

Numerička matematika

8. predavanje

Saša Singer

`singer@math.hr`

`web.math.pmf.unizg.hr/~singer`

PMF – Matematički odsjek, Zagreb

Sadržaj predavanja

- Metoda najmanjih kvadrata (nastavak):
 - QR faktorizacija.
 - Householderovi reflektori.
 - QR faktorizacija i pivotiranje.
 - Rješenje matricne formulacije problema najmanjih kvadrata korištenjem QR faktorizacije.
 - Neprekidni problem najmanjih kvadrata.
 - Jednostavni primjer.
 - Složeniji primjer.
 - Ortogonalne familije funkcija, ortogonalni polinomi.
 - Primjeri ortogonalnih familija funkcija.

Komentar rezultata 1. kolokvija

Rezultati prvog kolokvija — komentar:

- Općenito gledajući, rezultati su **dobri** :-)
- Prosjek bodova je **30.80**, na **147** pristiglih.
To je **rekord** (od 2015. g.) i čak **6.5** bodova više nego lani!

Idemo redom ...

- **Pohvala** svima koji imaju ≥ 40 bodova — ima ih **čak 19**.

Međutim, za **neke** — moglo je i puno **bolje**.

- **Svi** s ≤ 20 bodova ozbiljno su “**ugroženi**” — takvih je **13**.

Kolokviji ispituju gradivo **cijelog** kolegija, a ne samo **vježbe**!

- **veliki** dio vas je to **ipak shvatio** (samo **16 nema** bodova).

Komentar rezultata 1. kolokvija — nastavak

Evo statistike po **zadacima**, na 147 pristiglih studenata:

Zadatak	1	2	3	4	5	ukupno
Uk. bod.	10	10	10	10	10	50
Prosjek	4.02	4.60	9.63	8.31	4.24	30.80

Komentar o “**tužnijem**” dijelu rezultata (bez 1. zadatka):

- 2. zad. — Gleda se stabilnost **algoritma**, a ne problema. Algoritam je **$suma = suma + clan;$** .
- 5. zad. — Broje se **točni rezultati**, ne “znanje postupka”. Deriviranje i max. **aps. vrijednosti** (vježbe). Što bi???

Savjet: Isplati se bar pogledati **predavanja** i pazite na “**račun**”.

Informacije — riješeni zadaci . . .

Zadaci. Na [mojoj](#) i [službenoj](#) web stranici možete naći

- [riješene](#) zadatke iz [neprekidnih najmanjih kvadrata](#) (pdf format).

Tamo ima [6](#) zadataka s detaljnim rješenjima, a neki zadaci imaju i [dva](#) rješenja.

Neprekidni najmanji kvadrati se

- [detaljno](#) rade na [predavanjima](#), skupa sa zadacima, a ovo je dodatak za [vježbanje](#).

Informacije

Konzultacije:

- samo za NM: utorak u 15 sati (iza predavanja),
- petak, 12–14 sati, ili — po dogovoru.

Ne zaboravite, “žive” su i **domaće zadaće** na adresi

<http://web.math.hr/nastava/unm/zadace.php>

ili, izravno

<http://degiorgi.math.hr/nm/>

Dodatni bodovi “čekaju na vas”.

Informacije

Moja web stranica za **Numeričku matematiku** je

http://web.math.hr/~singer/num_mat/

Tamo su kompletna **predavanja** iz prošlih godina, a stizat će i **nova** (kako nastaju).

Skraćena verzija skripte — 1. dio (prvih 7 tjedana):

http://web.math.hr/~singer/num_mat/num_mat1.pdf

Skraćena verzija skripte — 2. dio (drugih 6 tjedana):

http://web.math.hr/~singer/num_mat/num_mat2.pdf

Householderovi reflektori

Householderovi reflektori

Za zadani **jedinični** vektor $u \in \mathbb{R}^m$, matrica H definirana s

$$H = H(u) := I - 2uu^T, \quad \|u\|_2 = 1,$$

zove se **Householderov reflektor**.

Matrica H je

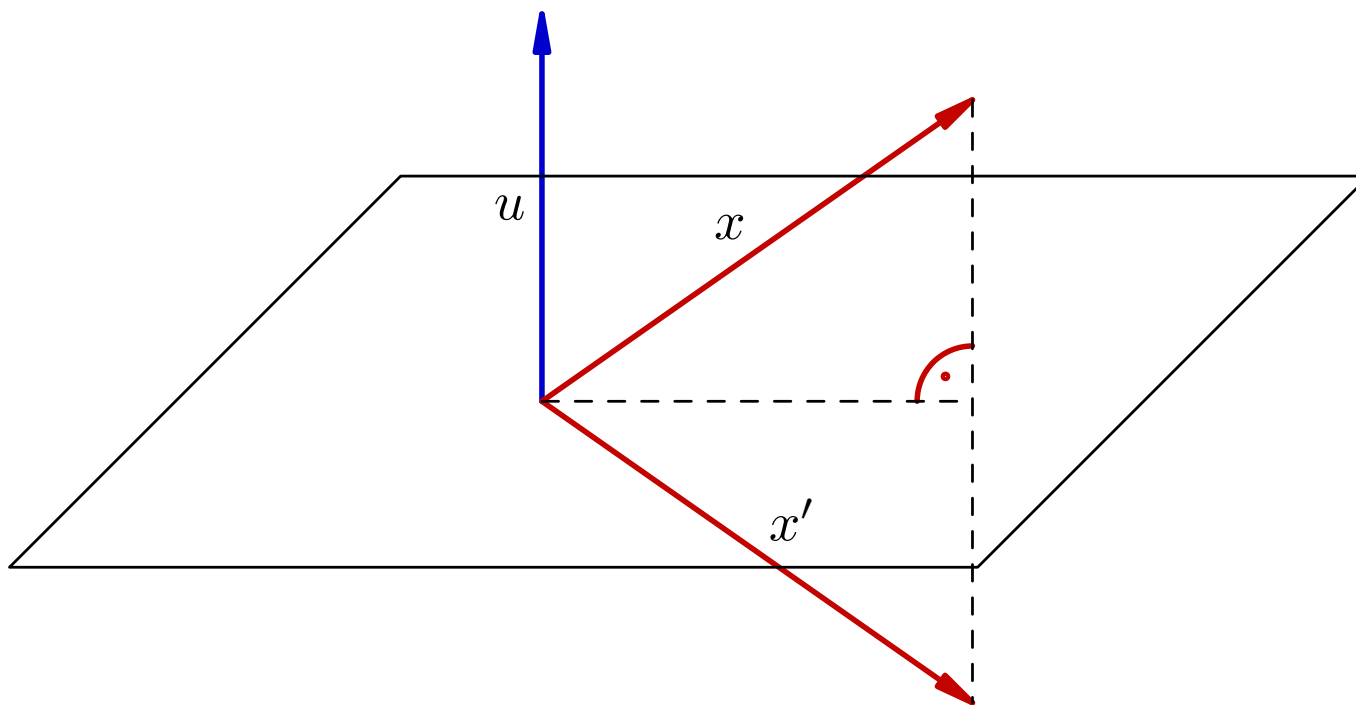
- **simetrična**,
- i **ortogonalna**, jer je

$$\begin{aligned} HH^T &= H^2 = (I - 2uu^T)(I - 2uu^T) \\ &= I - 4uu^T + 4u(u^T u)u^T \\ &= I - 4uu^T + 4\|u\|_2^2 uu^T = I. \end{aligned}$$

Zašto baš ime reflektor?

Promatrajmo **hiperravninu** koja je **okomita** na vektor u .

- Reflektor H sve vektore x preslikava u **simetrične** obzirom na tu hiperravninu, $x' = Hx$.



Poništavanje Householderovim reflektorima

Neka je zadan vektor x . Treba naći Householderov reflektor H koji poništava sve komponente vektora x , osim prve. Dakle, treba naći jedinični vektor u koji definira takav reflektor H .

Tražimo da je

$$Hx = \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = c \cdot e_1, \quad c \in \mathbb{R}.$$

Za početak, H je unitarna matrica, pa čuva normu vektora,

$$\|x\|_2 = \|Hx\|_2 = |c|.$$

odakle slijedi da je $c = \pm \|x\|_2$.

Poništavanje Householderovim reflektorima

Napišimo traženu jednadžbu preko nepoznatog vektora u

$$Hx = (I - 2uu^T)x = x - 2u(u^T x) = \pm \|x\|_2 e_1.$$

Uočimo da je $u^T x$ broj = skalarni produkt dva vektora.

Zanemarimo na trenutak mogućnost da je $u^T x = 0$. Onda je

$$u = \frac{1}{2(u^T x)} (x \mp \|x\|_2 e_1).$$

Obzirom na to da $u^T x$ ne znamo, možemo zaključiti da je

$$u = \alpha (x \mp \|x\|_2 e_1), \quad \text{za neki } \alpha \in \mathbb{R},$$

tj. da je u paralelan s vektorom $\tilde{u} = x \mp \|x\|_2 e_1$. Konačno, konstantu α nalazimo normiranjem vektora \tilde{u} na normu 1.

Poništavanje Householderovim reflektorima

Prema tome,

$$u = \frac{\tilde{u}}{\|\tilde{u}\|_2},$$

ako je $\tilde{u} \neq 0$. U protivnom, stavljamo $u = 0$, odnosno, $H = I$.

Uočite da **oba** izbora predznaka (\mp) u definiciji \tilde{u} **uvijek** daju

$$Hx = c \cdot e_1 = \pm \|x\|_2 e_1.$$

Ako je $x = 0$, onda je $\tilde{u} = 0$, a to znači da je $H = I$. Tada možemo uzeti **bilo koji** u , jer je $H \cdot 0 = 0$ za svaki H .

U protivnom je i $\|x\|_2 \neq 0$, pa **barem jedan** izbor predznaka (\mp) u formuli za \tilde{u} daje $\tilde{u} \neq 0$. Ako **drugi** izbor daje $\tilde{u} = 0$, onda je $x = \pm \|x\|_2 e_1$. Dakle, **oba** reflektora su korektna.

Izbor predznaka za u

Ranija mogućnost da je $u^T x = 0$ ne pravi nikakve poteškoće. Onda je $Hx = x = \pm \|x\|_2 e_1$ i samo tada bar jedan izbor predznaka daje $\tilde{u} = 0$. Dobiveni $H(u)$ je i tada korektan!

Za $x \neq 0$, u praksi se, zbog numeričke stabilnosti, često koristi

$$\tilde{u} = x + \text{sign}(x_1) \|x\|_2 e_1,$$

zato da nema kraćenja pri računanju prve komponente od \tilde{u} , tj. da oba pribrojnika budu istog znaka,

$$\tilde{u}_1 = x_1 + \text{sign}(x_1) \|x\|_2.$$

To znači da je $c = -\text{sign}(x_1)$, što ponekad zbunjuje u praksi.

🔴 Na primjer, za $x = e_1$ dobivamo $Hx = -e_1$!

Stvarno, uz pažljiviji poredak računanja, to nije potrebno!

Drugi način definicije H

Napomena. Normiranje $\tilde{u} \mapsto u$ se, **formalno**, može **izbjeći**, ako definiramo

$$H(\tilde{u}) = I - 2 \frac{\tilde{u} \tilde{u}^T}{\tilde{u}^T \tilde{u}}.$$

Kako djelovati s H na **ostale** stupce?

Kad smo izračunali u , **ne treba** računati **cijelu** matricu H . Dovoljno je pogledati kako ona djeluje na neki vektor z :

$$Hz = (I - 2uu^T)z = z - 2u(u^T z).$$

Dakle, treba izračunati **skalarni produkt** $u^T z$, a zatim **modificirati** vektor z (to je neki stupac radne matrice).

