

Numerične metode

izročki predavanj

Aljaž Zalar

Fakulteta za računalništvo in informatiko
Univerza v Ljubljani

Literatura

Osnovna vira:

- ▶ Bojan Orel, Osnove numerične matematike, Založba FE in FRI.
- ▶ Bor Plestenjak: Razširjen uvod v numerične metode, DMFA založništvo.

Tuji viri:

- ▶ K. Atkinson, W. Han: Elementary Numerical Analysis, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2003.
- ▶ R.L. Burden, J.D. Faires, A.M. Burden: Numerical Analysis, 10th edition, Cengage Learning, Boston, 2016.
- ▶ G.H. Golub, C.F. Van Loan: Matrix Computations, 3rd edition, Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, 1996.
- ▶ D.R. Kincaid, E.W. Cheney: Numerical Analysis, Mathematics of Scientific Computing, 3rd edition, Brooks/Cole, Pacific Grove, 2002.
- ▶ L.N. Trefethen, D. Bau: Numerical Linear Algebra, SIAM, Philadelphia, 1997.

Obveznosti

Potek predmeta:

- ▶ Predavanja: 3 ure na teden.
- ▶ Vaje: 2 uri na teden.

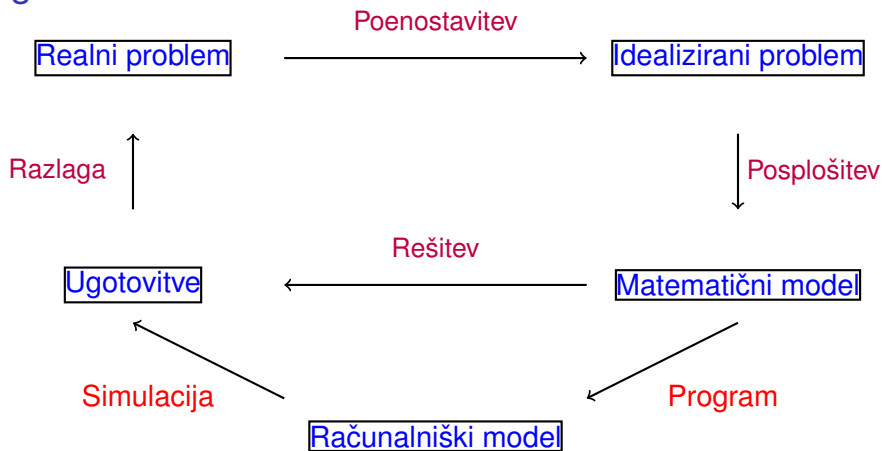
Ocena:

- ▶ 3 domače naloge.
- ▶ Pisni izpit.
- ▶ Ustni izpit.

Programska oprema:

- ▶ *Matlab*: Licenca dostopna za študente UL.
- ▶ *Octave*: Prosto dostopna alternativa Matlaba.

Vloga numerične matematike



Numerična matematika ima ključno vlogo pri pretvorbi matematičnega modela v računalniškega, reševanju tega modela in razlagi rešitev s stališča napak.

Vsebina predmeta

1. Računanje in vloga napak pri numerični matematiki
2. Reševanje sistemov linearnih enačb
 - ▶ Gausova eliminacija in LU razcep - cena in problemi
 - ▶ Pivotiranje
 - ▶ Iterativne metode - Jacobijeva in Gauss-Seidlova iteracija
3. Reševanje (sistemov) nelinearnih enačb in optimizacija
 - ▶ Tangentna oz. Newtonova metoda
 - ▶ Metoda fiksne točke
 - ▶ Newtonova optimizacijska metoda
4. Aproksimacija in interpolacija
 - ▶ Lagrangeov in Newtonov interpolacijski polinom
 - ▶ Aproksimacija po metodi najmanjših kvadratov
 - ▶ QR razcep za predoločene sisteme

5. Numerično odvajanje in integriranje

- ▶ Trapezna metoda
- ▶ Simpsonova metoda
- ▶ Rombergova metoda

6. Numerično reševanje diferencialnih enačb

- ▶ Eulerjeva metoda
- ▶ Runge-Kutta metode

Prvo poglavje:

Uvod v numerično računanje

- ▶ Numerično računanje
- ▶ Predstavljiva števila
- ▶ Zaokrožitvene napake
- ▶ Katastrofalno seštevanje/odštevanje
- ▶ Primeri (ne)stabilnega računanja

Numerično in simbolno računanje

Numerično računanje:

- ▶ Takoj v formulo vstavljamo **števila**
- ▶ Pridemo do numeričnega rezultata - **numerične rešitve**

Simbolno računanje:

- ▶ **simboli** predstavljajo števila
- ▶ izraz preoblikujemo s simbolnim računanjem do novega simbolnega izraza - **analitična rešitev**

Primer

- ▶ *Numerično:*

$$\frac{(17.36)^2 - 1}{17.36 + 1} = 16.36; \quad 0.25, 0.33333 \dots (?), 3.14159 \dots (?)$$

- ▶ *Simbolno:*

$$\frac{x^2 - 1}{x + 1} = x - 1; \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \pi, \tan 83$$

Numerično in simbolno računanje

Primer

```
1 >> x=rand; (x^2-1)/(x+1) - (x-1)
2
3 ans=1.387778780781446e-17
```

Analitično bi rezultat moral biti 0, vendar zaradi numeričnih napak dobimo majhno napako.

Kaj zanima numerično matematiko?

Metoda... matematična konstrukcija, s katero rešujemo problem

Algoritem... koraki metode

Implementacija... zapis algoritma v izbranem jeziku

Kaj pomeni 'biti numerično dober'?

majhna sprememba podatkov \Rightarrow majhna napaka rezultata

Tipična vprašanja numerične matematike:

- ▶ Ali je problem občutljiv?
- ▶ Ali je metoda 'dobra'?
- ▶ Ali je algoritem robusten - deluje na širokem spektru problemov?
- ▶ Ali je implementacija hitra - časovna in prostorska zahtevnost?

Občutljivih problemov NM ne more rešiti

Problem je občutljiv, če se ob majhni spremembi začetnih podatkov točen rezultat zelo spremeni.

Občutljivost je odvisna le od narave problema in ne od izbrane numerične metode.

Primer (presečišča premic)

Sistem in njegova perturbacija

$$x + y = 2 \quad \rightarrow \quad x + y = 1.9999$$

$$x - y = 0 \quad \rightarrow \quad x - y = 0.0002$$

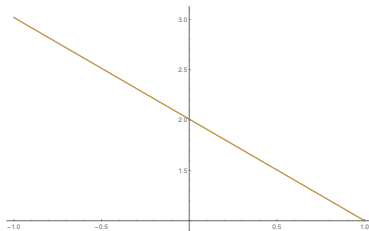
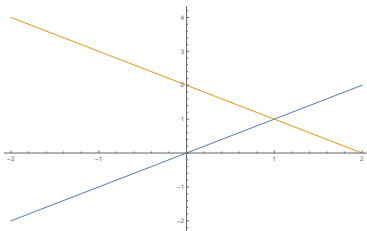
ima rešitvi $x = y = 1$ oz. $x = 1.00005$ in $y = 0.99985$. Problem je neobčutljiv, saj je šlo za spremembo za isti velikostni razred.

Sistem in njegova perturbacija

$$x + 0.99y = 1.99 \quad \rightarrow \quad x + 0.99y = 1.9899$$

$$0.99x + 0.98y = 1.97 \quad \rightarrow \quad 0.99x + 0.98y = 1.9701$$

ima rešitvi $x = y = 1$ oz. $x = 2.97$ in $y = -0.99$. Problem je občutljiv, saj je majhna sprememba začetnih podatkov povzročila veliko spremembo rezultata.



Na čem temeljijo numerične metode?

- ▶ **Matrike nadomestimo z enostavnejšimi** (upoštevamo samo diagonalni ali zgornjetrikotni del).
- ▶ **Nelinearne probleme nadomestimo z linearnimi** (linearna aproksimacija v točki).
- ▶ **Neskončne procese nadomestimo s končnimi** (uporabimo Taylorjev polinom) .
- ▶ **Neskončno razsežne prostore nadomestimo s končno razsežnimi** (funkcije nadomestimo s polinomi).
- ▶ **Diferencialne enačbe nadomestimo z algebraičnimi** (znebimo se vseh parcialnih odvodov iz enačb).

Zakaj sploh potrebujemo numerično matematiko?

Znanost, ki temelji na matematičnih izračunih, je neposredno odvisna od NM.

Nekatere katastrofe so se zgodile zaradi slabega numeričnega računanja (<http://www-users.math.umn.edu/~arnold//disasters/>):

- *Nesreča Misije Patriot, Zalivska vojna 1991, Savdska Arabija, 28 žrtev: slaba analiza zaokrožitvenih napak.*

Čas zadetka iraške rakete, usmerjene na Savdsko Arabijo, je bil računan na vsako desetino sekunde v 24-bitnem sistemu. Ker velja

$$\frac{1}{10} = 2^{-4} + 2^{-5} + 2^{-8} + 2^{-9} + 2^{-12} + 2^{-13} + 2^{-16} + 2^{-17} + 2^{-20} + 2^{-21} +$$
$$\underbrace{+ 2^{-24} + 2^{-25} + 2^{-28} + \dots}_{\text{zanemarimo}},$$

je vsako desetinko sekunde napaka $9.5 \cdot 10^{-8}$ s. Po 100 urah računanja je bila napaka $9.5 \cdot 10^{-8}$ s $\cdot 100 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10 = 0.34$ s. Ker je hitrost rakete 1.676 m/s, je bila pozicija rakete za več kot 500 m napačno predvidena in je ta ušla radarjem.

- ▶ *Eksplozija rakete Ariana 5, Francoska Gvajana, 1996:*
posledica prekoračitve obsega števil.

https://www.youtube.com/watch?v=PK_yguLapgA

<https://www.youtube.com/watch?v=W3YJeoYgozw>

Ob prenovi rakete so 'pozabili' nadgraditi uporabljen številski sistem, ki je horizontalno hitrost meril v 16-bitnem sistemu (1 bit porabimo za predznak). Največja hitrost v tem sistemu je

$$2^0 + 2^1 + \dots + 2^{13} + 2^{14} = \frac{2^{15} - 1}{2 - 1} = 32767.$$

Ker je prenovljena raketa po 37 sekundah presegla to hitrost, je prišlo do zaustavitve motorjev...

- ▶ *Potop naftne ploščadi Sleipner A, Stavanger, Norveška, 1991, milijarda dolarjev škode:* *nenatančna obdelava obremenitev pri reševanju PDE-jev.*

<https://www.youtube.com/watch?v=eGdiPs4THW8>

Ponovitev predstavljivih števil

Števila shranjujemo v obliki

$$x = \pm 0.d_1 d_2 d_3 \dots d_m \times \beta^e,$$

kjer je

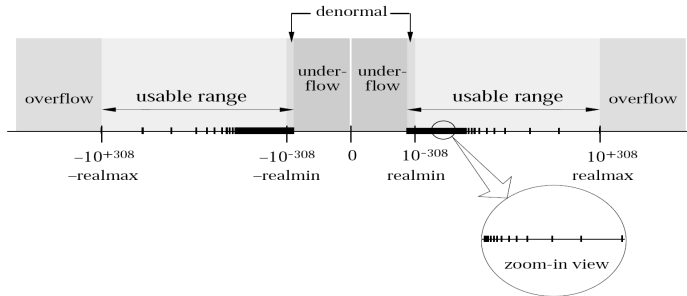
- ▶ β naravno število (v računalništvu $\beta = 2$),
- ▶ $d_1 d_2 d_3 \dots d_m$ mantisa, e eksponent.

Primer (baza 10)

- ▶ *1000.12345* zapišemo kot $+(0.100012345)_{10} \times 10^4$.
- ▶ *0.000812345* zapišemo kot $+(0.812345)_{10} \times 10^{-3}$.

Prekoračitev in podkoračitev

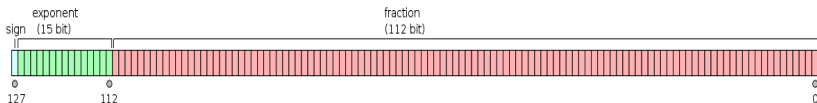
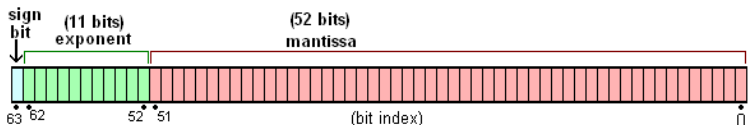
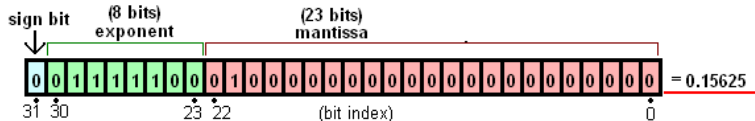
Floating Point Number Line



- ▶ izračuni preblizu 0 lahko povzročijo **podkoračitev**
- ▶ preveliki izračuni lahko povzročijo **prekoračitev**
- ▶ prekoračitev je v splošnem hujši problem

Različne natančnosti

- ▶ *IEEE Enojna natančnost*: števila so predstavljena z 32 biti.
- ▶ *IEEE Dvojna natančnost*: števila so predstavljena z 64 biti.
- ▶ *Multiprecision Computing Toolbox for MATLAB*: Omogoča računanje v višjih natančnostih. Dostopno na naslovu <https://www.advanpix.com/>



Kaj so zaokrožitvene napake?

- ▶ Večine realnih števil ne moremo predstaviti v strojni aritmetiki \Rightarrow **zaokrožujemo** in delamo **zaokrožitvene napake**.
- ▶ IEEE standard... **zaokroži x do najbližjega predstavljivega števila $\text{fl}(x)$** . Naj bosta

$$x_- \leq x \leq x_+$$

najbližji predstavljivi števili števila x . Potem je

$$\text{fl}(x) = \begin{cases} x_-, & \text{če je } x \text{ bližje } x_-, \\ x_+, & \text{če je } x \text{ bližje } x_+. \end{cases}$$

- ▶ Kako velika je napaka? Recimo, da je x bližje x_- :

$$x = (0.1b_2b_3 \dots b_mb_{m+1})_2 \times 2^e,$$

$$x_- = (0.1b_2b_3 \dots b_m)_2 \times 2^e,$$

$$x_+ = ((0.1b_2b_3 \dots b_m)_2 + 2^{-m}) \times 2^e,$$

$$\text{fl}(x) = x(1 + \delta), |\delta| < 2^{-m}$$

Absolutna napaka:

$$x - x_- \leq \frac{x_+ - x_-}{2} = 2^{e-m-1}.$$

Relativna napaka:

$$\frac{x - x_-}{x} \leq \frac{2^{e-m-1}}{1/2 \times 2^e} \leq \underbrace{2^{-m}}_u \dots \text{osnovna zaokrožitvena napaka}$$

Torej je

$$x_- = x_- - x + x \geq -ux + x = x(1 - u).$$

Podobno

$$x_+ \leq x(1 + u).$$

Sledi

$$\boxed{\text{fl}(x) = x(1 + \delta)}, \quad \text{kjer je } |\delta| < u.$$

Kako računamo s predstavljenimi števili?

Za **predstavljeni** števili x, y in katerokoli od osnovnih operacij $\odot \in \{+, -, \cdot, :\}$ število $x \odot y$ ni nujno predstavljlivo. Po zgornjem pa velja

$$\boxed{\text{fl}(x \odot y) = (x \odot y)(1 + \delta)}, \quad \text{kjer je } |\delta| \leq u.$$

Seštevanje numerično **ni asociativna operacija**, tj.

$$\boxed{(a + b) + c \neq a + (b + c)} :$$

Primer

```
1 >> a=rand;b=rand;c=rand;((a+b)+c)-(a+(b+c))
2
3 ans=-2.220446049250313e-16
```

Seštevamo od manjših k večjim številom

$$\begin{aligned}(a + b) + c &= \text{fl}(\text{fl}(a + b) + c) = \text{fl}((a + b)(1 + \delta_1) + c) \\&= [(a + b)(1 + \delta_1) + c](1 + \delta_2) \\&= [(a + b + c) + (a + b)\delta_1](1 + \delta_2) \\&= (a + b + c) \left[1 + \frac{a + b}{a + b + c} \delta_1(1 + \delta_2) + \delta_2 \right]\end{aligned}$$

Podobno

$$a + (b + c) = (a + b + c) \left[1 + \frac{b + c}{a + b + c} \delta_3(1 + \delta_4) + \delta_4 \right].$$

Če pozabimo na člena $\delta_1\delta_2$ in $\delta_3\delta_4$ (Zakaj to lahko naredimo?), dobimo

$$(a + b) + c = (a + b + c)(1 + \epsilon_3) \quad \text{kjer je} \quad \epsilon_3 \approx \frac{a + b}{a + b + c} \delta_1 + \delta_2,$$

$$a + (b + c) = (a + b + c)(1 + \epsilon_4) \quad \text{kjer je} \quad \epsilon_4 \approx \frac{b + c}{a + b + c} \delta_3 + \delta_4.$$

Sklep: Ko seštevamo števila, je za čim manjšo napako najboljše začeti z najmanjšim in prištevati večje.

Napake pri numeričnem računanju

- ▶ Neodstranljiva napaka $D_n \dots$ nenatančni začetni podatki.
- ▶ Napaka metode $D_m \dots$ npr. neskončni proces aproksimiramo s končnim.
- ▶ Zaokrožitvena napaka $D_z \dots$ računanje s približki in zaokroževanje.

Celotna napaka D je

$$D = D_n + D_m + D_z.$$

Stabilnost meri kakovost metode

Stabilnost metode preverimo z **analizo zaokrožitvenih napak**.

Vrste napak (x naj bo točna vrednost, \bar{x} pa približek zanjo):

► Prva delitev:

► **Absolutna napaka**: $\bar{x} - x$.

