \mathcal{P}_n .

Teorema 3.6.1. Polinom P_n^* je najbolja mini-max aproksimacija za $f \in C[a, b]$ u skupu \mathcal{P}_n ako i samo ako na $[a, b]$ postoje $n+2$ tačke x_0, x_1, \dots, x_{n+1} ($x_0 < x_1 < \dots < x_{n+1}$), takve da je

$$(3.6.1) \quad \delta_n^*(x_k) = -\delta_n^*(x_{k+1}) = \pm \|\delta_n^*\|_\infty = \pm E_n(f),$$

pri čemu je $\delta_n^*(x) = f(x) - P_n^*(x)$.

Dokaz egzistencije i jedinstvenosti polinoma P_n^* može se naći, na primer u [38]. Koristeći se Weierstrassovom teoremom 1.4.1, može se dokazati da $E_n(f) \rightarrow 0$, kada $n \rightarrow +\infty$.

Ako za neki polinom n -tog stepena postoje $n+2$ tačke sa svojstvom (3.6.1), kažemo da ima Čebiševljevu alternansu za f . Ako je $\epsilon_k = (-1)^{k+1}$, svojstvo (3.6.1) se može izraziti u obliku

$$(3.6.2) \quad \delta_n^*(x_0) + \varepsilon_k \delta_n^*(x_k) = 0 \quad (k=1, \dots, n+1).$$

Primer 3.6.1. Neka je $x \mapsto f(x) = x^{n+1}$ ($|x| \leq 1$) i neka je

$$\delta_n(x) = x^{n+1} - P_n(x),$$

gde je $P_n(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$. Kako iz uslova $T_{n+1}(x) = \cos[(n+1)\arccos x]$ $= \pm 1$, sleduje $x_k = -\cos \frac{k\pi}{n+1}$ ($k=0, 1, \dots, n+1$), pri čemu je $-1 = x_0 < x_1 < \dots < x_{n+1} = 1$, zaključujemo da na $[-1, 1]$ postoje $n+2$ tačke u kojima je $T_{n+1}(x_k) = (-1)^{n+k+1}$ ($k=0, 1, \dots, n+1$).

Ako stavimo $\delta_n^*(x) = \frac{1}{2^n} T_{n+1}(x)$, vidimo da je $|\delta_n^*(x)| \leq \frac{1}{2^n}$ ($|x| \leq 1$) i da $\delta_n^*(x_k) = \frac{1}{2^n} (-1)^{n+k+1}$ zadovoljava (3.6.2).

Na osnovu prethodnog i teoreme 3.6.1 zaključujemo da se najbolji mini-max polinom P_n^* za funkciju $x \mapsto f(x) = x^{n+1}$ ($|x| \leq 1$) može dobiti iz jednakosti

$$x^{n+1} - P_n^*(x) = \frac{1}{2^n} T_{n+1}(x).$$

Dakle,

$$P_n^*(x) = x^{n+1} - \frac{1}{2^n} T_{n+1}(x).$$

U specijalnom slučaju, za $n=1, 2, 3$ imamo

$$x^2 \sim P_1^*(x) = \frac{1}{2}, \quad x^3 \sim P_2^*(x) = \frac{3}{4}x, \quad x^4 \sim P_3^*(x) = x^2 - \frac{1}{8}.$$

Primetimo da se kod aproksimacije funkcije $x \mapsto x^{n+1}$ ($|x| \leq 1$) u skupu \mathcal{P}_n , mini-max aproksimacijom i srednje-kvadratnom aproksimacijom sa težinom $(1-x^2)^{-1/2}$, dobijaju isti aproksimacioni polinomi.

Primer 3.6.2. U skupu \mathcal{P}_2^6 odredimo najbolju mini-max aproksimaciju za $x \mapsto f(x) = x^6$ ($|x| \leq 1$). Za određivanje koeficijenata polinoma najbolje mini-max aproksimacije $P_2^*(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$, potrebno je naći $n+2=4$ tačke x_0, x_1, x_2, x_3 , takve da je

$$(3.6.3) \quad \delta_2^*(x_0) = -\delta_2^*(x_1) = \delta_2^*(x_2) = -\delta_2^*(x_3) = \pm \Delta,$$

gde su $\delta_2^*(x) = x^6 - P_2^*(x)$ i $\Delta = E_2(f) = \max_{|x| \leq 1} |\delta_2^*(x)|$.

Zbog simetrije problema može se uzeti $a_1 = 0$, a za tačke x_k ($k=0, 1, 2, 3$), na primer, $x_0 = -t$, $x_1 = 0$, $x_2 = t$, $x_3 = 1$, gde je t ($0 < t < 1$) tačka u kojoj δ_2^* dostiže ekstremnu vrednost. Dakle, t je pozitivan koren jednačine $6t^5 - 2a_2t = 0$.

Kako je, na osnovu (3.6.3),

$$a_0 = t^6 - (a_0 + a_2 t^2) = a_0 + a_2^{-1},$$

lako nalazimo $a_2 = 1$ i $a_0 = -\frac{\sqrt{3}}{9}$. Prema tome, najbolja mini-max aproksimacija za $x \mapsto x^6$ ($|x| \leq 1$) u skupu \mathcal{P}_2 je

$$P_2^*(x) = x^2 - \frac{\sqrt{3}}{9},$$

pri čemu je veličina najbolje aproksimacije (maksimalno odstupanje) $\Delta = \|\delta_2^*\|_{\infty} E_2(f) = \frac{\sqrt{3}}{9} \approx 0.19245$.

Primer 3.6.3. Istim postupkom kao u prethodnom primeru, nalazi se najbolji mini-max polinom u skupu \mathcal{P}_2 za funkciju $x \mapsto f(x) = |x|$ ($|x| \leq 1$), $P_2^*(x) = 1/8 + x^2$, pri čemu je $\Delta = \|f - P_2^*\|_{\infty} = 1/8$.

Oslanjajući se na teoremu 3.6.1 konstruišu se algoritmi za određivanje najbolje mini-max aproksimacije date funkcije. Jedan od najprikladnijih algoritama je Remesov algoritam. Jedna varijanta Remesovog algoritma se može iskazati na sledeći način:

1° Izabere se skup od $n+2$ sukcesivne tačke x_0, x_1, \dots, x_{n+1} sa segmenta $[a, b]$ i odrede se koeficijenti polinoma P_n i veličina E tako da je

$$(3.6.4) \quad f(x_k) - P_n(x_k) = (-1)^k E \quad (k=0, 1, \dots, n+1).$$

2° Na $[a, b]$ se odredi skup od $n+2$ tačke $\hat{x}_0, \hat{x}_1, \dots, \hat{x}_{n+1}$ u kojima $\delta_n(x) = f(x) - P_n(x)$ ima sukcesivne lokalne ekstremume sa alternativnim znacima, uključujući u ovaj skup tačku u kojoj veličina $|\delta_n(x)|$ ima najveću vrednost na $[a, b]$.

3° Za unapred zadatu tačnost ϵ proveravaju se uslovi $|\hat{x}_k - x_k| < \epsilon$ ($k=0, 1, \dots, n+1$). Ukoliko bar jedan od ovih uslova nije

zadovoljen, uzima se $\hat{x}_k := \hat{x}_k$ ($k=0, 1, \dots, n+1$) i prelazi na l^0 . U slučaju da su pomenuti uslovi ispunjeni, algoritam se završava i polinom P_n se uzima kao najbolja mini-max aproksimacija P_n^* .

S obzirom da se teorema 3.6.1 (o Čebiševljevoj alternansi) može formulisati i za neke opštije tipove aproksimacionih funkcija, kakve su, na primer, linearna aproksimaciona funkcija i racionalna aproksimaciona funkcija, Remesov algoritam se može primeniti i u tim slučajevima. Primetimo da u slučaju kada imamo nelinearnu aproksimacionu funkciju, sistem jednačina (3.6.4) postaje nelinearan i obično se tada rešava metodom Newton-Kantoroviča. Pri ovome se po metodu Newton-Kantoroviča, u cilju skraćivanja numeričkog rada, najčešće izvodi samo nekoliko prvih koraka.

Vrlo često se za nalaženje mini-max aproksimacije, problem zamenjuje odgovarajućim diskretnim mini-max problemom. Naime, segment $[a, b]$ se zamenjuje diskretnim skupom tačaka $I_m = \{x_0, x_1, \dots, x_m\}$, gde je $m \gg n$. Neka je aproksimaciona funkcija linearna, tj.

$$\phi(x) = a_0 \phi_0(x) + a_1 \phi_1(x) + \dots + a_n \phi_n(x).$$

Mini-max problem

$$\min_{a_i} \left(\max_{0 \leq k \leq m} \left| f(x_k) - \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x_k) \right| \right) = \max_{0 \leq k \leq m} \left| f(x_k) - \sum_{i=0}^n \bar{a}_i \phi_i(x_k) \right|$$

može se zameniti ekvivalentnim problemom:

Naći $\min w$
pod ograničenjima

$$w + \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x_k) \geq f(x_k)$$

$$(k=0, 1, \dots, m).$$

$$w - \sum_{i=0}^n a_i \phi_i(x_k) \geq -f(x_k)$$

Dobijeni problem linearnog programiranja, može se rešiti primenom simplex metoda na dualni problem ([4]):

$$\text{Naći } \max \left(\sum_{k=0}^m (s_k - t_k) f(x_k) \right)$$

pod ograničenjima

$$\sum_{k=0}^m (s_k + t_k) \leq 1,$$

$$\sum_{k=0}^m (s_k - t_k) \phi_i(x_k) = 0 \quad (i=0, 1, \dots, n),$$

$$s_k \geq 0, \quad t_k \geq 0 \quad (k=0, 1, \dots, m).$$

O nekim algoritamskim modifikacijama za rešavanje poslednjeg problema može se naći u [5], dok se o aproksimaciji pomoću racionalnih funkcija može se naći u radu [3].

6.4. LITERATURA

1. N.I. Ahiezer: Lekcii po teorii aprksimacii. Gostehizdat, Moskva, 1947.
2. J.H. Ahlberg, E.N. Nilson, J.L. Walsch: The theory of splines and their applications. Academic Press, New York, 1967.
3. I. Barrodale: *Best rational approximation and strict quasi-converity*. SIAM J. Numer. Anal. 10(1973), 8-12.
4. I. Barrodale: *Basic approximation theory*. In: Numerical solution of integral equations (L.M. Delves & J. Walsh, eds.), 54-62, Clarendon Press, Oxford, 1974.
5. I. Barrodale & C. Phillips: *Solution of an over-determined system of linear equation in Chebyshev norm*. Preprint, Dept. of Computational and Statistical Science. University of Liverpool, 1973.
6. K. Böhmer: Spline-Funktionen. B.G. Teubner, Stuttgart, 1974.
7. H. Brass: *Approximation durch Teilsummen von Orthogonalpolynomreihen*. In: Numerical Methods of Approximation Theory (L. Collatz, G. Meinardus, H. Werner, Eds.), 69-83, ISNM 52, Birkhäuser, Basel, 1980.
8. H. Brass: *Error estimates for least squares approximation by polynomials*. J. Approx. Theory 41(1984), 345-349.
9. L. Collatz und W. Krabs: *Approximationstheorie*. Tschebyscheffsche Approximation with Anwendungen. B.G. Teubner, Stuttgart, 1973.
10. J.W. Cooley, P.A.W. Lewis, P.D. Welch: *Historical notes on the fast Fourier transform*. Proc. IEEE 55(1967), 1675-1677.
11. J.W. Cooley & J.W. Tukey: *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*. Math. Comp. 19(1965), 297-301.
12. R. Courant: *Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations*. Bull. Amer. Math. Soc. 49(1943), 1-23.
13. I.K. Daugavet: *Vvedenie v teoriiu približenija funkcii*. Izd.

- Leningradskogo Universiteta, Leningrad, 1977.
14. P. J. Davis: Interpolation and approximation. Blaisdell Publ. Company, New York, 1963.
 15. B. P. Demidovič & I. A. Maron: Computational Mathematics. Mir Publishers, Moscow, 1973.
 16. G. Goertzel: *An algorithm for the evaluation of finite trigonometric series*. Amer. Math. Monthly 65(1958).
 17. R. P. Feinerma & D. J. Newman: Polynomial approximation. The Williams & Wilkins Company, Baltimore, 1974.
 18. L. Fox & I. B. Parker: Chebyshev polynomials in numerical analysis. Oxford University Press, 1972.
 19. D. C. Handscomb: *Spline functions*. In: Methods of Numerical approximation (D. C. Handscomb, ed.), 163-197, Pergamon Press, Oxford, 1966.
 20. F. B. Hildebrand: Introduction to numerical analysis. McGraw-Hill, New York, 1974.
 21. J. C. Holliday: *Smoothest curve approximation*. Math. Tables Aids Comput. (sada Math. Comp.) 11(1957), 233-243.
 22. E. Isaacson & H. B. Keller: Analysis of numerical methods. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966.
 23. D. W. Kammler: *Prony's method for completely monotonic functions*. J. Math. Anal. Appl. 57(1977), 560-570.
 24. S. Karlin & W. J. Studen: Tchebysheff systems with applications in analysis and statistics. Interscience Publishers, New York, 1966.
 25. M. Lal & E. Moore: *An iterative technique for fitting exponentials*. Int. J. Numer. Meth. Eng. 10(1976), 979-990.
 26. G. V. Milovanović i M. A. Kovačević: Zbirka rešenih zadataka iz numeričke analize. Naučna knjiga, Beograd, 1985.
 27. G. V. Milovanović & S. Wrigge: *Least squares approximation with constraints*. Math. Comp. 46(1986), 551-565.
 28. D. S. Mitrović: Uvod u specijalne funkcije. Gradjevinška knjiga, Beograd, 1975.
 29. D. Mitrović: Algebarska metoda za analizu i sintezu sistema automatskog upravljanja. Zavod za izdavanje udžbenika SRS, Beograd, 1966.
 30. R. De Prony: *Essai expérimentale et analytique* ... J. Ec. Polytech. Paris. 1(2)(1795), 24-76.
 31. W. Quade und L. Collatz: *Zur Interpolationstheorie der reellen periodischen Funktionen*. S.-B. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Mat. Kl. 30 (1938), 383-429.
 32. E. Ja. Remez: Osnovy čislennyh metodov Čebyševskogo približenija. Naukova Dumka, Kiev, 1969.
 33. T. J. Rivlin: An introduction to the approximation of functions. Dover Publications, Inc., New York, 1981.

34. I. J. Schoenberg: *Contributions to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions*, Quart. Appl. Math. 4 (1946), 45-99; 112-141.
35. D. D. Stancu: *The remainder of certain linear approximation formulas in two variables*, J. SIAM Numer. Anal. Ser. B. 1 (1964), 137-163.
36. S. B. Stečkin i Ju. N. Subbotin: *Splajni v vyčislitel'noj matematike*, Nauka, Moskva, 1976.
37. J. Stoer: *Einführung in die Numerische Mathematik I*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1972.
38. J. Todd: *Introduction to the constructive theory of functions*, New York, 1963.
39. D. Dj. Tošić: *Uvod u numeričku analizu*, Naučna knjiga, Beograd, 1978.
40. P. L. Van Roy & F. Schurer: *A bibliography on spline functions*, Technol. Univ., Eindhoven, 1971.
41. S. Wrigge & A. Fransén: *A general method of approximation. Part I*, Math. Comp. 38 (1982), 567-588.
42. D. M. Young & R. T. Gregory: *A survey of numerical mathematics*, Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 1973.

Numeričko diferenciranje i numerička integracija

7.1. NUMERIČKO DIFERENCIranJE

U ovom poglavlju razmatramo problem numeričkog diferenciranja realnih funkcija definisanih na $[a, b]$.

7.1.1. Osnovni pojmovi

Potreba za numeričkim diferenciranjem javlja se u sledećim slučajevima: (a) Kada su vrednosti funkcije poznate samo na diskretnom skupu tačaka iz $[a, b]$, tj. kada je funkcija f data tabelarno; (b) Kada je analitički izraz za f dosta komplikovan.

Numeričko diferenciranje se uglavnom zasniva na aproksimaciji funkcije f funkcijom ϕ na $[a, b]$, a zatim se ϕ diferencira odredjeni broj puta. Dakle, na osnovu $f(x) \sim \phi(x)$ ($a \leq x \leq b$), imamo

$$f^{(k)}(x) \sim \phi^{(k)}(x) \quad (a \leq x \leq b; k=1, 2, \dots).$$

Za funkciju ϕ se najčešće uzimaju algebarski interpolacioni polinomi, s obzirom da se oni jednostavno diferenciraju.

Neka je ϕ interpolacioni polinom n -tog stepena, tj.

$$\phi(x) = P_n(x).$$

Ako je poznata greška $R_n(f; x)$ u jednakosti

$$(1.1.1) \quad f(x) = P_n(x) + R_n(f; x) \quad (a \leq x \leq b),$$

moguće je oceniti grešku i u formuli za diferenciranje. Naime, iz (1.1.1) sleduje

$$f^{(k)}(x) = P_n^{(k)}(x) + R_n^{(k)}(f; x) \quad (a \leq x \leq b).$$

Za red izvoda ima smisla uzeti samo $k < n$.

Nije teško uočiti da numeričko diferenciranje ima manju tačnost od interpolacije. Tako na primer, dok je kod interpolacije greška u čvorovima jednaka nuli, kod numeričkog diferenciranja to nije slučaj.

7.1.2. Formule za numeričko diferenciranje

Neka su poznate vrednosti funkcije f na skupu ekvidistantnih tačaka $\{x_0, x_1, \dots, x_m\} \subset [a, b]$, sa korakom h . Dakle, neka je

$$f_k = f(x_k) = f(x_0 + kh) \quad (k = 0, 1, \dots, m).$$

Na skupu $\{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}\}$ ($0 \leq i \leq m-n$) konstruišimo prvi Newtonov interpolacioni polinom

$$P_n(x) = f_i + p\Delta f_i + \frac{p(p-1)}{2!}\Delta^2 f_i + \frac{p(p-1)(p-2)}{3!}\Delta^3 f_i + \dots + \frac{p(p-1)\dots(p-n+1)}{n!}\Delta^n f_i,$$

tj.

$$(1.2.1) \quad P_n(x) = f_i + p\Delta f_i + \frac{p^2-p}{2!}\Delta^2 f_i + \frac{p^3-3p^2+2p}{6}\Delta^3 f_i + \dots + \frac{p^n - \frac{1}{2}n(n-1)p^{n-1} + \dots}{n!}\Delta^n f_i,$$

gde je $p = (x-x_i)/h$.

S obzirom da je $P'_n(x) = \frac{1}{h} \frac{dP_n(x)}{dp}$, diferenciranjem jednakosti (1.2.1) dobijamo

$$(1.2.2) \quad P'_n(x) = \frac{1}{h} \left(\Delta f_i + \frac{2p-1}{2} \Delta^2 f_i + \frac{3p^2-6p+2}{6} \Delta^3 f_i + \dots \right).$$

Daljim diferenciranjem (1.2.2), dobijamo redom P''_n, P'''_n , itd. Na primer,

$$(1.2.3) \quad P''_n(x) = \frac{1}{h^2} \left(\Delta^2 f_i + (p-1)\Delta^3 f_i + \dots \right).$$

Umesto prvog Newtonovog interpolacionog polinoma mogu se koristiti i ostali interpolacioni polinomi. Na primer, diferenciranjem Stirlingovog polinoma

$$P_n(x) = f_i + \binom{p}{1} \delta \mu f_i + \frac{p}{2} \binom{p}{1} \delta^2 f_i + \binom{p+1}{3} \delta^3 \mu f_i + \frac{p}{4} \binom{p+1}{3} \delta^4 f_i + \dots,$$

gde je $x = x_i + ph$, dobijamo

$$P'_n(x) = \frac{1}{h} \left(\delta \mu f_i + p \delta^2 f_i + \frac{3p^2 - 1}{6} \delta^3 \mu f_i + \frac{2p^3 - p}{12} \delta^4 f_i + \dots \right),$$

$$P''_n(x) = \frac{1}{h^2} \left(\delta^2 f_i + p \delta^3 \mu f_i + \frac{6p^2 - 1}{12} \delta^4 f_i + \dots \right)$$

$$P'''_n(x) = \frac{1}{h^3} \left(\delta^3 \mu f_i + p \delta^4 f_i + \dots \right), \text{ itd.}$$

Za $x = x_i$, tj. $p=0$, formule (1.2.2) i (1.2.3) se svode na

$$P'_n(x_i) = \frac{1}{h} \left(\Delta f_i - \frac{1}{2} \Delta^2 f_i + \frac{1}{3} \Delta^3 f_i - \dots + \frac{(-1)^{n-1}}{n} \Delta^n f_i \right)$$

i

$$P''_n(x_i) = \frac{1}{h^2} \left(\Delta^2 f_i - \Delta^3 f_i + \frac{11}{12} \Delta^4 f_i - \dots \right).$$

Slično, iz formula dobijenih na osnovu Stirlingove formule sleđuje

$$P'_n(x_i) = \frac{1}{h} \left(\delta \mu f_i - \frac{1}{6} \delta^3 \mu f_i + \dots \right),$$

$$P''_n(x_i) = \frac{1}{h^2} \left(\delta^2 f_i - \frac{1}{12} \delta^4 f_i + \dots \right), \text{ itd.}$$

Do formula za izvod funkcije u interpolacionim čvorovima može se doći i formalno primenom operatorskog računā.

Kako je $e^{hD} = E = 1 + \Delta$, imamo

$$D = \frac{1}{h} \log(1 + \Delta) = \frac{1}{h} \left(\Delta - \frac{1}{2} \Delta^2 + \frac{1}{3} \Delta^3 - \frac{1}{4} \Delta^4 + \dots \right)$$

i

$$D^k = \frac{1}{h^k} \{ \log(1 + \Delta) \}^k.$$

Za dobijanje razvoja operatora D^k po stepenima od Δ , korišćemo se Stirlingovim brojevima prve vrste, koji se definišu na sledeći način:

Definicija 1.2.1. Koefficienti $S_n^{(k)}$ u razvoju

$$\frac{(\log(1+x))^k}{k!} = \sum_{n=k}^{+\infty} \frac{S_n^{(k)}}{n!} x^n,$$

koji važi za dovoljno malo x , nazivaju se Stirlingovim brojevima prve vrste.

Umesto prethodne definicije može se uzeti i sledeća njjoj ekvivalentna definicija.

Definicija 1.2.2. Koefficienti $S_n^{(k)}$ u razvoju uopštenog stepena po algebarskim stepenima, tj.

$$x^{(n)} = x(x-1)\dots(x-n+1) = \sum_{k=1}^n S_n^{(k)} x^k,$$

nazivaju se Stirlingovim brojevima prve vrste.

Primer 1.2.1. Dokazaćemo da za Stirlingove brojeve $S_n^{(k)}$ važi rekurentna relacija

$$(1.2.4) \quad S_{n+1}^{(k)} = S_n^{(k-1)} - nS_n^{(k)} \quad (k=2, 3, \dots).$$

Kako je $x^{(n+1)} = x^{(n)}(x-n)$, zaista, iz

$$\sum_{k=1}^{n+1} S_{n+1}^{(k)} x^k = (x-n) \sum_{k=1}^n S_n^{(k)} x^k = -nS_n^{(1)} x + \sum_{k=2}^n (S_n^{(k-1)} - nS_n^{(k)}) x^k + S_n^{(n)} x^{n+1}$$

sledeje (1.2.4), kao i jednakosti

$$S_{n+1}^{(1)} = -nS_n^{(1)} \quad \text{i} \quad S_{n+1}^{(n+1)} = S_n^{(n)}.$$

U sledećoj tabeli dati su Stirlingovi brojevi prve vrste $S_n^{(k)}$ za $n \leq 7$.

Tabela 1.2.1

$k \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7
1	1						
2	-1	1					
3	2	-3	1				
4	-6	11	-6	1			
5	24	-50	35	-10	1		
6	-120	274	-225	85	-15	1	
7	720	-1764	1624	-735	175	-21	1

Na osnovu definicije 1.2.1 imamo

$$D^k = \frac{1}{n^k} \left\{ \frac{S_{k+1}^{(k)}}{k} \Delta^k + \frac{S_{k+1}^{(k)}}{k+1} \Delta^{k+1} + \frac{S_{k+2}^{(k)}}{(k+1)(k+2)} \Delta^{k+2} + \dots \right\},$$

tj.

$$D^k = \frac{1}{h^k} \left\{ \Delta^k - \frac{k}{2} \Delta^{k+1} + \frac{k(3k+5)}{24} \Delta^{k+2} - \frac{k(k+2)(k+3)}{48} \Delta^{k+3} + \dots \right\}.$$

Dakle, formula za k-ti izvod u tački x_i može se predstaviti u obliku

$$f^{(k)}(x_i) = D^k f_i = \frac{1}{h^k} (\Delta^k f_i - \frac{k}{2} \Delta^{k+1} f_i + \frac{k(3k+5)}{24} \Delta^{k+2} f_i - \dots).$$

Na primer, za $k=1$, imamo

$$(1.2.5) \quad f'(x_i) = \frac{1}{h} (\Delta f_i - \frac{1}{2} \Delta^2 f_i + \frac{1}{3} \Delta^3 f_i - \dots + \frac{(-1)^{n-1}}{n} \Delta^n f_i) + R'_n(f; x_i).$$

Ako $f \in C^{n+1}[a, b]$, greška u poslednjoj formuli može se predstaviti u obliku

$$(1.2.6) \quad R'_n(f; x_i) = \frac{(-1)^n}{n+1} h^n f^{(n+1)}(\xi_n) \quad (x_i < \xi_n < x_{n+1}).$$

Primerimo da je kod interpolacionog polinoma $R_n(f; x_i) = 0$.

Primer 1.2.2. Na osnovu vrednosti funkcije $x \mapsto f(x) = x^3 - 2x - 5$ u tačkama $x_i = i$ ($i=0, 1, 2, 3, 4$) odredićemo prva tri izvoda ove funkcije u tački $x=0$.

Formirajmo najpre tablicu Δ razlika, uzimajući $h=1$:

x_i	f_i	Δf_i	$\Delta^2 f_i$	$\Delta^3 f_i$	$\Delta^4 f_i$
0	-5	-1			
1	-6	5	6		
2	-1	17	12	6	0
3	16	35	18		
4	51				

Tada je

$$f'(0) = \Delta f_0 - \frac{1}{2} \Delta^2 f_0 + \frac{1}{3} \Delta^3 f_0 - \frac{1}{4} \Delta^4 f_0 = -2,$$

$$f''(0) = \Delta^2 f_0 - \Delta^3 f_0 + \frac{11}{12} \Delta^4 f_0 = 0, \quad f'''(0) = \Delta^3 f_0 - \frac{3}{2} \Delta^4 f_0 = 6.$$

Na osnovu (1.2.5) i (1.2.6), za $n=1, 2, 3$ dobijamo respekti-

vno

$$f'(x_i) = \frac{1}{h} (f_{i+1} - f_i) - \frac{h}{2} f''(\xi_1),$$

$$f'(x_i) = \frac{1}{2h}(-3f_i + 4f_{i+1} - f_{i+2}) + \frac{h^2}{3}f'''(\xi_2),$$

$$f'(x_i) = \frac{1}{6h}(-11f_i + 18f_{i+1} - 9f_{i+2} + 2f_{i+3}) - \frac{h^3}{4}f^{IV}(\xi_3),$$

gde je ξ_n , u izrazima za ostatak u prethodnim formulama, takvo da $\xi_n \in (x_i, x_{i+n})$ ($n=1, 2, 3$).