Ako koristimo $H(\tilde{u})$, onda $\tilde{u}^T z$ **stalno** treba dijeliti s $\|\tilde{u}\|_2^2$.

QR faktorizacija korištenjem reflektora

QR faktorizacija provodi se sustavnom primjenom **Householderovih reflektora** na matricu G i to **slijeva**.

- Prvo se **reflektorom** H_1 **ponište** svi elementi **prvog** stupca (do na prvi), a na ostale stupce se djeluje **reflektorom** H_1 .
- Zatim se **ponište** elementi dijela **drugog** stupca od dijagonale nadolje (osim dijagonalnog elementa). To se radi “**skraćenim**” **reflektorom** H'_2 .

Na **cijelu** radnu matricu onda djelujemo **reflektorom**

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & \\ & H'_2 \end{bmatrix}.$$

U pripadnom vektoru u , prva komponenta je $u_1 = 0$.

QR faktorizacija korištenjem reflektora

I tako redom. U k -tom koraku, za $k = 1, \dots, n$,

- reflektorom H'_k se poništava k -ti “skraćeni” stupac u radnoj matrici — od dijagonale nadolje.
- Na cijelu radnu matricu onda djelujemo reflektorom

$$H_k = \begin{bmatrix} I & \\ & H'_k \end{bmatrix},$$

s tim da je I reda $k - 1$, a H'_k je reda $m - k + 1$.

Ako želimo formirati ortogonalnu matricu Q , onda je

$$H_n H_{n-1} \cdots H_1 G = R, \quad \text{tj.} \quad Q^T = H_n H_{n-1} \cdots H_1,$$

ili

$$Q = (H_n H_{n-1} \cdots H_1)^T = H_1 \cdots H_{n-1} H_n.$$

QR faktorizacija i pivotiranje

Računanje QR faktorizacije

Neka je G zadana matrica tipa $m \times n$, s tim da je $m \geq n$.

Računanje QR faktorizacije matrice G

- provodimo u nizu od n koraka. Ako dozvolimo i $m < n$, broj koraka je $\min\{m, n\}$.

Na početku algoritma označimo $R^{(0)} := G$.

Opišimo kako izgleda k -ti korak algoritma, za $k = 1, \dots, n$.

- Na početku k -tog koraka trenutna radna matrica je $R^{(k-1)}$.
- U njoj prvih $k - 1$ stupaca već ima gornjetrokutastu formu, tj. nule ispod dijagonale.
- Ti stupci se više neće mijenjati!

Računanje QR faktorizacije

Izgled radne matrice $R^{(k-1)}$ na početku k -tog koraka:

$$\left[\begin{array}{cccc|ccc} r_{1,1}^{(1)} & r_{1,2}^{(2)} & \cdots & r_{1,k-1}^{(k-1)} & r_{1,k}^{(k-1)} & \cdots & r_{1,n}^{(k-1)} \\ & r_{2,2}^{(2)} & \cdots & r_{2,k-1}^{(k-1)} & r_{2,k}^{(k-1)} & \cdots & r_{2,n}^{(k-1)} \\ & & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ & & & r_{k-1,k-1}^{(k-1)} & r_{k-1,k}^{(k-1)} & \cdots & r_{k-1,n}^{(k-1)} \\ & & & & r_{k,k}^{(k-1)} & \cdots & r_{k,n}^{(k-1)} \\ & & & & \vdots & & \vdots \\ & & & & r_{m,k}^{(k-1)} & \cdots & r_{m,n}^{(k-1)} \end{array} \right] \cdot$$

Računanje QR faktorizacije

U k -tom koraku — u matrici $R^{(k-1)}$

- poništavamo sve elemente k -tog stupca ispod dijagonale, nekom ortogonalnom transformacijom Q_k .
- Tako dobivamo novu radnu matricu $R^{(k)}$ koja ima jedan “sređeni” stupac više.

Ovu transformaciju možemo prikazati u obliku

$$R^{(k)} = Q_k R^{(k-1)}, \quad k = 1, \dots, n.$$

Na kraju dobivamo gornju trokutastu matricu $R := R^{(n)}$.

Nije bitno kako računamo Q_k — rotacijama ili reflektorima!

Pivotiranje stupaca u QR faktorizaciji

Slično kao kod LR faktorizacije, i kod QR faktorizacije možemo koristiti **pivotiranje**.

- Uobičajeno se koristi pivotiranje **stupaca**

$$GP = QR,$$

gdje je P matrica permutacije.

- Ako su x_ℓ , $\ell = k, \dots, n$, **skraćeni** stupci, na prvo mjesto dovodi se onaj s **najvećom** normom, tj. takav da je $\|x_k\|_2$ **maksimalna**.
- Postupak dovođenja na prvo mjesto **ponavljamo** u svakom koraku QR faktorizacije sa sve kraćim i kraćim stupcima.

Svrha pivotiranja

Svrha?

- Ako je matrica G bila takva da su joj stupci (skoro) **linearno zavisni**, onda se QR faktorizacijom s pivotiranjem određuje **rang** matrice G .

Teorem. Neka je $G \in \mathbb{R}^{m \times n}$ matrica ranga r . Tada postoje $n \times n$ matrica permutacije P , ortogonalna matrica Q reda m , te gornja trokutasta matrica R_0 ranga r , tipa $\min\{m, n\} \times n$, tako da vrijedi

$$GP = QR = Q \begin{bmatrix} R_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

i

$$\|(R_0)_{kk}\|^2 \geq \sum_{i=k}^j \|(R_0)_{ij}\|^2, \quad 1 \leq k \leq \min\{m, n\}, \quad k \leq j \leq n.$$

Rješenje matricne formulacije korištenjem QR faktORIZACIJE

Korištenje QR faktorizacije

Već smo najavili da ćemo za rješenje **diskretnog** problema **najmanjih kvadrata** koristiti **QR** faktorizaciju.

Prisjetimo se, ako je A **punog** stupčanog ranga (tj. vrijedi $\text{rang}(A) = m$), onda **QR** faktorizacija matrice A ima oblik

$$A = QR = [Q_0 \quad Q_0^\perp] \begin{bmatrix} R_0 \\ 0 \end{bmatrix} = Q_0 R_0.$$

Za početak, ako minimiziramo $\|Ax - b\|_2^2$, minimizirali smo i $\|Ax - b\|_2$. Zbog **unitarne invarijantnosti** 2-norme, imamo

$$\min_x \|Ax - b\|_2^2 = \min_x \|Q^T(Ax - b)\|_2^2 = \min_x \|Q^T Ax - Q^T b\|_2^2.$$

Korištenje QR faktorizacije

Za Q uzmimo ortogonalnu matricu iz QR faktorizacije, pa je

$$\begin{aligned}\min_x \|Q^T(Ax - b)\|_2^2 &= \min_x \left\| \begin{bmatrix} R_0 \\ 0 \end{bmatrix} x - Q^T b \right\|_2^2 \\ &= \min_x \left\| \begin{bmatrix} R_0 \\ 0 \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} Q_0^T \\ (Q_0^\perp)^T \end{bmatrix} b \right\|_2^2 \\ &= \min_x \left\| \begin{bmatrix} R_0 x - Q_0^T b \\ 0 - (Q_0^\perp)^T b \end{bmatrix} \right\|_2^2 \\ &= \min_x \left(\|R_0 x - Q_0^T b\|_2^2 + \|(Q_0^\perp)^T b\|_2^2 \right).\end{aligned}$$

Korištenje QR faktorizacije

Primijetimo da **samo prvi član** u prethodnom minimumu ovisi o x , a **drugi** ne.

Budući da je R_0 kvadratna i **punog ranga**, onda je i **regularna**, pa postoji **jedinstveno** rješenje x linearnog sustava

$$R_0x = Q_0^T b.$$

Time smo **prvi** član u kvadratu norme napravili **najmanjim** mogućim, jer je $\|R_0x - Q_0^T b\|_2^2 = 0$.

Zaključak. Onda vrijedi

$$\min_x \|Ax - b\|_2 = \|(Q_0^\perp)^T b\|_2,$$

a **postiže** se za vektor x koji je rješenje sustava $R_0x = Q_0^T b$.

Drugi način

Napomena. Postoji i lakši način da se dođe do prethodnog zaključka, ako znamo da su rješenja **problema minimizacije**

$$\min_x \|Ax - b\|_2$$

jednaka rješenju **sustava normalnih jednažbi**

$$A^T Ax = A^T b.$$

Ako je $A^T A$ **nesingularna**, što je ekvivalentno tome da A ima **puni** stupčani rang, onda problem najmanjih kvadrata ima **jedinstveno** rješenje

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b.$$

Drugi način

Napravimo skraćenu QR faktorizaciju matrice A

$$A = Q_0 R_0.$$

Uvrštavanjem u rješenje x izlazi

$$\begin{aligned}x &= (A^T A)^{-1} A^T b = ((Q_0 R_0)^T Q_0 R_0)^{-1} (Q_0 R_0)^T b \\&= (R_0^T Q_0^T Q_0 R_0)^{-1} R_0^T Q_0^T b = (R_0^T R_0)^{-1} R_0^T Q_0^T b \\&= R_0^{-1} (R_0^T)^{-1} R_0^T Q_0^T b = R_0^{-1} Q_0^T b,\end{aligned}$$

pa je x , očito, rješenje sustava

$$R_0 x = Q_0^T b.$$

Primjer

Primjer. Diskretnom linearnom metodom najmanjih kvadrata nađite funkciju oblika

$$\varphi(x) = \frac{x + a}{bx + c}$$

koja aproksimira slijedeći skup podataka (točaka):

x_i	0	1	2	3	4
f_i	2.02	0.97	0.82	0.70	0.67

Nađite

- aproximacije i pogreške u čvorovima x_i i
- sumu kvadrata apsolutnih grešaka S .

Primjer — linearizacija

Rješenje nađite

- korištenjem sustava **normalnih jednadžbi** i faktORIZACIJE Choleskog,
- korištenjem **QR** faktORIZACIJE,
- korištenjem **QR** faktORIZACIJE s **pivotiranjem** stupaca.

Rješenje. Traženi oblik funkcije je **nelinearan**, pa ga treba **linearizirati**. To možemo napraviti na više načina.

1. Pomnožimo oblik funkcije φ s $bx + c$ i dobivamo

$$(bx + c)\varphi(x) = x + a,$$

odnosno

$$-a + bx\varphi(x) + c\varphi(x) = x.$$

Primjer — linearizacija

2. Ovu funkciju $-a + bx\varphi(x) + c\varphi(x) = x$ možemo podijeliti s $\varphi(x)$, pa dobivamo drugu linearizaciju

$$-a \cdot \frac{1}{\varphi(x)} + bx + c = \frac{x}{\varphi(x)}.$$

Primijetite da ove dvije linearizacije

ne moraju (i neće) dati isto rješenje!

Obje pripadaju “grupi” linearizacija oblika

$$D + Eu + Fv = w,$$

pri čemu je $w = w(u, v)$.

Primjer — sustav normalnih jednadžbi

Prvo riješimo problem korištenjem sustava **normalnih jednadžbi** i faktorizacije **Choleskog**.