► **Relativna napaka**: $\frac{\bar{x} - x}{x}$.

► Druga delitev:

► **Direktna napaka**: Numerična napaka rezultata.

► **Obratna napaka**: Koliko je potrebno spremeniti začetne podatke, da dobimo izračunan rezultat.

Velja

$$|\text{direktna napaka}| \approx \text{občutljivost} \times |\text{obratna napaka}|.$$

Izračunana vrednost je blizu pravi, če rešujemo neobčutljiv problem z obratno stabilno metode.

Odštevanje in seštevanje sta lahko 'katastrofalni'

odštevanje dveh približno enakih števil

seštevanje dveh približno nasprotnih števil

$$a = x.xxxx\ xxxx\ xxx1 \overbrace{ssss \dots}^{\text{izguba}}$$

$$b = x.xxxx\ xxxx\ xxx0 \overbrace{tttt \dots}^{\text{izguba}}$$

$$\begin{array}{rcl} & \text{končna natančnost} & \\ & \overbrace{x.xxx\ xxxx\ xxx1} & \\ \text{Potem} \quad & - \quad x.xxx\ xxxx\ xxx0 & \\ \hline & = \quad 0.000\ 0000\ 0001 & \quad \quad \quad \text{???? ????} \\ & = \quad 1. \quad \underbrace{\text{???? ????}}_{\text{izguba natančnosti}} \cdot \beta^{-m} & \end{array}$$

S ponavljanjem se napake seštevajo.

Primer katastrofalnega odštevanja

Iščemo rešitve kvadratne enačbe

$$x^2 + 2ax + b = 0, \quad \text{kjer je } a > 0 \text{ in } a^2 > b.$$

Rešitev z manjšo absolutno vrednostjo je

$$x_2 = \frac{-2a + \sqrt{4a^2 - 4b}}{2} = -a + \sqrt{a^2 - b}.$$

$$1 \quad k_1 := a^2$$

$$2 \quad k_2 := k_1 - b$$

$$3 \quad k_3 := \sqrt{k_2}$$

$$4 \quad k_4 := -a + k_3$$

Če je a^2 veliko večji od b , potem ima lahko korak 4 veliko napako. Možna rešitev:

$$x_2 = (-a + \sqrt{a^2 - b}) \cdot \frac{a + \sqrt{a^2 - b}}{a + \sqrt{a^2 - b}} = \frac{-b}{a + \sqrt{a^2 - b}}.$$

```
1  $k_1 := a^2$   
2  $k_2 := k_1 - b$   
3  $k_3 := \sqrt{k_2}$   
4  $k_4 := a + k_3$   
5  $k_5 := \frac{-b}{k_4}$ 
```

```
1 >> a = 10000; b=-1;  
2 >> x = -a+sqrt(a^2 - b)  
3 x = 5.0000000055588316e-05  
4  
5 >> x^2 + 2 * a * x +b  
6 ans = 1.361766321927860e-08  
7  
8 >> x = -b/(a+sqrt(a^2-b))  
9 x = 4.999999987500000e-05  
10  
11 >> x^2 + 2 * a * x +b  
12 ans = -9.011402890989895e-17
```

Koda primera: [klik](#)

Računanje s stabilnejšo obliko

- ▶ Izračun vrednosti funkcije

$$f(x) = x(\sqrt{x+1} - \sqrt{x})$$

ni stabilen za velike x , ker je $\sqrt{x+1} \approx \sqrt{x}$. Tej težavi se lahko izognemo:

$$f(x) = f(x) \cdot \frac{\sqrt{x+1} + \sqrt{x}}{\sqrt{x+1} + \sqrt{x}} = \frac{x}{\sqrt{x+1} + \sqrt{x}}.$$

Koda primera: [klik](#)

- ▶ Vrsto

$$\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)},$$

ki se sešteje v $\frac{n}{n+1}$ (dokaz: indukcija), je bolje numerično računati vzvratno kot

$$\frac{1}{n \cdot (n+1)} + \frac{1}{(n-1) \cdot n} + \dots + \frac{1}{1 \cdot 2}.$$

Koda primera: [klik](#)

- Vrednost integrala $I_n = \int_0^1 x^n e^{-x} dx$ se lahko rekurzivno (integracija per partes) izračuna kot

$$I_n = -\frac{1}{e} + nI_{n-1}, \quad I_0 = 1 - \frac{1}{e}.$$

Če iz formule izrazimo I_{n-1} , dobimo

$$I_{n-1} = \frac{1}{n}I_n + \frac{1}{ne}.$$

Izkaže se, da je druga formula boljša, pri čemer za začetni približek I_N (pri velikem N) lahko vzamemo karkoli. Zakaj?

Koda primera: [klik](#)

Seštevanje in odštevanje v splošnem nista relativno direktno stabilni operaciji

$x, y \in \mathbb{R}$. Računamo približek \bar{p} za $p = x + y$.

$$\begin{aligned}\bar{p} &= \text{fl}(\text{fl}(x) + \text{fl}(y)) = \text{fl}(x(1 + \delta_1) + y(1 + \delta_2)) \\ &= (x(1 + \delta_1) + y(1 + \delta_2))(1 + \delta_3) \\ &= x(1 + \delta_1)(1 + \delta_3) + y(1 + \delta_2)(1 + \delta_3) \\ &= x + y + x(\delta_1 + \delta_3 + \delta_1\delta_3) + y(\delta_2 + \delta_3 + \delta_2\delta_3)\end{aligned}$$

kjer je $|\delta_i| \leq u$, $i = 1, 2, 3$. Relativna napaka je

$$\boxed{\frac{|\bar{p} - p|}{|p|} \leq \frac{|x(\delta_1 + \delta_3 + \delta_1\delta_3) + y(\delta_2 + \delta_3 + \delta_2\delta_3)|}{|x + y|}}.$$

Torej:

Če je $x + y$ blizu 0, potem je $\frac{|\bar{p} - p|}{|p|}$ veliko.

Množenje (in deljenje) je relativno direktno stabilna operacija

$x, y \in \mathbb{R}$. Računamo približek \bar{p} za $p = x \cdot y$.

$$\begin{aligned}\bar{p} &= \text{fl}(\text{fl}(x) \cdot \text{fl}(y)) = \text{fl}(x(1 + \delta_1) \cdot y(1 + \delta_2)) \\ &= x(1 + \delta_1) \cdot y(1 + \delta_2)(1 + \delta_3) \\ &= xy(1 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \text{produkti več } \delta),\end{aligned}$$

kjer je $|\delta_i| \leq u$, $i = 1, 2, 3$. Relativna napaka je

$$\boxed{\frac{|\bar{p} - p|}{|p|} \leq \frac{|xy||\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \mathcal{O}(u^2)|}{|xy|} = |\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \mathcal{O}(u^2)|}.$$

Torej:

Relativna napaka $\frac{|\bar{p} - p|}{|p|}$ ni odvisna od velikosti produkta xy .

Večina numeričnih metod ni relativno direktno stabilnih

Vse numerične metode, kjer sta vključeni

operaciji $+$ / $-$

in kot rezultat lahko dobimo npr. vrednost 0 ali nekje po poti kot vmesno vrednost skoraj singularno matriko, **niso relativno direktno stabilne**, tj. v rezultatu je lahko veliko relativna napaka.

Zato moramo vedno premisliti:

1. V katerih primerih so zgodi velika napaka?
2. Kako nestabilne primere preoblikovati v stabilne?

Primeri takih operacij:

- ▶ Računanje vrednosti polinoma.
- ▶ Računanje skalarne produkta.
- ▶ Reševanje linearnega sistema.
- ▶ \vdots

Drugo poglavje:

Linearni sistemi

$$Ax = b$$

- ▶ Direktne metode za reševanje
 - ▶ LU razcep
 - ▶ Pivotna rast $\rho(A)$
- ▶ Iterativne metode za reševanje
 - ▶ Jacobi, Gauss-Seidel, SOR, SSOR, konjugirani gradienti

Direktne metode

$$Ax = b$$

- ▶ Gaussova-eliminacija
- ▶ LU razcep
- ▶ Pivotiranje
- ▶ Pivotna rast

Reševanje kvadratnih linearnih sistemov

Linearni sistem n enačb z n neznankami x_1, \dots, x_n je oblike

$$\begin{aligned}a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1, \\a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2, \\&\vdots \\a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n,\end{aligned}$$

kjer so a_{ij}, b_j realna števila.

V matrični obliki ga zapišemo kot

$$\underbrace{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}}_b.$$

Geometrijski pomen sistema $Ax = b$

Naj bodo $a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(n)}$ stolpci matrike A , tj.,

$$a_{(i)} := \begin{bmatrix} a_{1i} \\ a_{2i} \\ \vdots \\ a_{ni} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n$$

Linearna kombinacija vektorjev $a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(n)}$ je vsak vektor oblike

$$x_1 \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{n1} \end{bmatrix} + x_2 \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{n2} \end{bmatrix} + \dots + x_n \begin{bmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ \vdots \\ a_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kjer so $x_i \in \mathbb{R}$ realna števila.

Zanima nas, ali obstaja linearna kombinacija (1), ki je enaka vektorju b .

Sistem $Ax = b$ z vidika numerične matematike

- ▶ Kako **drago** je reševanje sistema $Ax = b$?
cena=število osnovnih računskih operacij (+, −, ·, :).
- ▶ Kateri **problemi** in **napake** se pojavijo med reševanjem $Ax = b$?
Ali obstajajo slabe matrike? Kako take matrike identificirati?
- ▶ Za katere matrike se da **enostavno** in **poceni** rešiti tak sistem?

Ponovitev Gaussove eliminacije (GE)

Cilj je pretvoriti sistem v zgornjetrikotnega, nato pa ga rešiti z obratno substitucijo.

Primer

Rešujemo $Ax = b$, kjer sta

$$A = \begin{bmatrix} -3 & 2 & -1 \\ 6 & -6 & 7 \\ 3 & -4 & 4 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} -1 \\ -7 \\ -6 \end{bmatrix}.$$

Tvorimo *razširjen sistem*

$$\tilde{A} = [A \mid b] = \left[\begin{array}{ccc|c} -3 & 2 & -1 & -1 \\ 6 & -6 & 7 & -7 \\ 3 & -4 & 4 & -6 \end{array} \right]$$

Prištejemo 2-kratnik prve vrstice drugi in 1-kratnik prve vrstice tretji.

$$\tilde{A}_{(1)} = \left[\begin{array}{ccc|c} -3 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -2 & 5 & -9 \\ 0 & -2 & 3 & -7 \end{array} \right]$$

Primer

Odštejemo 1-kratnik druge vrstice od tretje

$$\tilde{A}_{(2)} = \left[\begin{array}{ccc|c} -3 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -2 & 5 & -9 \\ 0 & 0 & -2 & 2 \end{array} \right]$$

Rešimo z *obratno substitucijo*

$$x_3 = \frac{2}{-2} = -1,$$

$$x_2 = \frac{1}{-2} (-9 - 5x_3) = 2,$$

$$x_1 = \frac{1}{-3} (-1 - 2x_2 + x_3) = 2.$$

V nadaljevanju bomo:

1. Prešteli število potrebnih računskih operacij za Gaussovo eliminacijo (GE).
2. GE bomo zapisali s pomočjo matričnih množenj.
3. Ukvarjali se bomo s stabilnostjo GE.

Algoritem GE in cena GE

```
1   $-n \times n$  matrika  $A = [a_{ij}]_{ij}$  in  $n \times 1$  vektor  $b = [b_i]_i$ 
2  -preoblikujemo  $[A|b]$  v zgornjetrikotno z GE
3
4  for  $k = 1 \dots n - 1$ 
5      for  $i = k + 1 \dots n$ 
6           $xmult = a_{ik} / a_{kk}$ 
7           $a_{ik} = 0$ 
8          for  $j = k + 1 \dots n$ 
9               $a_{ij} = a_{ij} - (xmult) a_{kj}$ 
10         end
11          $b_i = b_i - (xmult) b_k$ 
12     end
13 end
```

Izrek

Število računskih operacij (+, −, ·, :) za prevedbo matrike A in razširjene matrike $[A|b]$ v zgornjetrikotno obliko je

$$\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2).$$

Obratna substitucija in število operacij

```
1  -zgornjetrikotna  $n \times n$  matrika  $U = [u_{ij}]_{i,j}$ , vektor  
     $c = [c_i]_i$   
2  -resimo sistem  $Ux = c$   
3  
4   $x_n = c_n / u_{nn}$   
5  for  $i = n - 1 \dots 1$   
6       $s = c_i$   
7      for  $j = i + 1 \dots n$   
8           $s = s - u_{ij}x_j$   
9      end  
10      $x_i = s / u_{ii}$   
11 end
```

Izrek

Število računskih operacij $(+, -, \cdot, :)$ za rešitev sistem $Ux = c$ je

$$n^2.$$

Motivacija za zapis GE v matrični obliki

Videli smo, da je cena pretvorba matrike A oz. sistema $[A|b]$ v zgornjetrikotno obliko bistveno dražja kot pa obratna substitucija.

Če bomo v nekem postoku reševali sisteme $Ax = b$ pri **fiksni matriki A** , **vektor b pa se bo spreminjal**, bi bilo iz računskega vidika bistveno učinkoviteje preoblikovanje matrike A v zgornjetrikotno obliko narediti samo enkrat.

Ključno v tem procesu je ugotoviti, **kako moramo preblikovati vektor b** , ne da bi delali GE na razširjenem sistemu.

LU razcep matrike A

```
1  -Vhod:  $A = [a_{ij}]_{i,j}$   $n \times n$  matrika.
2  -Izhod: Spodnja trikotna matrika  $L$  in zgornja
    trikotna matrika  $U$ , da je  $A = LU$ 
3  - $\ell_{ik}$  v spodnjem algoritmu so elementi pod
    diagonalo v  $L$ , na diagonali so same 1
4  -preostali elementi  $a_{ij}$  v zgornjem trikotniku so
    elementi matrike  $U$ 
5
6  for  $k = 1, \dots, n-1$ 
7      for  $i = k+1, \dots, n$ 
8           $\ell_{ik} = a_{ik} / a_{kk}$ 
9          for  $j = k+1, \dots, n$ 
10              $a_{ij} = a_{ij} - \ell_{ik} a_{kj}$ 
11         end
12     end
13 end
```

Izrek

Število računskih operacij $(+, -, \cdot, :)$ za izračun LU razcepa matrike A je $\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2)$.

Prema substitucija in število operacij

```
1  -Vhod: spodnja trikotna  $n \times n$  matrika  $L = [\ell_{ij}]_{i,j}$  in  
   vektor  $b = [b_i]_i$   
2  -Izhod: resitev  $y$  sistema  $Ly = b$   
3  
4   $y_1 = b_1 / \ell_{11}$   
5  for  $i = 2 \dots n$   
6       $s = b_i$   
7      for  $j = 1 \dots i - 1$   
8           $s = s - \ell_{ij} y_j$   
9      end  
10      $y_i = s / \ell_{ii}$   
11 end
```

Izrek

Število računskih operacij $(+, -, \cdot, :)$ za rešitev sistem $Ly = b$ je

$$n^2.$$

Reševanje sistema $Ax = b$ prek LU razcepa:

1. Izračunamo $A = LU$. Cena: $\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2)$.
2. Rešimo $Ly = b$ s premo substitucijo, tj. od y_1 proti y_n .
Cena: $n^2 - n$.
3. Rešimo $Ux = y$ z obratno substitucijo, t. od x_n proti x_1 .
Cena: n^2 .

Cena preme substitucije je za n operacij manjša kot cena obratne substitucije, saj imamo na diagonalni L same enice in prihranimo v vsaki spremenljivki eno deljenje.

Reševanje sistema $Ax = b$ prek LU razcepa

Primer

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & -4 \\ -4 & -1 & -4 & 7 \\ 2 & 3 & 5 & -3 \\ -2 & -2 & -7 & 9 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 8 \\ -14 \\ 7 \\ -16 \end{pmatrix}.$$

1. $L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, U = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & -4 \\ 0 & 1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$

2. Rešimo $Ly = b$ in dobimo $y = (8 \quad 2 \quad -5 \quad -1)^T.$

3. Rešimo $Ux = y$ in dobimo $x = (1 \quad -1 \quad 1 \quad -1)^T.$

LU razcep brez pivotiranja: [koda](#)

Prema substitucija: [koda](#)

Obratna substitucija: [koda](#)

Primer: [koda](#)

Obstoj LU razcepa matrike

V nadaljevanju se bomo ukvarjali z **obstojem** in **stabilnostjo LU razcepa**.

Problematična sta npr. matriki

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 10^{-17} & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix},$$

saj je 10^{-17} pod strojnim ϵ . Da pa se natančno povedati, kdaj LU razcep obstaja.

Podmatriki matrike $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, zožene na prvih k vrstic in stolpcev, pravimo **k -ta glavna vodilna podmatrika**.

Izrek (Obstoj LU razcepa)

Za $n \times n$ matriko A sta naslednji trditvi ekvivalentni:

- 1. LU razcep matrike A obstaja in je enoličen.*
- 2. k -ta glavna vodilna podmatrika matrike A je obrnljiva za vsak $k = 1, \dots, n$.*

LU razcep z delnim pivotiranjem

Pri **delnem pivotiranju** pred eliminacijo v j -tem stolpcu primerjamo elemente

$$a_{jj}, a_{j+1,j}, \dots, a_{nj},$$

nato pa **zamenjamo j -to vrstico** s tisto, ki vsebuje element z **največjo absolutno vrednostjo**.

Menjava j -te in k -te vrstice pa je **množenje z leve s permutacijsko matriko** P_{jk} , ki se od identitete razlikuje le v j -ti in k -ti vrstici, ki sta zamenjani:

$$P_{jk} = I_n - E_{jj} - E_{kk} + E_{jk} + E_{kj}.$$

Tu so E_{ij} standardne koordinatne matrike (1 v i -ti vrstici in j -tem stolpcu in 0 drugje).