Korišćenjem operatora zadnje razlike ∇ , slično formuli (1.2.5), dobijamo

$$f'(x_i) = \frac{1}{h}(\nabla f_i + \frac{1}{2}\nabla^2 f_i + \frac{1}{3}\nabla^3 f_i + \dots + \frac{1}{n}\nabla^n f_i) + R'_n(f; x).$$

Pod uslovom da $f \in C^{n+1}[a, b]$, ostatak se može predstaviti u obliku

$$R'_n(f; x) = \frac{1}{n+1} h^n f^{(n+1)}(\eta_n) \quad (x_{i-n} < \eta_n < x_i).$$

Odgovarajuće formule za $n=1, 2, 3$ su

$$f'(x_i) = \frac{1}{h}(f_i - f_{i-1}) + \frac{h}{2}f''(\eta_1),$$

$$f'(x_i) = \frac{1}{2h}(3f_i - 4f_{i-1} + f_{i-2}) + \frac{h^2}{3}f'''(\eta_2),$$

$$f'(x_i) = \frac{1}{6h}(11f_i - 18f_{i-1} + 9f_{i-2} - 2f_{i-3}) + \frac{h^3}{4}f^{IV}(\eta_3).$$

Prethodne formule za prvi izvod u čvoru x_i su evidentno nesimetrične. One se uspešno primenjuju kada se određuje izvod na krajevima intervala $[a, b]$. Tipična primena ovih formula je kod aproksimacije diferencijalnih konturnih uslova u konturnim problemima kod diferencijalnih jednačina.

Za čvorove unutar segmenta $[a, b]$ bolje je koristiti simetrične formule za diferenciranje, tj. one koje se dobijaju primenom operatora centralne razlike.

Predjimo sada na konstrukciju ovakvih formula. Kako je

$$D = \frac{2}{h} \operatorname{arsh} \frac{\delta}{2} = \frac{2}{h} \log \left[\frac{1}{2} \delta + \left(1 + \frac{1}{4} \delta^2\right)^{1/2} \right],$$

tj.

$$(1.2.7) \quad D = \frac{1}{h} \left(\delta - \frac{1^2}{2 \cdot 2!} \delta^3 + \frac{1^2 \cdot 3}{4 \cdot 4!} \delta^5 - \frac{1^2 \cdot 3 \cdot 5^2}{2 \cdot 6!} \delta^7 + \dots \right),$$

određivanje Df_i primenom poslednje formule, nije moguće ako ne

raspolažemo sa vrednostima funkcije u središnjim tačkama između interpolacionih čvorova, s obzirom da je

$$\delta^{2j+1} f_i = \delta^{2j} (f_{i+\frac{1}{2}} - f_{i-\frac{1}{2}}).$$

Medjutim, formula (1.2.7) može se uspešno primeniti na određivanje $Df_{i+\frac{1}{2}}$, s obzirom da je

$$\delta^{2j+1} f_{i+\frac{1}{2}} = \delta^{2j} (f_{i+1} - f_i).$$

Da bismo odredili Df_i samo na osnovu vrednosti funkcije u interpolacionim čvorovima, formulu (1.2.7) treba modifikovati. Naime, kako je $\mu = (1 + \frac{1}{4}\delta^2)^{\frac{1}{2}}$, imamo

$$D = \frac{2\mu}{h} (1 + \frac{1}{4}\delta^2)^{-\frac{1}{2}} \operatorname{arsh} \frac{\delta}{2},$$

tj.

$$(1.2.8) \quad D = \frac{\mu}{h} \left(\delta - \frac{1^2}{3!} \delta^3 + \frac{1^2 \cdot 2^2}{5!} \delta^5 - \frac{1^2 \cdot 2^2 \cdot 3^2}{7!} \delta^7 + \dots \right).$$

Na osnovu poslednje formule dobija se niz formula za određivanje Df_i . Navešćemo samo prve dve:

$$1^\circ \quad Df_i = \frac{1}{h} \mu \delta f_i + r_1(f) = \frac{1}{2h} (f_{i+1} - f_{i-1}) + r_1(f),$$

gde je $r_1(f) = -\frac{1}{6} h^2 f'''(\zeta_1)$ ($x_{i-1} < \zeta_1 < x_{i+1}$);

$$2^\circ \quad Df_i = \frac{1}{h} (\mu \delta f_i - \frac{1}{6} \mu \delta^3 f_i) + r_2(f) \\ = \frac{1}{h} (-f_{i+2} + 8f_{i+1} - 8f_{i-1} + f_{i-2}) + r_2(f),$$

gde je $r_2(f) = \frac{1}{30} h^4 f^{(4)}(\zeta_2)$ ($x_{i-2} < \zeta_2 < x_{i+2}$).

Izrazi za ostatak su izvedeni pod uslovom da je f tri, odnosno pet, puta neprekidno diferencijabilna funkcija. Na primer, za dokaz ostatka u formuli 1^o pretpostavimo da $f \in C^3[a, b]$. Tada korišćenjem Taylorove formule nalazimo

$$r_1(f) = f'(x_i) - \frac{1}{2h} (f(x_i+h) - f(x_i-h)) \\ = -\frac{h^2}{2 \cdot 3!} (f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2)),$$

gde $\xi_1 \in (x_i, x_{i+1})$ i $\xi_2 \in (x_{i-1}, x_i)$. Kako je f''' neprekidna funkcija, to zaključujemo da postoji $\zeta_1 \in (x_{i-1}, x_{i+1})$ takvo da je $f'''(\zeta_1)$ jednako aritmetičkoj sredini od $f'''(\xi_1)$ i $f'''(\xi_2)$, što znači da se

$r_1(f)$ može izraziti u obliku kakav je dat u 1.0.

Uzimajući umesto h , korak $h/2$, dvotačkasta simetrična formula za prvi izvod se može predstaviti u obliku

$$(1.2.9) \quad Df(x) \approx d_0(h) = \frac{1}{h} \left(f\left(x + \frac{h}{2}\right) - f\left(x - \frac{h}{2}\right) \right),$$

gde smo stavili $x = x_i$.

Do formule (1.2.9) se može doći metodom neodređenih koeficijenata, polazeći od opšteg oblika dvotačkaste formule

$$d(h) = \frac{1}{h} (a_1 f(x+b_1 h) + a_2 f(x+b_2 h)),$$

gde su a_i, b_i ($i=1,2$) za sada neodređeni parametri. Pretpostavimo samo da je ovo pravilo normalizovano, tj. da je $|b_1 - b_2| = 1$. Odradićemo sada nepoznate parametre tako da ova formula bude maksimalnog reda, tj. da je ostatak reda $O(h^r)$, gde je r maksimalno moguće.

Korišćenjem Taylorove formule dobijamo

$$\begin{aligned} f'(x) - d(h) &= -\frac{1}{h} (a_1 + a_2) f(x) + (1 - a_1 b_1 - a_2 b_2) f'(x) \\ &\quad - \frac{h}{2} (a_1 b_1^2 + a_2 b_2^2) f''(x) - \frac{h^2}{3!} (a_1 b_1^3 + a_2 b_2^3) f'''(x) + O(h^3). \end{aligned}$$

Iz uslova da se prva tri koeficijenta u dobijenom razvoju anuliraju i korišćenjem normalizacionog uslova nalazimo da je

$$a_1 = -a_2, \quad b_1 - b_2 = 1, \quad b_1 = -b_2, \quad 2a_1 b_1 = 1,$$

tj.

$$a_1 = -a_2 = 1 \quad \text{i} \quad b_1 = -b_2 = 1/2.$$

Primitimo da se sa ovakvim vrednostima minimizira koeficijent uz treći izvod funkcije f . Dakle, u klasi dvotačkastih formula za prvi izvod, "najbolja" je formula (1.2.9).

Isti problem, uz korišćenje tri tačke, razmatrali su J.M. Ash i R.L. Jones [5]. Naime, polazeći od

$$d(h) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^3 a_i f(x+b_i h)$$

i interpretirajući pojam "najbolja formula" na više načina, autori su dobili sledeće formule

$$1^{\circ} \quad d_1(h) = \frac{1}{6h} \left\{ (3-2\sqrt{3})f\left(x+\frac{1}{\sqrt{3}}+1\right)h + 4\sqrt{3}f\left(x+\frac{1}{\sqrt{3}}\right)h - (3+2\sqrt{3})f\left(x+\left(\frac{1}{\sqrt{3}}-1\right)h\right) \right\};$$

$$2^{\circ} \quad d_2(h) = \frac{1}{3h} \{ f(x+h) + \omega^2 f(x+\omega h) + \omega f(x+\omega^2 h) \},$$

gde su $\omega = (-1+i\sqrt{3})/2$ i $\omega^2 = (-1-i\sqrt{3})/2$ (treći koren iz jedinice);

$$3^{\circ} \quad d_3(h) = \frac{1}{120h} \{ 32f(x+3h) - 27f(x-2h) - 5f(x+6h) \}.$$

Primitimo da su ove formule nesimetrične. Štaviše, formula $d_2(h)$ koristi vrednosti funkcije za kompleksne argumente. Uslov normalizacije je uveden pomoću

$$\min\{|b_1-b_2|, |b_1-b_3|, |b_2-b_3|\} = 1.$$

Sve tri formule su trećeg reda. Greška odsecanja se može iskazati u obliku

$$E_T = \frac{|c_4| f_4}{4!} h^3,$$

gde su $c_4 = \sum_{i=1}^3 a_i b_i^4$, $f_4 = \sup_{y \in U(x)} |f^{IV}(y)|$, $U(x)$ okolina tačke x .

Za izračunavanje viših izvoda koristi se formula (1.2.7) za izvode parnog reda i formula (1.2.8) za izvode neparnog reda. Tako dobijamo

$$D^2 = \frac{1}{h^2} (\delta^2 - \frac{1}{12} \delta^4 + \frac{1}{90} \delta^6 - \frac{1}{560} \delta^8 + \frac{1}{3150} \delta^{10} - \dots),$$

$$D^3 = \frac{1}{h^3} (\delta^3 - \frac{1}{4} \delta^5 + \frac{7}{120} \delta^7 - \dots),$$

$$D^4 = \frac{1}{h^4} (\delta^4 - \frac{1}{6} \delta^6 + \frac{7}{240} \delta^8 - \dots),$$

$$D^5 = \frac{1}{h^5} (\delta^5 - \frac{1}{3} \delta^7 + \dots), \text{ itd.}$$

Na kraju dajemo najprostiju formulu za aproksimaciju drugog izvoda koja se u praksi najčešće koristi. Ovu formulu dobijamo uzimajući samo prvi član u razvoju za D^2 , tj.

$$D^2 f_i = \frac{1}{h^2} \delta^2 f_i + r(f) = \frac{1}{h^2} (f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}) + r(f).$$

Pod pretpostavkom da $f \in C^4[a, b]$ jednostavno se može dokazati da postoji $\xi \in (x_{i-1}, x_{i+1})$ takvo da se ostatak može predstaviti u obliku

$$r(f) = -\frac{h^2}{12} f^{IV}(\xi).$$

Korišćenjem numeričkih kvadratura mogu se dobiti formule za numeričko diferenciranje analitičkih funkcija (videti Lyness i Moler [47], Lyness [45], Tošić [86], Gautschi i Milovanović [28]).

7.2. NUMERIČKA INTEGRACIJA

Ovo poglavlje je posvećeno konstrukciji i analizi metoda za numeričku integraciju. Poseban tretman je dat Gauss-Christoffelovim kvadraturama.

7.2.1. Uvodne napomene

Numerička integracija funkcija sastoji se u približnom izračunavanju određenih integrala na osnovu niza vrednosti podintegralne funkcije po određenoj formuli.

Formule za numeričko izračunavanje jednostrukih integrala nazivaju se kvadrature formule. Slično, formule za dvostruke integrale nazivaju se kubaturne formule. U našem izlaganju zadržaćemo se samo na kvadraturnim formulama.

Potreba za numeričkom integracijom javlja se u velikom broju slučajeva. Naime, Newton-Leibnitzova formula

$$(2.1.1) \quad \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a),$$

gde je F primitivna funkcija za funkciju f , ne može se uvek uspešno primeniti*. Navešćemo neke od tih slučajeva:

1^o Funkcija F se ne može predstaviti pomoću konačnog broja elementarnih funkcija (na primer, kada je $f(x) = e^{-x^2}$).

2^o Primena formule (2.1.1) često dovodi do vrlo složenog izraza, čak i kod izračunavanja integrala jednostavnijih funkcija; na primer

* Ako nije drugačije naglašeno smatraćemo da je funkcija f neprekidna na $[a, b]$.

$$\int_0^a \frac{dx}{1+x^3} = \log \sqrt[3]{|a+1|} - \frac{1}{6} \log(a^2 - a + 1) + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{a\sqrt{3}}{2-a}.$$

3° Kod integracije funkcija, čije su vrednosti poznate samo na diskretnom skupu tačaka (dobijene, na primer, eksperimenta-lno), nije moguće primeniti formulu (2.1.1).

Veliki broj kvadraturnih formula ima oblik

$$(2.1.2) \quad \int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k),$$

gde su x_k tzv. čvorovi, a A_k težinski koeficijenti. Ako pretpostavimo da je f element izvesnog prostora X (na primer, $X=C[a,b]$ ili $X=C^m[a,b]$), tada numeričku integraciju možemo tretirati kao aproksimaciju funkcionele $I: X \rightarrow R$, pomoću funkcionele $K_n: X \rightarrow R$, gde su

$$I(f) = \int_a^b f(x) dx \quad \text{i} \quad K_n(f) = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k).$$

Funkcionelu R_n definisanu pomoću

$$R_n(f) = I(f) - K_n(f) = \int_a^b f(x) dx - \sum_{k=1}^n A_k f(x_k)$$

nazivamo ostatkom kvadraturne formule (2.1.2) i ona predstavlja grešku koja se čini pri zameni integrala konačnom sumom.

Čvorovi x_k su, u opštem slučaju, kompleksni brojevi. Međutim, kod većine kvadraturnih formula čvorovi x_k su takvi da svi pripadaju $[a,b]$, tj. da je

$$(2.1.3) \quad a \leq x_1 < x_2 < \dots < x_n \leq b.$$

Uslov (2.1.3) je prirodan, jer se tada vrednost funkcionele K_n određuje na osnovu vrednosti funkcije f na diskretnom skupu tačaka $\{x_1, \dots, x_n\} \subset [a,b]$. Ako je $x_1=a$ i $x_n=b$, za formulu (2.1.2) kažemo da je zatvorenog tipa, dok u ostalim slučajevima kažemo da je otvorenog tipa.

Od interesa su i kvadraturne formule oblika

$$(2.1.4) \quad \int_a^b p(x) f(x) dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f),$$

gde je $p: (a, b) \rightarrow R_+$ data težinska funkcija.

U daljem tekstu ako nije drugačije naglašeno smatraćemo da je $X = C[a, b]$.

7.2.2. Klase formula i stepen tačnosti

U prostoru funkcija X uočimo m linearno nezavisnih elementarnata u_1, u_2, \dots, u_m . Sa $X_m (\subset X)$ označimo lineal nad ovim elementima.

Problem konstrukcije kvadrature formula sastoji se u određivanju parametara x_k i A_k ($k=1, \dots, n$), pri čemu su uobičajena dva pristupa:

(a) Čvorovi x_k se unapred fiksiraju, a parametri A_k se određuju iz tzv. uslova "maksimalne tačnosti", s obzirom na izabrani potprostor X_m . Naime, parametre A_k (ukoliko je to moguće) određujemo iz uslova

$$(2.2.1) \quad R_n(f) = 0 \quad (\forall f \in X_n).$$

S obzirom da je R_n linearna funkcionala, uslov (2.2.1) je ispunjen ako je $R_n(u_i) = 0$ ($i=1, 2, \dots, n$), tj. ako je

$$(2.2.2) \quad \sum_{k=1}^n u_i(x_k) A_k = I(u_i) \quad (i=1, 2, \dots, n),$$

gde je funkcionala I , u opštem slučaju,

$$I(f) = \int_a^b p(x) f(x) dx.$$

Integrali $I(u_i)$ se nazivaju momentima težinske funkcije p u odnosu na bazis $B = \{u_1, \dots, u_n\}$. Jasno je da sistem (2.2.2) ima jedinstveno rešenje ako je B Čebiševljev sistem.

(b) Parametri A_k i x_k ($k=1, \dots, n$) određuju se iz uslova "maksimalne moguće tačnosti", tj. iz uslova

$$(2.2.3) \quad R_n(f) = 0 \quad (\forall f \in X_{2n}),$$

ili, što je ekvivalentno, iz $R_n(u_i) = 0$ ($i=1, 2, \dots, 2n$). Dakle, A_k i x_k su rešenja nelinearnog sistema od $2n$ jednačina

$$(2.2.4) \quad \sum_{k=1}^n u_i(x_k) A_k = I(u_i) \quad (i=1, 2, \dots, 2n).$$

Za kvadrature dobijene na ovaj način reći ćemo da su Gauss-Christoffelovog tipa.

Daleko najjeftinije se u primenama koriste kvadrature koje poseduju algebarski stepen tačnosti, tj. kod kojih je izabran sistem funkcija $u_i = x^{i-1}$ ($i=1,2,\dots$). U tom slučaju potprostor X_m biće skup svih algebarskih polinoma ne višeg stepena od $m-1$. Označimo ga sa \mathcal{P}_{m-1} . Prema tome, kvadratura formula (2.1.4) ima algebarski stepen tačnosti $p=m-1$, ako je $R_n(f)=0$ za svako $f \in \mathcal{P}_{m-1}$ (tj. $R_n(x^{i-1})=0$, $i=1,\dots,m$), a bar za jedno $f \in \mathcal{P}_m$, $R_n(f) \neq 0$ (tj. $R_n(x^m) \neq 0$).

Na osnovu prethodnog algebarski stepen tačnosti kvadratura njih formula dobijenih pristupom (a) je ne manji od $n-1$, dok je kod kvadratura formula Gauss-Christoffelovog tipa (pristup (b)) maksimalno moguće $p=2n-1$ (videti (2.2.3)), gde je $X_{2n} = \mathcal{P}_{2n-1}$.

Primer 2.2.1. Neka je

$$I(f) = \int_{-1}^1 f(x) dx \quad \text{i} \quad K_3(f) = \sum_{k=1}^3 A_k f(x_k).$$

Za u_i uzmimo algebarske polinome x^{i-1} ($i=1,2,\dots$).

(a) Izaberimo čvorove ekvidistantno, tj. $x_1=-1$, $x_2=0$, $x_3=1$. Tada sistem (2.2.2) postaje

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 + A_3 &= 2, \\ -A_1 + A_3 &= 0, \\ A_1 + A_3 &= \frac{2}{3}, \end{aligned}$$

odakle sleduje $A_1 = A_3 = \frac{1}{3}$, $A_2 = \frac{4}{3}$. Dakle, dobijena kvadratura formula ima oblik

$$I(f) = K_3(f) = \frac{1}{3}(f(-1) + 4f(0) + f(1)).$$

Ova formula je dobro poznata iz standardnih kurseva matematičke analize i naziva se Simpsonova formula. Za segment $[0,2h]$ ova formula glasi

$$\int_0^{2h} f(x) dx = \frac{h}{3}(f_0 + 4f_1 + f_2),$$

gde je $f_k = f(kh)$ ($k=0,1,2$).

(b) Odredjivanje čvorova i težinskih koeficijenata iz uslova maksimalne moguće tačnosti, tj. iz sistema jednačina (dobi-

nog na osnovu (2.2.4))

$$A_1 + A_2 + A_3 = 2,$$

$$A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 = 0,$$

$$A_1 x_1^2 + A_2 x_2^2 + A_3 x_3^2 = \frac{2}{3},$$

$$A_1 x_1^3 + A_2 x_2^3 + A_3 x_3^3 = 0,$$

$$A_1 x_1^4 + A_2 x_2^4 + A_3 x_3^4 = \frac{2}{5},$$

$$A_1 x_1^5 + A_2 x_2^5 + A_3 x_3^5 = 0$$

može biti veoma komplikovano. Korišćenjem izvesnih simetrija u sistemu nalazimo

$$x_1 = -\sqrt{3/5}, \quad x_2 = 0, \quad x_3 = \sqrt{3/5},$$

$$A_1 = A_3 = 5/9, \quad A_2 = 8/9,$$

što znači da smo dobili kvadraturnu formulu

$$I(f) \approx K_3(f) = \frac{1}{9}(5f(-\sqrt{3/5}) + 8f(0) + 5f(\sqrt{3/5})),$$

koja je poznata u literaturi kao trotačkasta Gauss-Legendreova formula. Ova formula ima algebarski stepen tačnosti $p=5$.

Za kvadraturne formule sa algebarskom bazom kažemo da su interpolacionog tipa, jer se umesto rešavanja sistema jednačina (2.2.2) ili (2.2.4) (sa prethodno odredjenim x_k na neki drugi način), težinski koeficijenti A_k mogu, korišćenjem Lagrangeove interpolacione formule, izraziti u ekspllicitnom obliku

$$(2.2.5) \quad A_k = \frac{1}{\omega'(x_k)} \int_a^b \frac{p(x)\omega(x)}{x-x_k} dx \quad (k=1, \dots, n),$$

gde je $\omega(x) = (x-x_1) \dots (x-x_n)$.

Zaista ako su vrednosti funkcije f u datim tačkama $x_1, \dots, x_n \in [a, b]$ redom f_1, \dots, f_n , tj.

$$f_k \equiv f(x_k) \quad (k=1, \dots, n),$$

odgovarajući Lagrangeov interpolacioni polinom je tada ne višeg stepena od $n-1$ i ima oblik

$$P_{n-1}(x) = \sum_{k=1}^n f_k \frac{\omega(x)}{(x-x_k) \omega'(x_k)},$$

gde je $\omega(x)$ dato prethodno.

Tada zamenom funkcije interpolacionim polinomom i interpolacijom dobijamo

$$\int_a^b p(x)f(x)dx = \int_a^b p(x)P_{n-1}(x)dx + R_n(f),$$

tj.

$$(2.2.6) \quad \int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=1}^n A_k f_k + R_n(f),$$

gde je A_k dato sa (2.2.5).

Kako je za $f(x)=x^k$ ($k=0,1,\dots,n-1$), $f(x)=P_{n-1}(x)$, imamo

$$R_n(x^k) = 0 \quad (k=0,1,\dots,n-1),$$

odakle zaključujemo da je formula (2.2.6) tačna za svako $f \in \mathcal{P}_{n-1}$, bez obzira na izbor interpolacionih čvorova.

Ako se za B izabere, na primer, trigonometrijski bazis $\{1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots\}$ dobićemo tzv. trigonometrijske kvadrature, kod kojih je interesantan tzv. trigonometrijski stepen tačnosti. Takođe, za B se mogu birati: eksponencijalne funkcije, racionalne funkcije, splajn funkcije i sl.

U daljem izlaganju tretiraćemo samo interpolacione kvadrature sa algebarskom bazom.

Kod kvadraturnih formula zatvorenog tipa obično numeracija čvorova počinje od nule, tako da imamo kvadraturu oblika

$$(2.2.7) \quad \int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=0}^n A_k f(x_k) + R_{n+1}(f).$$

Indeks $n+1$ u ostatku označava da se integral približno izračunava na osnovu vrednosti podintegralne funkcije u $n+1$ tačaka. Ako je formula (2.2.7) interpolacionog tipa, tada se koeficijenti A_k određuju pomoću (2.2.5) za $k=0,1,\dots,n$, pri čemu je $\omega(x)=(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n)$. Algebarski stepen tačnosti je u ovom slučaju ne manji od $p=n$.

7.2.3. Newton-Cotesove formule

U ovom odeljku izvešćemo kvadrature formule zatvorenog tipa u kojima su interpolacioni čvorovi $x_k = x_0 + kh$ ($k=0, 1, \dots, n$) uzeti ekvidistantno sa korakom $h = (b-a)/n$.

Dakle, formule su oblika (2.2.7). Razmotrićemo najprostiji slučaj kada je $p(x)=1$.

Ako uvedemo smenu $x-x_0 = ph$, imamo

$$(2.3.1) \quad \omega(x) = (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n) \\ = h^{n+1} p(p-1)\dots(p-n)$$

i

$$(2.3.2) \quad \omega'(x_k) = (x_k-x_0)\dots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\dots(x_k-x_n) \\ = h^n (-1)^{n-k} k!(n-k)!$$

Uvodjenjem oznake za uopšteni stepen $x^{(s)} = x(x-1)\dots(x-s+1)$, na osnovu (2.3.1), (2.3.2) i rezultata iz prethodnog odeljka, dobijamo

$$A_k = \int_0^n \frac{(-1)^{n-k} p^{(n+1)} h}{(p-k)k!(n-k)!} dp \quad (k=0, 1, \dots, n),$$

tj.

$$A_k = (b-a)H_k \quad (k=0, 1, \dots, n),$$

gde smo stavili

$$(2.3.3) \quad H_k(n) = \frac{(-1)^{n-k}}{n!n} \binom{n}{k} \int_0^p \frac{p^{(n+1)}}{p-k} dp \quad (k=0, 1, \dots, n).$$

Koeficijenti H_k su u literaturi (videti na primer [49] i [15]) poznati kao Newton-Cotesovi koeficijenti, a odgovarajuće formule

$$(2.3.4) \quad \int_{x_0=a}^{x_n=b} f(x) dx = (b-a) \sum_{k=0}^n H_k f\left(a+k \frac{b-a}{n}\right) \quad (n \in \mathbb{N})$$

kao Newton-Cotesove formule.

Primerba 2.3.1. Za koeficijente H_k važe jednakosti

$$H_k = H_{n-k} \quad \text{i} \quad \sum_{k=0}^n H_k = 1.$$

Razmotrićemo sada dva partikularna slučaja.

a) Neka je $n=1$. Tada je, na osnovu (2.3.3), $H_0=H_1=\frac{1}{2}$ pa je odgovarajuća Newton-Cotesova formula

$$(2.3.5) \quad \int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2}(f(a) + f(b)) + R_2(f).$$

Ova formula je poznata kao trapezna formula ili trapezno pravilo.

Teorema 2.3.1. Ako $f \in C^2[a, b]$, za ostatak $R_2(f)$, u formuli (2.3.5), važi

$$(2.3.6) \quad R_2(f) = -\frac{(b-a)^3}{12} f''(\xi_1) \quad (a < \xi_1 < b).$$

Dokaz. Definišimo funkciju $F: [0, b-a] \rightarrow \mathbb{R}$, pomoću

$$F(h) = \int_a^{a+h} f(x)dx - \frac{h}{2}(f(a) + f(a+h)).$$

Diferenciranjem ove funkcije sukcesivno dva puta dobijamo

$$F'(h) = \frac{1}{2}(f(a+h) - f(a)) - \frac{h}{2} f'(a+h)$$

i

$$(2.3.7) \quad F''(h) = -\frac{h}{2} f''(a+h).$$

Kako je $F(0)=0$ i $F'(0)=0$, integracijom jednačine (2.3.7) dobijamo

$$F(h) = -\frac{1}{2} \int_0^h t(h-t)f''(a+t)dt.$$

S obzirom da $f \in C^2[a, b]$, primenom teoreme o srednjoj vrednosti određenog integrala, poslednja jednakost se svodi na

$$(2.3.8) \quad F(h) = -\frac{1}{2}f''(a+\theta h) \int_0^h t(h-t)dt = -\frac{h^3}{12} f''(a+\theta h),$$

gde je $0 < \theta < 1$. Najzad, ako stavimo $h=b-a$, iz (2.3.8) sleduje

$$R_2(f) = F(b-a) = -\frac{(b-a)^3}{12} f''(\xi_1) \quad (a < \xi_1 < b),$$

čime je dokaz završen.