Za **1. slučaj** metoda najmanjih kvadrata ima oblik

$$S = \sum_{i=0}^n (w_i - (-a + bu_i + cv_i))^2 \rightarrow \min,$$

pri čemu su supstitucije za **varijable**

$$u = x\varphi(x), \quad v = \varphi(x), \quad w = x,$$

a za **vrijednosti** varijabli u čvorovima

$$u_i = x_i f_i, \quad v_i = f_i, \quad w_i = x_i.$$

Primjer — sustav normalnih jednadžbi

Deriviranjem po sve tri varijable izlazi

$$\frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=0}^n (w_i - (-a + bu_i + cv_i))(-1) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=0}^n (w_i - (-a + bu_i + cv_i))u_i = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial c} = -2 \sum_{i=0}^n (w_i - (-a + bu_i + cv_i))v_i = 0.$$

Primjer — sustav normalnih jednadžbi

Oдавде dobivamo simetrični, pozitivno definitni linearni sustav

$$\begin{bmatrix} (n+1) & -\sum_{i=0}^n u_i & -\sum_{i=0}^n v_i \\ -\sum_{i=0}^n u_i & \sum_{i=0}^n u_i^2 & \sum_{i=0}^n u_i v_i \\ -\sum_{i=0}^n v_i & \sum_{i=0}^n u_i v_i & \sum_{i=0}^n v_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{i=0}^n w_i \\ \sum_{i=0}^n u_i w_i \\ \sum_{i=0}^n v_i w_i \end{bmatrix} .$$

Primjer — sustav normalnih jednadžbi

Kad uvrstimo zadane podatke, za **1. slučaj** dobivamo linearni sustav $Mx = d$, gdje je

$$M = \begin{bmatrix} 5 & -7.39 & -5.18 \\ -7.39 & 15.2229 & 5.5513 \\ -5.18 & 5.5513 & 6.6326 \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} -10 \\ 21.27 \\ 7.39 \end{bmatrix}.$$

Faktorizacija **Choleskog** matrice M je $M = R^T R$, uz

$$R \approx \begin{bmatrix} 2.2360679775 & -3.3049084707 & -2.3165664247 \\ & 2.0737598704 & -1.0149391114 \\ & & 0.4858174557 \end{bmatrix}.$$

Primjer — sustav normalnih jednadžbi

Sad moramo još riješiti dva trokutasta sustava:

$$R^T y = d, \quad Rx = y.$$

Rješenja **prvog**, pa **drugog** sustava su

$$y \approx \begin{bmatrix} -4.4721359550 \\ 3.1295812465 \\ 0.4247159232 \end{bmatrix}, \quad x \approx \begin{bmatrix} 1.7685862981 \\ 1.9369990502 \\ 0.8742294419 \end{bmatrix}.$$

Prema tome, rješenje za parametre u **1. slučaju** je

$$a = 1.7685862981,$$

$$b = 1.9369990502,$$

$$c = 0.8742294419.$$

Primjer — sustav normalnih jednadžbi

Vrijednosti u čvorovima dobivamo tako da uvrstimo x_i u $\varphi(x)$

$$\varphi(x_i) = \frac{x_i + 1.7685862981}{1.9369990502x_i + 0.8742294419},$$

pripadne greške su $f_i - \varphi(x_i)$, a zbroj kvadrata grešaka je

$$S = \sum_{i=0}^4 (f_i - \varphi(x_i))^2.$$

Izračunajte sami!

Primjer — sustav normalnih jednadžbi

Za 2. slučaj treba uvesti supstitucije za varijable

$$u = -\frac{1}{\varphi(x)}, \quad v = x, \quad w = \frac{x}{\varphi(x)},$$

i vrijednosti varijabli u čvorovima

$$u_i = -\frac{1}{\varphi(f_i)}, \quad v_i = x_i, \quad w_i = \frac{x_i}{f_i}.$$

Metoda najmanjih kvadrata imat će oblik

$$S = \sum_{i=0}^n (w_i - (au_i + bv_i - c))^2 \rightarrow \min.$$

Primjer — sustav normalnih jednadžbi

Pripadni linearni sustav glasi $Mx = d$, gdje je

$$M \approx \begin{bmatrix} 7.0636 & -13.7258 & -5.6666 \\ -13.7258 & 30 & 10 \\ -5.6666 & 10 & 5 \end{bmatrix}, \quad d \approx \begin{bmatrix} -19.0704 \\ 42.6467 \\ 13.7258 \end{bmatrix}.$$

Rješenje za parametre u **2. slučaju** je

$$a = 1.7522057170,$$

$$b = 1.9387446017,$$

$$c = 0.8534831289.$$

Ova rješenja se **ponešto razlikuju** od prethodnih!

Primjer — QR faktorizacija

Riješimo sad **1. slučaj** korištenjem QR faktorizacije.
Uvrštavanjem točaka (x_i, f_i) u

$$-a + bx\varphi(x) + c\varphi(x) = x,$$

dobivamo

$$-a + bx_i f_i + c f_i = x_i, \quad i = 0, \dots, 4,$$

pa su A i b iz **problema minimizacije** jednaki

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0.00 & 2.02 \\ -1 & 0.97 & 0.97 \\ -1 & 1.64 & 0.82 \\ -1 & 2.10 & 0.70 \\ -1 & 2.68 & 0.67 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}.$$

Primjer — QR faktorizacija

Skraćena forma QR faktorizacije od A je $A = Q_0 R_0$, gdje je

$$Q_0 \approx \begin{bmatrix} -0.4472135955 & -0.7127151128 & 0.5364927787 \\ -0.4472135955 & -0.2449656815 & -0.6476203098 \\ -0.4472135955 & 0.0781189772 & -0.2814102151 \\ -0.4472135955 & 0.2999382951 & -0.0650056784 \\ -0.4472135955 & 0.5796235221 & 0.4575434246 \end{bmatrix},$$
$$R_0 \approx \begin{bmatrix} 2.2360679775 & -3.3049084707 & -2.3165664247 \\ & 2.0737598704 & -1.0149391114 \\ & & 0.4858174557 \end{bmatrix}.$$

Uočite: $R_0 = R$ iz faktorizacije Choleskog za $M = A^T A$.

Primjer — QR faktorizacija

Desna strana linearnog sustava je $Q_0^T b$, gdje je

$$Q_0^T b \approx \begin{bmatrix} -4.4721359550 \\ 3.1295812465 \\ 0.4247159232 \end{bmatrix} .$$

Rješenje trokutastog sustava $R_0 x = Q_0^T b$ je

$$x \approx \begin{bmatrix} 1.7685862981 \\ 1.9369990502 \\ 0.8742294419 \end{bmatrix}$$

Napravite isto sami za drugu linearizaciju.

Primjer — QR faktorizacija s pivotiranjem

Ako napravimo QR faktorizaciju s pivotiranjem stupaca, dobit ćemo $AP = Q_0 R_0$, gdje je poredak stupaca $p = [2, 3, 1]$,

$$Q_0 \approx \begin{bmatrix} 0.0000000000 & 0.9409894604 & 0.3321538334 \\ 0.2486125437 & 0.2870820614 & -0.7315708741 \\ 0.4203346099 & 0.1033900358 & -0.3129274676 \\ 0.5382333419 & -0.0306530483 & -0.0596152612 \\ 0.6868882649 & -0.1431559168 & 0.5029913595 \end{bmatrix},$$
$$R_0 \approx \begin{bmatrix} 3.9016534956 & 1.4228070243 & -1.8940687604 \\ & 2.1466765410 & -1.1576525926 \\ & & 0.2689684102 \end{bmatrix}.$$

Primjer — QR faktorizacija s pivotiranjem

Desna strana linearnog sustava je $Q_0^T b$, gdje je

$$Q_0^T b \approx \begin{bmatrix} 5.4515348490 \\ -0.1707206788 \\ 0.4756938448 \end{bmatrix} .$$

Dobiveno rješenje trokutastog sustava $R_0 x' = Q_0^T b$ je

$$x' \approx \begin{bmatrix} 1.9369990502 \\ 0.8742294419 \\ 1.7685862981 \end{bmatrix} .$$

Primjer — QR faktorizacija s pivotiranjem

Sad još treba vratiti x u “pravi poredak”. Budući da je finalni pivotni vektor bio $p = [2, 3, 1]$, to odgovara matrici permutacije

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Pravo rješenje x dobit ćemo kao

$$x = P^T x' = \begin{bmatrix} 1.7685862981 \\ 1.9369990502 \\ 0.8742294419 \end{bmatrix}.$$

Veza QR faktorizacije i faktorizacije Choleskog

Neka je G pravokutna matrica tipa (m, n) , koja ima **puni stupčani rang**, tj. $\text{rang}(G) = n \leq m$.

Matrica G ima jedinstvenu skraćenu **QR** faktorizaciju, pa je puni **QR** oblika

$$G = Q \begin{bmatrix} R_0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

gdje je R_0 jedinstvena **gornja trokutasta** matrica reda n , s **pozitivnim** dijagonalnim elementima, a Q je unitarna matrica.

S druge strane, neka je $H := G^*G$ **Gramova matrica** skalarnih produkata stupaca matrice G .

Znamo da je onda H **pozitivno definitna** matrica. Zato H ima jedinstvenu faktorizaciju **Choleskog** ...

Veza QR faktorizacije i faktorizacije Choleskog

$$H = R^* R,$$

gdje je R gornja trokutasta s pozitivnom dijagonalom.

Tvrdnja. Ovi trokutasti faktori su jednaki, tj. vrijedi $R = R_0$.

Dokaz. U $H = G^* G$ uvrstimo QR faktorizaciju od G i “skratimo” $Q^* Q = I$. Jedinственost faktora R daje tvrdnju. ■

Ista veza (jednakost) vrijedi i za faktorizacije s pivotiranjem:

- pivotiranje stupaca po normi u QR faktorizaciji, i
- dijagonalno pivotiranje u faktorizaciji Choleskog.

Korist: ako znamo “faktor” G matrice H , i tražimo R ,

- ne treba računati H , pa Choleskog, već samo QR od G .

Neprekidni problem najmanjih kvadrata

Još jednom o najmanjim kvadratima

U uvodu o aproksimaciji rečeno je da se parametri funkcije $\varphi \in \mathcal{F}$ po **metodi najmanjih kvadrata**, traže tako da bude

$$\min_{\varphi \in \mathcal{F}} \|e(x)\|_2,$$

pri čemu je $e(x) = f(x) - \varphi(x)$.

Da bismo mogli naći **minimalnu grešku** u **neprekidnom** slučaju, moramo definirati

- **skalarni produkt** za **neprekidne** funkcije na odgovarajućem intervalu.
- Definicija **norme nije dovoljna**, jer je rješenje već u **diskretnom** slučaju bila **projekcija** na potprostor, a za to nam je potreban skalarni produkt.

Definicija norme i skalarnog produkta

Neka je $w(x)$ zadana funkcija. $w(x)$ je **težinska funkcija** ako je

- $w(x) \geq 0$ na intervalu $[a, b]$,
- $w(x)$ može biti jednaka 0 samo u **izoliranim** točkama.