LU razcep z delnim pivotiranjem - algoritem

```
1  -Vhod:  $A = [a_{ij}]_{i,j}$   $n \times n$  matrika
2  -Izhod: permutacijska matrika  $P$ , spodnja in
      zgornja trikotna matrika  $L$  in  $U$ , da je
       $PA = LU$ 
3
4   $P$  in  $L$  identicni  $n \times n$  matriki
5  for  $k = 1, \dots, n-1$ 
6      poisci  $q$ -to in  $k$ -to vrstico, ki zadosca
           $|a_{qk}| = \max_{k \leq p \leq n} |a_{pk}|$ 
7       $q$ -to in  $k$ -to vrstico v matrikah  $A, P$  in strogem
          spodnjem trikotniku  $L$ 
8      for  $i = k+1, \dots, n$ 
9           $\ell_{ik} = a_{ik}/a_{kk}$ 
10         for  $j = k+1, \dots, n$ 
11              $a_{ij} = a_{ij} - \ell_{ik} a_{kj}$ 
12         end
13     end
14 end
```

LU razcep z delnim pivotiranjem

Izrek (\mathcal{O} računski zahtevnosti LU razcep z delnim pivotiranjem)

Število računskih operacij (+, −, ·, :) za izračun LU razcepa z delnim pivotiranjem je $\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2)$.

Dodatno delo pri LU razcepu z delnim pivotiranjem je $\mathcal{O}(n^2)$ primerjanj in menjav.

Reševanje $Ax = b$ prek LU razcepa z delnim pivotiranjem:

1. Izračunamo $PA = LU$. Cena: $\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2)$.
2. Rešimo $Ly = Pb$ s premo substitucijo. Cena: $n^2 - n$.
3. Rešimo $Ux = y$ z obratno substitucijo. Cena: n^2 .

Izrek (Obstoj LU razcepa z delnim pivotiranjem)

Za $n \times n$ matriko A sta naslednji trditvi ekvivalentni:

1. *LU razcep matrike A z delnim pivotiranjem obstaja.*
2. *Matrika A je obrnljiva.*

$Ax = b$ prek LU razcepa z delnim pivotiranjem

Primer.

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & -4 \\ -4 & -1 & -4 & 7 \\ 2 & 3 & 5 & -3 \\ -2 & -2 & -7 & 9 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 8 \\ -14 \\ 7 \\ -16 \end{pmatrix}.$$

$$1. \quad L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{3}{5} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{5} & -\frac{1}{8} & 1 \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} -4 & -1 & -4 & 7 \\ 0 & \frac{5}{2} & 3 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{16}{5} & \frac{58}{10} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{8} \end{pmatrix},$$
$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

2. Rešimo $Ly = Pb$ in dobimo $y = (-14 \quad 0 \quad -9 \quad -\frac{1}{8})^T$.

3. Rešimo $Ux = y$ in dobimo $x = (1 \quad -1 \quad 1 \quad -1)^T$.

LU razcep z delnim pivotiranjem: [koda](#)

Primer: [koda](#)

LU s kompletnim pivotiranjem

Pri kompletnem pivotiranju pred eliminacijo v j -tem stolpcu poiščemo element z največjo absolutno vrednostjo v podmatriki $A(j : n, j : n)$ in nato izvedemo ustrezni menjavi vrstic in stolpcev.

Dodatno delo pri LU razcepu s **kompletnim pivotiranjem** je $\mathcal{O}(n^3)$ primerjanj in menjav. Torej je skupna cena **precej dražja** od LU razcepa z delnim pivotiranjem. Ker bomo videli, da je LU razcep z delnim pivotiranjem statistično numerično stabilen, se v praksi kompletno pivotiranje **redko uporablja**.

Stabilnost LU razcepa matrike A

Sistem $Ax = b$ smo rešili prek LU razcepa in dobili približek \hat{x} . Računali smo v treh korakih:

1. *Izračun LU razcepa:* $A + E = \hat{L}\hat{U}$.
2. *Prema substitucija:* $\hat{L}\hat{y} = b$.
3. *Obratna substitucija:* $\hat{U}\hat{x} = \hat{y}$.

Izkaže se, da je (teoretično) nestabilen samo prvi korak.

Spomnimo se, da z u označujemo osnovno zaokrožitveno napako 2^{-m} kjer je m dolžina mantise. Z $|A| = [|a_{ij}|]_{i,j}$ označimo matriko absolutnih vrednosti vhodov matrike $A = [a_{ij}]_{i,j}$

Izrek (Ocena absolutne napake pri izračunu LU razcepa)

Naj bo $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ obrnljiva matrika, pri kateri se izvede LU razcep brez pivotiranja. Za izračunani matriki \hat{L}, \hat{U} velja $A = \hat{L}\hat{U} + E$, kjer je

$$|E| \leq 3(n-1)u \left(|A| + |\hat{L}||\hat{U}| \right) + \mathcal{O}(u^2).$$

Stabilnost LU razcepa matrike A

Označimo z $\|X\|_\infty$ največjo vsoto absolutnih vrednosti neke vrstice matrike X .

Izrek (Ocena relativne napake pri izračunu LU razcepa)

Pri LU razcepu z delnim pivotiranjem velja ocena relativne napake:

$$\frac{\|E\|_\infty}{\|A\|_\infty} \leq 3(n-1)u + 3(n-1)nu \cdot \frac{\|\hat{U}\|_\infty}{\|A\|_\infty} + \mathcal{O}(u^2).$$

Pivotna rast

Pivotna rast matrike A je definirana kot

$$\rho(A) := \frac{\max_{i,j} |\hat{u}_{i,j}|}{\max_{i,j} |a_{i,j}|}.$$

Velja

$$\|\hat{U}\|_{\infty} \leq n\rho(A)\|A\|_{\infty}.$$

Trditev

Pri delnem pivotiranju je pivotna rast omejena z 2^{n-1} .

Dokaz. Velja namreč $|\ell_{ij}| \leq 1$, a_{ij} pa na vsakem od največ $n - 1$ korakov izračunamo kot

$$a_{ij} = a_{ij} - \ell_{ik} a_{kj}.$$

Torej se absolutna vrednost največjega elementa v matriki kvečjemu podvoji.

Pivotna rast pri delnem pivotiranju

Žal pa za vsak n obstajajo matrice s pivotno rastjo 2^{n-1} , tako da LU razcep z delnim pivotiranjem **teoretično ni stabilen**.

Primer

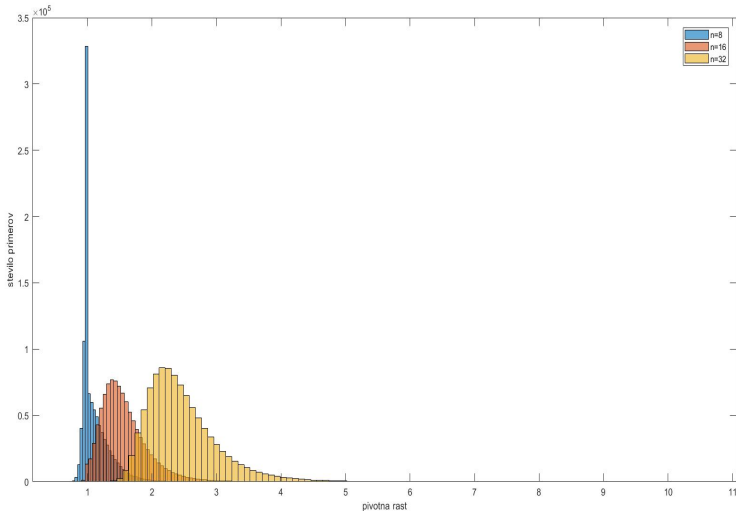
Matrika

$$A_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ -1 & 1 & \ddots & \vdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ -1 & \cdots & \cdots & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

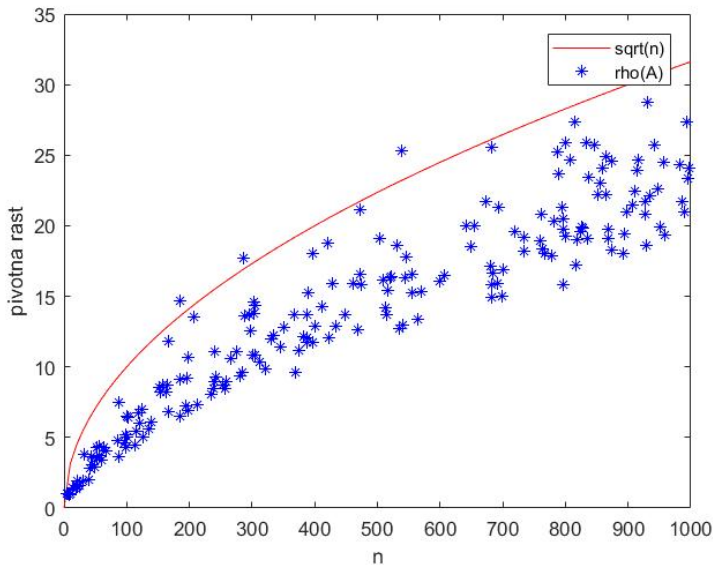
ima pivotno rast 2^{n-1} .

Statistično pa velja, da je pričakovana vrednost pivotne rasti $\mathcal{O}(n^{2/3})$, tako da LU razcep z delnim pivotiranjem **v praksi je obratno stabilen**.

Verjetnostne porazdelitve slučajne spremenljivke ρ , generirane z milijon naključnimi matrikami velikosti $n \times n$ (tj. vsak vhod naključen element iz enakomerne zvezne porazdelitve na intervalu $[0, 1]$):



Pivotna rast 200 naključnih matrik velikosti $n \times n$ (tj. vsak vhod naključen element iz enakomerne zvezne porazdelitve na intervalu $[0, 1]$):



Iterativne metode

$$Ax = b$$

- ▶ Jacobijeva iteracija
- ▶ Gauss-Seidlova iteracija
- ▶ SOR iteracija
- ▶ Veliko bolj specialnih metod (ki jih ne bomo obravnavali):
Pospešitev Čebiševa, SSOR, Metode podprostorov
Krilova, Metoda konjugiranih gradientov, Hitra Fourierova
transformacija, Ciklična redukcija, Večmrežna metoda.

Iterativne metode za reševanje $Ax = b$

Doslej smo iskali **točno rešitev** x^* sistema

$$Ax = b. \quad (2)$$

Odslej nas bodo zanimali samo **približki** \hat{x} točnih rešitev x^* .

Naprej si bomo izbrali $\epsilon > 0$ in iskali \hat{x} , ki zadošča pogoju

$$\|\hat{x} - x^*\| \leq \epsilon.$$

Prednosti iterativnih metod pred direktnimi:

- ▶ Če je matrika A velika in ima veliko ničel, je bolje uporabiti iterativne metode.
- ▶ Ko je rezultat znotraj vnaprej predpisane natančnosti, lahko končamo računanje. Pri direktnih metodah tega vpliva nimamo.

Recimo, da ugibamo, kaj bi lahko bila prava rešitev sistema (2)

$$x^{(0)} \approx x$$

Kako izboljšati $x^{(0)}$?

Idealno bi prišteli pravi razliko:

$$x^{(1)} = x^{(0)} + (x^* - x^{(0)}),$$

kar lahko drugače zapišemo kot

$$\begin{aligned} x^{(1)} &= x^{(0)} + (x^* - x^{(0)}) \\ &= x^{(0)} + (A^{-1}b - x^{(0)}) \\ &= x^{(0)} + A^{-1} \underbrace{(b - Ax^{(0)})}_{r^{(0)}}. \end{aligned}$$

Toda ta metoda ni smiselna, saj bi morali izračunati A^{-1} .

Kaj pa, če bi znali aproksimirati A^{-1} ?

Recimo, da je približek

$$Q^{-1} \approx A^{-1}$$

poceni za izračunati. Potem izračunamo

$$x^{(1)} = x^{(0)} + Q^{-1}r^{(0)}.$$

Nadaljujemo z $k = 2, 3, \dots$

$$x^{(k)} = x^{(k-1)} + Q^{-1} \underbrace{(b - Ax^{(k-1)})}_{r^{(k-1)}}. \quad (3)$$

Algoritem iterativnih metod

```
1  $A$  je dana  $n \times n$  matrika, ki jo aproksimiramo z  
   matriko  $Q$ , in  $n \times 1$  vektor  $b$ .  
2 Izberi zacetni priblizek  $x = x^{(0)}$ , toleranco  
   dovoljene relativne napake  $tol$  in maksimalno  
   stevilo  $k_{max}$  korakov iteracije.  
3  
4  $x^{(nov)} = \infty$   
5 for  $k = 1$  to  $k_{max}$   
6    $r = b - Ax$   
7   if  $\frac{\|x^{(nov)} - x\|}{\|x\|} \leq tol$ , stop  
8   else  
9      $x = x^{(nov)}$   
10     $x^{(nov)} = x + Q^{-1}r$   
11  end  
12  $x = x^{(nov)}$ 
```

Jacobijeva iteracija

Aproksimiramo $A = [a_{ij}]_{i,j}$ z diagonalno matriko

$$D = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{22} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Če pišemo

$$A = S + D + Z, \quad (4)$$

kjer je S strogo spodnjetrokotna matrika in Z strogo zgornjetrikotna matrika, potem (3) postane

$$\begin{aligned} x^{(k)} &= x^{(k-1)} + D^{-1}(b - Sx^{(k-1)} - Dx^{(k-1)} - Zx^{(k-1)}) \\ &= x^{(k-1)} + D^{-1}b - D^{-1}Sx^{(k-1)} - x^{(k-1)} - D^{-1}Zx^{(k-1)} \\ &= D^{-1}(b - Sx^{(k-1)} - Zx^{(k-1)}). \end{aligned} \quad (5)$$

Pišimo

$$x^{(j)} = \begin{pmatrix} x_1^{(j)} & x_2^{(j)} & \dots & x_n^{(j)} \end{pmatrix}^T$$

Po komponentah (5) pomeni

$$\boxed{x_i^{(k)} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} x_j^{(k-1)} \right)}. \quad (6)$$

Torej vsak preskok (iz $k - 1$ na k) potrebuje $O(n)$ operacij za vsak element novega vektorja.

Računska zahtevnost: Če je v vsaki vrstici vsi razen največ m koeficientov a_{ij} neničelnih, potem za vsak korak iteracije potrebujemo $O(mn)$ operacij.

[Koda algoritma: klik](#)

[Primer 1: klik](#)

[Primer 2: klik](#)

Gauss-Seidlova iteracija

Naj bo $A = [a_{ij}]_{i,j} = S + D + Z$ kot v (4). A aproksimiramo s spodnjetrokotno matriko

$$S + D = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,n-1} & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Potem (3) postane

$$\begin{aligned} x^{(k)} &= x^{(k-1)} + (D + S)^{-1}(b - (S + D)x^{(k-1)} - Zx^{(k-1)}) \\ &= x^{(k-1)} + (D + S)^{-1}b - x^{(k-1)} - (D + S)^{-1}Zx^{(k-1)} \quad (7) \\ &= (D + S)^{-1}(b - Zx^{(k-1)}), \end{aligned}$$

Pomnožimo (7) z leve z $D + S$ in dobimo

$$(D + S)x^{(k)} = b - Zx^{(k-1)}. \quad (8)$$

Odštejemo $Sx^{(k)}$ od obeh strani (8) in dobimo

$$Dx^{(k)} = b - Zx^{(k-1)} - Sx^{(k)}$$

OZ.

$$x^{(k)} = D^{-1}(b - Zx^{(k-1)} - Sx^{(k)}). \quad (9)$$

Po komponentah (9) pomeni

$$x_i^{(k)} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=1, j < i}^n a_{ij} x_j^{(k)} - \sum_{j=1, j > i}^n a_{ij} x_j^{(k-1)} \right). \quad (10)$$

Računska zahtevnost: Če je v vsaki vrstici vsi razen največ m koeficientov a_{ij} neničelnih, potem za vsak korak iteracije potrebujemo $O(mn)$ operacij.

[Koda algoritma: klik](#) [Primer 1: klik](#) [Primer 2: klik](#)

Razlika v primerjavi z Jacobijevo metodo je ta, da so popravki shranjeni v obstoječem vektorju in ne potrebujemo še enega dodatnega vektorja. Tako pridobimo precej prihranka v spominu.

SOR iteracija

Ideja **ekstrapolirana Gauss-Seidlove iteracija** ali **SOR(w)**, kjer je $w \in \mathbb{R}$ **relaksacijski parameter**, je pospešiti GS–iteracijo tako, da nov približek računamo kot uteženo povprečje

$$x_i^{(k)} = (1 - w)x_i^{(k-1)} + wx_i^{(k)},$$

pri čemer $x_i^{(k)}$ na desni strani enačbe izračunamo iz predpisa za GS–iteracijo:

$$x_i^{(k)} = (1 - w)x_i^{(k-1)} + \frac{w}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j < i}^n a_{ij}x_j^{(k)} - \sum_{j > i} a_{ij}x_j^{(k-1)} \right).$$

Koda algoritma: [klik](#)

Primer 1: [klik](#)

Primer 2: [klik](#)

Konvergenčni kriteriji

Matrika je **krepeko vrstično diagonalno dominantna (kVDD)**, če za vsak i velja

$$|a_{ii}| > \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}|.$$

Diagonalno dominantne matrike velikokrat nastopajo pri reševanju parcialnih diferencialnih enačb z metodo diskretizacije.