Promenom uslova za f moguće je dobiti i druge ocene za $R_2(f)$. Navešćemo bez dokaza neke od tih rezultata ([38], [57], [60], [94]).

Teorema 2.3.2. Ako funkcija zadovoljava Lipschitzov uslov, tj.

$$|f(x) - f(y)| \leq M|x - y| \quad (\forall x, y \in [a, b]),$$

tada je

$$|R_2(f)| \leq \frac{M(b-a)^2}{4} - \frac{1}{4M}(f(b) - f(a))^2.$$

Teorema 2.3.3. Ako funkcija f zadovoljava uslove $|f'(x) - f'(y)| \leq M|x - y|$ ($\forall x, y \in [a, b]$) i $f'(a) = f'(b) = 0$, tada je

$$|R_2(f)| \leq \frac{M(b-a)^3}{24} - \frac{1}{2M} \cdot \frac{(f(b) - f(a))^2}{b - a}.$$

b) Pretpostavimo sada da je $n=2$. Tada na osnovu (2.3.3) i (2.3.4), dobijamo kvadraturnu formulu

$$(2.3.9) \quad \int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{6}(f(a) + 4f(\frac{a+b}{2}) + f(b)) + R_3(f),$$

koja je poznata kao Simpsonova formula ili pravilo (videti primer 2.2.1).

Teorema 2.3.4. Ako $f \in C^4[a, b]$, za ostatak $R_3(f)$, u formuli (2.3.9), važi

$$(2.3.10) \quad R_3(f) = -\frac{(b-a)^5}{2880} f^{IV}(\xi_2) \quad (a < \xi_2 < b).$$

Dokaz. Slično, kao u dokazu teoreme 2.3.1, definišimo funkciju $F: [-\alpha, \alpha] \rightarrow \mathbb{R}$, pomoću

$$F(h) = \int_{c-h}^{c+h} f(x) dx - \frac{h}{3}(f(c-h) + 4f(c) + f(c+h)),$$

gde su $c = \frac{a+b}{2}$ i $\alpha = \frac{b-a}{2}$.

Uzastopnim diferenciranjem funkcije F tri puta dobijamo

$$F'(h) = \frac{2}{3}(f(c-h) - 2f(c) + f(c+h)) - \frac{h}{3}(f'(c+h) - f'(c-h)),$$

$$F''(h) = -\frac{1}{3}(f'(c+h) - f'(c-h)) - \frac{h}{3}(f''(c+h) + f''(c-h)),$$

$$F'''(h) = -\frac{h}{3}(f'''(c+h) - f'''(c-h)).$$

Kako je $F(0)=0$, $F'(0)=0$, $F''(0)=0$, $F'''(0)=0$, rešenje poslednje jednačine možemo predstaviti u obliku

$$F(h) = \int_0^h \frac{1}{2}(h-t)^2 \left(-\frac{t}{3}\right) (f'''(c+t) - f'''(c-t)) dt,$$

odakle, korišćenjem Lagrangeove teoreme, dobijamo

$$F(h) = -\frac{1}{3} \int_0^h t^2 (h-t)^2 f^{IV}(c+\theta(t)t) dt \quad (|\theta(t)| < 1).$$

Najzad, primenom teoreme o srednjoj vrednosti određenih integrala ($f \in C^4[a,b]$) i stavljanjem $h = a = \frac{b-a}{2}$, iz poslednje jednačnosti sleduje (2.3.10), čime je dokaz završen.

Na osnovu prethodnih razmatranja zaključujemo da je trapezna formula tačna za svako $f \in \mathcal{P}_1$, a da je Simpsonova formula tačna za svako $f \in \mathcal{P}_3$.

U daljem izlaganju daćemo pregled Newton-Cotesovih formula za $n \leq 8$ (videti [1], [14], [37]). Pri ovome koristimo oznake $h=(b-a)/n$, $f_k=f(x_k)$ ($k=0,1,\dots,n$).

1) $n=1$ (trapezno pravilo)

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) dx = \frac{h}{2}(f_0+f_1) - \frac{h^3}{12} f''(\xi_1);$$

2) $n=2$ (Simpsonovo pravilo)

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x) dx = \frac{h}{3}(f_0+4f_1+f_2) - \frac{h^5}{90} f^{IV}(\xi_2);$$

3) $n=3$ (Simpsonovo pravilo $\frac{3}{8}$)

$$\int_{x_0}^{x_3} f(x) dx = \frac{3h}{8}(f_0+3f_1+3f_2+f_3) - \frac{3h^5}{80} f^{IV}(\xi_3);$$

4) $n=4$ (Booleovo pravilo)

$$\int_{x_0}^{x_4} f(x) dx = \frac{2h}{45}(7f_0+32f_1+12f_2+32f_3+7f_4) - \frac{8h^7}{945} f^{(6)}(\xi_4);$$

5) $n=5$

$$\int_{x_0}^{x_5} f(x) dx = \frac{5h}{288} (19f_0 + 75f_1 + 50f_2 + 50f_3 + 75f_4 + 19f_5) - \frac{275h^7}{12096} f^{(6)}(\xi_5);$$

6) $n=6$

$$\int_{x_0}^{x_6} f(x) dx = \frac{h}{140} (41f_0 + 216f_1 + 27f_2 + 272f_3 + 27f_4 + 216f_5 + 41f_6) - \frac{9h^9}{1400} f^{(8)}(\xi_6);$$

7) $n=7$

$$\int_{x_0}^{x_7} f(x) dx = \frac{7h}{17280} (751f_0 + 3577f_1 + 1323f_2 + 2989f_3 + 2989f_4 + 1323f_5 + 3577f_6 + 751f_7) - \frac{8183h^9}{518400} f^{(8)}(\xi_7);$$

8) $n=8$

$$\int_{x_0}^{x_8} f(x) dx = \frac{4h}{14175} (989f_0 + 5888f_1 - 928f_2 + 10496f_3 - 4540f_4 + 10496f_5 - 928f_6 + 5888f_7 + 989f_8) - \frac{2368h^{11}}{467775} f^{(10)}(\xi_8),$$

gde $\xi_k \in (x_0, x_k)$ ($k=1, \dots, 8$).

U opštem slučaju ostatak $R_{n+1}(f)$ ima oblik (videti, na primer, [7], [14], [15])

$$(2.3.11) \quad R_{n+1}(f) = C_n h^m f^{(m-1)}(\xi_n) \quad (x_0 < \xi_n < x_n),$$

gde je $m = 2\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 3$. Jednakost (2.3.11) ima smisla ukoliko funkcija $f \in C^{m-1}[a, b]$.

Primer 2.3.2. Za koeficijente $H_k(n)$ u Newton-Cotesovoj formuli za segment $[0, 1]$, važe asimptotske formule (videti [14], [93])

$$H_k(n) = \frac{(-1)^{k-1}}{n \log n} \binom{n}{k} \left(\frac{1}{k} + \frac{(-1)^n}{n-k} \right) \left(1 + o\left(\frac{1}{\log n}\right) \right) \quad (1 \leq k \leq n-1),$$

$$H_0(n) = H_n(n) = \frac{1}{n \log n} \left(1 + o\left(\frac{1}{\log n}\right) \right).$$

Na osnovu prethodnog uočavamo da se formule znatno komplikuju **ukoliko** je n veće. U praktičnim računanjima obično se koristi **Simpsonova** formula ($n=2$), s obzirom da je relativno jednostavna, a da pri tome daje dosta zadovoljavajuću tačnost ukoliko je h dovoljno malo. Uslov da h bude dovoljno malo može se obezbediti podelom segmenta $[a,b]$ na niz podsegmentata, o čemu će biti reči u narednom odeljku.

Primer 2.3.1. .Primenimo Newton-Cotesove formule za $n=1, \dots, 6$ na približno izračunavanje integrala

$$(2.3.12) \quad I = \int_0^1 \frac{dx}{1+x},$$

čija je tačna vrednost $\log 2 = 0.69314818\dots$. Dobijene vrednosti središene su u narednoj tabeli.

n	Približna vrednost za I
1	0.75
2	0.69444444
3	0.69375
4	0.6931745
5	0.6931629
6	0.693148

Primerba 2.3.3. Ako Newton-Cotesovu formulu za $n=6$ predstavimo u obliku

$$\int_{x_0}^{x_6} f(x) dx = \frac{3h}{420} \{ (42-1)f_0 + (210+6)f_1 + (42-15)f_1 + (252+20)f_3 + (42-15)f_4 + (210+6)f_5 + (42-1)f_6 \} + R_7(f),$$

dobijamo tzv. Weddleovo pravilo

$$(2.3.13) \quad \int_{x_0}^{x_6} f(x) dx = \frac{3h}{10} (f_0 + 5f_1 + f_2 + 6f_3 + f_4 + 5f_5 + f_6) + \bar{R}_7(f),$$

gde je

$$\bar{R}_7(f) = -\frac{h}{140} \Delta^6 f_0 + R_7(f),$$

tj.

$$\bar{R}_7(f) = -\frac{h^7}{1400} (10f^{(6)}(\eta_6) + 9h^2 f^{(8)}(\xi_6)) \quad (\xi_6, \eta_6 \in (x_0, x_6)).$$

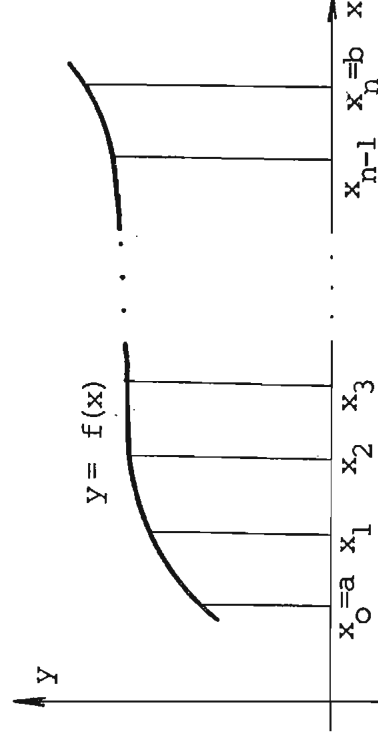
Primer 2.3.2. Primenom formule (2.3.13), na integral (2.3.12), dobijamo $I=0.6931493$, s obzirom da je

$$\begin{aligned} f_0 &= 1.00000000, & f_1 &= 0.8571428, & f_2 &= 0.75000000, \\ f_3 &= 0.66666667, & f_4 &= 0.60000000, & f_5 &= 0.54545454, \\ f_6 &= 0.50000000. \end{aligned}$$

7.2.4. Uopštene kvadrature formule

Kao što je napomenuto u prethodnom odeljku, da bismo tačnije izračunali vrednost integrala potrebno je podeliti segment $[a, b]$ na niz podsegmenta, a zatim na svakom od njih primeniti neku od kvadrature formula. Na taj način dobijamo uopštene ili kompozitne formule. U ovom odeljku razmotrićemo uopštene formule dobijene na bazi trapezne i Simpsonove formule, kao i neke uopštene kvadrature formule otvorenog tipa.

Podelimo segment $[a, b]$ na niz podsegmenta $[x_{i-1}, x_i]$ ($i=1, \dots, n$) tako da je $x_i = a + ih$ ($i=0, 1, \dots, n$) i $h=(b-a)/n$.



Sl. 2.4.1

Primenom trapezne formule na svaki od podsegmenta dobija-

mo

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx = \sum_{i=1}^n \left(\frac{h}{2} (f_{i-1} + f_i) - \frac{h^3}{12} f''(\xi_i) \right),$$

tj.

$$(2.4.1) \quad \int_a^b f(x)dx = T_n - \frac{h^3}{12} \sum_{i=1}^n f''(\xi_i),$$

gde su $T_n = T_n(f;h) = h(\frac{1}{2}f_0 + f_1 + \dots + f_{n-1} + \frac{1}{2}f_n)$ i $x_{i-1} < \xi_i < x_i$ ($i=1, \dots, n$).

Teorema 2.4.1. Ako $f \in C^2[a,b]$ važi jednakost

$$(2.4.2) \quad \int_a^b f(x)dx - T_n = - \frac{(b-a)^3}{12n^2} f''(\xi) \quad (a < \xi < b).$$

Dokaz. Kako uslov $f \in C^2[a,b]$ obezbeđuje egzistenciju takvog ξ ($a < \xi < b$) da je

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f''(\xi_i) = f''(\xi),$$

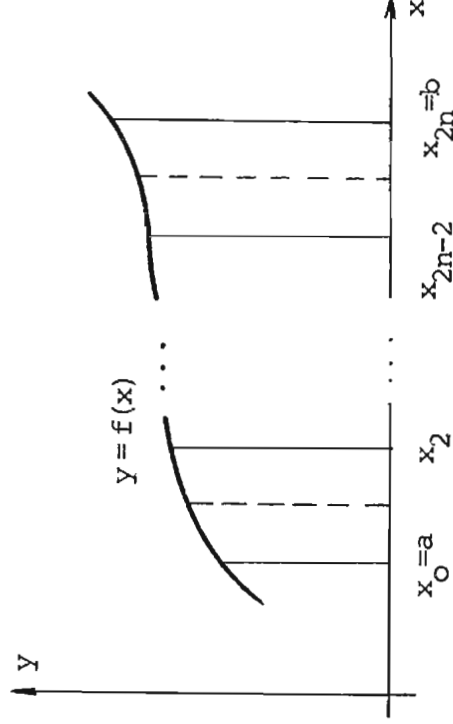
iz (2.4.1) neposredno sleduje jednakost (2.4.2).

Kvadratura formula

$$\int_a^b f(x)dx \approx T_n(f;h) \quad (h = \frac{b-a}{n})$$

naziva se uopštena trapezna formula.

Pretpostavimo sada da je $h = \frac{b-a}{2n}$, tj. $x_i = a+ih$ ($i=0, 1, \dots, 2n$) (videti sl.2.4.2), a zatim na podsegmente $[x_0, x_2], \dots, [x_{2n-2}, x_{2n}]$ primenimo Simpsonovu formulu. Na taj način dobijamo uopštenu Simpsonovu formulu



Sl. 2.4.2

$$\int_a^b f(x) dx = S_n(f; h) \quad (h = \frac{b-a}{2n}),$$

gde je

$$S_n = S_n(f; h) = \frac{h}{3} \{f_0 + 4(f_1 + \dots + f_{2n-1}) + 2(f_2 + \dots + f_{2n-2}) + f_{2n}\}.$$

Teorema 2.4.2. Ako $f \in C^4[a, b]$ važi jednakost

$$\int_a^b f(x) dx - S_n = -\frac{(b-a)^5}{2880n} f^{IV}(\xi) \quad (a < \xi < b).$$

Dokaz je sličan dokazu teoreme 2.4.1.

Daćemo sada jednu uopštenu kvadraturnu formulu otvorenog tipa koja se naziva pravilo srednje tačke, a koja se dobija pri-
menom elementarne formule

$$\int_c^{c+h} f(x) dx = hf(c + \frac{h}{2}).$$

Neka je

$$M_n = M_n(f; h) = h(f_{1/2} + f_{3/2} + \dots + f_{(2n-1)/2}),$$

gde su $f_{(2k-1)/2} = f(a + \frac{2k-1}{2}h)$ ($k=1, \dots, n$) i $h = \frac{b-a}{n}$.

Teorema 2.4.3. Ako $f \in C^2[a, b]$ važi

$$\int_a^b f(x) dx - M_n = \frac{(b-a)^3}{24n^2} f''(\xi) \quad (a < \xi < b).$$

Iz teorema 2.4.1 i 2.4.3 sleđuje

Posledica 2.4.1. Ako $f \in C^2[a, b]$ i $f''(x) \geq 0$ na $[a, b]$, tada je

$$M_n \leq \int_a^b f(x) dx \leq T_n.$$

Sledeća teorema se može izvesti kao specijalan slučaj je-
dnog opštijeg rezultata dođijenog u radu [56].

Teorema 2.4.4. Neka je f dva puta diferencijabilna funkcija na
 $[a, b]$ sa ograničenim drugim izvodom, tj. $|f''(x)| \leq A$ ($\forall x \in [a, b]$).

Tada je

$$\left| \int_a^b f(x) dx - \frac{1}{2}(T_n + M_n) \right| \leq \frac{A}{48n^2} \quad (h = \frac{b-a}{n}).$$

Primer 2.4.1. Primenom uopštene trapezne i uopštene Simpsonove formule izračunavamo integral

$$\int_{1.0}^{1.2} \sqrt{x} \, dx,$$

čija je tačna vrednost $\frac{2}{3}((1.2)^{3/2} - 1) = 0.2096894\dots$, ili, zaokružljena na šest značajnih cifara, 0.209689. Kod izračunavanja korišćimo se tablicom vrednosti funkcije $x \mapsto f(x) = \sqrt{x}$

x	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
f(x)	1.00000	1.02470	1.04881	1.07238	1.09544

Imamo

$$T_4 = 0.05 \left\{ \frac{1}{2} \cdot 1.00000 + (1.02470 + 1.04881 + 1.07238) \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2} \cdot 1.09544 \right\} = 0.2096805$$

i

$$S_2 = \frac{0.05}{3} \{ 1.00000 + 4(1.02470 + 1.07278) + 2 \cdot 1.04881$$

$$+ 1.09544 \} = 0.2096896,$$

ili, zaokružljivanjem na šest značajnih cifara,

$$T_4 = 0.209680 \quad \text{i} \quad S_2 = 0.209690,$$

pri čemu su odgovarajuće greške $9 \cdot 10^{-6}$ i $1 \cdot 10^{-6}$.

Ispitajmo sada kako utiču greške zaokružljivanja u vrednostima f_k na rezultat koji se dobija primenom uopštene trapezne i uopštene Simpsonove formule. Neka \bar{f}_k označava zaokružljenu vrednost od f_k , tj. neka je odgovarajuća greška zaokružljivanja $e_k = \bar{f}_k - f_k$. Sem toga, neka je $|e_k| \leq E$. Kako je

$$T_n(\bar{f}; h) = T_n(f; h) + T_n(e; h) \quad (e(x) = \bar{f}(x) - f(x)),$$

imamo

$$|T_n(e; h)| \leq h \left(\frac{1}{2} |e_0| + \sum_{k=1}^{n-1} |e_k| + \frac{1}{2} |e_n| \right) \leq nhE = (b-a)E.$$

Ista granica za grešku se dobija i kod Simpsonove formule. Naime, imamo

$$\begin{aligned} |S_n(e; f)| &\leq \frac{h}{3} \{ |e_0| + 4(|e_1| + \dots + |e_{2n-1}|) \\ &\quad + 2(|e_2| + \dots + |e_{2n-2}|) + |e_{2n}| \} \\ &\leq \frac{h}{3} (1 + 4n + 2(n-1) + 1) E = (b-a)E. \end{aligned}$$

Kako su vrednosti funkcije f , u primeru 2.4.1, zaokrugljene na šest značajnih cifara, tj. njihove apsolutne greške ne prelaze $5 \cdot 10^{-6}$, za grešku kod izračunavanja sume T_4 važi ocena

$$|T_4(e; 0.05)| \leq (1.2 - 1) \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 10^{-6}.$$

Ista je granica i za $|S_2(e; 0.05)|$.

Na kraju napomenimo da za veličine T_n , M_n , S_n važi jedna-kost

$$S_n(f; h) = \frac{1}{3}(T_n(f; 2h) + 2M_n(f; 2h)),$$

gde je $h = \frac{b-a}{2n}$.

7.2.5. Metodi za ocenu ostatka u kvadraturnim formulama

Kod numeričke integracije, kao što smo videli, javlja se greška ili ostatak kvadrature formule $R_n(f)$, tj.

$$\int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f).$$

Naravno, kod izračunavanja sume $\sum_{k=1}^n A_k f(x_k)$ javlja i greška zao-krugljivanja, koja zavisi od tačnosti računara.

U ranijem izlaganju, dali smo ocenu ostatka $R_n(f)$ u nekim elementarnim kvadraturnim formulama. U opštem slučaju, veličina $R_n(f)$ zavisi od izbora kvadrature formule i od osobina funkcije f .

U ovom odeljku, daćemo dva metoda za ocenu ostatka kvadraturnih formula. Prvi metod se odnosi na klasu neprekidno-diferencijabilnih funkcija, a drugi na jednu klasu analitičkih funkcija.

Primetimo, najpre, da je funkcionala L definisana na izve-
snoj klasi funkcija X , pomoću

$$Lf = R_n(f) = \int_a^b p(x)f(x)dx - \sum_{k=1}^n A_k f(x_k),$$

linearna funkcionala na X .

Teorema 2.5.1.1 (Peano). Neka je $R_n(f) \equiv 0$ za svako $f \in \mathcal{P}_m$. Tada je,
za svako $f \in C^{m+1}[a, b]$,

$$(2.5.1) \quad R_n(f) = \int_a^b K_m(t)f^{(m+1)}(t)dt,$$

gde je $K_m(t) = \frac{1}{m!} Lu$ i funkcija $x \mapsto u(x)$ definisana pomoću

$$u(x) = \begin{cases} (x-t)_+^m & (x \geq t) \\ 0 & (x < t). \end{cases}$$

Dokaz. S obzirom da se ostatak E_m u Taylorovoj formuli

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \dots + \frac{1}{m!} f^{(m)}(a)(x-a)^m + E_m$$

može predstaviti u obliku

$$E_m = \frac{1}{m!} \int_a^x (x-t)^m f^{(m+1)}(t)dt = \frac{1}{m!} \int_a^b (x-t)_+^m f^{(m+1)}(t)dt,$$

primenom linearne funkcionele L na f , dobijamo

$$Lf = \sum_{i=0}^m \frac{1}{i!} f^{(i)}(a)L((x-a)^i) + \frac{1}{m!} L \left(\int_a^b (x-t)_+^m f^{(m+1)}(t)dt \right).$$

Kako je, međjutim, $Lf = 0$ ($\forall f \in \mathcal{P}_m$) poslednja jednakost
se svodi na

$$R_n(f) = \frac{1}{m!} \int_a^b (Lu)f^{(m+1)}(t)dt,$$

gde smo stavili $u(x) = (x-t)_+^m$.

Ovim je dokaz završen.

Primerba 2.5.1.1. Funkcija $t \mapsto K_m(t)$ se naziva Peanovo jezgro za
funkcionalu L . Primetimo, takodje, da je

$$m!K_m(t) = \int_a^b p(x)(x-t)_+^m dx - \sum_{x_k > t} A_k (x_k - t)^m.$$

U slučaju kada je $p(x) \equiv 1$, poslednja jednakost se svodi na

$$m!K_m(t) = \frac{(b-t)^{m+1}}{m+1} - \sum_{x_k > t} A_k (x_k - t)^m.$$

Posledica 2.5.1. Ako jezgro K_m ne menja znak na $[a, b]$, važi

$$(2.5.2) \quad R_n(f) = \frac{f^{(m+1)}(\xi)}{(m+1)!} R_n(x^{m+1}) \quad (a < \xi < b).$$

Dokaz. Ako u (2.5.1) stavimo $f(x) = x^{m+1}$, dobijamo

$$R_n(f) = (m+1)! \int_a^b K_m(t) dt.$$

S druge strane, na osnovu teoreme o srednjoj vrednosti odredjenih integrala, jednakost (2.5.1) može se predstaviti u obliku

$$R_n(f) = f^{(m+1)}(\xi) \int_a^b K_m(t) dt \quad (a < \xi < b),$$

s obzirom da $f \in C^{m+1}[a, b]$.

Kombinujući poslednje dve jednakosti, dobijamo (2.5.2).

Primer 2.5.1. Odredimo ostatak u trapeznoj formuli. Ovde je $n=2$, $m=1$ i

$$R_2(f) = \int_a^b f(x) dx - \frac{b-a}{2} (f(a) + f(b)).$$

Primenom Peanoove teoreme, imamo

$$\begin{aligned} K_1(t) &= \int_a^b (x-t)_+ dx - \frac{b-a}{2} ((a-t)_+ + (b-t)_+), \\ &= \frac{1}{2}(a-t)(b-t). \end{aligned}$$

Kako je $K(t) \leq 0$ ($t \in [a, b]$), možemo koristiti tvrdjenje posledice 2.5.1, pa je

$$R_2(f) = \frac{1}{2} f''(\xi) R_2(x^2) = -\frac{(b-a)^3}{12} f''(\xi) \quad (a < \xi < b).$$

Neka je, sada, X Hilbertov prostor regularnih funkcija $z \mapsto f(z)$ u disku $|z| < 1$ i neprekidnih na $\Gamma = \{z \mid |z| = 1\}$, za skalarnim proizvodom

$$(f, g) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} f(z) \overline{g(z)} \, ds \quad (f, g \in X),$$

gde je ds element luka krive Γ .

Primerba 2.5.2. Sistem funkcija $\{1, z, z^2, \dots\}$ u prostoru X je ortonormiran, tj.

$$(z^m, z^n) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} z^m \overline{z^n} \, ds = \begin{cases} 1 & (m = n), \\ 0 & (m \neq n), \end{cases}$$

što se lako proverava neposrednim izračunavanjem.

Ako je $-1 < a < b < 1$ i $f \in X$, daćemo ocenu ostatka

$$R_n(f) = \int_a^b f(x) \, dx - \sum_{k=1}^n A_k f(x_k).$$

Jednostavnosti radi, pretpostavićemo da $-1 < x_k < 1$ ($k=1, \dots, n$).