Težinska L_2 -norma (ili samo **2-norma**) funkcije u na $[a, b]$ je

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

Ako je ta norma **konačna** i za funkciju u i za funkciju v , onda možemo definirati **težinski skalarni produkt**

$$\langle u, v \rangle = \int_a^b w(x) u(x) \overline{v(x)} dx.$$

Definicija skalarnog produkta

Skalarni produkt $\langle u, v \rangle$ je dobro definiran (konačan), jer vrijedi Cauchy–Schwarzova nejednakost

$$|\langle u, v \rangle| \leq \|u\|_2 \cdot \|v\|_2.$$

$\langle u, v \rangle$ je skalarni produkt, jer

1. $\langle u, u \rangle \geq 0$, a jednak je 0 za one funkcije u koje su nula u svim točkama gdje je $w(x) > 0$ (v. Mjera i integral),
2. vrijedi linearnost u prvom argumentu

$$\langle \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2, v \rangle = \alpha_1 \langle u_1, v \rangle + \alpha_2 \langle u_2, v \rangle,$$

3. i antilinearnost/linearnost (\mathbb{C}/\mathbb{R}) u drugom argumentu,

$$\langle u, \beta_1 v_1 + \beta_2 v_2 \rangle = \bar{\beta}_1 \langle u, v_1 \rangle + \bar{\beta}_2 \langle u, v_2 \rangle.$$

Ortogonalne funkcije

Napomena. Ako se radi o **realnim** funkcijama, onda kompleksno konjugiranje drugog argumenta izbacujemo.

U nastavku radimo samo s poljem \mathbb{R} , tj. s **realnim** funkcijama.

Za funkcije u i v reći ćemo da su **ortogonalne** ako vrijedi

$$\langle u, v \rangle = 0.$$

Ako su u i v **ortogonalne**, onda vrijedi

$$\begin{aligned}\|u + v\|^2 &= \langle u, u \rangle + \langle u, v \rangle + \langle v, u \rangle + \langle v, v \rangle \\ &= \|u\|^2 + 2\langle u, v \rangle + \|v\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2.\end{aligned}$$

Pitagorin poučak!

Sustavi ortogonalnih funkcija

Ako imamo **sustav ortogonalnih funkcija** u_k , $k = 0, \dots, m$, za koje vrijedi

$$\langle u_i, u_j \rangle = 0, \quad \text{za } i \neq j, \quad i, j = 0, \dots, m,$$

i $u_k \not\equiv 0$ tamo gdje je $w(x) > 0$, onda vrijedi

$$\left\| \sum_{k=0}^m \alpha_k u_k \right\|_2^2 = \sum_{k=0}^m |\alpha_k|^2 \|u_k\|_2^2.$$

Prethodna jednakost znači da je **ortogonalni sustav** funkcija **linearno nezavisan** tamo gdje je $w(x) > 0$.

Ako je lijeva strana jednaka **nula**, mora biti i desna, a po pretpostavci je $\|u_k\|_2 > 0$, pa je jedino moguće da je $\alpha_k = 0$ za $k = 0, \dots, m$.

Norma kvadrata greške

Ako je φ linearna funkcija, tj. $\varphi(x) = a_0\varphi_0(x) + \dots + a_m\varphi_m(x)$, onda za normu kvadrata greške dobivamo

$$S := \|e\|_2^2 = \|f - \varphi\|_2^2 = \langle f, f \rangle - 2\langle f, \varphi \rangle + \langle \varphi, \varphi \rangle.$$

Ako uvrstimo oblik funkcije φ i definiciju skalarnog produkta, dobivamo

$$S = \int_a^b w(x) f^2(x) dx - 2 \int_a^b w(x) f(x) \left(\sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(x) \right) dx + \int_a^b w(x) \left(\sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(x) \right)^2 dx.$$

Sustav normalnih jednažbi

Kvadrat norme greške S je funkcija koeficijenata a_j .

- Radi o kvadratnoj funkciji u $m + 1$ varijabli, pa je uvjet **minimuma** da su sve parcijalne derivacije jednake 0.

Dakle,

$$0 = \frac{\partial S}{\partial a_i} = 2 \int_a^b w(x) \left(\sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(x) \right) \varphi_i(x) dx - 2 \int_a^b w(x) f(x) \varphi_i(x) dx,$$

pa mora biti ...

Sustav normalnih jednažbi

... pa mora biti

$$\sum_{j=0}^m a_j \int_a^b w(x) \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx = \int_a^b w(x) f(x) \varphi_i(x) dx,$$

za $i = 0, \dots, m$. Uočimo da su odgovarajući integrali **skalarni produkti**, pa imamo

$$\sum_{j=0}^m \langle \varphi_i, \varphi_j \rangle a_j = \langle \varphi_i, f \rangle.$$

Ako označimo

$$m_{ij} = \langle \varphi_i, \varphi_j \rangle, \quad t_i = \langle \varphi_i, f \rangle, \quad i, j = 0, \dots, m,$$

Sustav normalnih jednažbi

pri čemu je

$$a^T = [a_0, a_1, \dots, a_m],$$

onda problem najmanjih kvadrata možemo pisati kao **sustav normalnih jednažbi**

$$Ma = t.$$

Matrica M , reda $m + 1$, je

- očito **simetrična**,
- ali i **pozitivno (semi)definitna**.

Dodatno, ako su funkcije $\varphi_0, \dots, \varphi_m$ linearno **nezavisne** na $[a, b]$, onda je M **pozitivno definitna** matrica.

Pozitivna (semi)definitnost matrice M

Pozitivna (semi)definitnost izlazi iz definicije elemenata m_{ij} .
Za svaki vektor x imamo

$$\begin{aligned}x^T M x &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m x_i x_j \langle \varphi_i, \varphi_j \rangle = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \langle x_i \varphi_i, x_j \varphi_j \rangle \\ &= \left\langle \sum_{i=0}^m x_i \varphi_i, \sum_{j=0}^m x_j \varphi_j \right\rangle = \left\| \sum_{i=0}^m x_i \varphi_i \right\|_2^2,\end{aligned}$$

što je očito **nenegativno**. Nula je **jednako** ako i samo ako je

$$\sum_{i=0}^m x_i \varphi_i \equiv 0, \quad \text{čim je } w(x) > 0.$$

Ako su $\varphi_0, \dots, \varphi_m$ linearno **nezavisne**, odavde slijedi i $x = 0$.

Rješenje problema najmanjih kvadrata

Neka su funkcije $\varphi_0, \dots, \varphi_m$ linearno **nezavisne** na $[a, b]$.

Zaključak. Simetrične pozitivno definitne matrice su **nesingularne**, pa

• postoji **jedinstveno** rješenje problema $Ma = t$.

Nadalje, izračunati vektor a je **jedinstveni minimum** za problem najmanjih kvadrata, jer je

• **Hesseova matrica** drugih parcijalnih derivacija H , također, pozitivno definitna, što slijedi iz

$$h_{ij} = \frac{\partial^2 S}{\partial a_i \partial a_j} = 2 \int_a^b w(x) \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx = 2m_{ij},$$

tj. $H = 2M!$

Jednostavni primjer

Primjer. Neprekidnom metodom najmanjih kvadrata nađite **polinom** stupnja 1 koji aproksimira funkciju

$$f(x) = e^x$$

na intervalu $[-1, 1]$ uz **težinsku funkciju** $w(x) = 1$.

Rješenje. Treba minimizirati

$$S = \int_{-1}^1 (e^x - a_1x - a_0)^2 dx \rightarrow \min.$$

Jednostavni primjer

Deriviranjem dobivamo

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = -2 \int_{-1}^1 (e^x - a_1 x - a_0) x dx$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = -2 \int_{-1}^1 (e^x - a_1 x - a_0) dx,$$

pa uz oznake

$$s_k := \int_{-1}^1 x^k dx, \quad t_k := \int_{-1}^1 e^x x^k dx,$$

treba riješiti sljedeći linearni sustav ...

Jednostavni primjer

... treba riješiti sljedeći linearni sustav

$$s_2 a_1 + s_1 a_0 = t_1$$

$$s_1 a_1 + s_0 a_0 = t_0,$$

Izračunajmo integrale s lijeve strane

$$s_k = \int_{-1}^1 x^k dx = \frac{1}{k+1} x^{k+1} \Big|_{-1}^1 = \frac{1 - (-1)^{k+1}}{k+1}$$

$$= \begin{cases} \frac{2}{k+1}, & \text{za } k \text{ paran,} \\ 0, & \text{za } k \text{ neparan.} \end{cases}$$

Jednostavni primjer

Za integrale desne strane dobivamo

$$t_0 := \int_{-1}^1 e^x dx = e^x \Big|_{-1}^1 = e - e^{-1}$$

$$t_1 := \int_{-1}^1 x e^x dx = \left\{ \begin{array}{ll} u = x & du = dx \\ dv = e^x dx & v = e^x \end{array} \right\} = x e^x \Big|_{-1}^1 - \int_{-1}^1 e^x dx$$

$$= e + e^{-1} - (e - e^{-1}) = 2e^{-1}.$$

Jednostavni primjer

Linearni sustav tada glasi:

$$\frac{2}{3} \cdot a_1 + 0 \cdot a_0 = 2e^{-1}$$

$$0 \cdot a_1 + 2 \cdot a_0 = e - e^{-1},$$

a njegovo rješenje je

$$a_1 = \frac{t_1}{s_2} = 3e^{-1} \approx 1.103638324,$$

$$a_0 = \frac{t_0}{s_0} = \frac{e - e^{-1}}{2} = \text{sh}(1) \approx 1.175201194.$$

Pravac dobiven neprekidnom metodom najmanjih kvadrata je

$$p_1(x) \approx 1.103638324x + 1.175201194.$$

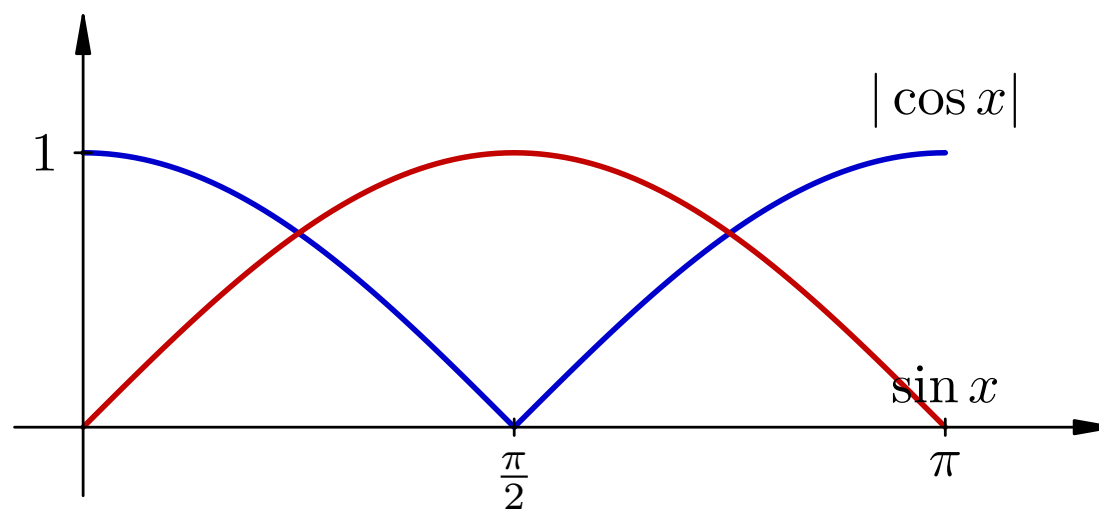
Složeniji primjer

Primjer. Neprekidnom metodom najmanjih kvadrata nađite **polinome** stupnjeva 1, 2 i 3 koji aproksimiraju funkciju

$$f(x) = \sin x$$

na intervalu $[0, \pi]$ uz **težinsku funkciju** $w(x) = |\cos x|$.

Rješenje. Skicirajmo prvo funkcije f i w .



Složeniji primjer

Budući da su obje funkcije **simetrične** oko točke $\frac{\pi}{2}$, polinome se isplati pisati u **bazi** $(x - \frac{\pi}{2})^k$.

Ključna je “**parnost**” težinske funkcije w oko $\frac{\pi}{2}$, jer u matrici sustava dobivamo hrpu **nula** (oko polovine elemenata).