Nekaj konvergenčnih rezultatov:

1. Jacobijeva in GS iteracija za kVDD matrike vedno konvergirata, ne glede na izbiro začetnega približka $x^{(0)}$. GS je hitrejša.
2. V primeru enakosti v kVDD pogojih za konvergenco Jacobija in GS potrebujemo dodatno lastnost matrike A - **nerazcepnost**.
3. Potreben pogoj za konvergenco $SOR(w)$ je $0 < w < 2$. Za pozitivno definitno matriko A je pogoj tudi zadosten.
4. Primerjavo hitrosti konvergence metod lahko naredimo za matrike A , katerih graf sosednosti je dvodelen. Hkrati lahko za take s formulo določimo optimalen w v $SOR(w)$.

Reševanje nelinearnih enačb in optimizacija

$$* f(x) = 0$$

$$* f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, \dots, n$$

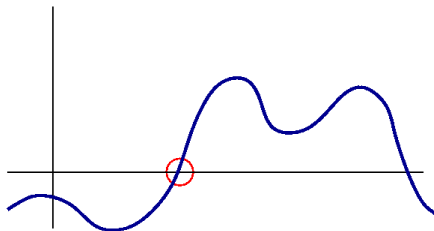
$$* \min\{f(x) : x \in K \subseteq \mathbb{R}^n\}$$

- ▶ Ena enačba v eni spremenljivki: Bisekcija, tangentna metoda, sekantna metoda, regula falsi, navadna iteracija
- ▶ Sistem n enačb v n spremenljivkah: Newtonova metoda, Broydenova metoda
- ▶ Optimizacija: Gradientni spust

Motivacija

Problem: Naj bo dana funkcija $f(x)$. Poišči x , ki zadošča

$$f(x) = 0.$$

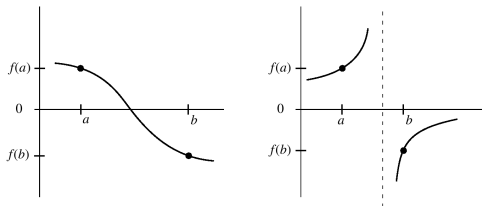


- ▶ **Nelinearni sistemi niso tako enostavno rešljivi** kot sistemi linearnih enačb.
- ▶ Ničel polinoma stopnje 5 ne moremo zapisati analitično.
- ▶ Kako reševati take probleme? Z **iterativnim postopkom**, pri čemer se rešitvam čim bolj približamo.

Osnovna strategija reševanja

1. Skiciraj funkcijo.

- ▶ Postavimo **začetno domnevo**, kaj je lahko ničla.
- ▶ **Ničla** x gotovo **obstaja** na intervalu $[a, b]$, če imata $f(a)$ in $f(b)$ **različna predznaka** in je funkcija f zvezna na $[a, b]$.
- ▶ Toda: **Sprememba predznaka funkcije ne pomeni vedno**, da je na tem intervalu ničle, kajti lahko imamo na intervalu singularnost:



- ## 2. Začnemo z **začetno domnevo** in uporabimo nek **iteracijski algoritem**.

Konvergenčni kriteriji za x

Zaustavitveni kriterij je odvisen od narave problema, ki ga rešujemo:

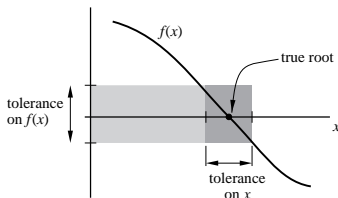
- ▶ Lahko nas zanima, kdaj velja

$$|x_k - x_{k-1}| < \text{toleranca}.$$

- ▶ Lahko pa nas zanima, kdaj velja

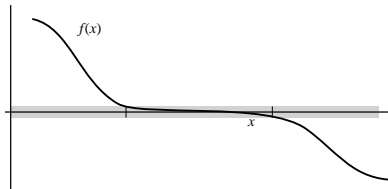
$$|f(x_k)| < \text{toleranca}.$$

- ▶ Še najboljše pa je zahtevati izpolnjenost **obeh pogojev** hkrati.

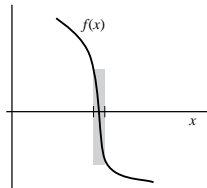


Primerjava obeh konvergenčnih kriterijev

Če je $f'(x)$ majhen v okolici ničle, je lažje zadostiti toleranci na funkcijsko vrednost.



Če je $f'(x)$ velik v bližini ničle, je možno zadostiti toleranci na dolžino intervala, četudi je $|f(x)|$ še vedno velik.



Povezava med obema kriterijama

Vprašanje: Kako sta kriterija na x in $f(x)$ povezana med sabo?

Ko x_a in x_b konvergirata proti x^* , gre razmerje

$$\frac{f(x_b) - f(x_a)}{x_b - x_a} \quad \text{proti} \quad f'(x^*)$$

Zato lahko pričakujemo, da velja

$$|f(x_b) - f(x_a)| \approx |f'(x^*)| |x_b - x_a|,$$

ko x_a in x_b konvergirata proti x^* .

Zaključek: $|f'(x^*)|$ določa povezavo med kriterijema.

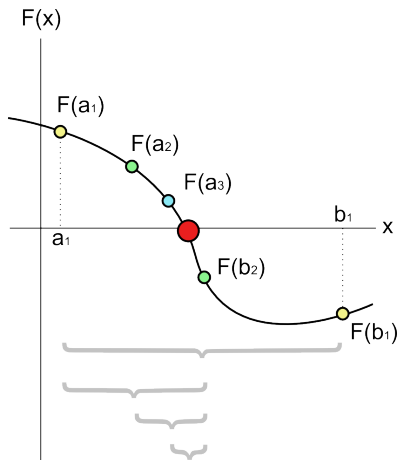
Bisekcija

Razpolovišče začetnega intervala $[a, b]$ je točka

$$x_m = \frac{1}{2}(a + b).$$

Postopek:

1. Poišči razpolovišče.
2. Izmed dveh možnih intervalov izberi tistega, kjer ima funkcija različno predznačeni krajišči.
3. Nadaljujemo s prvim korakom.
4. Ustavimo se, ko je interval krajši od naprej predpisane tolerance.



Algoritem za bisekcijo

```
1  zacetni podatki:   $f$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\text{tol}$ 
2  for  $k = 1, 2, \dots$ 
3       $x_m = a + (b - a)/2$ 
4      if  $\text{sign}(f(x_m)) = \text{sign}(f(a))$ 
5           $a = x_m$ 
6      else
7           $b = x_m$ 
8      end
9      if  $|b - a| < \text{tol}$ , stop
10 end
```

Algoritem: klik

Primer 1: klik

Primer 2: klik

Hitrost konvergence in računska zahtevnost

Naj bo δ_n velikost intervala po n -tem koraku bisekcije. Potem velja

$$\delta_0 = b-a, \quad \delta_1 = \frac{1}{2}\delta_0, \quad \delta_2 = \frac{1}{2}\delta_1 = \frac{1}{4}\delta_0, \quad \dots, \quad \delta_n = \left(\frac{1}{2}\right)^n \delta_0$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\delta_n}{\delta_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n = 2^{-n} \quad \text{ali} \quad n = \log_2 \left(\frac{\delta_n}{\delta_0} \right)$$

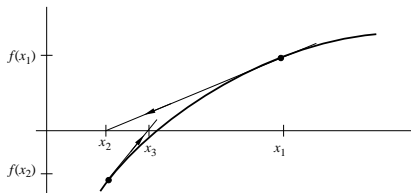
n	$\frac{\delta_n}{\delta_0}$	število izračunov funkcijskih vrednosti
5	3.1×10^{-2}	7
10	9.8×10^{-4}	12
20	9.5×10^{-7}	22
30	9.3×10^{-10}	32
40	9.1×10^{-13}	42
50	8.9×10^{-16}	52

Tangentna metoda

Iteracija:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}. \quad (11)$$

Izpeljava:



Pri trenutnem približku x_k uporabimo funkcijsko vrednost $f(x_k)$ in odvod $f'(x_k)$, da izračunamo naslednji približek. Enačba tangente na krivuljo v točki $(x_k, f(x_k))$ je

$$y = f(x_k) + (x - x_k) f'(x_k).$$

Ker je cilj najti x , tako da je $f(x) = 0$, dobimo

$$0 = f(x_k) + (x_{k+1} - x_k) f'(x_k)$$

in izrazimo x_{k+1} .

```

1  zacetni podatki:  funkcija f, priblizek  $x_1$ 
2  for  $k = 2, 3, \dots$ 
3       $x_k = x_{k-1} - f(x_{k-1})/f'(x_{k-1})$ 
4      if  $x_k$  znotraj tolerance, stop
5  end

```

Algoritem: klik

Primer 1: klik

Primer 2: klik

Lastnosti tangentne metode:

- Konvergira precej hitreje kot bisekcija - **red konvergence je vsaj 2**, tj. na vsakem koraku se število točnih decimalok podvoji.
- Zahteva **analitično formulo za $f'(x)$** - če tega ne poznamo, lahko uporabimo sekantno metodo (sledi).
- **Ni nujno, da konvergira**, saj približki pobegnejo:

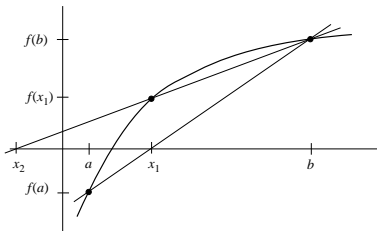


Sekantna metoda

Iteracija:

$$x_{k+1} = x_k - f(x_k) \left[\frac{x_k - x_{k-1}}{f(x_k) - f(x_{k-1})} \right] \quad (12)$$

Izpeljava:



S pomočjo dveh zaporednih približkov x_{k-1} in x_k , za nov približek vzamemo x -koordinato presečišča sekantne skozi točki $(x_k, f(x_k))$ in $(x_{k+1}, f(x_{k+1}))$ z abscisno osjo.

Naj bosta dana

x_k = trenutni približek za ničlo, x_{k-1} = prejšnji približek za ničlo.

Aproksimiramo prvi odvod z naklonom sekante skozi točki $(x_k, f(x_k))$ in $(x_{k+1}, f(x_{k+1}))$:

$$f'(x_k) \approx \frac{f(x_k) - f(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}}$$

Vstavimo to aproksimacijo v (11) in dobimo (12).

```
1  zacetni podatki:  f, x1, x2
2  for k = 2, 3...
3      xk+1 = xk - f(xk)(xk - xk-1)/(f(xk) - f(xk-1))
4      if je izpolnjen tolerancni pogoj, stop
5  end
```

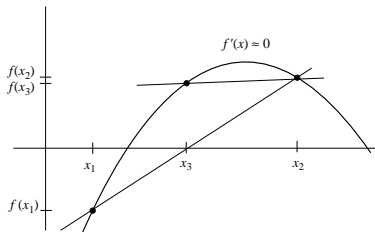
[Algoitem: klik](#)

[Primer 1: klik](#)

[Primer 2: klik](#)

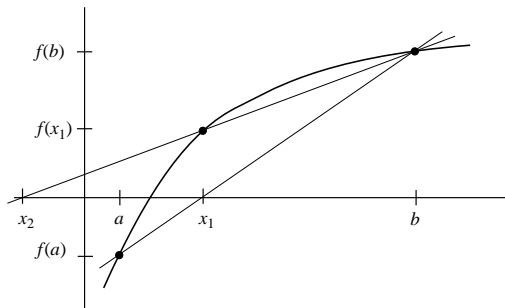
Lastnosti sekantne metode:

- ▶ Konvergenca je podobna tisti pri tangentni metodi. **Red je ≈ 1.62** , tj. na vsakem koraku se število točnih decimalk pomnoži z 1.62.
- ▶ **Ne potrebujemo odvoda $f'(x)$.**
- ▶ **Naslednji približek ne ostane nujno** znotraj začetnega intervala:



Vidimo, da bo nov približek x_{k+1} , daleč vstran od prejšnjega, če bo $f(x_k) \approx f(x_{k-1})$.

Metoda regula falsi



Metoda regula falsi je **hibrid bisekcije in sekantne metode**:

- ▶ Na vsakem koraku namreč izračunamo s pomočjo dveh zaporednih približkov a in b nov približek kot x -koordinato presečišča sekantne skozi točki $(a, f(a))$ in $(b, f(b))$ z abscisno osjo.
- ▶ Za nova približka a, b vzamemo interval, kjer je funkcija različno predznačena.

```

1  zacetni podatki:  a,b
2  for k = 2,3...
3      c = b - f(b)(b - a)/(f(b) - f(a))
4      if f(a)f(c) < 0
5          b = c
6      else
7          a = c
8      if je izpolnjen tolerancni pogoj, stop
9  end

```

Algoritem: klik

Primer 1: klik

Primer 2: klik

Lastnosti metode regula falsi:

- Konvergenca je počasnejša kot pri sekantni.
- Naslednji približek vedno ostane znotraj začetnega intervala.

Metode fiksne točke

Metodo fiksne točke dobimo tako, da enačbo

$$f(x) = 0$$

preoblikujemo v ekvivalentno enačbo

$$g(x) = x.$$

Točki x pravimo **negibna točka** funkcije g .

Algoritem:

1. Izberi začetni približek x_0 .
2. Ponavljaj iteracijo $x_{k+1} = g(x_k)$, dokler tolerančni kriterij ni izpolnjen.

Algoritem: klik

Primer 1: klik

Primer 2: klik

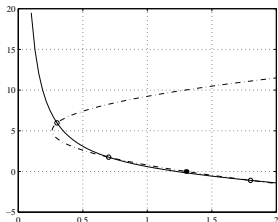
Primer 3: klik

Primer 4: klik

fzero funkcija

fzero je hibridna metoda v Matlabu, ki vključuje **bisekcijo**, **sekantno metodo** in **obratno kvadratno interpolacijo**.

Pri obratni kvadratni interpolaciji se išče presečišče parabole skozi tri točke $(x_0, f(x_0))$, $(x_1, f(x_1))$, $(x_2, f(x_2))$, z x-osjo.



```
1 r = fzero('fun', x0)
```

fzero izbere za naslednji približek

1. Rezultat obratne kvadratne interpolacije, če je le-ta znotraj začetnega intervala.
2. Rezultat sekantne metode, če prvi korak ni izpolnjen.
3. Rezultat bisekcije, če tudi drugi korak ni izpolnjen.

Sistemi nelinearnih enačb

Rešujemo sistem nelinearnih enačb:

$$f_1(x_1, \dots, x_n) = 0,$$

$$f_2(x_1, \dots, x_n) = 0,$$

$$\vdots$$

$$f_n(x_1, \dots, x_n) = 0.$$

Če definiramo

$$\underline{f} := (f_1, \dots, f_n) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n,$$

potem lahko sistem na kratko zapišemo kot

$$\underline{f}(\underline{x}) = 0.$$

Newtonova metoda: posplošitev tangentne metode,
Jacobijeva iteracija: posplošitev metode fiksne točke.

Newtonova iteracija

Pri Newtonovi iteraciji tvorimo zaporedje približkov

$$\underline{x}^{(r+1)} = \underline{x}^{(r)} - J_{\underline{f}}(\underline{x}^{(r)})^{-1} \underline{f}(\underline{x}^{(r)}),$$

kjer je $J_{\underline{f}}(\underline{x}^{(r)})$ matrika prvih odvodov preslikave \underline{f} , ki ji pravimo **Jacobijeva matrika**:

$$J_{\underline{f}}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} (\underline{x}).$$

V praksi pa ne računamo inverza $J_{\underline{f}}(\underline{x}^{(r)})^{-1}$, ampak namesto tega rešimo sistem

$$\begin{aligned} J_{\underline{f}}(\underline{x}^{(r)}) \Delta \underline{x}^{(r)} &= -\underline{f}(\underline{x}^{(r)}), \\ \underline{x}^{(r+1)} &= \underline{x}^{(r)} + \Delta \underline{x}^{(r)}. \end{aligned}$$

Algoritem: [klik](#)

Primer: [klik](#)

Jacobijeva iteracija

1. Sistem $\underline{f}(\underline{x}) = 0$ preoblikujemo v ekvivalentno obliko

$$\underline{g}(\underline{x}) = \underline{x},$$

kjer je $\underline{g} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$.

2. Izberemo začetni približek

$$\underline{x}^{(0)} \in \mathbb{R}^n.$$

3. Računamo zaporedje približkov

$$\underline{x}^{(r+1)} = \underline{g}(\underline{x}^{(r)}).$$

Algoritem: [klik](#)

Primer: [klik](#)

Variacijske metode

Za predstavljene metode moramo imeti **dober začetni približek**, kajti v nasprotnem nimamo zagotovljene konvergence. Tega lahko dobimo z uporabo **variacijskih metod**, tj. metod za iskanje lokalnih minimumov. Povezavo med iskanjem ničel in iskanjem lokalnih ekstremov podaja naslednja trditev.

Trditev (Pretvorba iskanja ničel funkcije na iskanje globalnih minimumov)

Ničle funkcije $f(\underline{x})$ so globalni minimumi funkcije

$$g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad g(\underline{x}) = \|f(\underline{x})\|^2 = \sum_{i=1}^n (f_i(\underline{x}))^2.$$

Vprašanje: Kako iščemo lokalne ekstreme neke dvakrat zvezno odvedljive funkcije $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$?

Iskanje lokalnih ekstremov g

- ▶ **Minimum** funkcije lahko iščemo **iterativno** tako, tekoči približek $\underline{x}^{(r)}$ popravimo v neki smeri \underline{v}_r :

$$\underline{x}^{(r+1)} = \underline{x}^{(r)} + \lambda_r \underline{v}_r, \quad (13)$$

kjer je λ_r neko realno število. Veljalo bo:

$$g(\underline{x}^{(r+1)}) < g(\underline{x}^{(r)}).$$

Imamo več možnosti za **izbiro smeri** \underline{v}_r v (13):

- ▶ **Splošna metoda spusta:** Izberemo katero koli smer, ki ni pravokotna na $\nabla g(\underline{x})$.
- ▶ **Metoda najhitrejšega spusta:** Za smer izberemo $\underline{v}_r = -\nabla g(\underline{x})$.
- ▶ **Metoda koordinatnega spusta:** Za smeri zaporedoma izbiramo koordinatne smeri $\underline{e}_1, \underline{e}_2, \dots, \underline{e}_n$.