Kako je, na osnovu Cauchyve formule,

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{f(\xi)}{\xi - z} \, d\xi = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \frac{f(\xi)}{1 - z\bar{\xi}} \, ds \quad (d\xi = i\bar{\xi} ds),$$

imamo

$$(2.5.3) \quad Lf = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} f(\xi) L\left(\frac{1}{1 - z\bar{\xi}}\right) ds,$$

gde je $Lf = R_n(f)$. Primenom Cauchy-Schwarzove nejednakosti na (2.5.3) dobijamo

$$(2.5.4) \quad |Lf|^2 \leq \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma} |f(\xi)|^2 ds \int_{\Gamma} \left|L\left(\frac{1}{1 - z\bar{\xi}}\right)\right|^2 ds.$$

Kako je $\|f\|^2 = (f, f) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} |f(\xi)|^2 ds$,

$$Q = L\left(\frac{1}{1 - z\bar{\xi}}\right) = \sum_{p=0}^{+\infty} L(z^p) \bar{\xi}^p$$

i

$$\sigma^2 = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma} |Q|^2 ds = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma} Q \bar{Q} ds = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=0}^{+\infty} |L(z^p)|^2,$$

pri čemu je iskorišćena osobina ortonormiranosti niza

$\{1, z, z^2, \dots\}$, (2.5.4) se svodi na

$$|Lf|^2 \leq \frac{1}{2\pi} \|f\|^2 (2\pi)^2 \sigma^2,$$

tj.

$$(2.5.5) \quad |R_n(f)| \leq (2\pi)^{1/2} \sigma \|f\|.$$

Ako pretpostavimo da kvadraturna formula ima algebarski stepen tačnosti m , tada se izraz za σ^2 svodi na

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=m+1}^{+\infty} |L(z^p)|^2.$$

Za normu $\|f\|$ najčešće se koristi gruba ocena $\|f\| \leq \max_{|z|=1} |f(z)|$ i tada iz (2.5.5) sleduje

$$|R_n(f)| \leq (2\pi)^{1/2} \sigma \max_{|z|=1} |f(z)|.$$

U radovima [32], [33], [34], Hämmerlin je odredio granice za σ u nekim standardnim kvadraturnim formulama. Tako, na primer, ako je $[a, b] = [-1/2, 1/2]$, on je dokazao nejednakosti

$$(2\pi)^{1/2} \sigma < 0.189h^2 \quad (\text{za uopštenu trapeznu formulu}),$$

$$(2\pi)^{1/2} \sigma < 0.253h^4 \quad (\text{za uopštenu Simpsonovu formulu}).$$

7.2.6. Neki metodi za povećanje tačnosti kvadraturnih formula

Ostatak u kvadraturnoj formuli

$$(2.6.1) \quad \int_a^b f(x) dx = \sum_{k=0}^n A_k f(x_k) + R_{n+1}(f),$$

po pravilu, se može učiniti proizvoljno malim, ukoliko se uzme dovoljno veliko n . Međutim, po svaku cenu n ne treba povećavati, s obzirom da se pri numeričkom radu javljaju greške o kojima je bilo reči u poglavlju 1.2. Izložićemo sada jednu ideju za povećavanje tačnosti formule (2.6.1), pri fiksiranom n , koja se sastoji u sukcesivnom izdvajanju tzv. glavnog dela ostatka.

Posmatrajmo uopštenu trapeznu formulu (videti odeljak 7.2.4)

$$\int_{x_0=a}^{x_n=b} f(x) dx = T_n(f; h) + R_{n+1}(f),$$

gde je $T_n(f;h) = h(\frac{1}{2}f_0 + f_1 + \dots + f_{n-1} + \frac{1}{2}f_n)$ i $f_i = f(x_i) = f(x_0 + ih)$ ($i=0,1,\dots,n$). Ako $f \in C^2[a,b]$, ostatak se može, kao što je poznato, predstaviti u obliku

$$R_{n+1}(f) = -\frac{(b-a)h^2}{12} f''(\xi) \quad (a < \xi < b).$$

Pod uslovom da je funkcija f dovoljan broj puta diferencijabilna, ideja o sukcesivnom izdvajanju glavnog dela ostatka, može se sprovesti razvijanjem ostatka $R_{n+1}(f)$ u red po koraku h . Dodajući članove ovog reda sumi $T_n(f;h)$ dobijamo niz kvadrurnih formula, čija se tačnost povećava sa brojem dodatnih članova.

Definicija 2.6.1. Koficijenti B_k ($k=0,1,\dots$) u razvoju

$$(2.6.2) \quad \frac{x}{e^{x-1}} = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{B_k}{k!} x^k \quad (|x| < 2\pi)$$

nazivaju se Bernoullievi brojevi.

Na osnovu (2.6.2), tj. jednakosti

$$x = (x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 + \dots)(B_0 + B_1x + \frac{1}{2!}B_2x^2 + \dots),$$

zaključujemo da je $B_{2i+1}=0$ ($i=1,2,\dots$) i

$$B_0=1, \quad B_1 = -\frac{1}{2}, \quad B_2 = \frac{1}{6}, \quad B_4 = -\frac{1}{30}, \quad B_6 = \frac{1}{42},$$

$$B_8 = -\frac{1}{30}, \quad B_{10} = \frac{5}{66}, \quad B_{12} = -\frac{691}{2730}, \quad B_{14} = \frac{7}{6}, \text{ itd.}$$

Izrazićemo najpre operator Δ^{-1} pomoću operatora diferenciranja. Kako je $e^{hD} = 1 + \Delta$, imamo

$$\Delta^{-1} = (e^{hD} - 1)^{-1} = \frac{D^{-1}}{h} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{B_k}{k!} (hD)^k,$$

tj.

$$\Delta^{-1} = \frac{1}{h} D^{-1} - \frac{1}{2} + \frac{1}{12} hD - \frac{1}{720} (hD)^3 + \dots$$

Kako je, dalje,

$$f_n - f_0 = \sum_{i=0}^{n-1} (f_{i+1} - f_i) = \sum_{i=0}^{n-1} \Delta f_i = \Delta \left(\sum_{i=0}^{n-1} f_i \right),$$

$$\Delta^{-1} (f_n - f_0) = \sum_{i=0}^{n-1} f_i,$$

$$D^{-1}(f_n - f_0) = D^{-1} \Delta \left(\sum_{i=0}^{n-1} f_i \right) = \sum_{i=0}^{n-1} J f_i = \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx,$$

primenom operatora Δ^{-1} na $f_n - f_0$, dobijamo Euler-Maclaurinovu sumacionu formulu

$$(2.6.3) \quad \sum_{i=0}^{n-1} f_i = \frac{1}{h} \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx - \frac{1}{2}(f_n - f_0) + \sum_{i=1}^m \frac{B_{2k} h^{2k-1}}{(2k)!} (f_n^{(2k-1)} - f_0^{(2k-1)}) + E_m(f),$$

gde je

$$E_m(f) = n \frac{B_{2m+2} h^{2m+2}}{(2m+2)!} f^{(2m+2)}(\xi) \quad (x_0 < \xi < x_n).$$

Formula (2.6.3) se može predstaviti u obliku

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = T_n(f; h) - \sum_{k=1}^m \frac{B_{2k} h^{2k}}{(2k)!} (f_n^{(2k-1)} - f_0^{(2k-1)}) - h E_m(f),$$

tj.

$$(2.6.4) \quad \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = T_n(f; h) - \frac{h^2}{12} (f'_n - f'_0) + \frac{h^4}{720} (f'''_n - f'''_0) -$$

$$- \frac{B_{2m} h^{2m}}{(2m)!} (f^{(2m-1)}_n - f^{(2m-1)}_0) - h E_m(f).$$

Primer 2.6.1. Za $m=1$, formula (2.6.4) se svodi na

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = T_n(f; h) - \frac{h^2}{12} (f'_n - f'_0) + \frac{nh^5}{720} f^{IV}(\xi) \quad (x_0 < \xi < x_n).$$

Poslednju formulu primenimo na izračunavanje vrednosti integrala iz primera 2.4.1 sa $h=0.05$, tj. $n=4$.

Kako je $f'(x) = \frac{1}{2} x^{-1/2}$ i $T_4 = 0.209680$, imamo

$$\int_{1.0}^{1.2} \sqrt{x} dx = 0.209680 - \frac{0.05^2}{12} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1.2}} - 1 \right) = 0.209689.$$

Euler-Maclaurinova formula ima primenu i kod izračunavanja zbira $S = f_0 + f_1 + \dots + f_n$.

Primer 2.6.2. Izračunaćemo zbir

$$S = \frac{1}{11^3} + \frac{1}{13^3} + \frac{1}{15^3} + \dots + \frac{1}{15^3}$$

uzimajući u formuli (2.6.3) $f(x)=1/x^3$, $h=2$, $n=20$, $x_0=11$, $x_{20}=51$, $m=3$.

Kako je $f'(x)=-3/x^4$, $f''(x)=-60/x^6$, $f'''(x)=-2520/x^8$,

imamo

$$S \approx \frac{1}{2} \int_{11}^{51} \frac{dx}{x^3} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{11^3} + \frac{1}{51^3} \right) + \frac{2}{12} \left(-\frac{3}{51^4} + \frac{3}{11^4} \right) - \frac{8}{720} \left(-\frac{60}{51^6} + \frac{60}{11^6} \right) + \frac{32}{42 \cdot 6!} \left(-\frac{2520}{51^8} + \frac{2520}{11^8} \right)$$

$$\approx \frac{1}{100} (0.1969999 + 0.0379427 + 0.0034077 + 0.0000376 + 0.0000012) = 0.2383891 \cdot 10^{-2},$$

tj. $S \approx 0.002383891$.

Pored formule (2.6.3) postoje i druge sumacione formule.

Na primer, formula

$$(2.6.5) \quad \sum_{i=0}^{n-1} f_{i+(1/2)} = \frac{1}{h} \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx - \sum_{k=1}^m \frac{(1-2^{1-2k}) B_{2k} h^{2k-1}}{(2k)!} (f_n^{(2k-1)} - f_0^{(2k-1)}) + E'_m,$$

gde je

$$E'_m = E'_m(f) = -n \frac{(1-2^{-1-2m}) B_{2m+2} h^{2m+2}}{(2m+2)!} f^{(2m+2)}(\xi) \quad (x_0 < \xi < x_n),$$

koja se naziva druga Euler-Maclaurinova formula, generališe tzv. pravilo srednje tačke (videti odeljak 7.2.4).

Navedene Euler-Maclaurinove formule mogu se modifikovati na taj način što bi se izvodi funkcije f u tačkama x_0 i x_n zamenili odgovarajućim diferencnim formulama.

Na primer, ako izvode u tački x_0 zamenimo pomoću formula sa operatorom prednje razlike, tj.

$$h^k f_0^{(k)} = \Delta^k f_0 - \frac{k}{2} \Delta^{k+1} f_0 + \frac{k(3k+5)}{24} \Delta^{k+2} f_0 - \dots,$$

a izvode u tački x_n pomoću formula sa operatorom zadnje razlike, tj.

$$h^k f_n^{(k)} = \nabla^k f_n + \frac{k}{2} \nabla^{k+1} f_n + \frac{k(3k+5)}{24} \nabla^{k+2} f_n + \dots,$$

iz (2.6.4) sleduje Gregorjeva formula

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx \sim T_n(f; h) - h \sum_{k=1}^{+\infty} G_k (\nabla^k f_n + (-1)^k \Delta^k f_0),$$

gde su

$$G_1 = \frac{1}{12}, \quad G_2 = \frac{1}{24}, \quad G_3 = \frac{19}{720}, \quad G_4 = \frac{3}{160}, \quad G_5 = \frac{864}{60480}, \text{ itd.}$$

Primerba 2.6.1. Koefficienti G_k mogu se odrediti iz relacije

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{n+1-k} G_k = \frac{n}{2(n+1)(n+2)}.$$

7.2.7. Richardsonova ekstrapolacija i Bombergova integracija

Posmatrajmo kvadraturnu formulu

$$(2.7.1) \quad I = \int_a^b f(x) dx = \sum_k A_k f(x_k) + R(f),$$

u kojoj su tačke x_k ($\in [a, b]$) uzete ekvidistantno sa korakom h . Sa $I(h)$ označimo približnu vrednost integrala I koja se dobija primenom ove kvadrature formule. Pretpostavimo, dalje, da je ostatak reda r ($r \in \mathbb{N}$), tj. da je oblika

$$(2.7.2) \quad R(f) = Ch^r + O(h^{r+1}),$$

gde C ne zavisi od h .

Očigledno je da $I(h) \rightarrow I$, kada $h \rightarrow 0$. Ako za h uzmemo dve vrednosti h_1 i h_2 ($h_2 < h_1$) i sa njima odredimo približne vrednosti integrala I (primenom formule (2.7.1)), sledećim postupkom, po pravilu, se može dobiti tačnija vrednost ovog integrala nego što su vrednosti $I(h_1)$ i $I(h_2)$. Naime, iz (2.7.1) i (2.7.2) sleduje

$$I - I(h_1) = Ch_1^r + O(h_1^{r+1})$$

i

$$I - I(h_2) = Ch_2^r + O(h_2^{r+1}).$$

Zanemarivanjem veličina $O(h_1^{r+1})$ i $O(h_2^{r+1})$ u poslednjim jednakostima i eliminacijom parametra C dobijamo formulu

$$(2.7.3) \quad I \cong \frac{\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^r I(h_2) - I(h_1)}{\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^r - 1} = I(h_2) + \frac{I(h_2) - I(h_1)}{\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^r - 1},$$

koja je poznata kao Richardsonova ekstrapolacija*. U praktičnim računanjima najčešće se uzima $h_2 = h_1/2$ i u tom slučaju formula (2.7.3) se svodi na

$$(2.7.4) \quad I \cong \frac{2^r I(h_2) - I(h_1)}{2^r - 1}.$$

Primerba 2.7.1. Ako se kao formula (2.7.1) uzme uopštena trapezna formula ili pravilo srednje tačke imamo $r=2$, dok je kod uopštenih Simpsonove formule $r=4$.

Primenom ideje koju daje Richardsonova ekstrapolacija, na Euler-Maclaurinovu sumacionu formulu može se doći do jednog rekurzivnog metoda za numeričku integraciju, koji je poznat kao Rombergova integracija ([75]). Kompletna teorija u vezi sa ovim metodom data je u radu [6].

Neka je (2.7.1) uopštena trapezna formula. Tada za $f \in C^{2m+2}[a,b]$, na osnovu Euler-Maclaurinove sumacione formule važi

$$(2.7.5) \quad R(f) = C_1 h^2 + C_2 h^4 + C_3 h^6 + \dots + C_m h^{2m} - (b-a) \frac{B_{2m+2} h^{2m+2}}{(2m+2)!} f^{(2m+2)}(\xi) \quad (\xi \in (a,b)),$$

gde su B_{2k} Bernoullievi brojevi i

$$C_k = - \frac{B_{2k}}{(2k)!} \{ f^{(2k-1)}(b) - f^{(2k-1)}(a) \} \quad (k=1, \dots, m).$$

Ako stavimo $h=h_k=(b-a)/2^k$ i odgovarajuću trapeznu aproksimaciju $T_n(f;h)$ ($n=2^k$) označimo sa $T_k^{(0)}$, tada primena Richardsonove eks-

* Ovdje se, u stvari, prognozira vrednost $I(0)$ na osnovu vrednosti $I(h_1)$ i $I(h_2)$.

trapolacije na $T_k^{(0)}$ i $T_{k+1}^{(0)}$, saglasno (2.7.4), daje

$$I \approx \frac{2^2 T_{k+1}^{(0)} - T_k^{(0)}}{2^2 - 1}.$$

Desnu stranu poslednje približne jednakosti označimo sa $T_k^{(1)}$. Odradićemo sada grešku u aproksimaciji $I = I_k^{(1)}$.

Kako je

$$I - T_k^{(1)} = I - \frac{1}{3}(4T_{k+1}^{(0)} - T_k^{(0)}) = \frac{4}{3}(I - T_{k+1}^{(0)}) - \frac{1}{3}(I - T_k^{(0)}),$$

na osnovu (2.7.5) imamo

$$I - T_k^{(1)} = \frac{4}{3}\left(C_1\left(\frac{h_k}{2}\right)^2 + C_2\left(\frac{h_k}{2}\right)^4 + \dots\right) - \frac{1}{3}(C_1 h_k^2 + C_2 h_k^4 + \dots),$$

tj.

$$I - T_k^{(1)} = -\frac{1}{4} C_2 h_k^4 + O(h_k^6).$$

Dakle, greška je reda h_k^4 , kada $h_k \rightarrow 0$.

Pod uslovom da je funkcija f dovoljan broj puta diferencijabilna, navedeni postupak sugerise konstrukciju iterativnog procesa za određivanje vrednosti integrala I u obliku

$$T_k^{(m)} = \frac{h_k^2 T_{k+1}^{(m-1)} - h_k^2 T_k^{(m-1)}}{h_k^2 - h_{k+m}^2} \quad (m=1, 2, \dots),$$

tj.

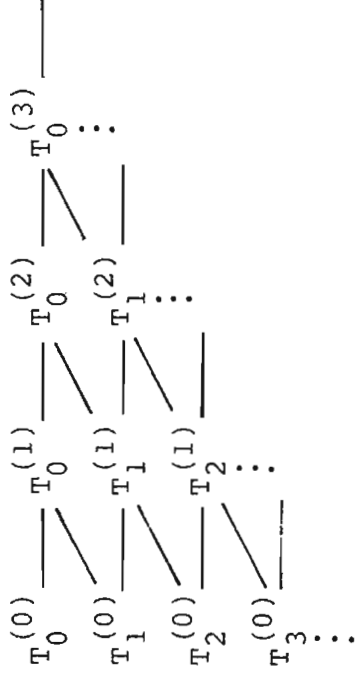
$$(2.7.6) \quad T_k^{(m)} = \frac{4^m T_{k+1}^{(m-1)} - T_k^{(m-1)}}{4^m - 1} \quad (m=1, 2, \dots),$$

s obzirom da je $h_k = (b-a)/2^k$.

Za grešku u aproksimaciji $T_k^{(m)}$ važi ocena

$$I - T_k^{(m)} = (-1)^{m+1} \frac{h_k^{2m+2} f^{(2m+2)}(\xi)}{2^m (m+1) (2m+2)!} \quad (a < \xi < b).$$

Na osnovu (2.7.6) može se konstruisati tzv. T-tabela



uzimajući $k=0,1,\dots$ i $m=1,2,\dots$. U prvoj koloni ove tabele nalaze se redom približne vrednosti integrala I dobijene primenom trapezne formule sa $h_k=(b-a)/2^k$ ($k=0,1,\dots$). Druga kolona ove tabele dobija se na osnovu prve, korišćenjem formule (2.7.6), treća na osnovu druge, itd.

Iterativni proces, definisan sa (2.7.6) predstavlja standardni Rombergov metod za numeričku integraciju. Može se dokazati da nizovi $\{T_k^{(m)}\}_{k \in \mathbb{N}_0}$ i $\{T_k^{(m)}\}_{m \in \mathbb{N}_0}$ (po kolonama i vrstama u Tabeli) konvergiraju ka I. Kod praktične primene Rombergove integracije, iterativni proces (2.7.6) se najčešće prekida kada je $|T_0^{(m)} - T_1^{(m-1)}| \leq \epsilon$, gde je ϵ unapred data dozvoljena greška, i tada se uzima $I \approx T_0^{(m)}$.

Primer 2.7.1. Primenom Rombergove integracije približno ćemo izračunati integral $\int_0^1 e^{-x^2} dx$. Pri računanju koristimo se približnim vrednostima podintegralne funkcije u tačkama $x_i=i/8$ ($i=0,1,\dots,8$)

$$f_0=1.000000, \quad f_1=0.984497, \quad f_2=0.939413,$$

$$f_3=0.868815, \quad f_4=0.778801, \quad f_5=0.676634,$$

$$f_6=0.569783, \quad f_7=0.465044, \quad f_8=0.367880.$$

Uvedimo, prethodno oznaku $A_k=T_k^{(0)}/h_k$ ($k=0,1,\dots$).

Primenom trapezne formule sa $h_k=1/2^k$ ($k=0,1,2,3$) imamo redom

$$A_0 = \frac{1}{2}f_0 + \frac{1}{2}f_8 = 0.683940, \quad T_0^{(0)} = h_0 A_0 = 0.683940;$$

$$A_1 = A_0 + f_4 = 1.462741, \quad T_1^{(0)} = h_1 A_1 = 0.7313705;$$

$$A_2 = A_1 + f_2 + f_6 = 2.971937, \quad T_2^{(0)} = h_2 A_2 = 0.7429842,$$

$$A_3 = A_2 + f_1 + f_3 + f_5 + f_7 = 5.966927, \quad T_3^{(0)} = h_3 A_3 = 0.7458658,$$

a zatim primenom formule (2.7.6) na ove rezultate dobijamo T-ta-
belu

$$0.683940 \quad 0.7471806 \quad 0.7468337 \quad 0.7468241$$

$$0.7313705 \quad 0.7468554 \quad 0.7468243$$

$$0.7429842 \quad 0.7468263$$

$$0.7458658$$

Dakle, dati integral je približno jednak 0.746824.

Rombergov metod, koji je prezentiran, sastoji se u sukcesivnom polovljenju intervala integracije, s obzirom da je $h_k = (b-a)/n_k$ i $n_k = 2^k$ ($k=0, 1, \dots$). Ovaj metod se može modifikovati u tom smislu da se za $\{n_k\}_{k \in \mathbb{N}_0}$ odabere neki drugi podniz prirodnih brojeva, ali takav da je $n_{k+1}/n_k > c > 1$. Na primer, u radu [6], za $\{n_k\}$ je korišćen niz $\{1, 2, 3, 6, 9, 18, 27, 54, \dots\}$. Tada je

$$T_k^{(m)} = \begin{cases} \frac{3^m T_{k+1}^{(m-1)} - T_k^{(m-1)}}{3^m - 1} & (m \text{ parno}), \\ \frac{4 \cdot 3^m T_{k+1}^{(m-1)} - 4 T_k^{(m-1)}}{4 \cdot 3^m - 3} & (m \text{ neparno, } k \text{ parno}), \\ \frac{3^{m+1} T_{k+1}^{(m-1)} - 4 T_k^{(m-1)}}{3^{m+1} - 4} & (m \text{ neparno, } k \text{ neparno}). \end{cases}$$

Pretpostavimo sada da formula (2.7.1) predstavlja pravilo srednje tačke, tj.

$$I = \int_a^b f(x) dx \approx M_n(f; h) + R(f),$$

$$\text{gde je } M_n(f; n) = h \sum_{i=0}^{n-1} f(a + \frac{2i+1}{2}h) \quad \text{i} \quad h = \frac{b-a}{n}.$$

Ako $f \in C^{2m+2}[a, b]$, na osnovu druge Euler-Maclaurinove suma-

cione formule (2.6.5), ostatak $R(f)$ se može predstaviti u obliku

$$R(f) = -\frac{1}{2}C_1 h^2 - \frac{7}{8}C_2 h^4 - \frac{31}{32}C_3 h^6 - \dots - \left(1 - \frac{2}{4^m}\right) C_m h^{2m} \\ + (b-a) \left(1 - \frac{2}{4^{m+1}}\right) \frac{B_{2m+2} h^{2m+2}}{(2m+2)!} f^{(2m+2)}(\xi) \quad (a < \xi < b),$$

gde su koeficijenti C_k ($k=1, \dots, m$) isti kao u formuli (2.7.5).

Ako stavimo $n=2^k$, tj. $h=h_k=(b-a)/2^k$ i aproksimaciju $M_n(f;h)$ označimo sa $M_k^{(0)}$, koristeći se istim postupkom kao kod uopštene tražene formule, možemo konstruisati iterativni proces

$$(2.7.7) \quad M_k^{(m)} = \frac{4^m M_{k-1}^{(m-1)} - M_k^{(m-1)}}{4^m - 1} \quad (m=1, 2, \dots).$$

Uzimajući $k=0, 1, \dots$ i $m=1, 2, \dots$ na osnovu (2.7.7) možemo formirati tzv. M-tabelu

$$\begin{array}{ccccccc} M_0^{(0)} & \text{---} & M_0^{(1)} & \text{---} & M_0^{(2)} & \text{---} & M_0^{(3)} & \text{---} \\ & \diagdown & & \diagup & & \diagdown & & \diagup \\ M_1^{(0)} & \text{---} & M_1^{(1)} & \text{---} & M_1^{(2)} & \text{---} & & \\ & \diagdown & & \diagup & & \diagdown & & \diagup \\ M_2^{(0)} & \text{---} & M_2^{(1)} & \text{---} & & & & \\ & \diagdown & & \diagup & & & & \diagup \\ M_3^{(0)} & \text{---} & & & & & & \\ & \diagdown & & & & & & \diagup \\ & & & & & & & \vdots \\ & & & & & & & \vdots \end{array}$$

Primitimo da elementi T i M -tabele stoje u određenoj vezi. Naime, ako pretpostavimo da smo izračunali $T_{k-1}^{(0)}$ i $M_{k-1}^{(0)}$, tada se sledeći element u prvoj koloni T -tabele može odrediti pomoću

$$T_k^{(0)} = \frac{1}{2}(T_{k-1}^{(0)} + M_{k-1}^{(0)}).$$

Naravno, važi i opštija jednakost

$$T_k^{(m)} = \frac{1}{2}(T_{k-1}^{(m)} + M_{k-1}^{(m)}).$$

Korišćenjem poslednje jednakosti, (2.7.6) postaje

$$T_k^{(m)} = M_k^{(m-1)} + \frac{(2 \cdot 4^{m-1} - 1)(T_k^{(m-1)} - M_k^{(m-1)})}{4^m - 1} \quad (m=1, 2, \dots).$$

M-tabela sama za sebe nema neki praktični značaj, međjutim, ona se može uspešno koristiti za konstrukciju T-tabele, zahvaljujući napred navedenim jednakostima.

7.2.8. Gauss-Christoffelove kvadrature formule

Centralno mesto u numeričkoj integraciji zauzimaju kvadrature formule interpolacionog tipa sa maksimalnim algebarskim stepenom tačnosti, poznate kao Gaussove ili, preciznije, kao Gauss-Christoffelove kvadrature. Klasična konstrukcija ovih formula je zasnovana na pristupu (b), datom u odeljku 7.2.2, tj. na rešavanju sistema nelinearnih jednačina (2.2.4).

Posmatrajmo opšti slučaj integracije sa težinskom funkcijom, tj. Gauss-Christoffelove kvadrature oblika

$$(2.8.1) \quad \int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f),$$

čiji je algebarski stepen tačnosti $p=2n-1$. Dakle, $R_n(f) \equiv 0$ za sva-ko $f \in \mathcal{P}_{2n-1}$.

Prve ideje o ovakvim kvadraturama potiču od Newtona (1676). Cotes je nezavisno od Newtona, takodje, koristio slične ideje. Os-lanjajući se na radove Newtona i Cotesa i svoj rad o hipergeomet-rijskim razvojjima iz 1812. godine, C.F. Gauss ([18]) je 1814. ra-zvio famozni metod za integraciju, koji značajno poboljšava dotad poznate Newton-Cotesove formule. Gauss je razmatrao slučaj $p(x)=1$ i numerički odredio parametre za $n \leq 7$. Gaussove rezultate je po-jednostavio (po formi) C.G.J. Jacobi (1826). U toku 19. veka Gau-ssove kvadrature su detaljnije razradjivali i dalje razvijali F. G. Mehler (1864), E.B.Christoffel (1858) i drugi. Dobijene rezul-tate su sistematizovali i uobličili u teoriju Christoffel (1877), Radau (1880) i Heine (1881).

Ovaj metod integracije danas se obično naziva Gauss-Chris-toffelov metod. U novije vreme (1966) pojavila se knjiga Strouda i Secresta ([82]) u kojoj je dat jedan opširan pregled ovih for-mula, uključujući i veliki broj numeričkih tabela. Novi značajan progres u konstrukciji Gauss-Christoffelovih formula učinjen je u poslednjih 10-15 godina. Ovde treba pomenuti značajne rezultate čo kojih su došli W.Gautschi ([19]-[24]), G.H.Golub i J.H.Welsch ([30]), R.A.Sack i A.F.Donovan ([76]), J.C.Wheeler ([96]) i drugi.

Takodje, u literaturi su razmatrane i trigonometrijske, eksponencijalne, racionalne, splajn i druge kvadrature Gaussovog tipa (na primer, Crout (1929/30), Newbery (1969), Tureckiĭ (1959, 1960), Haris i Evans (1977/78) i drugi. Detaljne informacije se mogu naći u radu W. Gautschia [23]).