Neka je p_n polinom stupnja n , zapisan u toj “**par–nepar**” bazi

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n a_{nk} \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^k.$$

Treba minimizirati

$$S = \int_0^{\pi} |\cos x| (\sin x - p_n(x))^2 dx \rightarrow \min.$$

Složeniji primjer

Iz uvjeta

$$\frac{\partial S}{\partial a_{nk}} = 0, \quad k = 0, \dots, n,$$

dobivamo linearni sustav

$$\sum_{j=0}^n a_{nj} \int_0^{\pi} |\cos x| \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^{k+j} dx = \int_0^{\pi} |\cos x| \sin x \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^k dx,$$

za $k = 0, \dots, n$.

Složeniji primjer

Nađimo sad potrebne integrale:

$$\int_0^{\pi} \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^k |\cos x| dx = \left\{ \begin{array}{ll} y = x - \frac{\pi}{2} & x = 0 \Rightarrow y = -\frac{\pi}{2} \\ dy = dx & x = \pi \Rightarrow y = \frac{\pi}{2} \end{array} \right\}$$

$$= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} y^k |\sin y| dy = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & \text{za } k \text{ neparan,} \\ 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^k \sin y dy, & \text{za } k \text{ paran.} \end{array} \right\}$$

Napomena. Neparni koeficijenti su **nula** jer je **baza** pogodno odabrana, tako da koristi činjenicu da je $w(x)$ **parna** funkcija obzirom na $\frac{\pi}{2}$. Baza sadrži samo “**parne**” i “**neparne**” funkcije.

Složeniji primjer

Nađimo rekurziju za integral

$$\begin{aligned} s_k &:= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^k \sin y \, dy = \left\{ \begin{array}{ll} u = y^k & du = ky^{k-1} \, dy \\ dv = \sin y \, dy & v = -\cos y \end{array} \right\} \\ &= 2 \left(-y^k \cos y \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} + k \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^{k-1} \cos y \, dy \right) \\ &= \left\{ \begin{array}{ll} u = y^{k-1} & du = (k-1)y^{k-2} \, dy \\ dv = \cos y \, dy & v = \sin y \end{array} \right\} \\ &= 2ky^{k-1} \sin y \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - k(k-1) \left(2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^{k-2} \sin y \, dy \right) \\ &= 2k \left(\frac{\pi}{2} \right)^{k-1} - k(k-1) s_{k-2}. \end{aligned}$$

Složeniji primjer

Još treba izračunati

$$s_0 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |\sin y| dy = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin y dy = -2 \cos y \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = 2.$$

Sada je

$$s_2 = 4 \frac{\pi}{2} - 4s_0 = 2\pi - 4,$$

$$s_4 = 8 \left(\frac{\pi}{2}\right)^3 - 12s_2 = \pi^3 - 24\pi + 48,$$

$$s_6 = 12 \left(\frac{\pi}{2}\right)^5 - 30s_4 = \frac{3}{8}\pi^5 - 24\pi^3 + 720\pi - 1440.$$

Složeniji primjer

Ostaje još izračunati integrale s desne strane:

$$t_k := 2 \int_0^{\pi} \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^k |\cos x| \sin x \, dx$$

$$= \left\{ \begin{array}{ll} y = x - \frac{\pi}{2} & x = 0 \Rightarrow y = -\frac{\pi}{2} \\ dy = dx & x = \pi \Rightarrow y = \frac{\pi}{2} \end{array} \right\} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} y^k |\sin y| \cos y \, dy$$

$$= \left\{ \begin{array}{ll} 0, & \text{za } k \text{ neparan,} \\ 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^k \sin y \cos y \, dy = \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^k \sin(2y) \, dy, & \text{za } k \text{ paran.} \end{array} \right\}$$

Složeniji primjer

Za parne indekse k s desne strane imamo

$$\begin{aligned} t_k &:= \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^k \sin(2y) dy = \left\{ \begin{array}{ll} u = y^k & du = ky^{k-1} dy \\ dv = \sin(2y) dy & v = -\cos(2y)/2 \end{array} \right\} \\ &= -\frac{1}{2} y^k \cos(2y) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} + \frac{k}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^{k-1} \cos(2y) dy \\ &= \left\{ \begin{array}{ll} u = y^{k-1} & du = (k-1)y^{k-2} dy \\ dv = \cos(2y) dy & v = \sin(2y)/2 \end{array} \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2}\right)^k + \frac{k}{2} \cdot \frac{1}{2} y^{k-1} \sin(2y) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \frac{k-1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} y^{k-2} \sin(2y) dy \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2}\right)^k - \frac{k(k-1)}{4} t_{k-2}. \end{aligned}$$

Složeniji primjer

Još treba izračunati

$$t_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(2y) dy = -\frac{1}{2} \cos(2y) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = 1.$$

Sada je

$$t_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \frac{1}{2} t_0 = \frac{\pi^2}{8} - \frac{1}{2} = \frac{\pi^2 - 4}{8}.$$

Linearni sustav sada ima oblik

$$\sum_{j=0}^n a_{nj} s_{k+j} = t_k, \quad k = 0, \dots, n.$$

Složeniji primjer

Za $n = 1$ sustav je:

$$s_0 a_{10} + s_1 a_{11} = t_0$$

$$s_1 a_{10} + s_2 a_{11} = t_1.$$

Kad uvrstimo izračunate s_k i t_k , imamo

$$2 \cdot a_{10} + 0 \cdot a_{11} = 1$$

$$0 \cdot a_{10} + (2\pi - 4) \cdot a_{11} = 0.$$

Rješenje tog sustava je $a_{10} = \frac{1}{2}$, $a_{11} = 0$, pa je aproksimacijski polinom

$$p_1(x) = \frac{1}{2}.$$

Složeniji primjer

Za $n = 2$ sustav je:

$$s_0 a_{20} + s_1 a_{21} + s_2 a_{22} = t_0$$

$$s_1 a_{20} + s_2 a_{21} + s_3 a_{22} = t_1$$

$$s_2 a_{20} + s_3 a_{21} + s_4 a_{22} = t_2.$$

Ako uvrstimo izračunate veličine, sustav glasi:

$$2 \cdot a_{20} + 0 \cdot a_{21} + (2\pi - 4) \cdot a_{22} = 1$$

$$0 \cdot a_{20} + (2\pi - 4) \cdot a_{21} + 0 \cdot a_{22} = 0$$

$$(2\pi - 4) \cdot a_{20} + 0 \cdot a_{21} + (\pi^3 - 24\pi + 48) \cdot a_{22} = \frac{\pi^2 - 4}{8}.$$

Složeniji primjer

Rješenje tog sustava je

$$a_{20} \approx 0.964909552, \quad a_{21} = 0, \quad a_{22} \approx -0.407246447,$$

pa je aproksimacijski polinom

$$p_2(x) \approx -0.407246447 \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^2 + 0.964909552.$$

Za $n = 3$ dobije se rješenje $p_3 = p_2$ (provjerite sami).

Uočiti bitna olakšanja uz izbor “**par-nepar**” baze $(x - \frac{\pi}{2})^k$:

- 🔴 Zbog **parne simetrije** težine i zadane funkcije oko točke $\frac{\pi}{2}$,
- 🔴 u svim polinomima ostaju samo “**parni**” članovi, tj. koeficijenti uz **neparni** dio baze su jednaki **nula!**

Još jedan primjer

Primjer. Ako funkciju $f(x)$ na $[0, 1]$ uz $w(x) = 1$ aproksimiramo **polinomom** stupnja n po neprekidnoj metodi najmanjih kvadrata, **matrica** linearnog sustava je

$$M = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 & \cdots & s_n \\ s_1 & s_2 & \cdots & s_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ s_n & s_{n+1} & \cdots & s_{2n} \end{bmatrix},$$

pri čemu su

$$s_k := \int_0^1 x^k dx = \frac{x^{k+1}}{k+1} \Big|_0^1 = \frac{1}{k+1}.$$

Matrica linearnog sustava je **Hilbertova matrica** reda $n + 1!$

Komentari primjera

U posljednja dva primjera uočili smo sljedeće:

- Ako za bazu biramo funkcije $1, x, x^2, \dots$, matrica sustava može biti **vrlo loše uvjetovana**.
- U složenijem primjeru, podizanjem stupnja polinoma **mijenjaju** se koeficijenti polinoma p_n . Na primjer, a_0 **ovisi** o stupnju n .

Prethodna dva problema otklanjaju se ako se za bazu funkcija uzmu **ortogonalne funkcije**.

Ortogonalne funkcije

Ortogonalne funkcije i najmanji kvadrati

Linearni sustav za neprekidni problem najmanjih kvadrata zapisali smo kao

$$\sum_{j=0}^m \langle \varphi_i, \varphi_j \rangle a_j = \langle \varphi_i, f \rangle, \quad i = 0, \dots, m.$$

Ako φ_i , $i = 0, \dots, m$, tvore **ortogonalni sustav funkcija**, onda je

$$\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle = 0 \quad \text{za } i \neq j, \quad \langle \varphi_j, \varphi_j \rangle = \|\varphi_j\|^2 > 0.$$

Uvrštavanjem u **linearni sustav**, dobivamo da je sustav **dijagonalan**, a njegovo rješenje je

$$a_j = \frac{\langle \varphi_j, f \rangle}{\langle \varphi_j, \varphi_j \rangle}, \quad j = 0, \dots, m.$$

Problemi

Oblikom koeficijenata a_j nismo izbjegli sve probleme.

- Tipično norme $\|\varphi_j\|_2^2$ padaju kad j raste, dok su brojnici reda veličine f .
- Za koeficijente a_j se očekuje da rapidno padaju.
- Zbog toga se očekuju greške nastale kraćenjem pri računanju skalarnog produkta u brojniku.

Alternativna forma za računanje a_j je

$$a_j = \frac{1}{\|\varphi_j\|_2^2} \left\langle f - \sum_{k=0}^{j-1} a_k \varphi_k, \varphi_j \right\rangle, \quad j = 0, \dots, m.$$

Uočite da je skalarni produkt “sume” s φ_j jednak nuli zbog ortogonalnosti.

Algoritam računanja koeficijenata

Sljedeći algoritam računa ne samo a_j , nego i aproksimaciju

$$\varphi^{(m)}(x) = \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(x).$$

Računanje koeficijenata

```
s[-1] = 0;  
za j = 0 do m radi {  
    a[j] = ⟨f - s[j - 1], phi[j]⟩ / ||phi[j]||22;  
    s[j] = s[j - 1] + a[j] * phi[j];  
};
```

Vrijednost $\varphi^{(m)}(x)$ izračunata je u $s[m]$.

Projekcija je opet rješenje

Tvrdimo da je greška aproksimacije $f - \varphi^{(m)}$ okomita na sve linearne kombinacije funkcija φ_k , za $k = 0, \dots, m$.

Dovoljno je pokazati da je greška okomita na svaki φ_k

$$\begin{aligned}\langle f - \varphi^{(m)}, \varphi_k \rangle &= \left\langle f - \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j, \varphi_k \right\rangle = \langle f - a_k \varphi_k, \varphi_k \rangle \\ &= \langle f, \varphi_k \rangle - a_k \langle \varphi_k, \varphi_k \rangle \\ &= \langle f, \varphi_k \rangle - \frac{\langle \varphi_k, f \rangle}{\langle \varphi_k, \varphi_k \rangle} \langle \varphi_k, \varphi_k \rangle = 0.\end{aligned}$$

Dobiveni rezultat ima jednostavno geometrijsko značenje — aproksimacija je **ortogonalna projekcija** na prostor Φ_m razapet funkcijama φ_k , za $k = 0, \dots, m$.