Po izbiri smeri moramo najti še λ_r v (13): Definiramo

$$q(\lambda) = g(\underline{x}^{(r)} + \lambda \underline{v}_r).$$

Uporabimo eno od naslednjih metod:

- ▶ **Metodo največjega spusta:** Rešimo enačbo $q'(\lambda) = 0$ z eno od metod za reševanje neenačb v eni spremenljivki.
- ▶ **Metoda tangentnega spusta:** Poiščemo presečišče tangente na $y = q(\lambda)$ v točki $\lambda = 0$ z osjo x .
- ▶ **Metoda paraboličnega spusta:** S tangento določimo α , nato pa čez točke $(0, q(0))$, $(\alpha/2, q(\alpha/2))$, $(\alpha, q(\alpha))$ potegnemo parabolo in za λ izberemo njen minimum.

Algoritem: [klik](#)

Primer 1: [klik](#)

Primer 2: [klik](#)

Uporaba metod za iskanje ničel pri iskanju ekstremov

Trditev (Pretvorba iskanja lokalnih ekstremov ba iskanje ničel sistema)

Lokalni ekstremi funkcije $g(\underline{x})$ so rešitve sistema

$$\nabla g(\underline{x}) = \left[\frac{\partial g(\underline{x})}{\partial x_1} \quad \dots \quad \frac{\partial g(\underline{x})}{\partial x_n} \right] = 0.$$

Vrsta ekstrema. O vrsti in obstoju ekstrema v stacionarni točki odloča **Hessejeva matrika**

$$H_g(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g(\underline{x})}{\partial x_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 g(\underline{x})}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial^2 g(\underline{x})}{\partial x_n \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 g(\underline{x})}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}.$$

Če ima $H_g(\underline{x})$ same **pozitivne** lastne vrednosti (oz. **negativne** lastne vrednosti), je v \underline{x} **lokalni minimum** (oz. **lokalni maksimum**).

Algoritem in primeri: [klik](#)

Polinomska interpolacija in aproksimacija

* Poišči polinom p , da je
 $p(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, n.$

* Poišči polinom p stopnje k , da je
 $\sum_{i=0}^n \|f(x_i) - p(x_i)\|^2$ minimalno.

- ▶ Interpolacija v standardni bazi
- ▶ Interpolacija v Lagrangeovi bazi
- ▶ Interpolacija v Newtonovi bazi
- ▶ Polinomska aproksimacija

Uvod v interpolacijo in aproksimacijo

Cilj: Aproksimirati želimo funkcijo $f(x)$ z **lažjo** funkcijo $g(x)$.

Tipi aproksimativnih funkcij: Polinomi, odsekoma polinomske funkcije, racionalne funkcije, trigonometrične funkcije, eksponentna funkcija, itd.

Vprašanje: Kako aproksimirati $f(x)$ z $g(x)$? V kakšnem smislu je aproksimacija dobra? Imamo več kriterijev:

1. **Interpolacija:** $g(x)$ mora imeti iste vrednosti kot $f(x)$ na dani množici točk.
2. **Metoda najmanjših kvadratov:** $g(x)$ se mora čim bolj prilegati $f(x)$ v smislu 2-norme, tj.

$$\int_a^b |f(t) - g(t)|^2 dt \quad \text{mora biti čim manjše.}$$

3. **Aproksimacija Čebiševa:** $g(x)$ se mora čim bolj prilegati $f(x)$ v smislu supremum norme, tj.

$$\text{minimizirati želimo} \quad \max_{t \in [a, b]} |f(t) - g(t)|.$$

Interpolacijski polinom v standardni bazi

Dani so naslednji podatki:

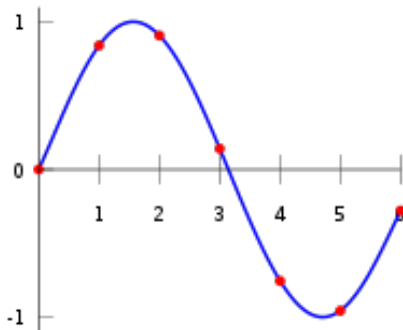
$n + 1$ točk x_0, \dots, x_n in vrednosti y_0, \dots, y_n .

Iščemo polinom

$$p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n,$$

stopnje n , ki zadošča

$$p(x_0) = y_0, \quad p(x_1) = y_1, \quad \dots, \quad p(x_n) = y_n. \quad (14)$$



Dobimo sistem

$$\begin{aligned}a_0 + a_1 x_0 + a_2 x_0^2 + \cdots + a_n x_0^n &= y_0, \\a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + \cdots + a_n x_1^n &= y_1, \\&\vdots \\a_0 + a_1 x_n + a_2 x_n^2 + \cdots + a_n x_n^n &= y_n.\end{aligned}\tag{15}$$

Polinomu $p(x)$ pravimo **interpolacijski polinom**.

V matrični obliki lahko sistem (15) zapišemo kot

$$Ax = b,$$

kjer je

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \cdots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^n \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^n \\ \vdots & & & & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^n \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}.$$

Matriki A pravimo **Vandermondova matrika** na točkah x_0, \dots, x_n , velja pa

$$\det(A) = \prod_{0 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j).$$

Posledica (O obstoju in enoličnosti interpolacijskega polinoma)

- ▶ Če so točke x_i , $i = 0, \dots, n$, paroma različne, ima sistem enolično rešitev.
- ▶ Polinom stopnje največ n skozi $n + 1$ točk je en sam.

Vprašanje:

1. Kako računsko zahtevno je reševanje sistema (15)?
2. Ali je sistem (15) numerično občutljiv?

Odgovor:

1. Računanje interpolacijskega polinoma s pomočjo Vandermondove matrike ni poceni ($\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2)$ operacij).
2. Sistem je lahko že pri majhnem številu točk (npr. 10) zelo občutljiv za numerične napake.

Interpolacijski polinom: Lagrangeova in Newtonova baza

Namesto uporabe **standardne baze**

$$1, x, x^2, \dots, x^n$$

je bolje uporabiti eno od naslednjih baz:

► **Lagrangeova baza:**

$$\frac{(x-x_1)\cdots(x-x_n)}{(x_0-x_1)\cdots(x_0-x_n)}, \frac{(x-x_0)(x-x_2)\cdots(x-x_n)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)\cdots(x_1-x_n)}, \dots, \frac{(x-x_0)\cdots(x-x_{n-1})}{(x_n-x_0)\cdots(x_n-x_{n-1})}.$$

► **Newtonova baza:**

$$1, x - x_0, (x - x_0)(x - x_1), \dots, (x - x_0) \cdots (x - x_{n-1}).$$

Obe zgornji bazi sta stabilni, Newtonova pa je cenejša za računanje v primeru dodajanja novih interpolacijskih točk.

Interpolacijski polinom v Lagrangeovi bazi

Primer

Poišči polinom najnižje stopnje, ki interpolira naslednji točki:

$$\begin{array}{c|cc} x & 1.4 & 1.25 \\ \hline y & 3.7 & 3.9 \end{array}.$$

Dobimo

$$p_1(x) = \left(\frac{x - 1.25}{1.4 - 1.25} \right) 3.7 + \left(\frac{x - 1.4}{1.25 - 1.4} \right) 3.9 = 3.7 - \frac{4}{3}(x - 1.4)$$

Kaj smo naredili? Zapisali smo $p(x)$ v obliki

$$p(x) = \underbrace{\left(\frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \right)}_{\substack{\ell_0(x), \\ \ell_0(x_0)=1, \ell_0(x_1)=0}} y_0 + \underbrace{\left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)}_{\substack{\ell_1(x), \\ \ell_1(x_0)=0, \ell_1(x_1)=1}} y_1$$

Danih imamo $n + 1$ točk

$$(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n).$$

Cilj je najti **Lagrangeove bazne polinome** stopnje največ n , ki zadoščajo

$$\ell_i(x_j) = \begin{cases} 0, & j \neq i, \\ 1, & j = i. \end{cases}$$

Torej je

$$\ell_i(x) = \underbrace{C_i}_{\text{konstanta}} \cdot \prod_{j \neq i} (x - x_j), \quad i = 0, \dots, n.$$

i -ti Lagrangeov bazni polinom je

$$\ell_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}, \quad i = 0, \dots, n.$$

Interpolacijski polinom v Lagrangeovi obliki je

$$p(x) = \sum_{i=0}^n \ell_i(x) y_i$$

Primer

Poišči enačbo parabole v Lagrangeovi obliki, ki gre skozi točke

$$(1, 6), (-1, 0), (2, 12).$$

$$\begin{aligned}\ell_0(x) &= \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} = \frac{(x+1)(x-2)}{(2)(-1)} \\ \ell_1(x) &= \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} = \frac{(x-1)(x-2)}{(-2)(-3)} \\ \ell_2(x) &= \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} = \frac{(x-1)(x+1)}{(1)(3)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_2(x) &= y_0\ell_0(x) + y_1\ell_1(x) + y_2\ell_2(x) \\ &= -3(x+1)(x-2) + 0(x-1)(x-2) + 4(x-1)(x+1).\end{aligned}$$

Interpolacijski polinom v Newtonovi bazi

Newtonov interpolacijski polinom na točkah $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ je oblike

$$p_n(x) = c_0 + c_1(x - x_0) + c_2(x - x_0)(x - x_1) + \dots \\ + c_n(x - x_0)(x - x_1) \cdots (x - x_{n-1}).$$

Newtonovi bazni polinomi so

$$1, x - x_0, (x - x_0)(x - x_1), \dots, \prod_{i=0}^{n-1} (x - x_i).$$

Newtonova baza proti Lagrangeovi bazi:

Prednost Newtonove baze pred Lagrangeovo je v tem, da se z dodajanjem novih točk x_{n+1}, \dots, x_{n+m} vsi že izračunani koeficienti c_0, \dots, c_n ne spremenijo.

V primeru **zlepkov**, ko imamo v naprej določen n , so Lagrangeovi polinomi primernejši, saj imamo koeficiente že dane.

Interpolirajmo podatke (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) v **Newtonovi obliki**.

Poiskati moramo **koeficiente c_0 , c_1 in c_2** v polinomu

$$p_2(x) = c_0 + c_1(x - x_0) + c_2(x - x_0)(x - x_1).$$

Iz n podatkov dobimo sistem **n linearnih enačb** v neznanih koeficientih:

$$x_0 : \quad y_0 = c_0 + 0 + 0$$

$$x_1 : \quad y_1 = c_0 + c_1(x_1 - x_0) + 0$$

$$x_2 : \quad y_2 = c_0 + c_1(x_2 - x_0) + c_2(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)$$

Ali v matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & x_1 - x_0 & 0 \\ 1 & x_2 - x_0 & (x_2 - x_0)(x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

Ker je matrika **spodnje trikotna**, potrebujemo samo $\mathcal{O}(n^2)$ operacij:

$$\begin{aligned}c_0 &= y_0 = f(x_0), \\c_1 &= \frac{y_1 - c_0}{x_1 - x_0} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}, \\c_2 &= \frac{y_2 - c_0 - (x_2 - x_0)c_1}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_0)} \\&= \frac{f(x_2) - f(x_0) - (x_2 - x_0)\frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_0)} \\&= \frac{\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} - \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}}{x_2 - x_0}.\end{aligned}$$

Deljena diferenca $f[x_0, \dots, x_k]$

Iz zgornjega primera opazimo naslednji vzorec. Pojavljajo se izrazi oblike:

$$\frac{f(x_j) - f(x_i)}{x_j - x_i}. \quad (16)$$

Če izraz (16) označimo z oglatimi oklepaji kot $f[x_i, x_j]$, potem bi na našem primeru dobili:

$$c_0 = f(x_0), \quad c_1 = f[x_0, x_1], \quad c_2 = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0}.$$

To se da posplošiti do **rekurzivnega računanja** polinomov v Newtonovi obliki.

Deljena diferenca $f[x_0, \dots, x_k]$ je vodilni koeficient (pri x^k) interpolacijskega polinoma stopnje največ k , ki se z f ujema v točkah x_0, \dots, x_k .

Izrek (O koeficientih Newtonovega interpolacijskega polinoma)

1. *Koeficienti Newtonovega interpolacijskega polinom p_n stopnje največ n , ki se z f ujema v točkah x_0, \dots, x_n , so enaki*

$$c_i = f[x_0, x_1, \dots, x_i], \quad i = 0, \dots, n.$$

2. *Deljene difference povezuje formula*

$$f[x_0, \dots, x_n] = \frac{f[x_1, \dots, x_n] - f[x_0, \dots, x_{n-1}]}{x_n - x_0}.$$

Če dopuščamo, da se točke x_i v $f[x_0, \dots, x_k]$ ponavljamo, potem želimo, da se interpolacijski polinom ujema s funkcijo še v **odvodu**.

Definiramo

$$f[x_0, \dots, x_k] = \begin{cases} \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!}, & x_0 = x_1 = \dots = x_k, \\ \frac{f[x_1, \dots, x_k] - f[x_0, \dots, x_{k-1}]}{x_k - x_0}, & \text{sicer.} \end{cases}$$

Deljene difference pa lahko bolj učinkovito računamo s pomočjo tabel:

x	$f[\cdot]$	$f[\cdot, \cdot]$	$f[\cdot, \cdot, \cdot]$	$f[\cdot, \cdot, \cdot, \cdot]$
x_0	$f[x_0]$			
		$f[x_0, x_1]$		
x_1	$f[x_1]$		$f[x_0, x_1, x_2]$	
		$f[x_1, x_2]$		$f[x_0, x_1, x_2, x_3]$
x_2	$f[x_2]$		$f[x_1, x_2, x_3]$	
		$f[x_2, x_3]$		
x_3	$f[x_3]$			

Primer. Konstruirajmo deljene difference za podatke $(1, 3)$, $(\frac{3}{2}, \frac{13}{4})$, $(0, 3)$, $(2, \frac{5}{3})$.

Iz tabele deljenih diferenc preberimo interpolacijski polinom.

x	$f[\cdot]$	$f[\cdot, \cdot]$	$f[\cdot, \cdot, \cdot]$	$f[\cdot, \cdot, \cdot, \cdot]$
1	3			
$\frac{3}{2}$	$\frac{13}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	
0	3	$\frac{1}{6}$	$-\frac{5}{3}$	-2
2	$\frac{5}{3}$	$-\frac{2}{3}$		

Interpolacijski polinom je tako

$$p_2(x) = 3 + \frac{1}{2}(x-1) + \frac{1}{3}(x-1)\left(x - \frac{3}{2}\right) - 2(x-1)\left(x - \frac{3}{2}\right)x.$$

Če uporabimo spodnjo stranico trikotnika, pa dobimo $p_2(x)$ izražen v drugi Newtonovi bazi:

$$p_2(x) = \frac{5}{3} - \frac{2}{3}(x-2) - \frac{5}{3}(x-2)x - 2(x-2)x\left(x - \frac{3}{2}\right).$$

Višanje stopnje aproksimacije

... ne izboljša vedno aproksimacije funkcije s polinomom.

Znan je **Rungejev primer**, ko funkcijo

$$f(x) = \frac{1}{1+x^2}$$

interpoliramo na intervalu $[-5, 5]$ z ekvidistantnimi točkami, tj.

$$x_0 = -5, x_1 = -5 + 10 \cdot \frac{1}{n}, \dots, x_{n-1} = -5 + 10 \cdot \frac{n-1}{n}, x_n = 5.$$

Pričakujemo, da se bo interpolacijski polinom **vse bolj prilegal** naši funkciji. Izkaže pa se, da temu ni tako. Če interpoliramo v točkah Čebiševa

$$x_i = 5 \cos \left(\frac{\pi}{2(i-1)(n+1)} \right), \quad i = 0, \dots, n$$

pa z višanjem stopnje res dobimo **boljše prileganje**.

Primer 1: klik Primer 2: klik Primer 3: klik

Napaka polinomske interpolacije

Ponavadi nas zanima razlika med vrednostjo funkcije f in vrednostjo interpolacijskega polinoma p_n v neki točki t :

$$e_n(t) = p_n(t) - f(t).$$

Naj bo q_{n+1} interpolacijski polinom funkcije f skozi točke x_0, \dots, x_n in t :

$$q_{n+1}(x) = p_n(x) + \overbrace{f[x_0, x_1, \dots, x_n, t]}^{\omega(x)} \cdot \prod_{i=0}^n (x - x_i).$$

Iz enakosti $f(t) = q_{n+1}(t)$ sledi

$$e_n(t) = p_n(t) - f(t) = -f[x_0, x_1, \dots, x_n, t]\omega(t).$$

Za oceno napako moramo oceniti še vrednost $f[x_0, x_1, \dots, x_n, t]$.

Izrek

$$f[x_0, x_1, \dots, x_n, t] = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \quad \text{za nek } \xi \in [a, b].$$

Izrek (Napaka polinomske interpolacije)

Naj bo f vsaj $(n + 1)$ -krat zvezno odvedljiva na intervalu $[a, b]$ in naj bo p_n interpolacijski polinom stopnje največ n skozi točke x_i , $i = 0, \dots, n$, ki vse ležijo na intervalu $[a, b]$. Potem je za vsak $x \in [a, b]$

$$f(x) - p_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} (x - x_0) \cdots (x - x_n),$$

kjer ξ leži na intervalu $[a, b]$.

Če znamo odvod $f^{(n+1)}$ na intervalu, ki nas zanima, omejiti, lahko dobimo uporabno oceno.