Gauss-Christoffelove kvadrature se mogu razmatrati i za opštije integrale oblika

$$I(f) = \int_R f(x) d\lambda(x),$$

gde je $d\lambda(x)$ nenegativna mera na realnoj pravoj R sa kompaktnim ili beskonačnim nosačem i za koju egzistira prvih $2n$ momenata

$$C_k = \int_R x^k d\lambda(x) \quad (k=0, 1, \dots, 2n-1).$$

Slučaj (2.8.1) se dobija kada je $d\lambda(x)=p(x)dx$ ($x \in (a,b)$).

Teorija Gauss-Christoffelovih kvadratura je u uskoj vezi sa teorijom ortogonalnih polinoma (poglavlje 2.2, I deo knjige). Tačnije rečeno, glavno polje primene ortogonalnih polinoma su Gaussove kvadrature. Štaviše, konstruktivna teorija ortogonalnih polinoma je proistekla iz konstrukcije Gauss-Christoffelovih kvadratura za neklasične težinske funkcije.

Neka je $\{\Omega_k\}_{k \in \mathbb{N}_0}$ ortogonalan niz polinoma na (a,b) u odnosu na težinsku funkciju $x \mapsto p(x)$.

Teorema 2.8.1. Interpolaciona kvadratura formula (2.8.1) ima algebraarski stepen tačnosti $2n-1$, ako i samo ako su x_k ($k=1, \dots, n$) nule polinoma $x \mapsto \Omega_n(x)$.

Dokaz. Neka su x_k ($k=1, \dots, n$) nule polinoma Ω_n , koje su, kao što je poznato, realne, proste i leže u (a,b) . Neka je, dalje, f proizvoljan polinom iz \mathcal{P}_{2n-1} . Kako se ovaj polinom može predstaviti u obliku

$$(2.8.2) \quad f(x) = \Omega_n(x)u_{n-1}(x) + v_{n-1}(x),$$

gde su u_{n-1} i v_{n-1} polinomi iz \mathcal{P}_{n-1} , imamo

$$(2.8.3) \quad \int_a^b p(x)f(x)dx = \int_a^b p(x)\Omega_n(x)u_{n-1}(x)dx + \int_a^b p(x)v_{n-1}(x)dx,$$

tj.

$$\int_a^b p(x)f(x)dx = \int_a^b p(x)v_{n-1}(x)dx,$$

s obzirom da je prvi integral na desnoj strani u jednakosti (2.8.3) jednak nuli zbog ortogonalnosti niza $\{\Omega_k\}_{k \in \mathbb{N}_0}$.

Primena kvadrature formule (2.8.1) na desnu stranu poslednje jednakosti daje

$$\int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=1}^n A_k v_{n-1}(x_k) + R_n(v_{n-1}).$$

Kako je, na osnovu (2.8.2), $f(x_k) = v_{n-1}(x_k)$ ($k=1, \dots, n$) i kako je $R_n(v_{n-1}) \equiv 0$ (jer je formula interpolacionog tipa), zaključujemo da kvadratura formula (2.8.1) ima algebarski stepen tačnosti $2n-1$.

Dokažimo sada obrnuto tvrdjenje. Neka kvadratura formula (2.8.1) ima algebarski stepen tačnosti $2n-1$. Pomoću x_1, \dots, x_n konstruišimo polinom \hat{Q}_n , takav da je

$$\hat{Q}_n(x) = (x-x_1) \dots (x-x_n)$$

i posmatrajmo integral

$$I_m = \int_a^b p(x)x^m \hat{Q}_n(x)dx \quad (m=0, 1, \dots, n-1).$$

Kako je $x \mapsto x^m \hat{Q}_n(x)$ polinom iz $\mathcal{P}_{n+m} \subset \mathcal{P}_{2n-1}$, imamo

$$I_m = \sum_{k=1}^n A_k x_k^m \hat{Q}_n(x_k) = 0 \quad (m=0, 1, \dots, n-1),$$

odakle zaključujemo da niz polinoma $\{\hat{Q}_n\}_{n \in \mathbb{N}_0}$ mora biti ortogonalan na (a, b) sa težinskom funkcijom $x \mapsto p(x)$. S obzirom na jedinstvenost ovih polinoma (do na multiplikativnu konstantu), imamo $\hat{Q}_n(x) = c_n Q_n(x)$.

Ovim je dokaz teoreme završen.

Predjimo sada na određivanje težinskih koeficijenata A_k , koji su poznati kao Christoffelovi brojevi.

Na osnovu prethodne teoreme, za interpolacione čvorove x_k ($k=1, \dots, n$) kod Gauss-Christoffelovih kvadraturnih formula treba uzeti nule polinoma \hat{Q}_n . Dakle, u ovom slučaju, imamo

$$\omega(x) = (x-x_1) \cdots (x-x_n) = \frac{\Omega_n(x)}{a_n},$$

gde je a_n koeficijent uz najviši stepen u polinomu $Q_n (= a_n x^n + \dots)$ i

$$A_k = \int_a^b \frac{p(x)\omega(x)}{(x-x_k)\omega'(x_k)} dx = \frac{1}{\Omega_n'(x_k)} \int_a^b \frac{p(x)Q_n(x)}{x-x_k} dx \quad (k=1, \dots, n).$$

Teorema 2.8.2. Težinski koeficijenti Gauss-Christoffelove kvadratne formule mogu se eksplicitno izraziti pomoću

$$A_k = \frac{\alpha_n}{\gamma_n} \cdot \frac{\|\Omega_n\|^2}{Q_{n-1}(x_k)Q_n'(x_k)} \quad (k=1, \dots, n),$$

gde su x_k ($k=1, \dots, n$) nule polinoma Q_n , a α_n i γ_n konstante koje se javljaju u rekurentnoj relaciji

$$(2.8.5) \quad Q_{n+1}(x) = (\alpha_n x + \beta_n)Q_n(x) - \gamma_n Q_{n-1}(x) \quad (n \in \mathbb{N}).$$

Dokaz. Polazeći od Christoffel-Darbouxovog identiteta za ortogonalne polinome (odeljak 2.2.2)

$$(2.8.6) \quad \sum_{i=0}^n \frac{1}{\|\Omega_i\|^2} Q_i(x)Q_i(t) = \frac{1}{\alpha_n \|\Omega_n\|^2} \cdot \frac{Q_{n+1}(x)Q_n(t) - Q_n(x)Q_{n+1}(t)}{x-t},$$

gde je α_n konstanta u rekurentnoj relaciji (2.8.5), možemo odrediti težinske koeficijente A_k ($k=1, \dots, n$). Naime, ako u (2.8.6) stavimo $t=x_k$ ($\Rightarrow Q_n(t)=0$), a zatim dobijenu jednakost pomnožimo sa $p(x)$ i integralimo od a do b , dobijamo

$$\sum_{i=0}^n \frac{1}{\|\Omega_i\|^2} Q_i(x_k) \int_a^b p(x)Q_i(x) dx = \frac{-Q_{n+1}(x_k)}{\alpha_n \|\Omega_n\|^2} \int_a^b \frac{p(x)Q_n(x)}{x-x_k} dx,$$

tj.

$$(2.8.7) \quad A_k = - \frac{\alpha_n \|\Omega_n\|^2}{Q_n'(x_k)Q_{n+1}(x_k)} \quad (k=1, \dots, n),$$

pri čemu je iskorišćena osobina ortogonalnosti niza $\{Q_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$.

Najzad, ako u (2.8.5) stavimo $x=x_k$, dobijamo

$$Q_{n+1}(x_k) = -\gamma_n Q_{n-1}(x_k),$$

što zajedno sa (2.8.7) daje (2.8.4).

Jedno važno svojstvo Gauss-Christoffelovih kvadratura je da su svi težinski koeficijenti A_k pozitivni. Da bismo dokazali ovo, pustimo da $x \rightarrow t$ u (2.8.6), a zatim stavimo $t=x_k$. Zamenom dobijenog rezultata u (2.8.7) nalazimo da je

$$A_k = \left(\sum_{i=0}^{n-1} (Q_i^2(x_k) / \|Q_i\|^2) \right)^{-1} > 0 \quad (k=1, \dots, n).$$

Primerba 2.8.1. Kako je $x \mapsto f_k(x) = \frac{Q_n(x)^2}{x - x_k}$ polinom stepena $2n-2$, to je $R_n(f_k)=0$, tj.

$$A_k Q_n'(x_k)^2 = \int_a^b p(x) f_k(x) dx > 0,$$

odakle, takodje, zaključujemo da su koeficijenti A_k ($k=1, \dots, n$) pozitivni.

Predjimo sada na određivanje ostatka $R_n(f)$ u Gauss-Christoffelovoj kvadraturnoj formuli.

Teorema 2.8.3. Neka su x_k i A_k ($k=1, \dots, n$) kao u prethodnoj teoremi i neka $f \in C^{2n}[a, b]$. Tada za ostatak $R_n(f)$ važi formula

$$(2.8.8) \quad R_n(f) = \frac{\|Q_n\|^2}{(2n)! a_n^2} f^{(2n)}(\xi) \quad (a < \xi < b),$$

gde je a_n koeficijent uz najviši stepen u polinomu Q_n .

Dokaz. Posmatrajmo Hermiteov interpolacioni polinom H_{2n-1} konstruisan na skupu podataka $f(x_k), f'(x_k)$ ($k=1, \dots, n$). Kako je greška kod ovog polinoma (videti odeljak 6.2.8)

$$r_{2n-1}(f; x) = f(x) - H_{2n-1}(x) = \frac{f^{(2n)}(\eta)}{(2n)!} \omega(x)^2 \quad (a < \eta < b),$$

gde je $\omega(x) = (x-x_1) \dots (x-x_n)$ i kako $H_{2n-1} \in \mathcal{P}_{2n-1}$, imamo

$$\begin{aligned} \int_a^b p(x) f(x) dx &= \int_a^b p(x) H_{2n-1}(x) dx + \int_a^b p(x) r_{2n-1}(f; x) dx \\ &= \sum_{k=1}^n A_k H_{2n-1}(x_k) + R_n(f) \\ &= \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f), \end{aligned}$$

gde je

$$R_n(f) = \int_a^b p(x) r_{2n-1}(f; x) dx = \int_a^b \frac{1}{(2n)!} p(x) \omega(x)^2 f^{(2n)}(x) dx.$$

S obzirom da je $\omega(x) = \frac{Q_n(x)}{a_n}$ i $f \in C^{2n}[a, b]$, ostatak $R_n(f)$

se može predstaviti u obliku

$$R_n(f) = \frac{f^{(2n)}(\xi)}{(2n)! a_n} \int_a^b p(x) Q_n(x)^2 dx \quad (a < \xi < b),$$

što je ekvivalentno sa (2.8.8).

Primer 2.8.2. Kako je

$$\alpha_n = \frac{a_{n+1}}{a_n} \quad \text{i} \quad \gamma_n = \frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}} \left(\frac{\|Q_n\|}{\|Q_{n-1}\|} \right)^2,$$

imamo

$$\frac{\alpha_n}{\gamma_n} \|Q_n\|^2 = \alpha_{n-1} \|Q_{n-1}\|^2 = \frac{a_n}{a_{n-1}} \|Q_{n-1}\|^2$$

Formula (2.8.4) se tada svodi na

$$A_k = \frac{a_n}{a_{n-1}} \cdot \frac{\|Q_{n-1}\|^2}{Q_{n-1}(x_k) Q'_n(x_k)} \quad (k=1, \dots, n).$$

Primer 2.8.1. Odredimo Gaussovu kvadraturnu formulu oblika

$$(2.8.10) \quad \int_{-1}^1 (1-x^2)^{3/2} f(x) dx = A_1 f(x_1) + A_2 f(x_2) + A_3 f(x_3) + R_3(f).$$

Polazeći od prirodnog bazisa $\{1, x, x^2, \dots\}$ Gram-Schmidtovim postupkom ortogonalizacije dobijamo niz ortogonalnih polinoma na $(-1, 1)$ sa težinskom funkcijom $x \mapsto p(x) = (1-x^2)^{3/2}$:

$$Q_0(x) = 1, \quad Q_1(x) = x, \quad Q_2(x) = x^2 - \frac{1}{6}, \quad Q_3(x) = x^3 - \frac{3}{8}x,$$

$$Q_4(x) = x^4 - \frac{3}{5}x^2 - \frac{3}{80}, \quad \text{itd.}$$

Na osnovu teoreme 2.8.1, interpolacioni čvorovi x_1, x_2, x_3 su nule polinoma Q_3 . Dakle,

$$x_1 = -\sqrt{\frac{3}{8}}, \quad x_2 = 0, \quad x_3 = \sqrt{\frac{3}{8}}.$$

Kako su koeficijenti uz najviše stepene u polinomima Ω_2 i Ω_3 jednaki jedinici, tj. $a_2=1$ i $a_3=1$, i kako je

$$\|\Omega_2\|^2 = \int_{-1}^1 (1-x)^2 \left(x^2 - \frac{1}{6}\right)^2 dx = \frac{5\pi}{384},$$

na osnovu (2.8.9) imamo

$$A_k = \frac{5\pi}{384} \cdot \frac{1}{3 \left(x_k^2 - \frac{1}{6}\right) \left(x_k^2 - \frac{1}{6}\right)}, \quad (k=1, 2, 3),$$

tj.

$$A_1 = A_3 = \frac{\pi}{12} \quad \text{i} \quad A_2 = \frac{5\pi}{24}.$$

Ako $f \in C^6[-1, 1]$, na osnovu teoreme 2.8.3, imamo

$$R_3(f) = \frac{f^{(6)}(\xi)}{6!} \int_{-1}^1 (1-x)^2 \left(x^2 - \frac{3}{8}x\right)^2 dx = \frac{3\pi f^{(6)}(\xi)}{2^{10} 6!},$$

gde $\xi \in (-1, 1)$.

Primer 2.8.1. Primenom formule (2.8.10) odredićemo približno vrednost integrala

$$I = \int_{-1}^1 (1-x)^2 \cos x dx.$$

Imamo

$$I = \frac{\pi}{12} \left(2 \cos \frac{\sqrt{6}}{4} + \frac{5}{2}\right) \approx 1.082952.$$

Tačna vrednost integrala je, međutim,

$$I \approx 3\pi J_2(1) \approx 1.082935,$$

gde je J_2 Besselova funkcija.

7.2.9. Gauss-Christoffelove formule za klasične težinske funkcije

U ovom odeljku dajemo pregled kvadraturnih formula sa težinskim funkcijama koje odgovaraju klasičnim ortogonalnim polinomima (odeljci 2.2.8 - 2.2.13). Detaljne tablice sa parametrima ovih formula mogu se naći u [82].

S obzirom da se klasični ortogonalni polinomi dele u tri podklase, posebno ćemo razmatrati ove slučajeve.

1. Gauss-Jacobieve formule imaju oblik

$$\int_{-1}^1 (1-x)^\alpha (1+x)^\beta f(x) dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f).$$

Kako su a_n (koeficijent uz najviši stepen u polinomu Q_n) i $\|Q_n\|^2$ dati sa

$$a_n = \frac{1}{2^n n!} \cdot \frac{\Gamma(2n+\alpha+\beta+1)}{\Gamma(n+\alpha+\beta+1)}$$

i

$$\|Q_n\|^2 = 2^{\alpha+\beta+1} \frac{\Gamma(n+\alpha+1)\Gamma(n+\beta+1)}{n!(2n+\alpha+\beta+1)\Gamma(n+\alpha+\beta+1)},$$

na osnovu (2.8.9) nalazimo težinske koeficijente

$$A_k = \frac{2^{\alpha+\beta}}{n!(n+\alpha+\beta)\Gamma(n+\alpha+\beta)} \cdot \frac{1}{n! (2n+\alpha+\beta)\Gamma(n+\alpha)\Gamma(n+\beta)} \cdot \frac{1}{P_{n-1}^{(\alpha,\beta)}(x_k) \frac{d}{dx} P_n^{(\alpha,\beta)}(x_k)},$$

gde su $x_k (k=1, \dots, n)$ nule Jacobievog polinoma $P_n^{(\alpha,\beta)}$.

Ako $f \in C^{2n}[-1,1]$ za ostatak dobijamo

$$(2.9.1) \quad R_n(f) = 2^{2n+\alpha+\beta+1} \frac{n!\Gamma(n+\alpha+1)\Gamma(n+\beta+1)\Gamma(n+\alpha+\beta+1)}{(2n)!(2n+\alpha+\beta+1)\Gamma^2(2n+\alpha+\beta+1)} f(2n)(\xi),$$

gde $\xi \in (-1,1)$.

1.1. Posebno za $\alpha=\beta=0, p(x)=1$, dobijamo Gauss-Legendre ovu formulu

$$\int_{-1}^{+1} f(x) dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f),$$

pri čemu su

$$(2.9.2) \quad A_k = \frac{2}{n} \cdot \frac{1}{P_{n-1}(x_k) P_n'(x_k)} \quad (k=1, \dots, n)$$

i $x_k (k=1, \dots, n)$ nule Legendreovog polinoma P_n .

Formula (2.9.1) se tada svodi na

$$R_n(f) = \frac{2^{2n+1} (n!)^4}{(2n+1) ((2n)!)^3} f^{(2n)}(\xi) \quad (-1 < \xi < 1).$$

Primerba 2.9.1. Za $n=2,4,6$ imamo

$$R_2(f) = 7.4 \cdot 10^{-3} f^{(4)}(\xi_2), \quad R_4(f) = 3 \cdot 10^{-7} f^{(8)}(\xi_4),$$

$$R_6(f) = 1.5 \cdot 10^{-12} f^{(12)}(\xi_6), \quad (\xi_2, \xi_4, \xi_6 \in (-1, 1)).$$

Primerba 2.9.2. Kako je Legendreov polinom parna ili neparna funkcija u zavisnosti da li je n paran ili neparan broj, za težišne koeficijente A_k ($k=1, \dots, n$), koji su dati pomoću (2.9.2), važi

$$A_k = A_{n-k+1} \quad (k=1, \dots, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor).$$

U sledećoj tabeli dajemo vrednosti za x_k i A_k ($k=1, \dots, n$) za Gauss-Legendreovu formulu kada je $n \leq 6$.

n	k	x_k	A_k
1	1	0.	2.
2	1,2	∓ 0.57735027	1.
3	1,3 2	∓ 0.77459667 0.	0.55555556 0.88888889
4	1,4 2,3	∓ 0.86113631 ∓ 0.33998104	0.34785488 0.65214516
5	1,5 2,4 3	∓ 0.90617985 ∓ 0.53846931 0.	0.23692688 0.47862868 0.56888889
6	1,6 2,5 3,4	∓ 0.93246951 ∓ 0.66120939 ∓ 0.23861919	0.17132450 0.36076158 0.46791394

Primerba 2.9.3. Na osnovu jednakosti za Legendreove polinome

$$(1-x^2)P_n'(x) + nxP_n(x) = nP_{n-1}(x),$$

formula (2.9.2) se može predstaviti u obliku

$$A_k = \frac{2(1-x_k^2)}{n^2 P_{n-1}(x_k)^2} = \frac{2}{(1-x_k^2) P_n'(x_k)^2} \quad (k=1, \dots, n).$$

Primer 2.9.1. Primenimo Gauss-Legendreove formule na izračunavanje integrala

$$\int_0^{\pi/2} \sin t \, dt.$$

Smenom $t = \frac{\pi}{4}(x+1)$, dati integral se svodi na $I = \int_{-1}^1 \frac{\pi}{4} \sin \frac{\pi}{4}(x+1) dx$.

Za $n=1, 2, 3$ redom imamo

$$I \approx 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 1.11072,$$

$$I \approx 1 \cdot \frac{\pi}{4} (0.325885 + 0.945409) = 0.99847,$$

$$I \approx \frac{\pi}{4} \left(\frac{5}{9} \cdot 0.176108 + \frac{8}{9} \cdot 0.707107 + \frac{5}{9} \cdot 0.984371 \right) = 1.00001,$$

pri čemu su rezultati zaokružljeni na pet decimala. Primitimo da je tačna vrednost integrala $I=1$.

1.2. Za $\alpha=\beta=-\frac{1}{2}$, $p(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ dobijamo Gauss-Čebiševljevu formulu

$$\int_{-1}^{+1} \frac{f(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f),$$

pri čemu su x_k nule Čebiševljevog polinoma T_n , koji je određen sa

$$T_n(x) = \frac{n!}{\left(\frac{1}{2}\right)_n} P_n^{(-1/2, -1/2)}(x),$$

gde je

$$(s)_n = s(s+1) \dots (s+n-1) = \frac{\Gamma(s+n)}{\Gamma(s)}.$$

Kako se polinom T_n može predstaviti i u obliku $T_n(x) = \cos(n \arccos x)$, imamo

$$x_k = \cos \frac{\pi}{2n} (2k-1) \quad (k=1, \dots, n).$$

Za težinske koeficijente A_k dobijamo

$$(2.9.3) \quad A_k = \frac{2^{-1} (2n-1) \Gamma(n - \frac{1}{2})^2}{n! (n-1)! \Gamma(n-1)!} \cdot \frac{C_n C_{n-1}}{T_{n-1}(x_k) T_n'(x_k)},$$

$$\text{gde je } C_n = \frac{n!}{\left(\frac{1}{2}\right)_n} = n! \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma(n + \frac{1}{2})}.$$

Kako je $T_{n-1}(x_k) T_n'(x_k) = n$, (2.9.3) se svodi na $A_k = \frac{\pi}{n}$ ($k=1, \dots, n$).

Dakle, Gauss-Čebiševljeva kvadratura formula je

$$\int_{-1}^{+1} \frac{f(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx = \frac{\pi}{n} \sum_{k=1}^n f(\cos \frac{\pi}{2n}(2k-1)) + R_n(f).$$

Stavljajući $\alpha=\beta=-\frac{1}{2}$ u (2.9.1), dobijamo ostatak

$$R_n(f) = \frac{\pi}{2^{2n-1} (2n)!} f^{(2n)}(\xi) \quad (-1 < \xi < 1).$$

U odeljku 7.2.14 biće razmatrane kvadrature formule kod kojih su svi težinski koeficijenti međusobno jednaki. To su tzv. kvadrature formule Čebiševljevog tipa. Kao što vidimo, Gauss-Čebiševljeva kvadratura pripada pomenutoj klasi formula Čebiševljevog tipa.

Uvodjenjem smene $x=\cos\theta$, Gauss-Čebiševljeva kvadratura formula se može predstaviti u obliku

$$\int_0^\pi f(\cos\theta) d\theta = \frac{\pi}{n} \sum_{k=1}^n f(\cos \frac{(2k-1)\pi}{2n}) + R_n(f).$$

1.3. Za $\alpha=\beta=\frac{1}{2}$, $p(x) = \sqrt{1-x^2}$ dobijamo Gauss-Čebiševljevu formulu druge vrste

$$\int_{-1}^1 \sqrt{1-x^2} f(x) dx = \frac{\pi}{n+1} \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{k\pi}{n+1} f(\cos \frac{k\pi}{n+1}) + R_n(f).$$

Korišćenjem prethodnih rezultata 1.2 i 1.3 i osobina ortogonalnih polinoma sa parnom težinskom funkcijom (odeljak 2.2.4) mogu se dobiti Gauss-Christoffelove kvadrature na $(0,1)$ sa težin-

skim funkcijama $p_1(x) = 1/\sqrt{x(1-x)}$, $p_2(x) = \sqrt{x/(1-x)}$, $p_3(x) = \sqrt{(1-x)/x}$, $p_4(x) = \sqrt{x(1-x)}$:

$$\int_0^1 p_1(x) f(x) dx = \frac{\pi}{n} \sum_{k=1}^n f\left(\cos^2 \frac{(2k-1)\pi}{4n}\right) + R_{1,n}(f),$$

$$\int_0^1 p_2(x) f(x) dx = \frac{2\pi}{2n+1} \sum_{k=1}^n \cos^2 \frac{(2k-1)\pi}{2(2n+1)} f\left(\cos^2 \frac{(2k-1)\pi}{2(2n+1)}\right) + R_{2,n}(f),$$

$$\int_0^1 p_3(x) f(x) dx = \frac{2\pi}{2n+1} \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{k\pi}{2n+1} f\left(\cos^2 \frac{k\pi}{2n+1}\right) + R_{3,n}(f),$$

$$\int_0^1 p_4(x) f(x) dx = \frac{\pi}{4(n+1)} \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{k\pi}{n+1} f\left(\cos^2 \frac{k\pi}{2(n+1)}\right) + R_{4,n}(f).$$

2. Gauss-Laguerreove formule imaju oblik

$$\int_0^{+\infty} x^s e^{-x} f(x) dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f).$$

Kako je u ovom slučaju $a_n = (-1)^n$ i $\|L_n^s\|^2 = n! \Gamma(n+s+1)$, na osnovu (2.8.9) imamo

$$(2.9.4) \quad A_k = - \frac{(n-1)! \Gamma(n+s)}{L_{n-1}^s(x_k) \frac{d}{dx} L_n^s(x_k)} \quad (k=1, \dots, n),$$

gde su x_k ($k=1, \dots, n$) nule generalisanog Laguerreovog polinoma L_n^s .