Projekcija je opet rješenje

Iz ortogonalnosti

$$\langle f - \varphi^{(m)}, \psi \rangle = 0,$$

gdje je $\psi \in \Phi_m$ bilo koja linearna kombinacija φ_k ,
zaključujemo da je i

$$\langle f - \varphi^{(m)}, \varphi^{(m)} \rangle = 0.$$

Tada, zbog okomitosti, možemo pisati

$$\begin{aligned} \|f\|_2^2 &= \|f - \varphi^{(m)}\|_2^2 + \|\varphi^{(m)}\|_2^2 = \|f - \varphi^{(m)}\|_2^2 + \left\| \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j \right\|_2^2 \\ &= \|f - \varphi^{(m)}\|_2^2 + \sum_{j=0}^m |a_j|^2 \|\varphi_j\|_2^2. \end{aligned}$$

Greška rješenja

Iz prethodne relacije slijedi da se **greška aproksimacije** može zapisati kao

$$\|f - \varphi^{(m)}\|_2 = \left(\|f\|_2^2 - \sum_{j=0}^m |a_j|^2 \|\varphi_j\|_2^2 \right)^{1/2}.$$

Ako je zadan **niz** prostora Φ_m , $m = 0, 1, 2, \dots$, onda je iz prethodne relacije jasno da je

$$\|f - \varphi^{(0)}\|_2 \geq \|f - \varphi^{(1)}\|_2 \geq \|f - \varphi^{(2)}\|_2 \geq \dots,$$

što jasno slijedi i iz činjenice da je

$$\Phi_0 \subset \Phi_1 \subset \Phi_2 \subset \dots.$$

Greška rješenja

Ako je prostora Φ_k beskonačno mnogo, očito je da je norma greške aproksimacije

- monotono padajuća i
- odozdo ograničena s 0,

pa mora konvergirati.

Mora li norma greške konvergirati u 0?

Odgovor je ne! Naravno, nužni i dovoljni uvjet da bi greška konvergirala u nulu je

$$\|f\|_2^2 = \sum_{j=0}^{\infty} |a_j|^2 \|\varphi_j\|_2^2,$$

što se odmah čita iz oblika greške.

Ortogonalizacija

Ako je zadan skup funkcija $\hat{\varphi}_j$ koje su **linearno nezavisne**, ali **nisu ortogonalne** na nekom intervalu,

- $\hat{\varphi}_j$ ortogonaliziramo korištenjem (modificiranog) Gram–Schmidtovog procesa ortogonalizacije.
- Funkcije φ_j koje razapinju isti prostor kao $\hat{\varphi}_j$ ne treba **normirati**.

Ortogonalizacija započinje s:

$$\varphi_0 := \hat{\varphi}_0.$$

Zatim, za $j = 1, 2, \dots$ stavimo

$$\varphi_j := \hat{\varphi}_j - \sum_{k=0}^{j-1} a_k \varphi_k, \quad a_k = \frac{\langle \hat{\varphi}_j, \varphi_k \rangle}{\|\varphi_k\|_2^2}.$$

Tada je φ_j ortogonalan na sve prethodne φ_k , $k = 0, \dots, j - 1$.

Primjer

Primjer. Nađite **ortogonalnu** bazu za prostor razapet funkcijama $1, x, x^2$ na intervalu $[-1, 1]$ s **težinskom funkcijom** $w = 1$.

Rješenje. **Skalarni produkt** funkcija u i v definiran je s

$$\langle u, v \rangle = \int_{-1}^1 w(x)u(x)v(x) dx = \int_{-1}^1 u(x)v(x) dx.$$

Prva funkcija u ortogonalnoj bazi jednaka je **prvoj** zadanoj funkciji,

$$\varphi_0(x) = 1.$$

Primjer

Sada je

$$\langle x, \varphi_0 \rangle = \int_{-1}^1 x \cdot 1 dx = (\text{neparnost}) = 0,$$

$$\langle \varphi_0, \varphi_0 \rangle = \int_{-1}^1 1 \cdot 1 dx = x \Big|_{-1}^1 = 2,$$

pa je

$$a_0 = \frac{\langle x, \varphi_0 \rangle}{\langle \varphi_0, \varphi_0 \rangle} = \frac{0}{2} = 0.$$

Odatle odmah dobivamo

$$\varphi_1(x) = x - a_0 \cdot 1 = x.$$

Primjer

Za ortogonalni polinom stupnja 2 treba izračunati a_0 i a_1

$$\langle x^2, \varphi_0 \rangle = \int_{-1}^1 x^2 \cdot 1 dx = \frac{x^3}{3} \Big|_{-1}^1 = \frac{2}{3},$$

$$\langle x^2, \varphi_1 \rangle = \int_{-1}^1 x^2 \cdot x dx = (\text{neparnost}) = 0,$$

$$\langle \varphi_1, \varphi_1 \rangle = \int_{-1}^1 x \cdot x dx = \frac{2}{3},$$

pa je

$$a_0 = \frac{\langle x^2, \varphi_0 \rangle}{\langle \varphi_0, \varphi_0 \rangle} = \frac{\frac{2}{3}}{2} = \frac{1}{3}, \quad a_1 = \frac{\langle x^2, \varphi_1 \rangle}{\langle \varphi_1, \varphi_1 \rangle} = \frac{0}{\frac{2}{3}} = 0.$$

Primjer

Odatle je

$$\varphi_2(x) = x^2 - a_1 \cdot x - a_0 \cdot 1 = x^2 - \frac{1}{3}.$$

Primjer. Korištenjem **ortogonalnih** polinoma izračunatih u prethodnom primjeru, po neprekidnoj metodi najmanjih kvadrata nađite **polinome** stupnjeva 0 i 1 koji aproksimiraju funkciju

$$f(x) = e^x$$

na intervalu $[-1, 1]$ uz **težinsku funkciju** $w(x) = 1$.

Jednostavni primjer — ortogonalni polinomi

Rješenje problema najmanjih kvadrata je funkcija

$$\varphi^{(m)} = \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j, \quad a_j = \frac{\langle \varphi_j, f \rangle}{\langle \varphi_j, \varphi_j \rangle}, \quad j = 0, 1.$$

Za račun koeficijenata a_j moramo izračunati

$$\langle \varphi_0, \varphi_0 \rangle = \int_{-1}^1 1 \cdot 1 \, dx = 2, \quad \langle \varphi_0, e^x \rangle = \int_{-1}^1 1 \cdot e^x \, dx = e - e^{-1},$$

$$\langle \varphi_1, \varphi_1 \rangle = \int_{-1}^1 x \cdot x \, dx = \frac{2}{3}, \quad \langle \varphi_1, e^x \rangle = \int_{-1}^1 x \cdot e^x \, dx = 2e^{-1}.$$

Jednostavni primjer — ortogonalni polinomi

Odatle odmah izlazi

$$a_0 = \frac{e - e^{-1}}{2} = \operatorname{sh}(1), \quad a_1 = \frac{2e^{-1}}{\frac{2}{3}} = 3e^{-1}.$$

Aproksimacija **konstantom** je

$$\varphi^{(0)}(x) = \operatorname{sh}(1)\varphi_0(x) = \operatorname{sh}(1) \cdot 1,$$

a **polinomom stupnja 1**

$$\varphi^{(1)}(x) = \operatorname{sh}(1)\varphi_0(x) + 3e^{-1}\varphi_1(x) = \operatorname{sh}(1) \cdot 1 + 3e^{-1} \cdot x,$$

što se poklapa s već izračunatim rješenjem koje nije koristilo ortogonalne polinome.

Primjeri ortogonalnih familija funkcija

Trigonometrijske funkcije

Trigonometrijske funkcije

$$\{1, \cos x, \cos 2x, \cos 3x, \dots, \sin x, \sin 2x, \sin 3x, \dots\}$$

čine **ortogonalnu familiju** funkcija na intervalu $[0, 2\pi]$ uz **težinsku funkciju** $w(x) = 1$.

Pokažimo da je to zaista istina. Neka su $k, \ell \in \mathbb{N}_0$. Tada vrijedi

$$\int_0^{2\pi} \sin kx \cdot \sin \ell x \, dx = -\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (\cos(k + \ell)x - \cos(k - \ell)x) \, dx.$$

Ortogonalnost trigonometrijskih funkcija

Ako je $k = \ell$, onda je prethodni integral jednak

$$-\frac{1}{2} \left(\frac{\sin(k + \ell)x}{k + \ell} - x \right) \Big|_0^{2\pi} = \pi.$$

Ako je $k \neq \ell$, onda je jednak

$$-\frac{1}{2} \left(\frac{\sin(k + \ell)x}{k + \ell} - \frac{\sin(k - \ell)x}{k - \ell} \right) \Big|_0^{2\pi} = 0.$$

Drugim riječima, vrijedi

$$\int_0^{2\pi} \sin kx \cdot \sin \ell x \, dx = \begin{cases} 0, & k \neq \ell, \\ \pi, & k = \ell, \end{cases} \quad k, \ell = 1, 2, \dots,$$

Ortogonalnost trigonometrijskih funkcija

Na sličan način, pretvaranjem **produkta** trigonometrijskih funkcija u zbroj, možemo pokazati da je

$$\int_0^{2\pi} \cos kx \cdot \cos lx \, dx = \begin{cases} 0, & k \neq l, \\ 2\pi, & k = l = 0, \\ \pi, & k = l > 0, \end{cases} \quad k, l = 0, 1, \dots,$$

te, također, da je

$$\int_0^{2\pi} \cos kx \cdot \sin lx \, dx = 0, \quad k = 0, 1, \dots, \quad l = 1, 2, \dots$$

Fourierov red

Ako **periodičku** funkciju f , **osnovnog perioda** duljine 2π , aproksimiramo (u smislu najmanjih kvadrata) redom oblika

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx),$$

onda, množenjem odgovarajućim trigonometrijskim funkcijama i integriranjem, dobivamo

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx \, dx, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx \, dx.$$

Prethodni red poznat je pod imenom **Fourierov red**, a koeficijenti kao **Fourierovi koeficijenti**.

Fourierov red i najmanji kvadrati

Ako **Fourierov red** odsiječemo za $k = m$, onda dobijemo tzv. **trigonometrijski polinom**

$$f_m(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx + b_k \sin kx).$$

Taj polinom je

- **najbolja** aproksimacija u smislu najmanjih kvadrata za f , u klasi trigonometrijskih polinoma “stupnja” **manjeg ili jednakog m** .

Uz ortogonalnost trigonometrijskih funkcija (obzirom na integralni skalarni produkt), postoji i **diskretna ortogonalnost** (integral se zamijeni sumom).

Klasični ortogonalni polinomi

Klasični ortogonalni polinomi — uvod

U praksi najčešće susrećemo **pet tipova** klasičnih **ortogonalnih polinoma**.

Prisjetimo se, za polinome

$$\{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n, \dots\},$$

(indeks polinoma označava stupanj), kažemo da su **ortogonalni** obzirom na težinsku funkciju w , na $[a, b]$, ako vrijedi

$$\int_a^b w(x) p_m(x) p_n(x) dx = 0, \quad \text{za } m \neq n.$$

Klasični ortogonalni polinomi — uvod

Težinska funkcija

- određuje sistem polinoma do na konstantni faktor u svakom od polinoma.
- Izbor takvog faktora zove se još i standardizacija ili normalizacija.