Aproksimacija po metodi najmanjših kvadratov

Za funkcijo, podano v n točkah

$$(x_0, y_0), \dots, (x_n, y_n),$$

iščemo polinom p_k stopnje $k \leq n$, za katerega ima izraz

$$E_{LSQ} = \sqrt{\sum_{i=0}^n (p_k(x_i) - y_i)^2}$$

najmanjšo vrednost. Če zapišemo na dolgo:

$$E_{LSQ} = \sqrt{\sum_{i=0}^n \underbrace{(a_0 + a_1 x_i + \dots + a_k x_i^k)}_{p_k(x_i)} - y_i)^2}.$$

Torej iščemo ekstrem funkcije več spremenljivk. Iz analize vemo, da je potreben pogoj za ekstrem

$$\frac{\partial E_{LSQ}}{\partial a_0} = \frac{\partial E_{LSQ}}{\partial a_1} = \dots = \frac{\partial E_{LSQ}}{\partial a_k} = 0.$$

Naj bo

$$s_1 = x_0 + \dots + x_n, \quad s_2 = x_0^2 + \dots + x_n^2, \quad \dots, \quad s_{2k} = x_0^{2k} + \dots + x_n^{2k}.$$

Dobimo **normalni sistem**:

$$\begin{bmatrix} n & s_1 & s_2 & \dots & s_k \\ s_1 & s_2 & s_3 & \dots & s_{k+1} \\ s_2 & s_3 & s_4 & \dots & s_{k+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_k & s_{k+1} & s_{k+2} & \dots & s_{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n y_i \\ \sum_{i=0}^n y_i x_i \\ \sum_{i=0}^n y_i x_i^2 \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n y_i x_i^k \end{bmatrix},$$

ki pa je pri velikem številu točk lahko **numerično slabo pogojen**.

Predoločeni sistemi

Problem polinomske aproksimacije je poseben primer predločenega sistema:

Za matriko $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $n \geq m$, in vektor $b \in \mathbb{R}^n$, iščemo vektor $x \in \mathbb{R}^m$, ki zadošča:

$$Ax = b. \quad (17)$$

Kadar je $n > m$, točna rešitev sistema (17) najverjetneje ne obstaja. Zato nas navadno zanima rešitev po metodi najmanjših kvadratov:

Poišči $x \in \mathbb{R}^m$, ki minimizira $\|Ax - b\|_2$.

Trditev

Naj bo $\text{rank}(A) = m$. Rešitev sistema (17) po metodi najmanjših kvadratov je $x \in \mathbb{R}^m$, ki reši t.i. normalni sistem:

$$\underbrace{A^T A}_{m \times m} x = \underbrace{A^T b}_{m \times 1}. \quad (18)$$

QR razcep

Težava, ki se pojavi pri reševanju normalnega sistema (18), je **numerična nestabilnost**. Problematične so matrike A , pri kateri stolpci niso dovolj linearno neodvisni.

Rešitev tega problema je uporaba t.i. **QR razcepa** matrike A .

QR razcep matrike $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ sta ortogonalna matrika $Q \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ($Q^T Q = I_m$) in zgornjetrikotna matrika $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$, ki zadoščata

$$A = QR. \quad (19)$$

Iz (19) sledi, da se sliki matrike A in Q ujemata. Pogoji ortogonalnosti matrike Q pa pomeni, da so njeni stolpci normirani (tj. dolžine 1) in paroma pravokotni.

Če označimo z a_1, \dots, a_m in q_1, \dots, q_m stolpce matrik A in Q ter $R = [r_{i,j}]_{i,j}$, potem veljajo zveze:

$$\begin{aligned}q_1 &= \frac{1}{r_{11}} a_1, \\q_2 &= \frac{1}{r_{22}} (a_2 - r_{12} q_1), \\q_3 &= \frac{1}{r_{33}} (a_3 - r_{13} q_1 - r_{23} q_2), \\&\vdots \\q_m &= \frac{1}{r_{mm}} (a_m - r_{1m} q_1 - \dots - r_{m-1,m} q_{m-1}).\end{aligned}\tag{20}$$

Iz (20) lahko izpeljemo enega od načinov za izračun QR razcepa, tj. z uporabo **Gram-Schmidtove ortogonalizacije (GSO)**:

```
1   $A = [a_1, \dots, a_m]$  je  $n \times m$  matrika s stolpci  $a_1, \dots, a_m$ 
2
3   $r_{1,1} = \|a_1\|_2$ 
4   $q_1 = \frac{1}{r_{1,1}} a_1$ 
5  for  $i = 2, \dots, m$ 
6       $q_i = a_i$ 
7      for  $j = 1, \dots, i - 1$ 
8           $r_{j,i} = q_j^T a_i$ 
9           $q_i = q_i - r_{j,i} q_j$ 
10     end
11      $r_{i,i} = \|q_i\|_2$ 
12      $q_i = \frac{1}{r_{i,i}} q_i$ 
13 end
```

Izkaže se, da je **računska zahtevnost** GSO $\frac{4}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2)$, kar je dvakrat dražje od računanja LU razcepa z delnim pivotiranjem in da je GSO **stabilna operacija**.

Uporaba QR razcepa za reševanje sistema $Ax = b$

Trditev

Naj bo $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ in $\text{rank}(A) = m$. Rešitev sistema $Ax = b$ po metodi najmanjših kvadratov je enaka rešitvi zgornjetrikotnega sistema

$$Rx = Q^T b, \quad (21)$$

kjer je $A = QR$ za zgornjetrikotno matriko R in ortogonalno matriko Q .

Dokaz. Vemo, da je rešitev sistema (17) po metodi najmanjših kvadratov, kar rešitev normalnega sistema (18). Velja:

$$\begin{aligned} A^T Ax &= (QR)^T (QR)x = (R^T Q^T)(QR)x = R^T (Q^T Q)Rx = R^T Rx, \\ A^T b &= (QR)^T b = R^T Q^T b. \end{aligned}$$

Sistem (18) je tako ekvivalenten sistemu $R^T Rx = R^T Q^T b$. Ker je po predpostavki $\text{rank}(A) = m$, je tudi $\text{rank}(R) = \text{rank}(R^T) = m$. Zato je $R^T \in \mathbb{R}^{m \times m}$ obrnljiva in z množenjem zadnje enačbe z leve z $(R^T)^{-1}$, dobimo (21).

Opomba

- ▶ V Matlabu *QR razcep* matrike izračunamo z ukazom $[Q, R] = qr(A)$.
- ▶ V Matlabu sistem $Ax = b$ rešimo po metodi najmanjših kvadratov z ukazom $A \backslash b$. V ozadju operatorja \backslash je uporaba QR razcepa.

Linearna regresija

Iščemo premico, ki se najbolje prilega podatkom $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_m)$ po metodi najmanjših kvadratov. Premica je oblike $y = a + bx$. Torej sta spremenljivki a in b . Sistem lahko zapišemo v obliki

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \\ 1 & x_n \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}}_{\vec{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}}_{\vec{b}}. \quad (22)$$

Po zgoraj napisanem je rešitev (22) enaka

$$\vec{x} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{b} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix}.$$

Numerična integracija

Oceni $\int_a^b f(x) dx$.

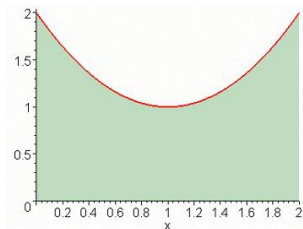
- ▶ Newton–Cotesova (NC) pravila: trapezno, Simpsonovo pravilo
- ▶ Izбира koraka v NC pravilih
- ▶ Adaptivna NC pravila
- ▶ Gaussove kvadraturene formule
- ▶ Integracija v več spremenljivkah

Numerična integracija

Naš cilj je izračunati določen integral

$$\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$$

funkcije $f(x)$. Tu je F nedoločen integral funkcije f .

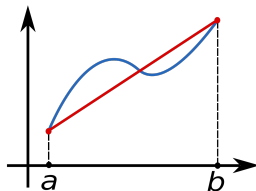


Če ne znamo izračunati nedoločenega integrala F , smo v težavah. Npr. za $f(x) = e^{-x^2}$, $g(x) = \frac{\sin x}{x}$, $h(x) = x \tan x$.

Prav tako ne moremo točno izračunati vrednosti integrala, če imamo funkcijo podano samo na neki množici točk.

Osnovno trapezno pravilo in napaka E

Integral $\int_a^{a+h} f(x) dx$ tako, da f aproksimiramo z linearno funkcijo in izračunamo ploščino pod linearno funkcijo oz. trapezom.



$$p(x) = f(a) + \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a)$$

Velja

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &\approx \int_a^b p(x) dx = f(a)(b - a) + \frac{f(b) - f(a)}{b - a} \frac{(b - a)^2}{2} \\ &= \frac{(b - a)}{2} (f(a) + f(b)). \end{aligned}$$

Pri tem je napaka naslednja:

$$\begin{aligned} E &= \int_a^b (f(x) - p(x)) dx = \int_a^b f[a, b, x](x - b)(x - a) dx \\ &= f[a, b, \xi] \cdot \int_a^{a+h} (x - b)(x - a) dx \\ &= \frac{f''(\eta)}{2} \left(-\frac{1}{6}(b - a)^3 \right) \\ &= \boxed{-\frac{(b - a)^3 f''(\eta)}{12}}, \end{aligned}$$

kjer sta $\xi, \eta \in [a, b]$, tretja enakost sledi po izreku o povprečni vrednosti, četrta pa po izreku o $f[a, b, \xi]$.

Sestavljeno trapezno pravilo

Če interval ni zelo kratek, potem očitna naivna linearna transformacija običajno ne da dobrega približka integrala.

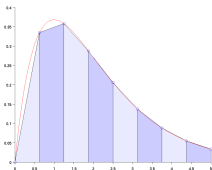
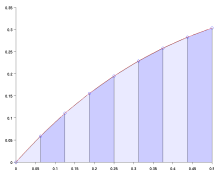
Če interval $[a, b]$ razdelimo z ekvidistantnimi točkami x_0, x_1, \dots, x_n , tj.

$$h := h_i = x_{i+1} - x_i$$

je konstanta in na vsakem intervalu uporabimo osnovno trapezno pravilo, dobimo:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} \sum_{i=0}^{n-1} f(x_i) + f(x_{i+1})$$

$$= \frac{h}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n))$$



Napaka E_i na intervalu $[x_i, x_{i+1}]$ je enaka

$$E_i = -\frac{h^3 \cdot f''(\eta_i)}{12} \quad \text{za nek } \eta_i \in [x_i, x_{i+1}].$$

Torej je skupna napaka

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=0}^{n-1} E_i = \sum_{i=0}^{n-1} -\frac{h^3 \cdot f''(\eta_i)}{12} = -n \cdot \frac{h^3 \cdot f''(\eta)}{12} \\ &= \boxed{-\frac{(b-a)h^2 \cdot f''(\eta)}{12}}, \end{aligned}$$

kjer je $\eta \in [a, b]$ in smo v tretji enakosti uporabili izrek o srednji vrednosti.

Algoritem: [klik](#)

Primer - $\int_0^1 e^{-x^2} dx$

Koliko točk uporabiti, da bo sestavljeno trapezno pravilno natančno z napako omejeno z 10^{-6} ?

Želimo

$$\left| \frac{(b-a)h^2 f''(\eta)}{12} \right| \leq 10^{-6}$$

Kako velik je drugi odvod $f''(x)$?

$$f'(x) = -2xe^{-x^2}, \quad f''(x) = -2e^{-x^2} + 4x^2e^{-x^2}.$$

Ker je

$$f'''(x) = 12xe^{-x^2} - 8x^3e^{-x^2} = 4x(3 - 2x^2)e^{-x^2}$$

pozitiven na $[0, 1]$, je f'' monoton naraščajoč na $[0, 1]$ in zato zavzame maksimum v krajišču: $f''(0) = 2$. Potem lahko omejimo

$$\frac{(b-a)2h^2}{12} \leq 10^{-6} \quad \Rightarrow \quad h^2 \leq 6 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow \quad \underbrace{\sqrt{(1/6)10^3}}_{\approx 410} \leq n.$$

Trapezno pravilo s kontrolo koraka

Motivacija. Če uporabimo sestavljeno trapezno pravilo, moramo:

- ▶ Vnaprej določiti velikost h .
- ▶ Če želimo oceniti napako, moramo znati oceniti $f''(\eta)$ na intervalu $[a, b]$.

Obe težavi želimo rešiti, tj. radi bi, da funkcija samo zmanjšuje h , v kolikor napaka ni dovolj manjka. V ta namen moramo znati to napako oceniti.

Pridemo do **trapeznega pravila s kontrolo koraka**.

Naj bo $I = \int_a^b f(x)dx$ in $T(h)$ **ocena za I** z uporabo sestavljenega trapeznega pravila z velikostjo intervala h .

Spomnimo se, da pri sestavljenem trapeznem pravilu $T(h)$ za napako $E(h)$ velja:

$$E(h) := T(h) - I = \frac{b-a}{12} f''(\xi_h) h^2, \quad \text{kjer je } \xi_h \in (a, b).$$

Želimo se izogniti dejstvu, da moramo poznati f'' . Zapišimo napako še v primeru razpolovljenega koraka, tj. $\frac{h}{2}$:

$$E(h/2) := T(h/2) - I = \frac{b-a}{12} f''(\xi_{h/2}) \frac{h^2}{4}, \quad \text{kjer je } \xi_{h/2} \in (a, b).$$

Predpostavimo, da je $\frac{b-a}{12} f''(\xi_h)$ približno **enako C** za vsak h .

Dobimo:

$$I = T(h) - Ch^2 = T(h/2) - C\frac{h^2}{4}.$$

Sledi:

$$T(h) - T(h/2) = \frac{3}{4}Ch^2 + \mathcal{O}(h^4) \quad \text{oz.} \quad Ch^2 \approx \frac{4}{3}(T(h) - T(h/2)).$$

Tako sta

$$\frac{4}{3}(T(h) - T(h/2)), \quad \frac{1}{3}(T(h) - T(h/2))$$

približka za napaki $E(h)$ in $E(h/2)$. Velja

$$T(h/2) = \underbrace{\frac{T(h)}{2}}_{\text{razplovimo } T(h)} + \underbrace{\frac{h}{2} \sum_{i=1}^n f(a + (i-1/2)h)}_{\text{računamo samo ta del}}, \quad n = (b-a)/h.$$

Algoritem:

1. Izračunamo $T(b-a) = (b-a) \frac{f(a)+f(b)}{2}$.
2. Izračunamo $T((b-a)/2) = \frac{T(b-a)}{2} + \frac{b-a}{2} f((a+b)/2)$.
3. Izračunamo $\frac{1}{3}(T(b-a) - T((b-a)/2))$. Če je to dovolj majhno po absolutni vrednosti, končamo, približek za integral pa je $T((b-a)/2)$. Sicer ponovimo postopek z razpolovljenim h .

Algoritem: klik

Adaptivno trapezno pravilo

Motivacija: Če uporabimo trapezno pravilo s kontrolo koraka, potem dolžine koraka h ne rabimo sami določiti, vendar pa je h enak na celotnem integracijskem intervalu. **Želeli bi, da na nekaterih delih intervala uporabimo večje h , manjše pa le tam, kjer je to res potrebno.**

Zgornji cilj lahko dosežemo z uporabo **rekurzivnega računanja integrala**:

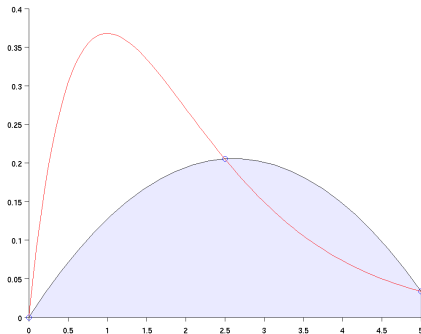
- ▶ Najprej izračunamo $T(b - a)$ in $T((b - a)/2)$.
- ▶ Če je podobno kot pri kontroli koraka zgoraj ocena napake $e := \frac{T(b-a)/2 - T(b-a)}{3}$ dovolj majhna, vrnemo $T((b - a)/2) + e$ in končamo.
- ▶ Če je e prevelik, ponovimo zgornji postopek ločeno za podintervala $[a, (a + b)/2]$ in $[(a + b)/2, b]$, pri čemer naj bo napaka na vsakem največ **polovica začetne tolerance**.
- ▶ **Rekurzivno nadaljujemo** zgornji postopek in dobimo oceno integrala, pri čemer delilne točke ne bodo enakomerno razporejene po intervalu $[a, b]$.