Primer 2.9.4. Kako je, na osnovu jednakosti $x L_{n-1}^{s+1}(x) = (n+s) L_{n-1}^s(x) - L_n^s(x)$ i $\frac{d}{dx} L_n^s(x) = -n L_{n-1}^s(x)$,

$$\frac{d}{dx} L_n^s(x_k) = - \frac{n}{x_k} (n+s) L_{n-1}^s(x_k),$$

formula (2.9.4) se može predstaviti i u sledećim ekvivalentnim oblicima

$$A_k = \frac{(n-1)! \Gamma(n+s) x_k}{n(n+s) (L_{n-1}^s(x_k))^2} = \frac{n! \Gamma(n+s+1)}{x_k \left(\frac{d}{dx} L_n^s(x_k)\right)^2} \quad (k=1, \dots, n).$$

Ako $f \in C^{2n}[0, +\infty)$ za ostatak se dobija

$$R_n(f) = \frac{n! \Gamma(n+s+1)}{(2n)!} f^{(2n)}(\xi) \quad (0 < \xi < +\infty).$$

3. Gauss-Hermiteova formula ima oblik

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2} f(x) dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f).$$

Kako je

$$a_n = 2^n \quad \text{i} \quad \|H_n\|^2 = 2^n n! \sqrt{\pi},$$

imamo

$$(2.9.5) \quad A_k = \frac{2^n (n-1)! \sqrt{\pi}}{H_{n-1}(x_k) H_n'(x_k)} \quad (k=1, \dots, n),$$

gde su x_k nule Hermiteovog polinoma H_n . S obzirom na jednakost $H_n'(x) = 2nH_{n-1}(x)$, jednakost (2.9.5) se može predstaviti i u obliku

$$A_k = \frac{2^{n+1} n! \sqrt{\pi}}{H_n'(x_k)^2} = \frac{2^{n-1} (n-1)! \sqrt{\pi}}{n H_{n-1}(x_k)^2} \quad (k=1, \dots, n).$$

Za ostatak se dobija

$$R_n(f) = \frac{n! \sqrt{\pi}}{2^n (2n)!} f^{(2n)}(\xi) \quad (-\infty < \xi < +\infty).$$

Primerba 2.9.5. Kao i kod Gauss-Legendreove formule, i u ovom slučaju je $A_k = A_{n-k+1}$ ($k=1, \dots, [n/2]$). Neke vrednosti za x_k i A_k date su u sledećoj tabeli.

n	k	x_k	A_k
1	1	0.	1.77245385
2	1,2	± 0.70710678	0.88622693
3	1,3	± 1.22474487	0.29540898
	2	0.	1.18163590
4	1,4	± 1.65068012	0.08131284
	2,3	± 0.52464762	0.80491409

7.2.10. Opšti metod konstrukcije Gauss-Christoffelovih formula

U ovom odeljku razmatraćemo opšti metod konstrukcije Gauss-Christoffelovih kvadraturenih formula oblika

$$(2.10.1) \quad \int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f),$$

gde je $x \mapsto p(x)$ proizvoljna težinska funkcija. Bez ikakvih ograničenja metod se može primeniti i na konstrukciju kvadratura za integrale opštijeg oblika

$$I(f) = \int_R f(x)d\lambda(x),$$

gde je $d\lambda(x)$ nenegativna mera na realnoj pravoj R sa kompaktnim ili beskonačnim nosačem, za koju egzistiraju momenti

$$C_k = I(x^k) = \int_R x^k d\lambda(x) \quad (k=0,1,\dots,2n-1).$$

Na prvi pogled, konstrukcija kvadratura, tj. određivanje parametara $x_k, A_k (k=1,\dots,n)$, može se izvesti rešavanjem sistema nelinearnih jednačina (2.2.4), tj.

$$(2.10.2) \quad \sum_{k=1}^n A_k x_k^m = C_m \quad (m=0,1,\dots,2n-1).$$

Međutim, određivanje parametara iz ovog sistema nije pogodno iz više razloga, od kojih je, svakako, najznačajniji slaba uslovnost sistema (2.10.2). Može se pokazati da su parametri Gauss-Christoffelovih kvadratura u uskoj vezi sa problemom sopstvenih vrednosti za jednu simetričnu trodijagonalnu matricu, tzv. Jacobievu matricu. Ta činjenica omogućava stabilnu konstrukciju formula.

Neka je $\{Q_k\}_{k \in \mathbb{N}_0}$ sistem moničnih polinoma ortogonalnih u odnosu na težinsku funkciju $x \mapsto p(x)$ na (a,b) (ili, uopšte, u odnosu na meru $d\lambda(x)$). Konstrukcija takvog sistema polinoma podrazumeva određivanje koeficijenata β_k i γ_k u tročlanoj rekurentnoj relaciji

$$(2.10.3) \quad \begin{cases} Q_{k+1}(x) = (x - \beta_k)Q_k(x) - \gamma_k Q_{k-1}(x) & (k=0,1,\dots), \\ Q_{-1}(x) = 0, \quad Q_0(x) = 1, \end{cases}$$

što se može ostvariti metodima izloženim u odeljcima 2.2.6 i 2.2.7 (I deo knjige). Koficijenti γ_k su pozitivni.

Uzimajući za k redom $0, 1, \dots, n-1$, iz rekurentne relacije (2.10.3) dobijamo sistem linearnih jednačina koji se može predstaviti u matričnom obliku

$$\begin{bmatrix} Q_0(x) \\ Q_1(x) \\ \vdots \\ Q_{n-1}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_0 & 1 & 0 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 1 \\ \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \gamma_{n-1} & \beta_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_0(x) \\ Q_1(x) \\ \vdots \\ Q_{n-1}(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ Q_n(x) \end{bmatrix},$$

tj.

$$(2.10.4) \quad x \vec{q}(x) = T_n \vec{q}(x) + Q_n(x) \vec{e}_n,$$

gde smo sa T_n označili dobijenu trodijagonalnu matricu i uveli vektore

$$\vec{q}(x) = [Q_0(x) \ Q_1(x) \ \dots \ Q_{n-1}(x)]^T \quad \text{i} \quad \vec{e}_n = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T.$$

Ako bismo rekurentnu relaciju napisali za ortonormirane polinome $Q_k^*(x) = Q_k(x) / \|Q_k\|$, $\|Q_k\| = (\gamma_0 \gamma_1 \dots \gamma_k)^{1/2}$, odgovarajuća matrica u (2.10.4) bila bi simetrična. Dakle, relacija

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\gamma_{k+1}} Q_{k+1}^*(x) = (x - \beta_k) Q_k^*(x) - \sqrt{\gamma_k} Q_{k-1}^*(x) \quad (k=0, 1, \dots), \\ Q_{-1}^*(x) = 0, \quad Q_0^*(x) = C_0^{-1/2} \end{array} \right.$$

implicira sistem

$$(2.10.5) \quad x \vec{q}^*(x) = J_n \vec{q}^*(x) + \sqrt{\gamma_n} Q_n^*(x) \vec{e}_n,$$

gde su

$$(2.10.6) \quad \vec{q}^*(x) = [Q_0^*(x) Q_1^*(x) \dots Q_{n-1}^*(x)]^T$$

i

$$(2.10.7) \quad J_n = \begin{bmatrix} \beta_0 & & & & \\ \sqrt{\gamma_1} & \beta_1 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & 0 & \ddots & \\ & & & \sqrt{\gamma_{n-1}} & \beta_{n-1} \end{bmatrix}$$

Matrica J_n je poznata kao Jacobieva matrica. Matrice J_n i T_n su slične, jer egzistira dijagonalna matrica D takva da je $D^{-1}T_n D = J_n$.

Kao što znamo, čvorovi kvadratura x_k su nule polinoma $Q_n(x)$. Ako stavimo $x = x_k$, na osnovu (2.10.4), sleduje da je x_k sopstvena vrednost matrice T_n , a da je $\vec{q}(x_k)$ odgovarajući sopstveni vektor, jer je $T_n \vec{q}(x_k) = x_k \vec{q}(x_k)$.

Isto važi za Jacobievu matricu (2.10.7). Naime, iz (2.10.5) sleduje

$$J_n \vec{q}^*(x_k) = x_k \vec{q}^*(x_k),$$

što znači da je x_k sopstvena vrednost, a $\vec{q}^*(x_k)$ odgovarajući sopstveni vektor matrice J_n .

Prema tome određivanje čvorova Gauss-Christoffelove kvadrature se svodi na nalaženje sopstvenih vrednosti za Jacobievu matricu J_n . Pokazaćemo sada da se i Christoffelovi brojevi A_k mogu odrediti iz istog problema sopstvenih vrednosti.

Primetimo, najpre, da je

$$(2.10.8) \quad [\vec{q}^*(x_k)]^T [\vec{q}^*(x_k)] = \sum_{k=0}^{n-1} Q_k^*(x_k)^2 = \frac{1}{A_k}.$$

Poslednja jednakost je korišćena za dokaz pozitivnosti Christoffelovih brojeva u odeljku 7.2.8.

Obično se kod rešavanja problema sopstvenih vrednosti nalaze normalizovani sopstveni vektori, čija je euklidska norma jednaka jedinici. Naime, određuje se sopstvena vrednost x_k i sopstveni vektor $\vec{v}_k = [v_{k1} v_{k2} \dots v_{kn}]^T$ tako da je

$$(2.10.9) \quad J_n \vec{v}_k = x_k \vec{v}_k, \quad \vec{v}_k^T \vec{v}_k = 1.$$

Naravno, vektor \vec{v}_k je kolinearan sa $\vec{q}^*(x_k)$, tj. $\vec{v}_k = \alpha \vec{q}^*(x_k)$, gde se α može odrediti, na primer, upoređivanjem prvih koordinata vektora. Tako, s obzirom na (2.10.6), imamo

$$v_{k1} = \alpha Q_0^*(x) = \alpha C_0^{-1/2}.$$

Najzad, korišćenjem (2.10.8) nalazimo

$$(2.10.10) \quad A_k = \alpha^2 = C_0 v_{k1}^2.$$

Prema tome, određivanje parametara Gauss-Christoffelovih kvadratura se svodi na rešavanje problema sopstvenih vrednosti (2.10.9). S obzirom na (2.10.10) nije neophodno nalaziti sopstvene vektore \vec{v}_k , već je dovoljno naći samo prve koordinate ovih vektora.

Jedan od najprikladnijih algoritama za konstrukciju Gauss-Christoffelovih kvadratura, tj. rešavanja problema sopstvenih vrednosti za Jacobievu matricu J_n je QR (ili QL) algoritam (vide ti odeljak 4.4.8). U vezi sa konstrukcijom kvadratura može se naći u radovima Gobuba i Welscha [30], Gautschia [19], [22], [23], i dr.

Možemo zaključiti da je konstrukcija kvadratura usko povezana sa konstrukcijom ortogonalnih polinoma. Medjutim, tamo gde je eksplicitno poznata rekurentna relacija za ortogonalne polinome, kao što je slučaj kod klasičnih ortogonalnih polinoma, određivanje parametara x_k, A_k ($k=1, \dots, n$) je skoro trivijalno. Naime, problem sopstvenih vrednosti (2.10.9) se veoma efikasno rešava prethodno pomenutim algoritmima. Glavne teškoće nastaju kod konstrukcije ortogonalnih polinoma za neklasične težinske funkcije, s obzirom na slabu uslovljenost preslikavanja vektora momenata u vektor koeficijenata rekurentne relacije, o čemu je bilo reči u odeljcima 2.2.6 i 2.2.7. Ovo može da dovede do toga da koeficijenti kvadratura budu apsolutno pogrešni, čak i u slučajevima kada se izračunavanje sprovede u aritmetici dvostruke tačnosti. Tako je S.Y. Lee u radu [41], razvijajući Gauss-Christoffelove kvadrature na $(0, +\infty)$ za težinu $p(x)=\exp(-x^3/3)$, dobio parametre x_k, A_k ($k=1, \dots, n$) za $n \leq 15$. Kako je kasnije Gautschi ([26]) pokazao, dobijeni rezultati za $n=15$ su potpuno pogrešni (od 16 cifara ni jedna nije tačna). U istom radu Gautschi je dobio tačne parametre i dao nekoliko testova za proveru tačnosti dobijenih parametara.

Na osnovu prethodnog može se zaključiti da se konstrukciji Gauss-Christoffelovih kvadratura za neklasične težine mora posvetiti posebna pažnja.

U obimnom radu [23], W. Gautschi daje pregled formula Gauss-ovog tipa razradjenih do 1980. godine, sa iscrpnom bibliografijom. Navedimo samo neke od tih kvadratura: (1) $p(x)=\exp(-x^2)$ na $(0, +\infty)$ i $(0, b)$, $b > 0$ (Steen, Byrne, Gelbard, 1969); (2) $p(x)=(1-x)^\alpha x^\beta \times \log(1/x)$ na $(0, 1)$, $\alpha, \beta = -1/2, -1/3, -1/4, -1/5, 1/3, 1/2$ (Piessens i Branders, 1975); (3) $p(x)=E_1(x)$ (eksponencijalni integral) na

$(0, \infty)$ (Danloy, 1973); (4) $p(x)=\text{erfc}(x)$ (komplementarna funkcija greške) na $(0, \infty)$ (Vigneron i Lambin, 1980); itd.

U novije vreme pojavile su se kvadrature sa $p(x)=1/\Gamma(x)$ (Γ gama funkcija) na $(0, +\infty)$ (Gautschi, 1982) i kvadrature sa Einsteinovom i Fermievom funkcijom, $p(x)=(x/(e^x-1))^r$ i $p(x)=(e^x+1)^{-r}$ ($r=1,2$), na $(0, +\infty)$ (Gautschi i Milovanović, 1985). U poslednjem slučaju, rekurzivni koeficijenti β_k i γ_k su dobijeni korišćenjem diskretizovane Stieltjesove procedure (videti odeljak 2.2.7) sa Gauss-Laguerreovom kvadraturom. Na primer, za izračunavanje integrala u Stieltjesovoj proceduri korišćeno je Gauss-Laguerreovo pravilo

$$\int_0^{\infty} P(x) \left(\frac{x}{e^x-1} \right)^r dx = \frac{1}{r} \int_0^{\infty} P(x/r) \left(\frac{x/r}{1-e^{-x/r}} \right)^r e^{-x} dx \\ = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^N A_k^L P(x_k^L/r) \left(\frac{x_k^L/r}{1-e^{-x_k^L/r}} \right)^r,$$

gde je $P(x)$ algebarski polinom. A_k^L i x_k^L su parametri Gauss-Laguerreove kvadrature. Da bi se postigla zadovoljavajuća tačnost, N treba uzeti dovoljno veliko. Na primer, za dobijanje prvih 12 rekurzivnih koeficijenata ($n=12$) sa 12(25) korektnih decimala potrebno je uzeti $N=49$ ($N=127$), pri $r=1$, i $N=41$ ($N=85$), pri $r=2$. Prvih 40 koeficijenata ($n=40$) mogu se dobiti sa 25 tačnih decimala ako se uzme $N=281$ za $r=1$ i $N=201$ za $r=2$. U radu [27], Gautschi i Milovanović su dobili kvadrature formule za $n=5(5)40$, sa 25 tačnih decimala. Parametri formula su navedeni u prilogu pomenutog rada.

Gauss-Christoffelove kvadrature su uopštavane u raznim pravcima. Navešćemo samo neke od njih:

1^o Konstrukcija formula sa višestrukim čvorovima (Turan (1950), Ossicini (1966), Ossicini i Rosati (1978), Stroud i Stancu (1965); Golub i Kautsky (1983), i drugi).

2^o Konstrukcija kvadratura sa "težinskim" funkcijama koje menjaju znak u intervalu integracije, ili još opštije, konstrukcija kvadratura sa kompleksnim "težinskim" funkcijama, koje nalaze primenu kod numeričke inverzije Laplaceove transformacije.

3^o Konstrukcija Gauss-Christoffelovih kvadratura na polukrugu oblika

$$\int_0^{\pi} f(e^{i\theta}) d\sigma(\theta) = \sum_{k=1}^n A_k f(\xi_k) + R_n(f),$$

gde je $d\sigma(\theta)$ data mera. Korišćenjem polinoma ortogonalnih na polukrugu (odjeljak 2.2.16), Gautschi i Milovanović [28] su razvili kvadrature za $d\sigma(\theta)=d\theta$ (videti sledeći odeljak), kao i za neke opštije slučajeve.

4^o Konstrukcija kvadratura Gaussovog tipa sa unapred fiksanim čvorovima (videti odeljke 7.2.12 i 7.2.13).

Na kraju ovog odeljka navedimo jednu interesantnu primenu kvadratura sa Einsteinovom i Fermievom težinom za sumiranje srokonvergentnih numeričkih redova u kojima se pojavljuje Laplaceova transformacija

$$F(p) = \int_0^{+\infty} e^{-pt} f(t) dt, \quad \text{Re } p \geq 1,$$

ili njen izvod. Naime, ako stavimo $a_k = -F'(k)$, tada imamo

$$S_1 = \sum_{k=1}^{+\infty} a_k = \sum_{k=1}^{+\infty} \int_0^{+\infty} t e^{-kt} f(t) dt = \int_0^{+\infty} \frac{t}{e^{t-1}} f(t) dt,$$

što znači da se sumiranje reda S_1 svodi na izračunavanje integrala pomoću dobijene kvadrature za Einsteinovu težinsku funkciju. Slično, nalazimo

$$S_2 = - \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^{k-1} k^{-1} F'(k) = \int_0^{+\infty} \frac{t}{e^{t+1}} f(t) dt$$

$$S_3 = \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^{k-1} k^{-1} F(k) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{e^{t+1}} f(t) dt,$$

što sugeriše primenu Gauss-Christoffelove kvadrature sa Fermievom težinom.

Ilustrujmo primenu na jednom primeru ([27]):

Neka je $F(p) = p^{-1} \exp(-1/p)$. Tada je $f(t) = J_0(2\sqrt{t})$, gde je J_0 Besselova funkcija prve vrste. Imajući u vidu da je $-F'(p) =$

$= (p-1)p^{-3} \exp(-1/p)$, posmatraćemo redove S_1, S_2, S_3 čije su sume sa 24 značajne cifre redom

$$S_1 = \sum_{k=1}^{+\infty} (k-1)k^{-3} \exp(-1/k) = 0.342918943844609780961838,$$

$$S_2 = \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^{k-1} (k-1)k^{-3} \exp(-1/k)$$

$$= -0.0441559381340836052736928,$$

$$S_3 = \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^{k-1} k^{-1} \exp(-1/k) = 0.197107936397950656955672.$$

Direktno sumiranje prvih 10 000 članova kod ovih redova daje 3, 7 i 4 korektne cifre, respektivno. Primena dobijenih Gauss-Christoffelovih kvadratura za $n=2(2)10$ daje rezultate čije su relativne greške date u tabeli:

n	2	4	6	8	10
S_1	4.48(-2)	3.80(-6)	3.35(-11)	7.01(-17)	6.86(-23)
S_2	8.95(-1)	2.39(-4)	3.71(-9)	1.13(-14)	1.08(-20)
S_3	1.77(-2)	9.65(-7)	5.32(-12)	1.05(-17)	1.27(-23)

Brojevi u zagradama ukazuju na decimalni eksponent. Vidimo da se za $n=10$ dobijaju rezultati sa visokom tačnošću.

7.2.11. Gauss-Christoffelove kvadrature na polukrugu

Razradjujući teoriju polinoma ortogonalnih na polukrugu $\Gamma = \{z \mid z = e^{i\theta}, 0 \leq \theta \leq \pi\}$, Gautschi i Milovanović ([28]) su konstruisali Gauss-Christoffelove kvadrature oblika

$$(2.11.1) \quad \int_0^\pi g(e^{i\theta}) d\theta = \sum_{k=1}^n \sigma_k f(\xi_k) + R_n(f), \quad R_n(\mathcal{P}_{2n-1}) = 0$$

za integrale na polukrugu. Čvorovi kvadratura ξ_k su nule kompleksnog polinoma $\pi_n(z)$, koji zadovoljava tročlanu rekurentnu relaciju (videti odeljak 2.2.16)

$$\begin{cases} \pi_{k+1}(z) = (z - i\alpha_k) \pi_k(z) - \beta_k \pi_{k-1}(z) & (k=0, 1, \dots), \\ \pi_{-1}(z) = 0, \quad \pi_0(z) = 1, \end{cases}$$

$$(2.11.3) \quad \vec{p}(z) = D_n^{-1} \vec{\pi}(z),$$

tada je

$$[-iD_n^{-1} J_n D_n] \vec{p}(\xi_k) = \eta_k \vec{p}(\xi_k),$$

tj. $\vec{p}(\xi_k)$ je sopstveni vektor realne matrice (2.11.2), koji odgovara sopstvenoj vrednosti $\eta_k = -i\xi_k$. Sa V_n označimo matricu sopstvenih vektora matrice (2.11.2), pri čemu je svaki od njih normalizovan tako da je njegova prva koordinata jednaka jedinici. Tada imamo

$$V_n = [\vec{v}_1 \ \vec{v}_2 \ \dots \ \vec{v}_n], \quad \vec{v}_k = \sqrt{\pi} \vec{p}(\xi_k).$$

Uzimajući za $g(z)$, u (2.11.1), svaku od koordinata vektora $\vec{p}(z)$, definisanog pomoću (2.11.3), dobijamo sistem jednačina

$$\sqrt{\pi} \vec{e}_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} V_n \vec{\sigma}, \quad \vec{\sigma} = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \dots \ \sigma_n]^T,$$

gde je $\vec{e}_1 = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ prvi koordinatni vektor. Tako za određivanje Christoffelovih brojeva σ_k treba rešiti sistem linearnih jednačina

$$(2.11.4) \quad V_n \vec{\sigma} = \pi \vec{e}_1.$$

Korišćenjem odgovarajućih potprograma za određivanje matrice V_n i rešavanje sistema (2.11.4), uzetih iz poznatih visokokvalitetnih programskih paketa EISPACK i LINPACK, u radu [28] su određeni parametri kvadratura ξ_k i σ_k ($k=1, \dots, n$). U tabeli 2.11.1 su navedeni parametri za $n=5, 10, 20$, sa osam značajnih cifara. Primetimo da su čvorovi ξ_k raspoređeni simetrično u odnosu na imaginarnu osu i svi se nalaze u gornjem jediničnom polukrugu.

U pomenutom radu [28] date su primene dobijenih kvadratura na numeričko diferenciranje analitičkih funkcija, korišćenjem reprezentacije za izvod analitičke funkcije

$$f'(a) = \frac{1}{\pi h} \int_0^\pi e^{-i\theta} \left(f\left(a + \frac{h}{2} e^{i\theta}\right) - f\left(a - \frac{h}{2} e^{i\theta}\right) \right) d\theta,$$

kao i primene na izračunavanje Cauchyove glavne vrednosti nesvojestvenih integrala, imajući u vidu da je

Tabela 2.11.1

n	k	ξ_k	σ_k
5	1,2	± 0.89052727	0.0072402551
	3,4	± 0.48026508	0.50270345
		$0.22216141i$	$\pm 0.92618932i$
10	1,2	± 0.97146604	0.0078107581
	3,4	± 0.85284258	0.023571055
	5,6	± 0.65232339	0.063357456
	7,8	± 0.39255204	0.23196483
	9,10	± 0.11928205	1.24409223
			$\pm 0.83467375i$
20	1,2	± 0.99279481	0.00093961488
	3,4	± 0.96223284	0.0023283767
	5,6	± 0.90804700	0.0041099345
	7,8	± 0.83157445	0.0066940217
	9,10	± 0.73472727	0.010908872
	11,12	± 0.61995356	0.018712830
	13,14	± 0.49022929	0.035680664
	15,12	± 0.34918044	0.082367746
	17,18	± 0.20200473	0.26876888
	19,20	± 0.061601584	1.14028539
			$\pm 0.018602063i$
			$\pm 0.044211071i$
		$\pm 0.072223615i$	
		$\pm 0.10457986i$	
		$\pm 0.14441960i$	
		$\pm 0.19743837i$	
		$\pm 0.27542598i$	
		$\pm 0.40649151i$	
		$\pm 0.65608704i$	
		$\pm 0.69192546i$	

$$\int_{-1}^1 \frac{f(t)}{t} dt = i \{ \pi f(0) - \int_0^{\pi} f(e^{i\theta}) d\theta \}.$$

Ovde se pretpostavlja da je funkcija f analitička na zatvorenom gornjem jediničnom poludisku.

7.2.12. Modifikovane Gaussove formule

Od posebnog interesa je i konstrukcija kvadraturnih formula Gaussovog tipa sa nekim unapred fiksnim čvorovima. Problem je ovde odrediti ostale čvorove i sve težinske koeficijente iz ulova maksimalne algebarske tačnosti. Još je Christoffel (1858) razmatrao ovakav problem za $p(x)=1$ i $(a,b)=(-1,1)$, dajući kompletno rešenje pod pretpostavkom da su svi fiksnirani čvorovi izvan intervala $(-1,1)$.

Kvadraturne formule oblika

$$(2.12.1) \int_a^b p(x) f(x) dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + \sum_{k=1}^m B_k f(y_k) + R_{n+m}(f),$$

sa algebarskim stepenom tačnosti $2n+m-1$, pri čemu su Y_k unapred zađate apscise, nazivaju se modifikovane Gaussove formule. Dakle, nepoznate parametre A_k, x_k ($k=1, \dots, n$) i B_k ($k=1, \dots, m$) možemo odrediti iz uslova

$$R_{n+m}(x^i) = 0 \quad (i=0, 1, \dots, 2n+m-1).$$

Primer 2.12.1. Izvedimo modifikovanu Gaussovu formulu oblika

$$(2.12.2) \quad \int_{-1}^{+1} f(x) dx = A_1 f(x_1) + A_2 f(x_2) + B_1 f(-1) + B_2 f(1).$$

Kako ova formula mora biti tačna za svako $f \in P_5$, na osnovu (2.12.2) uzimajući za $f(x)$ redom $1, x, \dots, x^5$ dobijamo sistem nelinearnih jednačina

$$(2.12.3) \quad \begin{aligned} A_1 + A_2 + B_1 + B_2 &= 2, \\ A_1 x_1 + A_2 x_2 - B_1 + B_2 &= 0, \\ A_1 x_1^2 + A_2 x_2^2 + B_1 + B_2 &= \frac{2}{3}, \\ A_1 x_1^3 + A_2 x_2^3 - B_1 + B_2 &= 0, \\ A_1 x_1^4 + A_2 x_2^4 + B_1 + B_2 &= \frac{2}{5}, \\ A_1 x_1^5 + A_2 x_2^5 - B_1 + B_2 &= 0. \end{aligned}$$

Da bismo rešili ovaj sistem jednačina uvedimo pomoćnu funkciju ω pomoću

$$\begin{aligned} \omega(x) &= (x-x_1)(x-x_2)(x+1)(x-1) \\ &= x^4 + C_3 x^3 + C_2 x^2 + C_1 x + C_0. \end{aligned}$$

Sada, množenjem prvih pet jednačina sistema (2.12.3) sa C_0, C_1, C_2, C_3 , i respektivno i njihovim sabiranjem dobijamo

$$A_1 \omega(x_1) + A_2 \omega(x_2) + B_1 \omega(-1) + B_2 \omega(1) = 2C_0 + \frac{2}{3}C_2 + \frac{2}{5}.$$

Primenjujući isti postupak, iz poslednjih pet jednačina sistema (2.12.3) sleđuje

$$A_1 x_1 \omega(x_1) + A_2 x_2 \omega(x_2) - B_1 \omega(-1) + B_2 \omega(1) = \frac{2}{3}C_1 + \frac{1}{5}C_3.$$

Kako je, s druge strane, $\omega(x_1) = \omega(x_2) = \omega(-1) = \omega(1) = 0$, na osnovu prethodnog, dolazimo do sistema linearnih jednačina

$$C_0 - C_1 + C_2 - C_3 = -1,$$

$$C_0 + C_1 + C_2 + C_3 = -1,$$

$$2C_0 + \frac{2}{3}C_2 = -\frac{2}{5},$$

$$\frac{2}{3}C_1 + \frac{1}{5}C_3 = 0,$$

odakle je

$$C_0 = \frac{1}{5}, \quad C_1 = 0, \quad C_2 = -\frac{6}{5}, \quad C_3 = 0,$$

tj.

$$\omega(x) = x^4 - \frac{6}{5}x^2 + \frac{1}{5} = (x-1)(x+1)\left(x^2 - \frac{1}{5}\right).$$

Iz uslova $\omega(x) \neq 0$, nalazimo $x_1 = -x_2 = -\frac{\sqrt{5}}{5}$.

Najzad, zamenom vrednosti za x_1 i x_2 u (2.12.2) i rešavanjem dobijenog sistema linearnih jednačina po A_k, B_k ($k=1, 2$) dobijamo

$$A_1 = A_2 = \frac{5}{6} \quad \text{i} \quad B_1 = B_2 = \frac{1}{6},$$

tj.

$$\int_{-1}^{+1} f(x) dx \approx \frac{5}{6} \left(f\left(-\frac{\sqrt{5}}{5}\right) + f\left(\frac{\sqrt{5}}{5}\right) \right) + \frac{1}{6} (f(-1) + f(1)).$$

Za modifikovane Gaussove formule može se dokazati sledeća teorema.