Zajedničke karakteristike ortogonalnih polinoma:

- Ortogonalni polinomi zadovoljavaju tročlanu rekurziju

$$p_{n+1}(x) + \alpha_n(x)p_n(x) + \beta_n(x)p_{n-1}(x) = 0, \quad n = 1, 2, \dots,$$

s tim da su poznate “početne” funkcije p_0 i p_1 , i sve funkcije α_n , β_n , za $n \in \mathbb{N}$.

Klasični ortogonalni polinomi — uvod

Zajedničke karakteristike ortogonalnih polinoma (nastavak):

- ⦿ **Oprez.** Prethodnu rekurziju zadovoljavaju i mnoge specijalne funkcije koje **nisu** ortogonalne!
- ⦿ **Nultočke** ortogonalnih polinoma uvijek se nalaze **unutar** intervala $[a, b]$ na kojem su polinomi **ortogonalni**.

Dokaze za **tročlanu** rekurziju i **nultočke** možete naći u skripti. Napraviti ćemo ih malo kasnije.

Čebiševljevi polinomi prve vrste

Čebiševljevi polinomi prve vrste

- označavaju se s T_n ,
- ortogonalni su na intervalu $[-1, 1]$
- obzirom na težinsku funkciju

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

Relacija ortogonalnosti:

$$\int_{-1}^1 \frac{T_m(x) T_n(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx = \begin{cases} 0, & \text{za } m \neq n, \\ \pi, & \text{za } m = n = 0, \\ \pi/2, & \text{za } m = n \neq 0. \end{cases}$$

Čebiševljevi polinomi prve vrste

Oni zadovoljavaju rekurzivnu relaciju

$$T_{n+1}(x) - 2xT_n(x) + T_{n-1}(x) = 0,$$

uz start

$$T_0(x) = 1, \quad T_1(x) = x.$$

Za njih postoji i **eksplicitna** formula

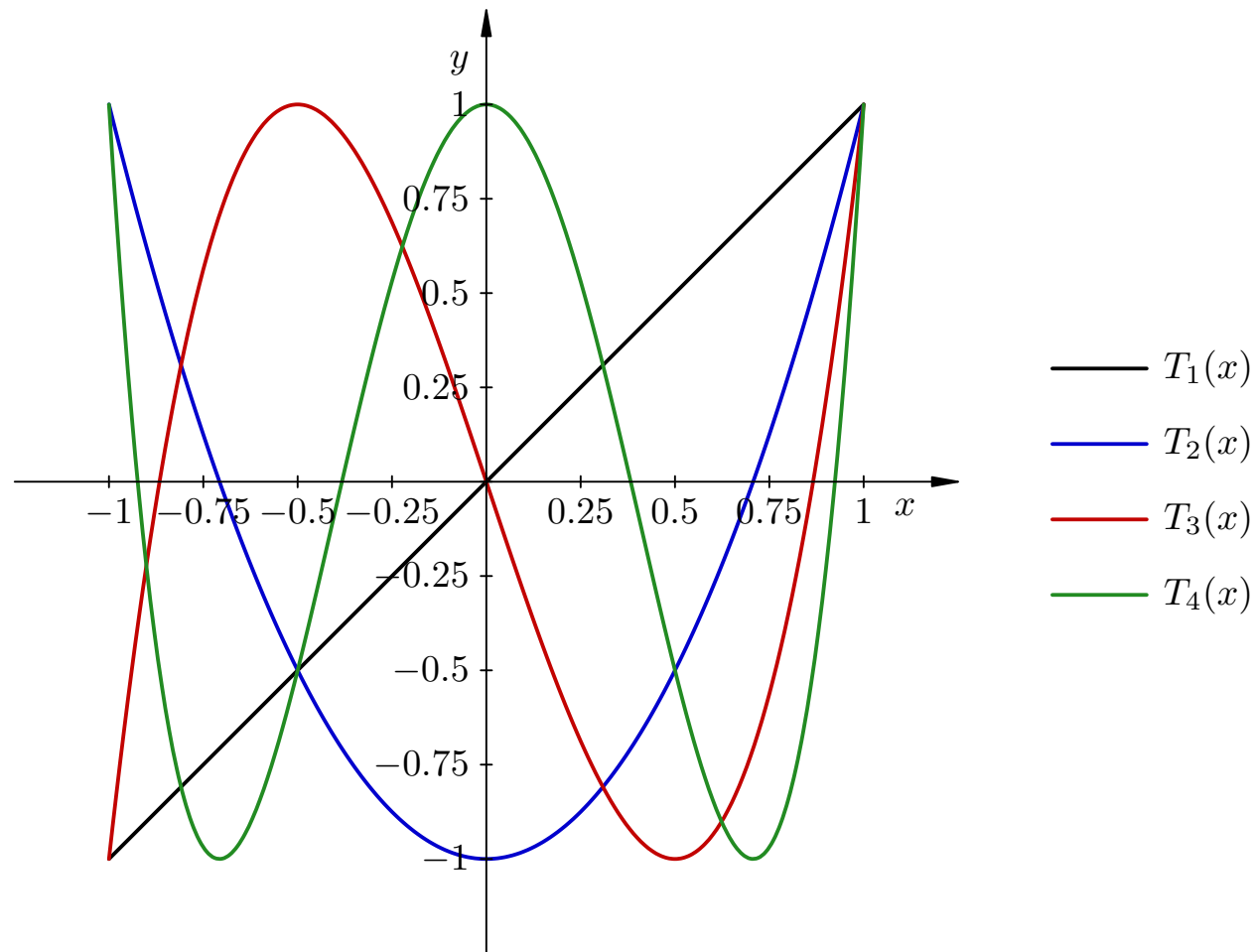
$$T_n(x) = \cos(n \arccos x).$$

Osim toga, n -ti Čebiševljev polinom prve vrste T_n zadovoljava diferencijalnu jednažbu

$$(1 - x^2)y'' - xy' + n^2y = 0.$$

Čebiševljevi polinomi prve vrste

Graf prvih par polinoma izgleda ovako.



Čebiševljevi polinomi prve vrste na $[0, 1]$

Katkad se koriste i Čebiševljevi polinomi prve vrste

- transformirani na interval $[0, 1]$,
- u oznaci T_n^* .

Dobivaju se korištenjem linearne (preciznije, afine) transformacije

$$[0, 1] \ni x \mapsto \xi := 2x - 1 \in [-1, 1].$$

Relacija ortogonalnosti postaje

$$\int_0^1 \frac{T_m^*(x) T_n^*(x)}{\sqrt{x - x^2}} dx = \begin{cases} 0, & \text{za } m \neq n, \\ \pi, & \text{za } m = n = 0, \\ \pi/2, & \text{za } m = n \neq 0, \end{cases}$$

Čebiševljevi polinomi prve vrste na $[0, 1]$

a rekurzivna relacija

$$T_{n+1}^*(x) - 2(2x - 1)T_n^*(x) + T_{n-1}^*(x) = 0,$$

uz start

$$T_0^*(x) = 1, \quad T_1^*(x) = 2x - 1.$$

Čebiševljevi polinomi druge vrste

Čebiševljevi polinomi druge vrste

- označavaju se s U_n ,
- ortogonalni su na intervalu $[-1, 1]$
- obzirom na težinsku funkciju

$$w(x) = \sqrt{1 - x^2}.$$

Relacija ortogonalnosti:

$$\int_{-1}^1 \sqrt{1 - x^2} U_m(x) U_n(x) dx = \begin{cases} 0, & \text{za } m \neq n, \\ \pi/2, & \text{za } m = n. \end{cases}$$

Čebiševljevi polinomi druge vrste

Zadovoljavaju **istu** rekurziju kao i polinomi prve vrste

$$U_{n+1}(x) - 2xU_n(x) + U_{n-1}(x) = 0,$$

uz malo drugačiji start

$$U_0(x) = 1, \quad U_1(x) = 2x.$$

Za njih postoji i **eksplicitna** formula

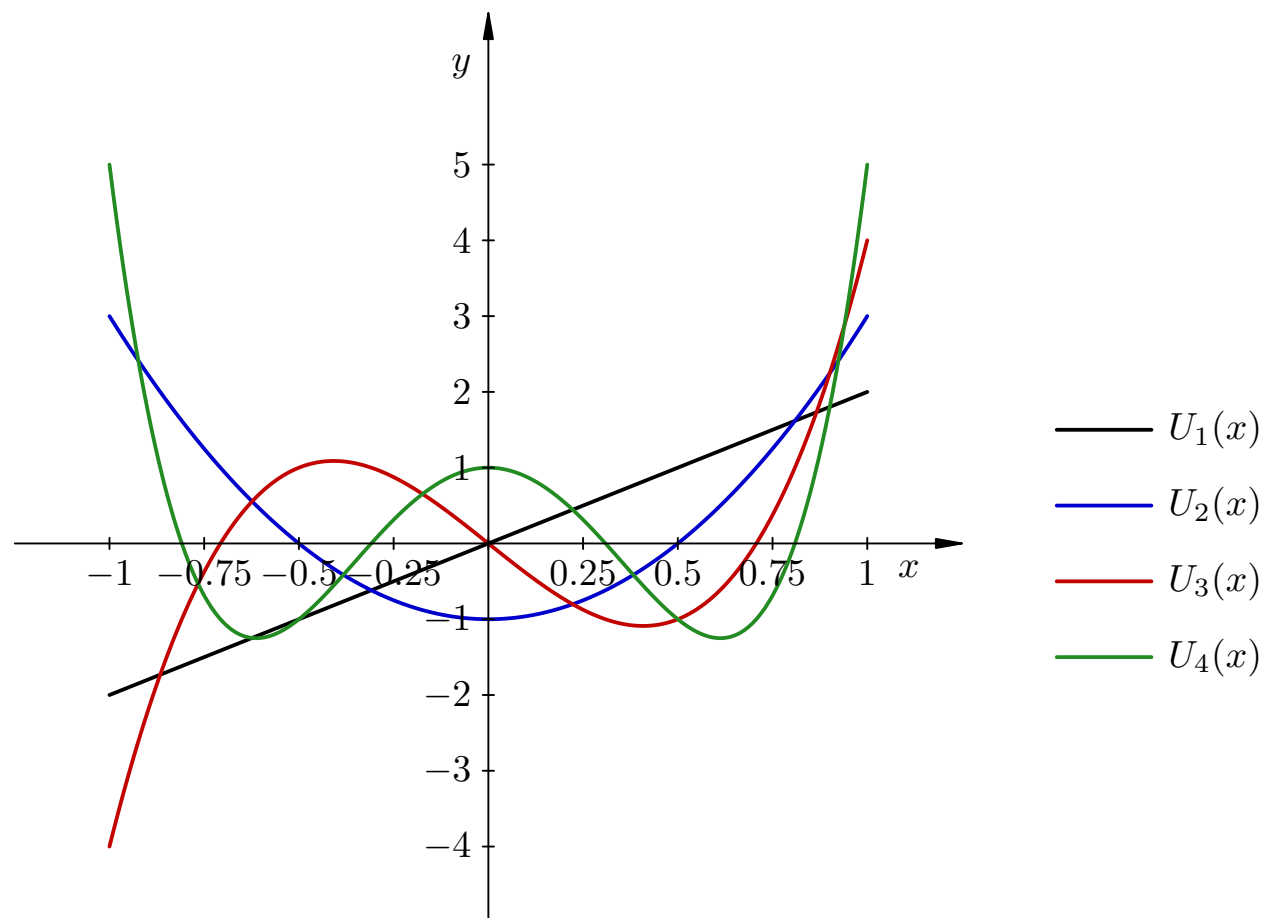
$$U_n(x) = \frac{\sin((n+1) \arccos x)}{\sin(\arccos x)}.$$

n -ti Čebiševljev polinom druge vrste U_n zadovoljava diferencijalnu jednažbu

$$(1 - x^2)y'' - 3xy' + n(n+2)y = 0.$$

Čebiševljevi polinomi druge vrste

Graf prvih par polinoma izgleda ovako.