Algoritem: [klik](#)

Enostavno Simpsonovo pravilo

Naj bo p_2 polinom stopnje 2, s katerim interpoliramo točke

$$(a, f(a)), \quad \left(\frac{a+b}{2}, f\left(\frac{a+b}{2}\right)\right), \quad (b, f(b)) :$$



$$p_2(x) = C_0 + C_1 \cdot (x - a) + C_2 \cdot (x - a) \left(x - \frac{a+b}{2}\right).$$

Označimo $h := \frac{b-a}{2}$. Rešujemo sistem:

$$p_2(a) = f(a), \quad p_2\left(\frac{a+b}{2}\right) = f\left(\frac{a+b}{2}\right), \quad p_2(b) = f(b).$$

Dobimo

$$\begin{aligned} C_0 = f[a] &= f(a), & C_1 &= f\left[a, \frac{a+b}{2}\right] = \frac{f(a+h) - f(a)}{h}, \\ C_2 &= f\left[a, \frac{a+b}{2}, b\right] = \frac{f(a+2h) - 2f(a+h) + f(a)}{2h^2}. \end{aligned}$$

Računamo $\int_a^b p_2(x) dx$ (naredimo substitucijo $x = a + t$);

$$\begin{aligned} \int_a^{a+2h} p_2(x) dx &= \int_0^{2h} p_2(a+t) dt \\ &= f(a) \cdot 2h + \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \cdot 2h^2 + \frac{f(a+2h) - 2f(a+h) + f(a)}{2h^2} \\ &= \boxed{\frac{h}{3}(f(a) + 4f(a+h) + f(a+2h))}. \end{aligned}$$

Izkaže se, da je napaka približno:

$$\boxed{-\frac{1}{90}h^5 f^{(4)}(\xi)}, \quad \xi \in [a, b]$$

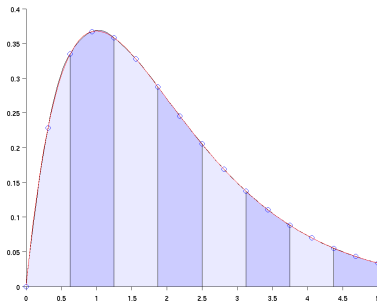
Algoritem: klik

Sestavljeno Simpsonovo pravilo in napaka

Vzemimo ekvidistantno particijo $P = \{x_0 = a < \dots < x_n = b\}$ intervala $[a, b]$ na sodo število enako dolgih intervalov in na zaporednih trojicah točk uporabimo osnovno Simpsonovo pravilo ($h = x_{i+1} - x_i$):

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} \frac{h}{3} [f(x_{2i}) + 4f(x_{2i+1}) + f(x_{2i+2})]$$

$$= \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \dots + f(x_n)] .$$



Napaka E_i na intervalu $[x_{2i}, x_{2i+2}]$ je enaka

$$E_i = -\frac{h^5 f^{(4)}(\eta_i)}{90}$$

za nek $\eta_i \in [x_{2i}, x_{2i+2}]$. Torej je skupna napaka

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} E_i = \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} -\frac{h^5 f^{(4)}(\eta_i)}{90} = -\frac{n}{2} \frac{h^5 f^{(4)}(\eta)}{90} \\ &= \boxed{-\frac{(b-a)h^4 f''(\eta)}{180}}, \end{aligned}$$

kjer je $\eta \in [a, b]$ in smo v tretji enakosti uporabili izrek o srednji vrednosti.

Adaptivno Simpsonovo pravilo

Motivacija. Ideja je povsem enaka kot pri adaptivnem trapeznem pravilu, tj. radi bi uporabili čim večji h povsod, kjer je to mogoče. Če s $S(h)$ označimo vrednost sestavljenega Simpsonovega pravila s korakom dolžine h , potem napako E ocenimo iz $S(h)$ in $S(h/2)$.

Postopek:

- ▶ Najprej izračunamo $S(b - a)$ in $S((b - a)/2)$.
- ▶ Iz $\int_a^b f(x)dx = S(h) + C_1 h^4 = S(h/2) + C_1 (\frac{h}{2})^4$ izrazimo

$$C_1 \left(\frac{h}{2}\right)^4 = \frac{S(b-a)/2 - S(b-a)}{15},$$

kar je naša ocena napake E . Če je E dovolj majhna, vrnemo $S((b - a)/2) + E$ in končamo.

- ▶ Če je E prevelik, ponovimo zgornji postopek ločeno za podintervala $[a, (a + b)/2]$ in $[(a + b)/2, b]$, pri čemer naj bo napaka na vsakem največ polovica začetne tolerance.
- ▶ **Rekurzivno nadaljujemo** zgornji postopek in dobimo oceno integrala, pri čemer delilne točke ne bodo enakomerno razporejene po intervalu $[a, b]$.

Algoritem: klik

Osnovna Newton–Cotesova pravila

Newton–Cotesova (NC) pravila interval $[a, b]$ razdelijo z $n + 1$ ekvidistantnimi točkami in $\int_a^b f(x) dx$ aproksimirajo z $\int_a^b p_n(x) dx$, kjer je p_n interpolacijski polinom stopnje n na teh točkah.

Pravila:

ime	n	formula
trapezno	1	$\frac{(b-a)}{2} [f(a) + f(b)]$
Simp. 1/3	2	$\frac{(b-a)}{6} [f(a) + 4f(\frac{a+b}{2}) + f(b)]$
Simp. 3/8	3	$\frac{(b-a)}{8} [f(a) + 3f(a+h) + 3f(b-h) + f(b)]$
Boolovo	4	$\frac{(b-a)}{90} [7f(a) + 32f(a+h) + 12f(\frac{a+b}{2}) + 32f(b-h) + 7f(b)]$

Ocene napak:

ime	n	napaka	h
trapezno	1	$-\frac{(b-a)h^2}{12} f''(\xi)$	$h = b - a$
Simpsonovo 1/3	2	$-\frac{(b-a)h^4}{180} f^{(4)}(\xi)$	$h = (b - a)/2$
Simpsonovo 3/8	3	$-\frac{(b-a)h^4}{80} f^{(4)}(\xi)$	$h = (b - a)/3$
Booleovo	4	$-\frac{2(b-a)h^6}{945} f^{(6)}(\xi)$	$h = (b - a)/4$

Izpeljava NC pravil z metodo nedoločenih koeficientov

Izpeljati želimo integracijsko formulo na danih (ekvidistantnih) $n + 1$ točkah, **vozlih**, ki bo **točna za polinome stopnje največ n** :

$$\int_a^{a+nh} f(x) dx = \sum_{i=0}^n a_i f(a + ih) + R(f(x)),$$

kjer so a_0, \dots, a_n iskani koeficienti, $R(f(x))$ pa napaka. Izpeljimo Simpsonovo 3/8 pravilo.

$$\int_0^{3h} f(x) dx = a_0 f(0) + a_1 f(h) + a_2 f(2h) + a_3 f(3h) + R(f(x)),$$

Želimo

$$R(1) = R(x) = R(x^2) = R(x^3) = 0 :$$

$$\begin{aligned} \int_0^{3h} 1 dx &= 3h = a_0 + a_1 + a_2 + a_3, & a_0 &= \frac{3}{8}h, \\ \int_0^{3h} x dx &= \frac{9h}{2} = a_1 + 2a_2 + 3a_3, & a_1 &= \frac{9}{8}h, \\ \int_0^{3h} x^2 dx &= \frac{27h}{3} = a_1 + 4a_2 + 9a_3, & a_2 &= \frac{9}{8}h, \\ \int_0^{3h} x^3 dx &= \frac{81h}{4} = a_1 + 8a_2 + 27a_3. & a_3 &= \frac{3}{8}h. \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

Predvidevamo, da je napaka $R(f(x))$ oblike

$$D \cdot f^{(4)}(\xi),$$

kjer je $\xi \in [a, b]$. Za $f(x) = x^4$ dobimo

$$\int_0^{3h} x^4 dx = \frac{3^5}{5} h^5 = \frac{3}{8} h(3h^4 + 3 \cdot 2^4 \cdot h^4 + 3^4 h^4) + 24D \quad \Rightarrow \quad D = -\frac{3}{80} h^5.$$

Torej:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{(b-a)}{8} [f(a) + 3f(a+h) + 3f(b-h) + f(b)] - \frac{(b-a)h^4}{80} f^{(4)}(\xi).$$

Gaussove kvadraturene formule

- ▶ NC pravila za integriranje so oblike

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{j=0}^n w_j f(x_j), \quad (23)$$

kjer so točke x_j enakomerno razporejeni **vozli**, w_j pa **uteži**.

- ▶ Vemo pa že iz poglavja o interpolacijskih polinomih, da **ekvidistantne točke niso vedno najboljša izbira**.
- ▶ Rešili se bomo ekvidistantnih vozlov v kvadrturnih formulah.
- ▶ V formuli (23) bomo **izbirali vozle in koeficiente na optimalen način**, tako da **maksimiziramo stopnjo natančnosti**, tj. integracijsko pravilo bo točno za polinome najvišjih možnih stopenj.
- ▶ Imamo $n + 1$ prostih točk $x_j \in [a, b]$,

$$a \leq x_0 < x_1 < \cdots < x_{n-1} < x_n \leq b.$$

in $n + 1$ realnih koeficientov w_j , tj. skupaj $2n + 2$ neznank.

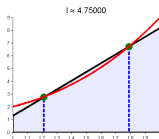
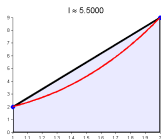
Primer najboljših vozlov za interval $[-1, 1]$

Oglejmo si primer $n = 1$ (tj. 2 točki) na primeru intervala $[-1, 1]$. Poiščimo w_0 , w_1 , x_0 , x_1 , tako da velja

$$\int_{-1}^1 f(x) dx \approx w_0 f(x_0) + w_1 f(x_1),$$

pri čemer je aproksimacija kar se da točna.

$$\int_1^2 (x^3 + 1) dx = \left[\frac{x^4}{4} + x \right]_1^2 = 4.75.$$



Cilj: poišči w_0 , w_1 , x_0 , x_1 tako da bi aproksimacija točna za polinome stopnje največ 3:

$$f(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3.$$

To pomeni, da mora za vsak $c_0, c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{R}$ veljati:

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 f(x) dx &= \int_{-1}^1 (c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3) dx \\ &= w_0 (c_0 + c_1 x_0 + c_2 x_0^2 + c_3 x_0^3) + w_1 (c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_1^2 + c_3 x_1^3). \end{aligned}$$

Desno stran preuredimo na **konstantne, linearne, kvadratične in kubične člene**, ter dobimo, da je naslednji izraz

$$c_0 \left(w_0 + w_1 - \int_{-1}^1 1 \, dx \right) + c_1 \left(w_0 x_0 + w_1 x_1 - \int_{-1}^1 x \, dx \right) \\ + c_2 \left(w_0 x_0^2 + w_1 x_1^2 - \int_{-1}^1 x^2 \, dx \right) + c_3 \left(w_0 x_0^3 + w_1 x_1^3 - \int_{-1}^1 x^3 \, dx \right).$$

ničelen. Ker so koeficienti c_0, c_1, c_2 in c_3 poljubni, morajo biti koeficienti pri njih ničelni.

Od tod sledi:

$$\begin{aligned} w_0 + w_1 &= \int_{-1}^1 1 \, dx = 2 & w_0 x_0 + w_1 x_1 &= \int_{-1}^1 x \, dx = 0 \\ w_0 x_0^2 + w_1 x_1^2 &= \int_{-1}^1 x^2 \, dx = \frac{2}{3} & w_0 x_0^3 + w_1 x_1^3 &= \int_{-1}^1 x^3 \, dx = 0 \end{aligned}$$

Z nekaj algebre pridemo do:

$$w_0 = 1 \quad w_1 = 1 \quad x_0 = -\frac{\sqrt{3}}{3} \quad x_1 = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

Zato:

$$\int_{-1}^1 f(x) \, dx \approx f\left(-\frac{\sqrt{3}}{3}\right) + f\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right).$$

Posplošitev na interval $[a, b]$

Z linearno substitucijo

$$t = a_0 + a_1 x, \quad t(a) = -1, \quad t(b) = 1,$$

preslikamo interval $[a, b]$ na $[-1, 1]$.

Velja $a_0 = -\frac{b+a}{b-a}$ in $a_1 = \frac{2}{b-a}$ ter

$$x = \frac{b-a}{2}t + \frac{b+a}{2}, \quad dx = \frac{b-a}{2}dt.$$

Sledi:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_{-1}^1 f\left(\frac{(b-a)t + b+a}{2}\right) \frac{b-a}{2} dt$$

in lahko uporabimo kvadraturno formulo nad $[-1, 1]$.

Z uporabo dveh točk, $n = 1$, smo dobili točen integral za polinome stopnje največ $2 \cdot 1 + 1 = 3$.

Razširitev Gaussovih kvadraturnih formul

Sedaj je naš cilj **razširiti zgornje pravilo tako, da bo delovalo za polinome višje stopnje**, tj. z vsaki dodanim parom vozla in uteži želimo povečati točnost za dve stopnji.

Velja:

- ▶ Smiselno kvadraturno pravilo za integracijo nad intervalom $[-1, 1]$ na enem vozlu bi uporabilo $x = 0$. To pa je ničla funkcije $\phi(x) = x$.
- ▶ Kvadratura pravilo na dveh točkah $\pm \frac{1}{\sqrt{3}}$ smo dobili za ničli funkcije

$$\phi(x) = 3x^2 - 1.$$

- ▶ Kako nadaljevati?

Izrek (Gauss)

Naj bo $q(x)$ netrivialen polinom stopnje $n + 1$, tako da je

$$\int_a^b x^k q(x) dx = 0 \quad \text{za vsak } k = 0, 1, \dots, n$$

in naj bodo x_0, x_1, \dots, x_n ničle funkcije $q(x)$. Potem velja

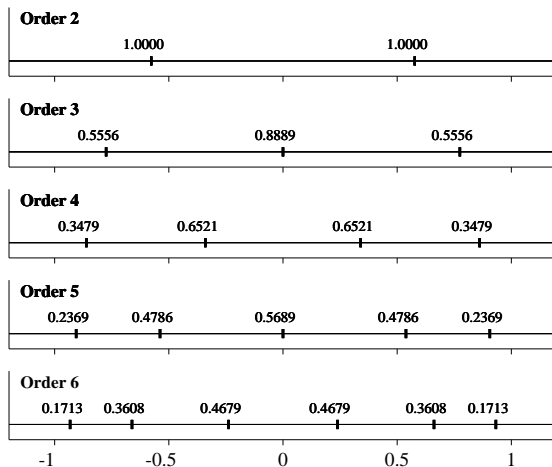
$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=0}^n A_i f(x_i),$$

kjer je

$$A_i = \int_a^b \ell_i(x) dx \quad \text{za } i = 0, \dots, n,$$

pri čemer ℓ_i označuje i -ti Lagrangeov bazni polinom na točkah x_0, \dots, x_n , pravilo pa je točno za polinome stopnje največ $2n + 1$.

Izgled vozlov



Algoritem: klik Primer: klik

Integracija v več dimenzijah

Ločili bomo primera:

1. Zanima nas $\int_{\Omega} f(x, y) \, dx \, dy$, kjer je $\Omega = [a, b] \times [c, d] \subseteq \mathbb{R}^2$ pravokotnik.
2. Zanima nas $\int_{\Omega} f(\underline{x}) \, d\Omega$, kjer je $\Omega \subseteq \mathbb{R}^d$ poljubno območje v \mathbb{R}^d .

V prvem primeru lahko uporabimo dve sestavljeni pravili za vsako spremenljivko posebej. Naj bosta

$$a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$$

in

$$c = y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_n = d$$

delitvi intervalov $[a, b]$ in $[c, d]$ na n enakih delov in $h = \frac{b-a}{n}$, $k = \frac{d-c}{n}$. Če uporabimo sestavljeni trapezni pravili dobimo:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} f(x, y) \, dx \, dy &= \int_c^d \int_a^b f(x, y) \, dx \, dy = \int_c^d \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{h}{2} (f(x_i, y) + f(x_{i+1}, y)) \right) dy \\ &= \frac{hk}{4} \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} (f(x_i, y_j) + f(x_i, y_{j+1}) + f(x_{i+1}, y_j) + f(x_{i+1}, y_{j+1})) \end{aligned}$$

Izkaže se, da pomnožimo istoležne koeficiente v tabeli funkcijskih vrednosti

$$\begin{pmatrix} f(x_n, y_0) & f(x_n, y_1) & f(x_n, y_2) & \cdots & f(x_n, y_{n-1}) & f(x_n, y_n) \\ f(x_{n-1}, y_0) & f(x_{n-1}, y_1) & f(x_{n-1}, y_2) & \cdots & f(x_{n-1}, y_{n-1}) & f(x_{n-1}, y_n) \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ f(x_1, y_0) & f(x_1, y_1) & f(x_1, y_2) & \cdots & f(x_1, y_{n-1}) & f(x_1, y_n) \\ f(x_0, y_0) & f(x_0, y_1) & f(x_0, y_2) & \cdots & f(x_1, y_{n-1}) & f(x_0, y_n) \end{pmatrix},$$

s tabelo koeficientov

$$\frac{hk}{4} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & \cdots & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 4 & \cdots & 4 & 2 \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 2 & 4 & 4 & \cdots & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & \cdots & 2 & 1 \end{pmatrix} = \frac{hk}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ \vdots \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & \cdots & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

in seštejemo vse vrednosti v dobljeni matriki.

Če bi namesto sestavljenega trapeznega pravila uporabili Simpsonovega, bi morali za tabelo koeficientov vzeti

$$\frac{hk}{9} \cdot uu^T,$$

V drugem primeru uporabimo **Monte Carlo metode**, ki temeljijo na dejstvu, da velja

$$\int_{\Omega} f(x_1, \dots, x_d) d\Omega = \text{Vol}(\Omega) \cdot E_{\Omega}(f(X_1, \dots, X_d)),$$

kjer je $\text{Vol}(\Omega) = \int_{\Omega} 1 d\Omega$ volumen območja Ω , $X = (X_1, \dots, X_d) : \Omega \rightarrow \Omega$ slučajni vektor, E_{Ω} pa pričakovana vrednost slučajne spremenljivke $f(X_1, \dots, X_d)$.

Naključno moramo torej vzorčiti na območju Ω , nato pa izračunati povprečje funkcijskih vrednosti.

Za dovolj veliko naključnih točk bo povprečje dobra ocena za vrednost integrala.

Reševanje diferencialnih enačb

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0$$

- ▶ Eulerjeva metoda
- ▶ Runge-Kutta metode
- ▶ Adaptivne metode: DOPRI5, Cash-Fehlberg

Diferencialna enačba

Diferencialna enačba (DE) je enačba oblike:

$$F(t, x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n)}) = 0, \quad (25)$$

kjer je $x = x(t)$ **odvisna** spremenljivka, t **neodvisna** spremenljivka, \dot{x} pa označuje odvod x po t .