Teorema 2.12.1. Kvadratura formula (2.12.1) ima algebarski stepen tačnosti $2n+m-1$ ako i samo ako je

- 1) tačna za svako $f \in P_{n+m-1}$,
- 2) $\int_a^b p(x)\omega(x)f(x)dx = 0$ za svako $f \in P_{n-1}$,

gde je

$$\omega(x) = \prod_{k=1}^n (x-x_k) \prod_{k=1}^m (x-y_k).$$

Navešćemo sada dva interesantna slučaja modifikovanih Gaussovih formula.

Teorema 2.12.2 (Radau). Neka su x_k ($k=1, \dots, n-1$) nule polinoma

$$x \mapsto \frac{1}{x+1} (P_n(x) + P_{n-1}(x)) \text{ i}$$

$$A_k = \frac{1-x_k}{n^2 P_{n-1}(x_k)^2} \quad (k=1, \dots, n-1),$$

gde je P_n Legendreov polinom. Ako $f \in C^{2n-1}[-1, 1]$ ostatak u kvadratnoj formuli

$$\int_{-1}^1 f(x) dx = \frac{2}{n^2} f(-1) + \sum_{k=1}^{n-1} A_k f(x_k) + R_n(f)$$

je dat pomoću

$$R_n(f) = 2^{2n-1} n! \left[\frac{(n-1)!}{(2n-1)!} \right]^3 f^{(2n-1)}(\xi) \quad (-1 < \xi < 1).$$

Teorema 2.12.3 (Lobatto). Neka su x_k ($k=1, \dots, n-2$) nule polinoma $x \mapsto P'_{n-1}(x)$ (P_n Legendreov polinom) i

$$A_k = \frac{2}{n(n-1)P_{n-1}(x_k)^2} \quad (k=1, \dots, n-2).$$

Ako $f \in C^{2n-2}[-1, 1]$ važi formula

$$\int_{-1}^{+1} f(x) dx = \frac{2}{n(n-1)} (f(-1) + f(1)) + \sum_{k=1}^{n-2} A_k f(x_k) + R_n(f),$$

gde je

$$R_n(f) = -\frac{2^{2n-1} n! (n-2)!}{(2n-1)!} \left[\frac{(n-1)!}{(2n-2)!} \right]^2 f^{(2n-2)}(\xi) \quad (-1 < \xi < 1).$$

Radauove i Lobattoove kvadrature formule razvijane su za različite težinske funkcije, uvodeći pritom i višestrukost fiksnih čvorova. Pored klasičnih težinskih funkcija, dosta su razradjivane kvadrature na $(0, 1)$ sa logaritamskim singularitetom, na primer, kada je $p(x) = \log(1/x)$. Za ovu težinsku funkciju u radu [51] su razvijene formule Lobattoovog tipa za $n=1(1)5$ sa 15 decimala. Najprostija formula, za $n=1$, ima oblik

$$\int_0^1 \log(1/x) f(x) dx = \frac{89}{252} f(0) + \frac{17}{468} f(1) + \frac{509}{819} f(7/20) + R_3(f),$$

gde ostatak ima oblik $R_3(f) = -\frac{79}{345600} f^{(4)}(\xi)$, $0 < \xi < 1$.

Znatno teži problem se javlja kada su fiksirani čvorovi unutar intervala (a, b) . U narednom odeljku razmatraćemo formule ovog tipa.

7.2.13. Formule Kronrodovog tipa

Jedan interesantan i dosta važan slučaj, kada su fiksirani čvorovi unutar intervala integracije, razmatrao je A.S. Kronrod (1964). O optimalnom izboru broja fiksiranih čvorova pojavljuje se rad Pattersona (1968). Poslednjih godina (počev od 1976) ova problematika je opet postala vrlo aktuelna, tako da se pojavio veći broj radova (G. Monegato ([61] - [65]), P. Rabinowitz ([73]) i drugi). Ovde ćemo ukazati na neke od ovih rezultata.

Posmatrajmo Gauss-Christoffelovu kvadraturu

$$(2.13.1) \quad \int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=1}^n A_k f(x_k) + R_n(f),$$

koja ima algebarski stepen tačnosti $p=2n-1$. Ako želimo da povećamo stepen tačnosti, a da pritom iskoristimo sve vrednosti funkcije koje su korišćene u (2.13.1), možemo konstruisati kvadraturu oblika

$$(2.13.2) \quad \int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=1}^n B_k f(x_k) + \sum_{i=1}^m C_i f(Y_i) + R_{n+m}(f),$$

koja ima m čvorova više od formule (2.12.1). Ovde treba odrediti m čvorova Y_i ($i=1, \dots, m$) i $n+m$ težinskih koeficijenata B_k i C_i ($k=1, \dots, n$; $i=1, \dots, m$) iz uslova da stepen tačnosti formule (2.13.2) bude maksimalan. Dakle, x_k su nule polinoma $Q_n(x)$, ortogonalnog u odnosu na težinsku funkciju $p(x)$ na (a, b) , a Y_i se biraju tako da je $R_{n+m}(f)=0$, kada $f \in \mathcal{P}_{n+2m-1}$. Naravno, ako želimo da poboljšamo Gaussovu kvadraturu (2.13.1), mora biti $n+2m-1 > 2n-1$, tj. $m \geq \left[\frac{n}{2} \right] + 1$.

Stavimo $E_m(x) = E_{m,n}(x; p) = \prod_{i=1}^m (x - Y_i) = x^m + \dots$, gde m zadovoljava prethodni uslov. Neka je f proizvoljan polinom stepena ne vi-

šeg od $n+2m-1$, tj. $f \in \mathcal{P}_{n+2m-1}$, tada je moguća reprezentacija

$$(2.13.3) \quad f(x) = Q_n(x)E_m(x)u_{m-1}(x) + v_{n+m-1}(x),$$

gde su polinomi u i v takvi da $u \in \mathcal{P}_{m-1}$ i $v \in \mathcal{P}_{n+m-1}$. Kako je formula (2.13.2) interpolacionog tipa, tj. $R_{n+m}(f)=0$ za svako f iz \mathcal{P}_{n+m-1} , zamenom (2.13.3) u (2.13.2) možemo izvesti zaključak da će formula (2.13.2) imati algebarski stepen tačnosti $p=n+2m-1$ ako i samo ako su zadovoljeni uslovi ortogonalnosti

$$\int_a^b p(x)Q_n(x)E_m(x)x^k dx = 0 \quad (k=0, 1, \dots, m-1).$$

Može se pokazati da ovaj sistem jednakosti može biti zadovoljen samo ako je $m \geq n+1$. Od interesa je slučaj $m=n+1$, tj. kvadratura oblika

$$(2.13.4) \quad \int_a^b p(x)f(x)dx = \sum_{k=1}^n B_k f(x_k) + \sum_{i=1}^{n+1} C_i f(Y_i) + R_{2n+1}(f).$$

Glavni problem je konstrukcija polinoma $E_{n+1}(x)=E_{n+1,n}(x;p)$. Neki dosad poznati rezultati u vezi kvadrature (2.13.4) su:

(a) Slučaj $(a,b)=(-1,1)$ i $p(x)=1$ rešio je 1964. A.S. Kronrod. Algebarski stepen tačnosti je $p=n+2(n+1)-1=3n+1$. Medjutim, ako je n neparan broj, algebarski stepen tačnosti se povećava za jedinicu, tj. iznosi $p=3n+2$. Interesantno je primetiti da je polinom $E_{n+1}(x)=E_{n+1,n}(x;1)$ još 1894. godine razmatrao Stieltjes, što možemo videti iz jednog njegovog pisma Hermiteu ([81]). Naime, Stieltjes je dokazao da je

$$\frac{1}{Q_n(x)} = E_{n+1}(x) + \frac{a_1}{x} + \frac{a_2}{x^2} + \dots \quad (n \geq 1),$$

gde je Q_n Legendreova funkcija druge vrste. Kasnije, Szegö ([84]) je proučavao ovaj sistem polinoma. Nedavno Monegato ([61] - [65]) je dao niz novih rezultata koji se odnose na Stieltjesove polinome $E_m(x)$. Monegato je dokazao da su koeficijenti B_k i C_i u (2.13.4) pozitivni.

(b) U slučaju $(a,b)=(-1,1)$ i $p(x)=(1-x^2)^{-1/2}$, G.Monegato (1976) je dokazao da je stepen tačnosti $p=4n-1$, a u slučaju Čebiševljeve težine druge vrste $p(x)=(1-x^2)^{1/2}$ algebarski stepen tač-

nosti je $4n+1$. U posljednjem slučaju $E_{n+1,n}(x; \sqrt{1-x^2}) = \frac{1}{2^n} T_{n+1}(x)$

i tada imamo

$$\int_{-1}^1 (1-x^2)^{1/2} f(x) dx = \frac{\pi}{2(n+1)} \sum_{i=1}^{2n+1} (1-x_1^2) f(x_1) + R_{2n+1}(f),$$

gde su

$$x_i = \cos \frac{i\pi}{2(n+1)} \quad (i=1, \dots, 2n+1).$$

(c) Slučaj $(a,b)=(-1,1)$ i $p(x)=(1-x^2)^{\lambda-1/2}$ razmatrao je za $0 < \lambda \leq 2$, $\lambda \neq 1$ P. Rabinowitz (1980). Ovdje su sve nule polinoma $E_{n+1,n}(x;p)$ realne, različite i leže u $[-1,1]$.

U vezi sa kvadraturama (2.13.4) koje su u literaturi poznate kao Kronrodove ekstenzije Gauss-Christoffelovih formula, ili kraće kao Kronrodove šeme, postoji veći broj otvorenih problema. Neki od neresnih problema mogu se naći u radu [65].

7.2.14. Čebiševljeve kvadrature formule

Kvadrature formule oblika

$$(2.14.1) \quad \int_a^b p(x) f(x) dx = A_n \sum_{k=1}^n f(x_k) + R_n(f),$$

sa algebarskim stepenom tačnosti n , nazivaju se Čebiševljeve formule. Nepoznate parametre A_n i x_k ($k=1, \dots, n$) možemo odrediti rešavanjem sistema jednačina

$$(2.14.2) \quad A_n (x_1^m + \dots + x_n^m) = \int_a^b p(x) x^m dx \quad (m=0, 1, \dots, n).$$

Iz prve jednačine ovog sistema određujemo

$$(2.14.3) \quad A_n = \frac{1}{n} \int_a^b p(x) dx.$$

Primetimo da je $A_n > 0$, s obzirom da je p težinska funkcija.

Uvedimo oznake

$$s_m = x_1^m + \dots + x_n^m \quad (m=1, 2, \dots),$$

$$\begin{aligned}\omega(x) &= (x-x_1) \dots (x-x_n) \\ &= x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n.\end{aligned}$$

Na osnovu (2.14.2) - (2.14.3) možemo odrediti vrednosti s_m ($m=1, \dots, n$) pomoću

$$s_m = \frac{1}{A_n} \frac{\int_a^b p(x) x^m dx}{\int_a^b p(x) dx}.$$

Tada, stavljanjem $m=1, \dots, n$ u jednakosti (videti [59, str. 74])

$$s_m + a_1 s_{m-1} + a_2 s_{m-2} + \dots + a_{m-1} s_1 + m a_m = 0,$$

đolazimo do sistema linearnih jednačina

$$\begin{aligned}1 \cdot a_1 &= -s_1, \\ s_1 a_1 + 2a_2 &= -s_2, \\ s_2 a_1 + s_1 a_2 + 3a_3 &= -s_3, \\ &\vdots \\ s_{n-2} a_1 + s_{n-3} a_2 + s_{n-4} a_3 + \dots + (n-1) a_{n-1} &= -s_{n-1}, \\ s_{n-1} a_1 + s_{n-2} a_2 + \dots + s_1 a_{n-1} + n a_n &= -s_n,\end{aligned}$$

(2.14.4)

čijim se rešavanjem nalaze nepoznati koeficijenti polinoma $x \mapsto \omega(x)$. Napomenimo da navedeni sistem linearnih jednačina ima jedinstveno rešenje s obzirom da njegova determinanta ima vrednost $n!$. Najzad, nalaženjem nula polinoma ω određujemo apscise x_k ($k=1, \dots, n$).

Jasno je da se među nulama polinoma ω mogu naći i kompleksne nule, kao i realne nule koje ne pripadaju segmentu $[a, b]$. Za integraciju realnih funkcija realnog argumenta, kakvu mi razmatramo, od interesa su samo slučajevi kada su sve nule x_k ($k=1, \dots, n$) realne, proste i leže u $[a, b]$. Imajući u vidu ovu činjenicu može se postaviti sledeći problem (Čebiševljev kvadraturni problem):

Odrediti realno A_n i realne i različite apscise $x_1, \dots, x_n \in [a, b]$ tako da je formula (2.14.1) tačna za svako $f \in \mathcal{P}_n$ ($n=1, 2, \dots$).

U najprostijem slučaju kada je $p(x) \equiv 1$, Čebiševljev kvadratni problem se ne može rešiti kada je $n=8$ i $n > 9$.

Za slučaj $[a,b] = [-1,1]$, J.L.Ullman ([92]) je odredio jednoparametarsku familiju težinskih funkcija oblika

$$(2.14.5) \quad p(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \cdot \frac{1+2rx}{1+4rx+4r^2} \quad (|r| < \frac{1}{4}),$$

sa osobinom da odgovarajući Čebiševljev problem ima rešenje za svako $n \in \mathbb{N}$. Primetimo da se za $r=0$ (2.14.5) svodi na klasičnu Čebiševljevovu težinsku funkciju i tada su Gauss-Čebiševljeva kvadratura formula i odgovarajuća Čebiševljeva formula ekvivalentne.

Primer 2.14.1. Odredimo nepoznate parametre u Čebiševljevoj kvadratnoj formuli

$$(2.14.6) \quad \int_{-1}^1 f(x) dx = A_3(f(x_1) + f(x_2) + f(x_3)).$$

Uzimajući za $f(x)$ redom $1, x, x^2, x^3$, nalazimo

$$A_3 = \frac{2}{3}, \quad s_1 = x_1 + x_2 + x_3 = \frac{3}{2} \int_{-1}^1 x dx = 0,$$

$$s_2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = \frac{3}{2} \int_{-1}^1 x^2 dx = 1, \quad s_3 = x_1^3 + x_2^3 + x_3^3 = \frac{3}{2} \int_{-1}^1 x^3 dx = 0.$$

Koeficijente polinoma

$$\omega(x) = (x-x_1)(x-x_2)(x-x_3) = x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_3$$

određujemo iz sistema jednačina (2.14.4). Imamo

$$a_1 = -s_1 = 0, \quad a_2 = \frac{1}{2}(-s_2 - s_1 a_1) = -\frac{1}{2},$$

$$a_3 = \frac{1}{3}(-s_3 - s_2 a_1 - s_1 a_2) = 0,$$

tj.

$$\omega(x) = x^3 - \frac{1}{2}x = x(x + \frac{\sqrt{2}}{2})(x - \frac{\sqrt{2}}{2}),$$

odakle sleđuje $x_1 = -\frac{\sqrt{2}}{2}$, $x_2 = 0$, $x_3 = \frac{\sqrt{2}}{2}$. Dakle, formula (2.14.6)

postaje

$$\int_{-1}^1 f(x)dx = \frac{2}{3} \left(f\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) + f(0) + f\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \right).$$

7.2.15. Konturna integracija analitičkih funkcija u kompleksnoj ravni

Neka je $z \mapsto f(z)$ funkcija kompleksne promenljive $z=x+iy$. Kompleksni integral po konturi C može se svesti na izračunavanje krivolinijskih realnih integrala, ako se izvrši razdvajanje realnog i imaginarnog dela. Naime, neka je $f(z)=u+iv$, gde su $u=u(x,y)$ i $v=v(x,y)$ realni i imaginarni deo funkcije f . Tada imamo

$$\begin{aligned} \int_C f(z)dz &= \int_C (u+iv)(dx+idy) \\ &= \int_C (udx-vdy) + i \int_C (vdx+udy). \end{aligned}$$

Ako je kontura C definisana parametarskim jednačinama

$$x=x(t), \quad y=y(t) \quad (a \leq t \leq b),$$

tada se izračunavanje krivolinijskog integrala svodi na izračunavanje običnog integrala po promenljivoj t . Na primer,

$$\int_C udx-vdy = \int_a^b \left\{ (u(x(t)), y(t)) \frac{dx}{dt} - v(x(t), y(t)) \frac{dy}{dt} \right\} dt.$$

Ako je f regularna analitička funkcija u prosto povezanoj oblasti D , u kojoj leži otvorena kontura C , tada se, na osnovu Cauchyve teoreme, kontura C može zameniti bilo kojom drugom konturom $C'(\subset D)$, koja sa konturom C ima istu početnu i krajnju tačku. Na ovaj način izračunavanje vrednosti integrala može se uprostiti. Najčešće se kao C' bira prava linija \overline{AB} , ili pak unija dve prave \overline{AD} i \overline{DB} , koje su paralelne realnoj, odnosno imaginarnoj osi (videti sl. 2.15.1).

U ovom odeljku razmotrićemo problem integracije regularne analitičke funkcije po linijskom segmentu u kompleksnoj ravni od tačke z_0-h do tačke z_0+h . Pod pretpostavkom da je funkcija g regularna u kvadratu D čija su temena u tačkama $z_k = z_0 + i^{k-1}h$ ($k=1,2,3,4$), Birkhoff i Young ([8]) su izveli kvadraturnu formulu

$$(2.15.1) \quad \int_{z_0-h}^{z_0+h} g(z) dz = \frac{h}{15} \{ 24g(z_0) + 4[g(z_0+h) + g(z_0-h)] - [g(z_0+ih) + g(z_0-ih)] \} + R,$$

koja, kao što vidimo, sadrži i čvorove koji ne pripadaju segmentu integracije. Greška se može oceniti pomoću ([14, str. 136], [97])

$$|R| \leq \frac{1}{1890} |h|^7 \max_{z \in D} |g^{(6)}(z)|.$$

Algebarski stepen tačnosti ove formule je, dakle, $p=5$.

Linearnom transformacijom $z=hw+z_0$, iz ravni $z=h+iy$ u ravan $w=u+iv$, formula (2.15.1) se transformiše na

Sl. 2.15.1

$$(2.15.2) \quad \int_{-1}^1 f(w) dw = \frac{8}{5} f(0) + \frac{4}{15} (f(1) + f(-1)) - \frac{1}{15} (f(i) + f(-i)) + R_5(f),$$

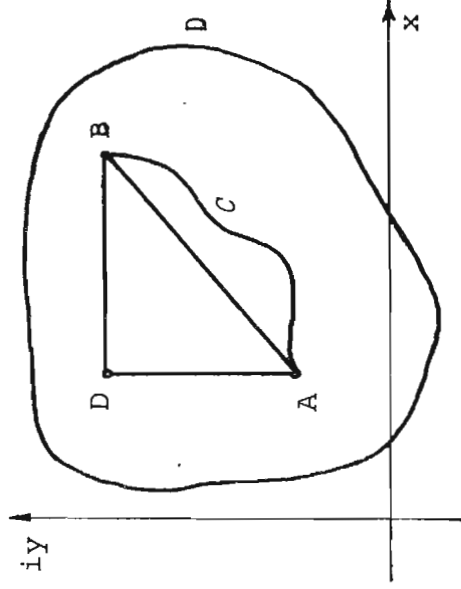
gde je $f(w)=g(hw+z_0)$ i $R_5(f)$ odgovarajući ostatak. Ovo znači da je moguće Birkhoff-Youngovu formulu (2.15.1) razmatrati u obliku (2.15.2).

U radu [43], F. Lether je dao jedan prost metod za konstrukciju kvadratura za numeričku integraciju analitičkih funkcija po linijskom segmentu u kompleksnoj ravni, ukazujući pritom da je trotačkasta Gauss-Legendreova formula, algebarskog stepena tačnosti $p=5$,

$$(2.15.3) \quad \int_{-1}^1 f(z) dz = \frac{5}{9} f(\sqrt{0.6}) + \frac{8}{9} f(0) + \frac{5}{9} f(-\sqrt{0.6}) + R_3(f).$$

analogna formuli (2.15.2) i da ima manju konstantu greške (koeficijent uz izvod u izrazu za grešku), tj. $R_3(f) = \frac{1}{15750} f^{(6)}(\xi)$ ($-1 < \xi < 1$). Naime, Lether preporučuje korišćenje Gauss-Legendre-ovih kvadratura za računanje integrala u (2.15.2).

Birkhoff-Youngova formula se može dobiti kao specijalan slučaj jedne opštije formule. Naime, ako je kontura C krug $|z|=1$,



konturni integral oblika

$$I = \frac{1}{2\pi i} \oint_C f(z) dz = \frac{r}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{i\theta} f(re^{i\theta}) d\theta,$$

tj.

$$I = r \int_0^1 e^{2\pi i t} f(re^{2\pi i t}) dt,$$

se može efikasno izračunavati primenom uopštenog trapeznog pravila T_n . Zapravo, zbog periodičnosti podintegralne funkcije sa periodom 1, može se jednostavno pokazati da je formula

$$(2.15.4) \quad I = T_n = \frac{r}{n} \sum_{k=1}^n e^{2\pi i k/n} f(re^{2\pi i k/n})$$

tačna za svako $f \in \mathcal{P}_{n-1}$. Pretpostavimo sada da je funkcija f regularna u krugu $|z| \leq r$. Tada koeficijenti Taylorovog razvoja

$$(2.15.5) \quad f(z) = \sum_{j=0}^{+\infty} a_j z^j,$$

mogu biti izračunati trapeznim pravilom (2.15.4) (videti Lyness i Moler [47], Lyness i Delves [46])

$$a_j = \frac{1}{j!} f^{(j)}(0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{z^{j+1}} dz = \frac{1}{r^j} \int_0^1 \frac{f(re^{2\pi i t})}{e^{2\pi i j t}} dt$$

$$= \frac{1}{r^j} \sum_{k=1}^n e^{-2\pi i j k/n} f(re^{2\pi i k/n}) \equiv a_j.$$

Na osnovu prethodnog, ova aproksimacija izvoda je tačna za $j=0, 1, \dots, n-1$, ako $f \in \mathcal{P}_{n-1}$.

Integracijom stepenog reda (2.15.5) od $-r$ do r nalazimo da je

$$(2.15.6) \quad \int_{-r}^r f(z) dz = 2r \sum_{m=0}^{+\infty} \frac{r^{2m} a_{2m}}{2m+1}.$$

Zamenom a_{2m} sa a_{2m} i "odsecanjem" razvoja, dobijamo kvadraturno pravilo

$$\int_{-r}^r f(z) dz \approx Q_n(t) = 2r \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n-1}{2} \rfloor} \frac{r^{2m} a_{2m}}{2m+1},$$

čiji je algebarski stepen tačnosti $p=n-1$, tj. formula je tačna za svako $f \in \mathcal{P}_{n-1}$. Jedna modifikacija ove kvadrature

$$(2.15.7) \quad Q_n^*(f) = Q_n(f) + \frac{2in}{n+1}(f(0) - \hat{a}_0)$$

ima, uz neznatno povećanje izračunavanja, algebarski stepen tačnosti $p=n+1$.

Uzimajući $n=4$ i $r=1$, (2.15.7) se svodi na Birkhoff-Youngovu formulu (2.15.2).

Startujući od (2.15.6), za $r=1$, i korišćenjem formula za drugi i četvrti izvod regularne funkcije (videti Tošić [86]):

$$f''(0) = \frac{1}{2k^2}(f(k) + f(-k) - f(ik) - f(-ik)) \\ - 2\left(\frac{k^4}{6!}f^{(6)}(0) + \frac{k^8}{10!}f^{(10)}(0) + \frac{k^{12}}{14!}f^{(14)}(0) + \dots\right)$$

i

$$f^{(4)}(0) = \frac{6}{k^4}(f(k)+f(-k)+f(ik)+f(-ik)-4f(0)) \\ - 24\left(\frac{k^4}{8!}f^{(8)}(0) + \frac{k^8}{12!}f^{(12)}(0) + \dots\right),$$

gde su $k, -k, ik, -ik$ ($0 < k \leq 1$) temena kvadrata u kojima se računava vrednost funkcije za aproksimaciju izvoda, D.Dj. Tošić ([85]) je dobio kvadraturnu formulu

$$(2.15.8) \quad \int_{-1}^1 f(z)dz = 2\left(1 - \frac{1}{5k^4}\right)f(0) + \left(\frac{1}{6k^2} + \frac{1}{10k^4}\right)(f(k)+f(-k)) \\ + \left(-\frac{1}{6k^2} + \frac{1}{10k^4}\right)(f(ik)+f(-ik)) + R,$$

gde je

$$R = \left(-\frac{2}{3 \cdot 6!}k^4 + \frac{2}{7!}\right)f^{(6)}(0) + \left(\frac{2}{9!} - \frac{2}{5 \cdot 8!}k^4\right)f^{(8)}(0) + \dots$$

Za $k=1$ formula (2.15.8) se svodi na Birkhoff-Youngovu formulu (2.15.2), a za $k=\sqrt{0.6}$ na Gauss-Legendreovu formulu (2.15.3).

Anulirajući koeficijent uz šesti izvod u razvoju za R , tj. uzimajući $k = \sqrt[4]{3/7}$, Tošić je dobio formulu maksimalne tačnosti

$$\int_{-1}^1 f(z) dz = \frac{16}{15} f(0) + \frac{1}{6} \left(\frac{7}{5} + \sqrt{\frac{7}{3}} \right) \left(f\left(\sqrt{\frac{4}{7}}\right) + f\left(-\sqrt{\frac{4}{7}}\right) \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{7}{5} - \sqrt{\frac{7}{3}} \right) \left(f\left(1\sqrt{\frac{4}{7}}\right) + f\left(-1\sqrt{\frac{4}{7}}\right) \right) + R_M,$$

gde je

$$R_M = \frac{1}{793800} f^{(8)}(0) + \frac{1}{61122600} f^{(10)}(0) + \dots$$

U više radova [50], [53], [54], [55], [88] ova formula je uopštavana u raznim pravcima. Na primer, u radu [53] Milovanović i Djordjević su dobili devetotačkastu formulu interpolacionog tipa oblika

$$\int_{-1}^1 f(z) dz = A f(0) + C_{11} (f(r_1) + f(-r_1)) + C_{12} (f(r_2) + f(-r_2)) + C_{21} (f(ir_1) + f(-ir_1)) + C_{22} (f(ir_2) + f(-ir_2)) + R(f),$$

gde je $0 < r_2 < r_1 < 1$, čiji je algebarski stepen tačnosti $p=13$, ako se r_1 i r_2 izaberu tako da je

$$r_1^4 = \frac{63+4\sqrt{114}}{143} \quad \text{i} \quad r_2^4 = \frac{63-4\sqrt{114}}{143}.$$

Tada su parametri formule

$$r_1 = 0.927247386651532, \quad r_2 = 0.613755686975668,$$

$$A = \frac{512}{675} = 0.75851851851852,$$

$$C_{11} = 0.18671643342768, \quad C_{12} = 0.44678904212713,$$

$$C_{21} = 0.64900035496038 \cdot 10^{-3}, \quad C_{22} = -0.13413735169030 \cdot 10^{-1}.$$

Razvoj greške $R(f)$ u Taylorov red u $z=0$ ima vodeći član

$$R_1 = \frac{R(z^{14})}{14!} f^{(14)}(0) \approx 3.56 \cdot 10^{-14} f^{(14)}(0).$$

Ovako dobijeno devetotačkasto pravilo je pogodno za pri-

menu kada je funkcija f oblika $f(x)=g(x^4)$, jer se tada formula svodi na trotačkastu formulu

$$\int_0^1 f(x)dx = C_0 f(0) + C_1 f(r_1) + C_2 f(r_2),$$

gde su

$$C_0 = \frac{256}{675}, \quad C_{1,2} = \frac{15922 \pm 591\sqrt{114}}{51300}.$$

U poslednje vreme postoji više radova u kojima se tretira problem integracije analitičkih funkcija više promenljivih ([2], [3]), [52]).