Legendreovi polinomi

Legendreovi polinomi

- označavaju se s P_n ,
- ortogonalni su na intervalu $[-1, 1]$
- obzirom na težinsku funkciju

$$w(x) = 1.$$

Relacija ortogonalnosti:

$$\int_{-1}^1 P_m(x) P_n(x) dx = \begin{cases} 0, & \text{za } m \neq n, \\ 2/(2n + 1), & \text{za } m = n. \end{cases}$$

Legendreovi polinomi

Oni zadovoljavaju rekurzivnu relaciju

$$(n + 1)P_{n+1}(x) - (2n + 1)xP_n(x) + nP_{n-1}(x) = 0,$$

uz start

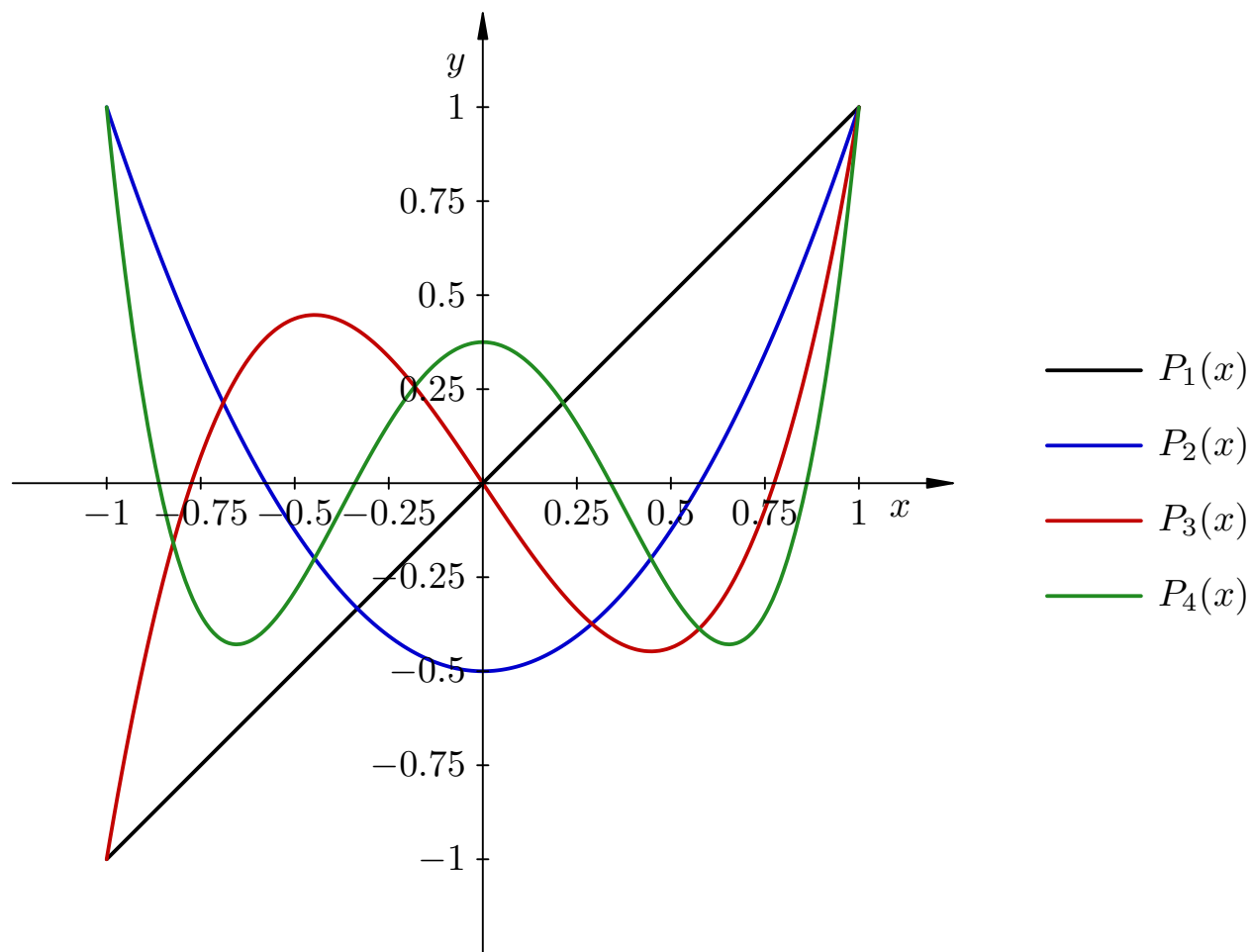
$$P_0(x) = 1, \quad P_1(x) = x.$$

Osim toga, n -ti Legendreov polinom P_n zadovoljava diferencijalnu jednačbu

$$(1 - x^2)y'' - 2xy' + n(n + 1)y = 0.$$

Legendreovi polinomi

Graf prvih par polinoma izgleda ovako.



Laguerreovi polinomi

Laguerreovi polinomi

- označavaju se s L_n ,
- ortogonalni su na intervalu $[0, \infty)$
- obzirom na težinsku funkciju

$$w(x) = e^{-x}.$$

Relacija ortogonalnosti:

$$\int_0^{\infty} e^{-x} L_m(x) L_n(x) dx = \begin{cases} 0, & \text{za } m \neq n, \\ 1, & \text{za } m = n. \end{cases}$$

Laguerreovi polinomi

Oni zadovoljavaju rekurzivnu relaciju

$$(n + 1)L_{n+1}(x) + (x - 2n - 1)L_n(x) + nL_{n-1}(x) = 0,$$

uz start

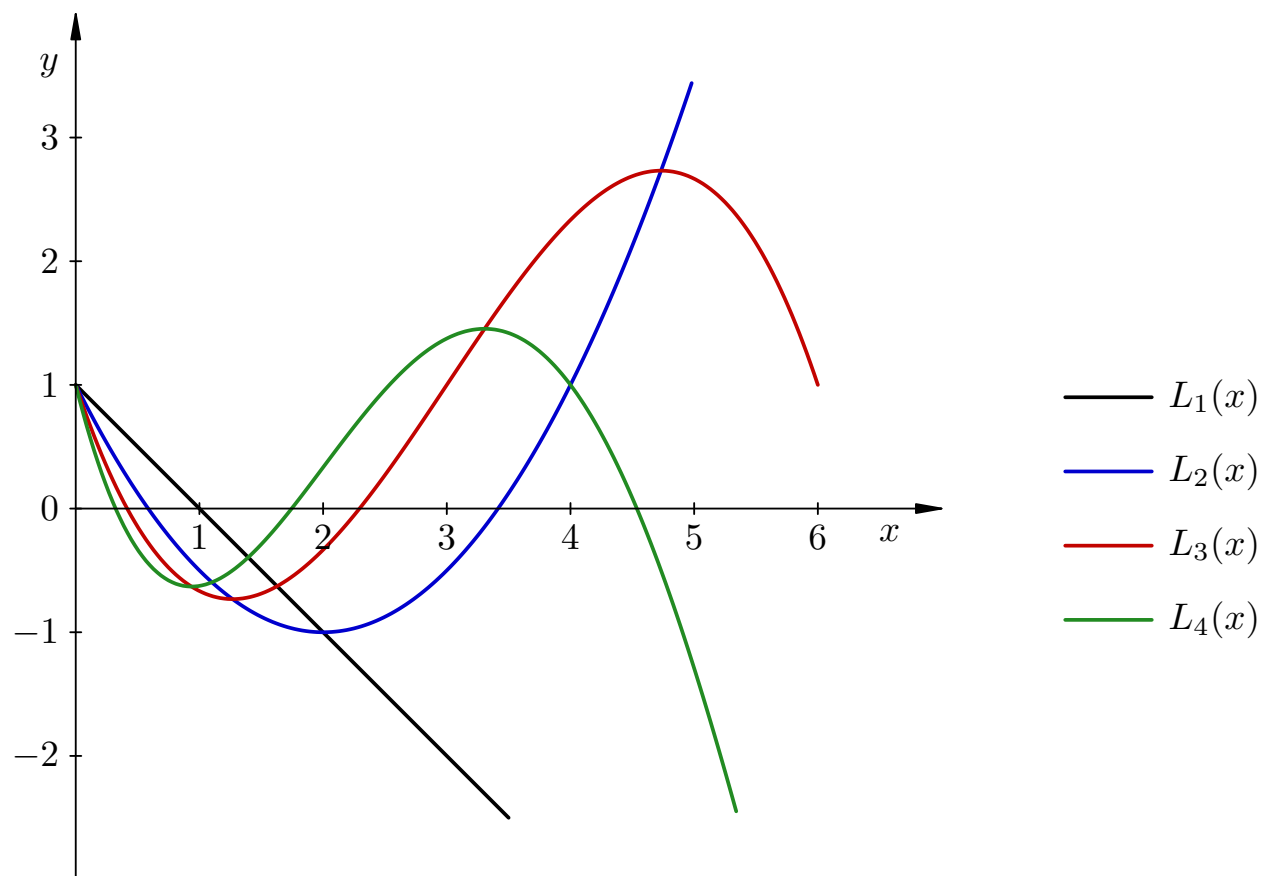
$$L_0(x) = 1, \quad L_1(x) = 1 - x.$$

Osim toga, n -ti Laguerreov polinom L_n zadovoljava diferencijalnu jednačbu

$$xy'' + (1 - x)y' + ny = 0.$$

Laguerreovi polinomi

Graf prvih par polinoma izgleda ovako.



Laguerreovi polinomi

Često nailazi na još jednu rekurziju za Laguerreove polinome

$$\tilde{L}_{n+1}(x) + (x - 2n - 1)\tilde{L}_n(x) + n^2\tilde{L}_{n-1}(x) = 0,$$

uz jednaki start

$$\tilde{L}_0(x) = 1, \quad \tilde{L}_1(x) = 1 - x.$$

Uspoređivanjem ove i prethodne rekurzije dobivamo da je

$$\tilde{L}_n(x) = n! L_n(x),$$

tj. radi se samo o drugačijoj **normalizaciji**

$$\int_0^{\infty} e^{-x} \tilde{L}_m(x) \tilde{L}_n(x) dx = \begin{cases} 0, & \text{za } m \neq n, \\ (n!)^2, & \text{za } m = n. \end{cases}$$

Hermiteovi polinomi

Hermiteovi polinomi

- označavaju se s H_n ,
- ortogonalni su na intervalu $(-\infty, \infty)$
- obzirom na težinsku funkciju

$$w(x) = e^{-x^2}.$$

Relacija ortogonalnosti:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} H_m(x) H_n(x) dx = \begin{cases} 0, & \text{za } m \neq n, \\ 2^n n! \sqrt{\pi}, & \text{za } m = n. \end{cases}$$

Hermiteovi polinomi

Oni zadovoljavaju rekurzivnu relaciju

$$H_{n+1}(x) - 2xH_n(x) + 2nH_{n-1}(x) = 0,$$

uz start

$$H_0(x) = 1, \quad H_1(x) = 2x.$$

Osim toga, n -ti Hermiteov polinom H_n zadovoljava diferencijalnu jednačbu

$$y'' - 2xy' + 2ny = 0.$$

Hermiteovi polinomi

Graf prvih par polinoma izgleda ovako.