Če je $y = y(x)$ **odvisna** spremenljivka, x pa **neodvisna**, potem je DE oblike

$$F(x, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0. \quad (26)$$

Ključna lastnost DE je ta, da poleg neodvisne spremenljivke t (oz. x) in odvisne spremenljivke x (oz. y) nastopajo še **odvodi** odvisne spremenljivke $\dot{x}, \dots, x^{(n)}$ (oz. $y', \dots, y^{(n)}$).

Rešitev DE je (dovoljkrat odvedljiva) funkcija, ki zadošča enačbi (25) oz. (26) na definicijskem območju \mathcal{D} neodvisne spremenljivke.

Red DE je stopnja najvišjega odvoda, ki nastopa v DE.

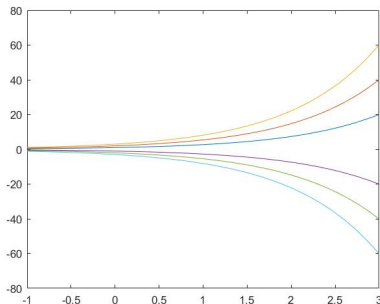
Primeri. $y' = y$, $y' + 5xy = 3x^2$, $\dot{x} + x = 0$, $\ddot{x} + a\dot{x} + bx = A \cos \omega t$.

Splošna rešitev diferencialne enačbe reda n je družina funkcij, odvisna od n parametrov, ki so vse rešitve diferencialne enačbe.

Primer

Rešimo DE $y' = y$.

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} = y &\Rightarrow \frac{dy}{y} = dx \Rightarrow \int \frac{dy}{y} = \int dx \\ &\Rightarrow \log(|y|) = x + C, \quad C \in \mathbb{R} \\ &\Rightarrow y = Ke^x, \quad K \in \mathbb{R}\end{aligned}$$



Partikularna rešitev je posamezna rešitev iz te družine.

Določena je z n dodatnimi pogoji, na primer z začetnimi pogoji:

$$x(t_0) = a_0, \quad \dot{x}(t_0) = a_1, \dots, \quad x^{(n-1)}(t_0) = a_{n-1}$$

Zelo malo DE je analitično rešljivih. Mednje sodijo:

- ▶ DE z ločljivima spremenljivkama
- ▶ Linearne DE
- ▶ DE zelo posebne oblike

Večina DE ni analitično rešljivih. Te rešujemo numerično.

Diferencialna enačba 1. reda z ločljivima spremenljivkama

$$\dot{x} = f(t)g(x)$$

Enačbo rešimo tako, da vpeljemo $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ in ločimo spremenljivki:

$$\frac{dx}{dt} = f(t)g(x), \quad \frac{dx}{g(x)} = f(t)dt$$

in potem integriramo

$$\int \frac{dx}{g(x)} = \int f(t)dt.$$

Linearna diferencialna enačba

$$y' + f(x)y = g(x) \quad (27)$$

Pravimo, da je enačba **homogena**, če je $g(x) = 0$ in **nehomogena**, če je $g(x) \neq 0$.

1. Rešimo **homogeni del** $y' + f(x)y = 0$ s pomočjo ločitve spremenljivk. Dobimo rešitev

$$y = Ce^{-\int f(x)dx} = C z(x)$$

2. Metoda **variacije konstante**

- ▶ V (27) vstavimo $y = C(x) z(x)$ in rešimo na $C(x)$.
- ▶ Tako dobljeni C vstavimo v rešitev homogenega dela.

Numerično reševanje DE

Na intervalu $[a, b]$ rešujemo DE prvega reda

$$y' = f(x, y), \quad y(a) = y_0. \quad (28)$$

Interval $[a, b]$ razdelimo z zaporedjem točk

$$a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b.$$

Z y_i označimo **približek** za rešitev (28) v točki x_i . Označimo **dolžino koraka** z $h_i := x_{i+1} - x_i$.

Razliko med približkom in točno rešitvijo v x_i pišemo z $g_i = y_i - y(x_i)$ in jo imenujemo **globalna napaka** v x_i .

Razliko med približkom in točno rešitvijo DE

$$z' = f(x, z), \quad z(x_{i-1}) = y_{i-1} \quad (29)$$

v x_i pišemo z $\ell_i = y_i - z(x_i)$ in jo imenujemo **lokalna napaka** v x_i .

Globalno napako lahko ocenimo s pomočjo lokalnih napak:

$$|g_i| \leq |\ell_1| + |\ell_2| + \dots + |\ell_i|.$$

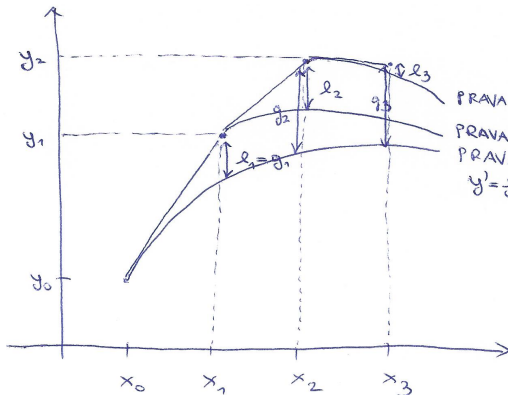
Red metode je število $p \in \mathbb{N}$, ki zadošča

$$\ell_i = Ch_i^{p+1} + \mathcal{O}(h_i^{p+2})$$

Eulerjeva metoda

Pri tej metodi v vsaki točki x_i uporabimo **linearno aproksimacijo funkcije**. Rešitev na intervalu $[x_i, x_{i+1}]$ nadomestimo z odsekom tangente na graf rešitve v točki x_i :

$$y_{i+1} = y_i + h_i \cdot f(x_i, y_i).$$



PRAVA REŠITEV $y' = f(x, y)$, $y(x_2) = y_2$

PRAVA REŠITEV $y' = f(x, y)$, $y(x_1) = y_1$

PRAVA REŠITEV
 $y' = f(x, y)$, $y(x_0) = y_0$

```

1
2  y = y0
3  x = x0
4  h = (b - a)/n
5  for i = 1, ..., n - 1
6      y = y + h · f(x, y)
7      x = x + h
8  end

```

Ker je

$$y(x + h) = \underbrace{y(x) + hy'(x)}_{\text{upoštevamo}} + \underbrace{\frac{h^2}{2}y''(\xi)}_{\text{napaka}}, \quad \xi \in [x, x + h],$$

je red Eulerjeve metode 1.

Algoritem: [klik](#)

Metode Runge-Kutta

Ideja teh metod je, da za aproksimacijo odvoda na intervalu $[x_n, x_{n+1}]$ ne upoštevamo odvoda le v točki x_n , temveč neko uteženo povprečje odvodov na $[x_n, x_{n+1}]$.

Primer (Metode Runge-Kutta (RK) reda 2)

Upoštevamo odvoda v točki x_n in $x_n + ch \in [x_n, x_{n+1}]$, kjer je $h = x_{n+1} - x_n$ in $c \in [0, 1]$. Približek y_{n+1} izračunamo tako, da se premaknemo za uteženo povprečje premikov po tangentah v točkah x_n in $x_n + ch$:

$$y_{n+1} = y_n + \underbrace{b_1}_{\text{utež}} \cdot \underbrace{(h \cdot f(x_n, y_n))}_{\text{tangenta v } x_n} + \underbrace{b_2}_{\text{utež}} \cdot \underbrace{(h \cdot f(x_n + ch, y(x_n + ch)))}_{\text{tangenta v } x_n + ch} \quad (30)$$

Upoštevamo

$$y(x_n + ch) \approx y_n + chy'(x_n) = y_n + chf(x_n, y_n) \approx y_n + ahf(x_n, y_n), \quad (31)$$

kjer je a postal prost parameter.

Primer (Metode Runge-Kutta (RK) reda 2)

Upoštevamo (31) v (30) in dobimo

$$y_{n+1} = y_n + b_1 \cdot \underbrace{(h \cdot f(x_n, y_n))}_{k_1} + b_2 \cdot \underbrace{(h \cdot f(x_n + ch, y_n + a \cdot k_1))}_{k_2}. \quad (32)$$

Z razvojem funkcije $y(x_n + h)$ in $f(x_n + ch, y_n + ak_1)$ v Taylorjevi vrsti in primerjavo koeficientov pri h in h^2 v (32) dobimo pogoja

$$\begin{aligned} 1 &= b_1 + b_2, \\ \frac{1}{2}(f_x + f_y f)_n &= b_2 c(f_x)_n + b_2 a(ff_y)_n, \end{aligned} \quad (33)$$

kjer $f_n, (f_x)_n, (f_y)_n$ pomenijo $f(x_n, y_n), f_x(x_n, y_n), f_y(x_n, y_n)$. Enačbi (33) imata veliko rešitev, npr.:

► $b_1 = b_2 = \frac{1}{2}$ in $c = a = 1$. RK metoda je:

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{2}(k_1 + k_2), \\ k_1 &= hf(x_n, y_n), \\ k_2 &= hf(x_n + h, y_n + k_1). \end{aligned}$$

Primer (Metode Runge-Kutta (RK) reda 2)

- $b_1 = 1, b_2 = 0$ in $c = a = \frac{1}{2}$. RK metoda je:

$$\begin{aligned}y_{n+1} &= y_n + k_2, \\k_1 &= hf(x_n, y_n), \\k_2 &= hf(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_1).\end{aligned}$$

Splošna RK metoda je oblike

$$\begin{aligned}y_{n+1} &= y_n + b_1 k_1 + b_2 k_2 + \dots + b_s k_s, \\k_1 &= hf(x_n, y_n), \\k_2 &= hf(x_n + c_2 h, y_n + a_{2,1} k_1), \\k_3 &= hf(x_n + c_3 h, y_n + a_{3,1} k_1 + a_{3,2} k_2), \\k_s &= hf(x_n + c_s h, y_n + a_{s,1} k_1 + \dots + a_{s,s-1} k_{s-1}).\end{aligned}\tag{34}$$

Butcherjeva tabela

RK metode (34) v kompaktni obliki shranjujemo v [Butcherjevi tabeli](#):

0	0					
c_2	$a_{2,1}$	0				
c_3	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	0			
\vdots	\vdots					
c_s	$a_{s,1}$	$a_{s,2}$	$a_{s,3}$	\dots	$a_{s,s-1}$	0
	b_1	b_2	b_3	\dots	b_{s-1}	b_s

kjer je še

$$c_2 = a_{2,1},$$

$$c_3 = a_{3,1} + a_{3,2},$$

$$\vdots$$

$$c_s = a_{s,1} + a_{s,2} + \dots + a_{s,s-1}.$$

Metoda Runge-Kutta reda 4

Butcherjeva tabela:

0	0			
1	1	0		
2	2		0	
1	0	1	0	
2	0	2		0
1	0	0	1	0
<hr/>				
	1	1	1	1
	6	3	3	6

Metoda je

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}k_1 + \frac{1}{3}k_2 + \frac{1}{3}k_3 + \frac{1}{6}k_4,$$

$$k_1 = hf(x_n, y_n), \quad k_2 = hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_1\right),$$

$$k_3 = hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_2\right), \quad k_4 = hf(x_n + h, y_n + k_3).$$

Algoritam in primer: [klik](#) [klik](#)

Ocenjevanje napake in kontrola koraka

1. Pri računanju nas zanima velikost globalne napake.
2. Med izvajanjem metode ocenjujemo velikost lokalnih napak.
3. Na velikost lokalnih napak ključno vpliva izbira dolžine koraka.

Naj bo M metoda reda p , s katero izračunamo $y(x_{n+1})$ z dolžino koraka h . Približek označimo z $y_{n+1,h}$. Velja:

$$\ell_{n+1} := y_{n+1,h} - z(x_{n+1}) \approx Ch^{p+1}, \quad (35)$$

kjer je $z(x)$ rešitev začetnega problema

$$y' = f(x, y), \quad y(x_n) = y_n. \quad (36)$$

Podobno velja:

$$\ell_{n+1} = y_{n+1,h/2} - z(x_{n+1}) \approx C(h/2)^{p+1} + C(h/2)^{p+1} = 2^{-p}Ch^{p+1}, \quad (37)$$

saj smo pri koraku $h/2$ naredili dva koraka metode.

Odštejemo (37) od (35) in dobimo

$$y_{n+1,h} - y_{n+1,h/2} \approx Ch^{p+1}(1 - 2^{-p}). \quad (38)$$

Iz (38) izrazimo Ch^{p+1} in dobimo

$$Ch^{p+1} \approx \frac{y_{n+1,h} - y_{n+1,h/2}}{1 - 2^{-p}}. \quad (39)$$

1. Če je $|\ell_{n+1}| < \epsilon h$, potem $y_{n+1,h}$ sprejmemo.
V vsaki točki namreč omejimo napako na ϵ . Na celem intervalu integriramo torej napako največ ϵ in dobimo mejo ϵh .
2. Če je $|\ell_{n+1}| \geq \epsilon h$, potem ponovimo računanje približka $y(x_{n+1})$ s krajšim korakom.
3. Če je $|\ell_{n+1}|$ bistveno manjši od ϵh , lahko v nadaljevanju uporabimo daljši korak.

Spreminjanje dolžine koraka

Recimo, da rešujemo DE z metodo reda p , Torej je lokalna napaka

$$\ell_n \approx Ch_n^{p+1}. \quad (40)$$

Na naslednjem koraku želimo, da je napaka sorazmerna dolžini koraka:

$$Ch_{n+1}^{p+1} \approx \epsilon h_{n+1}. \quad (41)$$

Izrazimo C iz (40), vstavimo v (41) in dobimo

$$\frac{h_{n+1}^{p+1}}{h_n^{p+1}} \approx \frac{\epsilon h_{n+1}}{|\ell_n|}.$$

Dolžina naslednjega koraka naj bo zato

$$h_{n+1} = h_n \sqrt[p]{\frac{\epsilon h_n}{|\ell_n|}}.$$

Zaradi zaokroževanja desno stran pomnožimo še s $\sigma \approx 1$, npr. $\sigma = 0.9$.

Metoda vgnezenih parov za oceno ℓ_n

Naj bosta M_1, M_2 dve metodi Runge-Kutta z istima matrikama koeficientov $a_{i,j}$ (in zato c_i), vendar različnima vektorjema uteži b_i in b_i^* . Naj bo prva metoda reda p , druga pa $p + 1$.

Primer

Metodo vgnezenih parov uporabimo za Butcherjevi tabeli:

$$\begin{array}{c|cc} 0 & 0 & \\ 1 & 1 & 0 \\ \hline & 1 & 0 \\ & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{array}.$$

Prva metoda je Eulerjeva, reda 1, druga pa reda RK reda 2. Velja

$$y_{n+1} = y_n + k_1,$$

$$y_{n+1}^* = y_n + \frac{1}{2}(k_1 + k_2).$$

Ocena lokalne napake je

$$\ell_{n+1} \approx y_{n+1}^* - y_{n+1} = (-k_1 + k_2)/2.$$

DOPRI5, Fehlberg, Cash-Karp

Zelo uporabne metode za praktično računanje so metode DOPRI5 (1980, avtorja Dormand in Prince), Fehlberg (1969), Cash-Karp, ki z metodo gnezdenih parov združi dve RK metodi, eno reda 4 in eno reda 5:

https://en.wikipedia.org/wiki/Dormand%E2%80%93Prince_method

https://en.wikipedia.org/wiki/Runge%E2%80%93Kutta%E2%80%93Fehlberg_method

https://en.wikipedia.org/wiki/Cash%E2%80%93Karp_method

Algoritem in primer: [klik](#) [klik](#)

Sistemi diferencialnih enačb

Sistem DE je oblike:

$$\begin{aligned}y_1' &= f_1(x, y_1, \dots, y_m), \\y_2' &= f_2(x, y_1, \dots, y_m), \\&\vdots \\y_m' &= f_m(x, y_1, \dots, y_m),\end{aligned}\tag{45}$$

kjer so $y_1(x), \dots, y_m(x)$ neznane funkcije. Imamo še m začetnih pogojev $y_i(x_0) = y_{i,0}$ za $i = 1, \dots, m$. Sistem (45) lahko zapišemo v vektorski obliki:

$$\vec{y}' = \vec{f}(x, \vec{y}), \quad \vec{y}(x_0) = \vec{y}_0,\tag{46}$$

kjer so

$$\begin{aligned}\vec{y} &= (y_1, \dots, y_m), \quad \vec{f} = (f_1, \dots, f_m), \\ \vec{y}(x_0) &= (y_1(x_0), \dots, y_m(x_0)).\end{aligned}$$

Sistem (46) lahko rešujemo z Runge-Kutta metodami, le da vse funkcije podamo kot vektorske funkcije, točke pa kot vektorje.

Algoritmi: klik klik klik

Robni problem - strelska metoda

Robni sistem DE v dveh spremenljivkah je oblike:

$$\begin{aligned}y' &= f(x, y, z), \\z' &= g(x, y, z),\end{aligned}\tag{47}$$

kjer sta $y(x)$ in $z(x)$ neznani funkciji, $x \in [a, b]$, dana pa sta še pogoja

$$y(a) = y_a \in \mathbb{R}, \quad z(b) = z_b \in \mathbb{R}.$$

Sistem (47) na intervalu rešujemo s **strelsko metodo**, tako da ugotovimo vrednost $z(a) = \alpha_1$, rešimo začetni problem z eno od numeričnih metod in pogledamo, ali je v rešitvi res $z(b) = z_b$. To skoraj gotovo ne bo izpolnjeno.

Zato uvedemo **funkcijo napake**

$$F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, \quad \alpha \mapsto z_b - z(b).$$

Radi bi našli α , tako, da je $F(\alpha) = 0$. Iščemo torej ničlo funkcije F . Ker F ni eksplicitno podana, tangentne metode za iskanje ničle F ne moremo uporabiti. Lahko pa uporabimo sekantno metodo, pri čemer sprva izračunamo $F(\alpha_1)$ in $F(\alpha_2)$ za dva začetna približka α_1, α_2 .

Algoritem in primer: klik klik