7.2.16. Integracija brzo oscilatornih funkcija

Ako podintegralna funkcija veliki broj puta menja znak u intervalu integracije, tada standardne kvadraturne formule postaju neefikasne. Ovakve brzo oscilatorne funkcije se često sreću u primenama, na primer, kod Fourierovih transformacija

$$\int_a^b f(x) \cos nx dx, \quad \int_a^b f(x) \sin nx dx,$$

i slično. U ovom odeljku izložićemo ukratko nekoliko pristupa koji omogućavaju integraciju brzo oscilatornih funkcija sa zadovoljavajućom tačnošću. U opštem slučaju, mogu se razmatrati integrali oblika

$$I(t) = \int_a^b f(x)K(x,t)dx \quad (-\infty \leq a < b \leq +\infty),$$

gde je $K(x,t)$ tzv. oscilatorno jezgro, dok je $f(x)$ "neoscilatorni" deo.

a) Integracija izmedju nula. Neka su x_k ($k=1,2,\dots,m$) nule oscilatornog jezgra i neka su uredjene tako da je

$$a \leq x_1 < x_2 < \dots < x_m \leq b.$$

Jedan prost način za izračunavanje vrednosti brzo oscilatornih integrala sastoji se u određivanju nula jezgra, dekompoziciji integrala i primeni nekog pravila na svaki od "komponentnih" integrala, tj.

$$\int_a^b f(x)K(x,t)dx = \sum_{k=0}^m x_{k+1} \int_{x_k}^{x_{k+1}} f(x)K(x,t)dx = \sum_{k=0}^m Q_k(g),$$

gde smo stavili $x_0=a$, $x_{m+1}=b$ i $g(x)=f(x)K(x,t)$. Sa $Q_k(g)$ smo označili neko kvadraturno pravilo za približno određivanje integrala funkcije g na segmentu $[x_k, x_{k+1}]$. Pri ovome su naročito pogodna pravila zatvorenog tipa, jer se dobija veća tačnost bez dodatnog izračunavanja. Na primer, formule Lobattoovog tipa su posebno interesantne. Tako Lobattoova formula sa n tačaka (2 na krajevima podsegmenta i $n-2$ u intervalu) zahteva $n-2$ izračunavanja na podsegmentu, jer je funkcija jednaka nuli na krajevima intervala.

b) Filonovo pravilo. Pretpostavimo da se funkcija $f:[a,b] \rightarrow \mathbb{R}$ može dosta dobro aproksimirati pomoću

$$\phi(x) = a_0\phi_0(x) + a_1\phi_1(x) + \dots + a_n\phi_n(x)$$

i da se transformacije bazisnih funkcija ϕ_k mogu jednostavno eksplicitno odrediti

$$\psi_k(t) = \int_a^b \phi_k(x)K(x,t)dx \quad (k=0, 1, \dots, n).$$

Tada imamo

$$I(t) = \int_a^b f(x)K(x,t)dx \approx \sum_{k=0}^n a_k \psi_k(t).$$

Filon je aproksimirao $f(x)$ pomoću paraboličkih lukova, tj. deo po deo parabolom drugog reda. Ilustrujemo ovaj metod na primeru Fourierovog integrala

$$(2.16.1) \quad I(k) = \int_a^b f(x) \cos kx dx.$$

Podelimo segment $[a,b]$ na $2n$ podsegmenta ekvidistantnim nizom tačaka. Na svakom od podsegmenta, dužine $h=(b-a)/2n$, funkciju f interpolirajmo polinomom drugog stepena (parabolom) u tačkama mreže: x_{2k-2} , x_{2k-1} , x_{2k} ($k=1, \dots, n$). Izračunavanjem Fourierovog integrala (2.16.1), kada se za $f(x)$ uzme "deo po deo" parabola, dobijamo

$$\int_a^b f(x) \cos kx \, dx = h \{ \alpha [f(b) \sin kb - f(a) \sin ka] + \beta C_{2n} + \gamma C_{2n-1} \},$$

gde su

$$C_{2n} = \frac{1}{2} f(a) \cos ka + f(a+2h) \cos k(a+2h) + f(a+4h) \cos k(a+4h) + \dots + \frac{1}{2} f(b) \cos kb,$$

$$C_{2n-1} = f(a+h) \cos k(a+h) + f(a+3h) \cos k(a+3h) + \dots + f(b-h) \cos k(b-h),$$

$$\alpha = \alpha(\theta) = \frac{1}{3}(\theta^2 + \theta \sin \theta \cos \theta - 2 \sin^2 \theta),$$

$$\beta = \beta(\theta) = \frac{2}{3}(\theta(1 + \cos^2 \theta) - 2 \sin \theta \cos \theta),$$

$$\gamma = \gamma(\theta) = \frac{4}{3}(\sin \theta - \theta \cos \theta), \quad \theta = kh = k(b-a)/2n.$$

Ako se na sličan način definišu sume S_{2n} i S_{2n-1} , može se odrediti "sinusni" integral

$$\int_a^b f(x) \sin kx \, dx = h \{ -\alpha [f(b) \cos kb - f(a) \cos ka] + \beta S_{2n} + \gamma S_{2n-1} \}.$$

Pri praktičnom određivanju, za male vrednosti θ , treba koristiti razvoje za funkcije $\alpha(\theta)$, $\beta(\theta)$, $\gamma(\theta)$, tj.

$$\alpha(\theta) = \frac{2}{45} \theta^3 - \frac{2}{315} \theta^5 + \frac{2}{4725} \theta^7 + \dots,$$

$$\beta(\theta) = \frac{2}{3} + \frac{2}{15} \theta^2 - \frac{4}{105} \theta^4 + \frac{2}{567} \theta^6 + \dots,$$

$$\gamma(\theta) = \frac{4}{3} - \frac{2}{15} \theta^2 + \frac{1}{210} \theta^4 - \frac{1}{11340} \theta^6 + \dots.$$

c) Korišćenje formula Gauss-Christoffelovog tipa. Ako definišemo težinske funkcije

$$c_m(x) = \frac{1}{2}(1 + \cos m\pi x), \quad s_m(x) = \frac{1}{2}(1 + \sin m\pi x)$$

za $x \in [-1, 1]$ i $m=0, 1, \dots$, tada je

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos mx \, dx = \int_{-1}^1 c_m(x) f(\pi x) \, dx - \frac{1}{2} \int_{-1}^1 f(\pi x) \, dx,$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin mx dx = \int_{-1}^1 s_m(x) f(\pi x) dx - \frac{1}{2} \int_{-1}^1 f(\pi x) dx.$$

Drugi integrali na desnoj strani u ovim jednakostima se jednostavno odredjuju jer $f(\pi x)$ nije "oscilatorno". Za određivanje vrednosti Fourierovih koeficijenata sa visokom tačnošću treba, dakle, odrediti sa istom takvom tačnošću integrale sa težinama $c_m(x)$ i $s_m(x)$. Gauss-Christoffelove formule sa ovim težinama razvio je Gautschi [21].

Integracija brzo oscilatornih funkcija je veoma aktuelna oblast numeričke integracije, na kojoj se poslednjih godina dosta radi.

7.2.17. Konvergencija kvadraturnih procesa

U ovom odeljku ispitaćemo uslove za konvergenciju kvadraturnih procesa, tj. uslove pod kojima ostatak $R_n(f) \rightarrow 0$, kada $n \rightarrow +\infty$.

Neka je dat niz kvadraturnih formula

$$(2.17.1) \quad I(f) = \int_a^b f(x) dx = K_n f + R_n(f) \quad (n=1, 2, \dots),$$

gde su

$$(2.17.2) \quad K_n f = \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} f(x_k^{(n)}),$$

$A_k^{(n)}$ težinski koeficijenti (konstantni za fiksirano n) i $x_k^{(n)}$ apscise koje zadovoljavaju uslov

$$a \leq x_1^{(n)} < x_2^{(n)} < \dots < x_n^{(n)} \leq b.$$

Teorema 2.17.1. Potreban i dovoljan uslov da niz $\{K_n f\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergira ka $I(f)$ za svako $f \in C[a, b]$ je da on konvergira za svaki algebarski polinom i da postoji pozitivna konstanta M takva da je

$$(2.17.3) \quad \sum_{k=1}^n |A_k^{(n)}| \leq M \quad (n=1, 2, \dots).$$

Dokaz. Posmatrajmo linearnu funkcionalu K_n , definisanu pomoću (2.17.2). Kako je za svako $f \in C[a, b]$

$$\|K_n f\| \leq \sum_{k=1}^n |A_k^{(n)}| \cdot |f(x_k^{(n)})| \leq \left(\sum_{k=1}^n |A_k^{(n)}| \right) \|f\|,$$

gde je $\|f\| = \max_{a \leq x \leq b} |f(x)|$, zaključujemo da je funkcionala K_n ograničena na $C[a, b]$.

Dakle,

$$(2.17.4) \quad \|K_n f\| \leq \|K_n\| \cdot \|f\| \quad (\forall f \in C[a, b])$$

1

$$(2.17.5) \quad \|K_n\| \leq \sum_{k=1}^n |A_k^{(n)}|.$$

Odredimo sada normu $\|K_n\|$. U prostoru $C[a, b]$ izaberimo funkciju \bar{f} , koja je određena sa

$$\bar{f}(x_k^{(n)}) = \operatorname{sgn} A_k^{(n)},$$

linearna na $[x_k^{(n)}, x_{k+1}^{(n)}]$ ($k=1, \dots, n-1$) i konstantna na $[a, x_1^{(n)}]$ i $[x_n^{(n)}, b]$. Tada je $\|\bar{f}\| = 1$ i

$$K_n \bar{f} = \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \operatorname{sgn} A_k^{(n)} = \sum_{k=1}^n |A_k^{(n)}|,$$

pa iz (2.17.4), za $f = \bar{f}$, sleduje $\|K_n\| \geq \sum_{k=1}^n |A_k^{(n)}|$, što zajedno

sa (2.17.5) daje $\|K_n\| = \sum_{k=1}^n |A_k^{(n)}|$.

Prema tome, kako je

1° Niz $\{\|K_n\|\}_{n \in \mathbb{N}}$ ograničen (na osnovu (2.17.3));

2° $\lim_{n \rightarrow +\infty} K_n f = I(f)$ za svaki algebarski polinom;

3° Skup polinoma svuda gust u $C[a, b]$,

na osnovu Banach-Steinhausove teoreme (videti odeljak 2.3.1) zaključujemo da važi tvrdjenje teoreme 2.17.1.

Teorema 2.17.2. Ako su koeficijenti $A_k^{(n)} \geq 0$ ($k=1, \dots, n$; $n=1, 2, \dots$) potreban i dovoljan uslov da niz $\{K_n f\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergira ka $I(f)$ za svako $f \in C[a, b]$ je da on konvergira za svaki algebarski polinom.

Dokaz. Kako je $\lim_{n \rightarrow +\infty} K_n f = I(f)$, stavljajući $f(x) = 1$ u

(2.17.1), dobijamo

$$b - a = \sum_{k=1}^n A_k^{(n)},$$

što znači da je uslov (2.17.3) ispunjen sa $M=b-a$, čime je dokaz završen.

Iz teoreme 2.17.2 sleduje konvergencija Gauss-Christoffelovih kvadraturnih procesa, s obzirom da je $A_k^{(n)} \geq 0$.

Teorema 2.17.2 nije primenljiva na niz Newton-Cotesovih formula (videti (2.3.4)), jer su već pri $n=8$ neki od težinskih koeficijenata negativni. Napomenimo, da ovaj niz, zaista, ne konvergira za svako $f \in C[a,b]$ (videti [9] i [11]).

7.3. LITERATURA

1. M. Abramovitz & I.A. Stegun: Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables. Dover, New York, 1965.
2. B.P. Acharya & R.N. Das: *On numerical integration of analytic function of more than one variable*. J.Math.Phys.Sci. 15(1981), 399-408.
3. B.P. Acharya & R.N. Das: *Approximative evaluation of the multiple complex integrals of analytic functions*. Computing 30(1983), 279-283.
4. D.G. Anderson: *Gaussian quadrature formulae for $\int_0^1 -\ln(x)f(x)dx$* . Math. Comp. 19(1965), 477-481.
5. J.M. Ash & R.L. Jones: *Optimal numerical differentiation using three function evaluations*. Math. Comp. 37(1981), 159-167.
6. F.L. Bauer, H. Rutishauser, E.L. Stiefel: *New aspects in numerical quadrature*. In: Experimental Arithmetic, High Speed Computing and Mathematics. Amer. Math. Soc., Providence, R.I., 1963.
7. I.S. Berezin i N.P. Žitkov: *Numerička analiza - numeričke metode*. Naučna knjiga, Beograd, 1963.
8. G. Birkhoff & D. Young: *Numerical quadrature of analytic and harmonic functions*. J. Math. Phys. 29(1950), 217-221.
9. H. Brass: *Ein Gegenbeispiel zum Newton-Cotes-Verfahren*. Z. Angew. Math. Mech. 57(1977), 609.
10. E.B. Christoffel: *Über die Gaussische Quadratur und eine Verallgemeinerung derselben*. J. Reine Angew. Math. 55(1858), 61-82 [Ges. Math. Abhandlungen I, 65-87].
11. L. Collatz: *Functionalanalysis und Numerische Mathematik*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1968.
12. P.D. Crout: *The approximation of functions and integrals by a linear combination of functions*. J. Math. Phys. (M.I.T.) 9(1929/30), 278-314.

13. B. Danloy: *Numerical construction of Gaussian quadrature formulas for $\int_0^1 (-\log x) x^\alpha f(x) dx$ and $\int_0^m E_m(x) f(x) dx$* . Math. Comp. 27 (1973), 861-869.
14. P. J. Davis & P. Rabinowitz: *Methods of numerical integration*. Academic Press, New York, 1975.
15. B. P. Demidovich & I. A. Maron: *Computational mathematics*. Mir Publishers, Moscow, 1973.
16. J. J. Dongarra et al.: *LINPACK User's Guide*. SIAM, Philadelphia, 1979.
17. H. Engels: *Numerical quadrature and cubature*. Academic Press, London, 1980.
18. C. F. Gauss: *Methodus nova integratum valores per approximationem invenendi*. Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Göttingensis Recentiores 3 (1814) [Werke III, 123-162].
19. W. Gautschi: *Construction of Gauss-Christoffel quadrature formulas*. Math. Comp. 22 (1968), 251-270.
20. W. Gautschi: *On the construction of Gaussian quadrature rules from modified moments*. Math. Comp. 24 (1970), 245-260.
21. W. Gautschi: *Tables of Gaussian quadrature rules for the calculation of Fourier coefficients*. Math. Comp. 24 (1970), no. 110, loose microfiche suppl. A-D.
22. W. Gautschi: *On generating Gaussian quadrature rules*. In: *Numerische Integration*. ISNM 45 (Ed. by Hämmerlin, G.), 147-154, Birkhäuser, Basel, 1979.
23. W. Gautschi: *A survey of Gauss-Christoffel quadrature formulas*. In: E. B. Christoffel - The influence of his work in mathematics and the physical sciences (P. L. Butzer & F. Fehér, eds.), 72-147, Birkhäuser Verlag, Basel, 1981.
24. W. Gautschi: *On generating orthogonal polynomials*. SIAM J. Sci. Statistics. Comput. 3 (1982), 289-317.
25. W. Gautschi: *Polynomials orthogonal with respect to the reciprocal gamma function*. BIT 22 (1982), 387-389.
26. W. Gautschi: *How and how not to check Gaussian quadrature formulae*. BIT 23 (1983), 209-216.
27. W. Gautschi & G. V. Milovanović: *Gaussian quadrature involving Einstein and Fermi functions with an application to summation of series*. Math. Comp. 44 (1985), 177-190.
28. W. Gautschi & G. V. Milovanović: *Polynomials orthogonal on the semi-circle*. J. Approx. Theory 46 (1986), 230-250.
29. G. H. Golub & J. Kautski: *Calculation of Gauss quadratures with multiple free and fixed knots*. Numer. Math. 41 (1983), 147-163.
30. G. H. Golub & J. H. Wellsch: *Calculation of Gauss quadrature rules*. Math. Comp. 23 (1969), 221-230.
31. S. Haber: *Midpoint quadrature formulas*. Math. Comp. 21 (1967), 719-221.

32. G. Hämmerlin: *Über ableitungsfreie Schranken für Quadraturfehler*. Numer. Math. 5(1963), 226-233.
33. G. Hämmerlin: *Über ableitungsfreie Schranken für Quadraturfehler II. Ergänzungen und Möglichkeiten zur Verbesserung*. Numer. Math. 7(1965), 232-237.
34. G. Hämmerlin: *Zur Abschätzung von Quadraturfehlern für analytische Funktionen*. Numer. Math. 8(1966), 334-344.
35. C.G.Harris & W.A.B.Evans: *Extension of numerical quadrature formulae to cater for end point singular behaviours over finite intervals*. Internat. J. Comput. Math. 6(1977/78), 219-227.
36. E.Heine: *Anwendungen der Kugelfunctionen und der verwandten Functionen*. Reimar, Berlin, 1881 [I. Theil: Mechanische Quadratur, 1-31].
37. K.H.Huebner: *The finite element method for engineers*. New York-Sydney-Toronto, 1975.
38. K.S.K.Iyengar: *Note on an inequality*. Math. Student 6(1938) 75-76.
39. C.G.J.Jacobi: *Über Gauss neue Methode, die Werthe der Integrale näherungsweise zu finden*. J. Reine Angew. Math. 1(1826), 301-308.
40. V.I.Krylov: *Approximate calculation of integrals (Russian)*. Izdat. Fiz.-Mat.Lit. Moscow, 1959.
41. Soo-Y.Lee: *The inhomogeneous Airy functions $G_i(z)$ and $H_i(z)$* . J. Chem. Phys. 72(1980), 332-336.
42. F.G.Lether: *Error bounds for fully symmetric quadrature rules*. SIAM J. Numer. Anal. 11(1974), 3-9.
43. F.Lether: *On Birkhoff-Young quadrature of analytical functions*. J. Comput. Appl. Math. 2(1976), 81-84.
44. F.G.Lether: *On the construction of Gauss-Legendre quadrature rules*. J. Comput. Appl. Math. 4(1978), 47-52.
45. J.N.Lyness: *Differentiation formulas for analytic functions*. Math. Comp. 22(1968), 352-362.
46. J.N.Lyness & L.M.Delves: *On numerical contour integration round a closed contour*. Math. Comp. 21(1967), 561-577.
47. J.N.Lyness & C.B.Moler: *Numerical differentiation of analytic functions*. SIAM J. Numer. Anal. 4(1967), 202-210.
48. F.G.Mehler: *Bemerkungen zur Theorie der mechanischen Quadraturen*. J. Reine Angew. Math. 63(1864), 152-157.
49. Š.E.Mikeladze: *Čislennye metody matematičeskogo analiza*. Gos-tehizdat, Moskva, 1953.
50. B.Milošević i G.V.Milovanović: *Novo kvadrature formule za analitičke funkcije*. Zb. rad. Gradj. fak. u Nišu, N^o4(1983), 315-323.
51. G.V.Milovanović: *Konstruktivna kvadratura formula Lobatto-ovog tipa sa integracijsu funkcija sa logaritamskom težinom*. Zb. rad. PMF u Kragujevcu, 4(1983), 99-104.
52. G.V.Milovanović, B.P.Acharya, T.N.Pattnaik: *On numerical evaluation of double integrals of an analytic function of two complex variables*. BIT 26(1986), 521-526.

53. G.V.Milovanović & R.Ž.Djordjević: *On a generalization of modified Birkhoff-Young quadrature formula*. Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. Fiz. N-735 - N-762(1982), 130-134.
54. G.V.Milovanović i B.Milošević: *Numerička integracija analitičkih funkcija*. Zb. rad. Gradj. fak. u Nišu, N-3(1982), 237-241.
55. G.V.Milovanović i I.Ž.Milovanović: *Jedna klasa formula za numeričku integraciju analitičkih funkcija*. Zb. rad. III znanstvenog skupa Numeričke metode u tehnici, Stubičke Toplice, 1981, 171-177.
56. G.V.Milovanović & J.E.Pečarić: *On generalization of the inequality of A.Ostrowski and some related applications*. Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. Fiz. N-544 - N-576(1976), 155-158.
57. G.V.Milovanović & J.E.Pečarić: *Some considerations of Iyengar's inequality and some related applications*. Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. Fiz. N-544 - N-576(1976), 166-170.
58. G.V.Milovanović i S.Č.Stojanović: *Uopštene Gaussove kvadrature formule za logaritamsku težinu*. Zb. rad. IV znanstvenog skupa PPR, Stubičke Toplice, 1982, 457-462.
59. D.S.Mitrinović i D.Ž.Djoković: *Polinomi i matrice*. ICS, Beograd, 1975.
60. D.S.Mitrinović (with P.M.Vasić): *Analytic inequalities*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1970.
61. G.Monegato: *A note on extended Gaussian quadrature rules*. Math. Comp. 30(1976), 812-817.
62. G.Monegato: *Positivity of the weight of extended Gauss-Legendre quadrature rules*. Math. Comp. 32(1978), 243-245.
63. G.Monegato: *Some remarks on the construction of extended Gaussian quadrature rules*. Math. Comp. 32(1978), 247-252.
64. G.Monegato: *An overview of results and questions related to Kronrod schemes*. In: Numerische Integration. ISNM 45(Ed. by Hämmerlin, G.). 231-240, Birkhäuser, Basel, 1979.
65. G.Monegato: *Stieltjes polynomials and related quadrature rules*. SIAM Review 24(1982), 137-158.
66. A.C.R.Newbery: *Some extensions of Legendre quadrature*. Math. Comp. 23(1969), 173-176.
67. J.Nuttall: *Gaussian integration for complex weight functions*. J. Inst. Math. Applics. 21(1978), 165-170.
68. A.Ossicini: *Costruzione di formule di quadratura di tipo Gaussiano*. Ann. Mat. Pura Appl. (4)72(1966), 213-237.
69. A.Ossicini, F.Rosati: *Funzioni caratteristiche nelle formule di quadratura gaussiane con nodi multipli*. Boll. Un. Mat. Ital. (4)11(1975), 224-237.
70. D.F.Paget: *Generalized product integration*. Ph. Thesis. University of Tasmania, Hobart, 1976.
71. T.N.L.Patterson: *On optimum addition of points to quadrature formulae*. Math. Comp. 22(1967), 847-856.

72. R. Piessens & M. Branders: *Tables of Gaussian quadrature formulas*. Appl. Math. Prog. Div., University of Leuven, Leuven, 1975.
73. P. Rabinowitz: *The exact degree of precision of generalized Gauss-Kronrod integration rules*. Math. Comp. 35(1980), 1275-1283.
74. R. Radau: *Étude sur les formules d'approximation qui servent à calculer la valeur numérique d'une intégrale définie*. J. Math. Pures Appl. (3)6(1880), 283-336.
75. W. Romberg: *Vereinfachte numerische Integration*. Norske Vid. Selsk. Forh. (Trondheim) 28(1955), 30-36.
76. R. A. Sack & A. F. Donovan: *An algorithm for Gaussian quadrature given modified moments*. Numer. Math. 18(1971/72), 465-478.
77. H. E. Salzer: *Optimal points for numerical differentiation*. Numer. Math. 2(1960), 214-227.
78. B. T. Smith et al.: *Matrix Eigensystem Routines - EISPACK Guide*. Lect. Notes Comput. Sci. 6, Springer-Verlag, New York, 1974.
79. N. M. Steen, G. D. Byrne, E. M. Gelbard: *Gaussian quadratures for the integrals $\int_0^{\infty} \exp(-x^2)f(x)dx$ and $\int_0^b \exp(-x^2)f(x)dx$* . Math. Comp. 23(1969), 661-671.
80. T. J. Stieltjes: *Quelques recherches sur la théorie des quadratures dites mécaniques*. Ann. Sci. Ecole Nor. Paris Sér. 3, 1(1884), 409-426 [Oeuvres I, 377-396].
81. T. J. Stieltjes: *Correspondence d'Hermite et de Stieltjes*. vol. II, Gauthier-Villars, Paris, 1905, 439-441.
82. A. H. Stroud & D. Secrest: *Gaussian quadrature formulas*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1966.
83. A. H. Stroud & D. D. Stancu: *Quadrature formulas with multiple Gaussian nodes*. J. Soc. Indust. Appl. Math. Ser. B Numer. Anal. 2(1965), 129-143.
84. G. Szegő: *Über gewisse orthogonale Polynome, die zu einer oszillierenden Belegungsfunktion gehören*. Math. Ann. 110(1934), 501-513.
85. D. Dj. Tošić: *A modification of the Birkhoff-Young quadrature formula for analytical functions*. Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. Fiz. N-602 - N-633(1978), 73-77.
86. D. Dj. Tošić: *Numerical differentiation of analytic functions*. Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. Fiz. N-678 - N-715(1980), 175-182.
87. D. Dj. Tošić & A. A. ElBah: *Optimal numerical differentiation of real-valued analytic functions*. Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. Fiz. N-735 - N-762(1982), 122-126.
88. D. Dj. Tošić, D. Sotirovski, J. Draškić-Ostojić: *Some quadrature formulas for analytic functions*. Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. Fiz. N-618 - N-715(1980), 170-172.
89. P. Turan: *On the theory of the mechanical quadrature*. Acta Sci. Math. (Szeged), 12(1950), 30-37.
90. A. H. Tureckij: *On quadrature formulas exact for trigonometric polynomials*. Učen. Zap. Belorussk. Univ. no1(49)(1959), 31-54 (Russian).

91. A.H. Tureckiĭ: *Quadrature formulae with an even number of interpolation points accurate for trigonometric polynomials*. Dokl. Akad. Nauk BSSR 4 (1960), 365-368 (Russian).
92. J.L. Ullman: *A class of weight functions that admit Tchebycheff quadrature*. Michigan Math. J. 13 (1966), 417-423.
93. J.V. Uspensky: *Sur les valeurs asymptotiques des Coefficients de Cotes*. Bull. Amer. Math. Soc. 31 (1925), 145-156.
94. P.M. Vasić & G.V. Milovanović: *On an inequality of Iyengar*. Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. Fiz. N-544 - N-576 (1976), 18-24.
95. J.P. Vigneron & P. Lambin: *Gaussian quadrature of integrands involving the error function*. Math. Comp. 35 (1980), 1299-1307.
96. J.C. Wheeler: *Modified moments and Gaussian quadratures*. Rocky Mountain J. Math. 4 (1974), 287-296.
97. D. Young: *An error bound for the numerical quadrature of analytic functions*. J. Math. Phys. 31 (1952), 42-44.