

Numerické metody

11. přednáška, 2. května 2017

Jiří Zelinka

Opakování – Gaussova eliminační metoda

Úprava soustavy na soustavu s horní trojúhelníkovou maticí R :

$$(A | \mathbf{b}) \longrightarrow (R | \tilde{\mathbf{b}})$$

Pak provádíme tzv. zpětný chod – počítáme řešení od poslední složky k první.

Elementární úpravy a matice úprav

Nemění řešení, každá úprava má inverzi.

1. násobení řádku nenulovou konstantou c

$$I_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & c & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 1 \end{pmatrix}, \quad I_c^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & 1/c & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

2. výměna řádků i, k

$$P_{i,k} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & & & \dots & & & & & & 0 \\ 0 & 1 & & & & & & & & & 0 \\ & & \ddots & & & & & & & & \\ & & & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ & & & 0 & 0 & 1 & & & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ & & 0 & 0 & & & & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & 0 & 1 & 0 & \dots & & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & \dots & & 0 & 0 & 1 & & \\ & & \vdots & & & & & & & & \ddots & \\ 0 & & 0 & & & & & & & & & 1 \end{pmatrix}, \quad P_{i,k}^{-1} = P_{i,k}$$

$P_{i,k}$ – permutační matice

3. přičtení c násobku i -tého řádku ke k -tému, $i < k$

$$G_{i,k,c} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & & & 0 \\ 0 & 1 & \dots & & & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \\ i & & & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ k & & & c & & 1 & \\ & & & & & & \ddots \\ 0 & & & & & & & 1 \end{pmatrix}.$$

$$G_{i,k,c}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & & & 0 \\ 0 & 1 & \dots & & & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \\ i & & & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ k & & & -c & & 1 & & \\ & & & & & & \ddots & \\ 0 & & & & & & & & 1 \end{pmatrix}.$$

Ve skutečnosti pro převod na trojúhelníkovou matici stačí 2. a 3. elementární úprava.

Postup při Gaussově eliminaci

(1) výměna 1. a k -tého řádku (v případě potřeby)

$$(A | \mathbf{b}) \longrightarrow (A^{(1)} | \mathbf{b}^{(1)}), \quad (A^{(1)} | \mathbf{b}^{(1)}) = P_{1,k} \cdot (A | \mathbf{b})$$

(1') vynulování prvního sloupce pod hlavní diagonálou

$$(A^{(1')} | \mathbf{b}^{(1')}) = G_1 \cdot (A^{(1)} | \mathbf{b}^{(1)}), \quad G_1 = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & \cdots & 0 \\ l_{21} & 1 & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix},$$

$$l_{k1} = -\frac{a_{k1}^{(1)}}{a_{11}^{(1)}}$$

(i) výměna i -tého. a k -tého řádku (v případě potřeby)

$$\left(A^{(i)} \mid \mathbf{b}^{(i)} \right) = P_{i,k} \cdot \left(A^{(i-1')} \mid \mathbf{b}^{(i-1')} \right)$$

(i') vynulování i -tého sloupce pod hlavní diagonálou

$$\left(A^{(i')} \mid \mathbf{b}^{(i')} \right) = G_i \cdot \left(A^{(i)} \mid \mathbf{b}^{(i)} \right),$$

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 & & \cdots & & 0 \\ & \ddots & & & \\ \vdots & & 1 & & \\ & l_{i+1,i} & \ddots & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ 0 & l_{n,i} & & & 1 \end{pmatrix}, \quad l_{ki} = -\frac{a_{ki}^{(i)}}{a_{ii}^{(i)}}$$

$$i = 2, \dots, n-1$$

Gaussova eliminace bez výměny řádků:

$$(R \mid \tilde{\mathbf{b}}) = G_{n-1} \cdot \dots \cdot G_2 \cdot G_1 \cdot (A \mid \mathbf{b})$$

tedy

$$R = G_{n-1} \cdot \dots \cdot G_2 \cdot G_1 \cdot A$$

odkud

$$G_1^{-1} G_2^{-1} \dots G_{n-1}^{-1} R = A.$$

Matice G_i jsou dolní trojúhelníková, tedy G_1^{-i} jsou také dolní trojúhelníkové, takže

$$A = L \cdot R, \quad L = G_1^{-1} G_2^{-1} \dots G_{n-1}^{-1}.$$

L – dolní trojúhelníková matice.

$$G_i^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & & \dots & & & & 0 \\ & \ddots & & & & & \\ \vdots & & 1 & & & & \\ & & -l_{i+1,i} & \ddots & & & \\ & & \vdots & & \ddots & & \\ 0 & & -l_{ni} & & & & 1 \end{pmatrix},$$

pak

$$L = G_1^{-1} G_2^{-1} \dots G_{n-1}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & \dots & 0 \\ -l_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ -l_{n1} & \dots & -l_{n,n-1} & 1 \end{pmatrix}.$$

LR rozklad

$A = L \cdot R$: LR (též LU) rozklad matice A

Použití při řešení soustavy: substituce $R\mathbf{x} = \mathbf{y}$, řešíme soustavu $L\mathbf{y} = \mathbf{b}$ s dolní trojúhelníkovou maticí, pak $R\mathbf{x} = \mathbf{y}$ s horní trojúhelníkovou maticí.

LR rozklad s výměnou řádků

Provádíme LR rozklad matice $P \cdot A$, kde P je vhodná permutační matice, která provádí výměnu řádků.

Při praktickém výpočtu, pokud narazíme na potřebu vyměnit řádky, postupujeme takto:

Pokud bychom vyměnili řádky předem, v už vypočítané části matice L by tyto řádky byly vyměněny, zbytek by se nezměnil.

Proto můžeme vyměnit řádky ve vypočítané části matice L .

Dále v pomocném vektoru \mathbf{p} na začátku nastaveném na $(1, 2, \dots, n)^T$ zaznamenáme výměnu řádků, tedy vyměníme v něm stejné řádky.

Příklad

$$2x_1 + 4x_2 - x_3 = -5$$

$$x_1 + x_2 - 3x_3 = -9$$

$$4x_1 + x_2 + 2x_3 = 9$$

Výběr vedoucího prvku (pivota) – částečný

Při úpravě i -tého sloupce najdeme mezi prvky $a_{ii}^{(i-1)}, \dots, a_{ni}^{(i-1)}$ prvek s maximální absolutní hodnotou (např. $a_{ki}^{(i-1)}$), pak vyměníme i -tý a k -tý řádek.

Výběr vedoucího prvku (pivota) – úplný

Hledáme prvek s maximální absolutní hodnotou mezi $a_{jk}^{(i-1)}$, $i \leq j \leq n$, $i \leq k \leq n$, pak vyměníme příslušný řádek a sloupec, čímž se změní pořadí proměnných.

Příklad:

LR rozklad matice

$$A = \begin{pmatrix} 0,0001 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

se zaokrouhlováním na 3 platné číslice.

Věta

Nechť všechny hlavní minory matice $A \in \mathcal{M}_n$ jsou různé od nuly, tj.

$$a_{11} \neq 0, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \neq 0, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \neq 0, \dots \det A \neq 0.$$

Pak matici A lze rozložit na součin dolní a horní trojúhelníkové matice.

Důsledky

- Nechť matice A je pozitivně definitní. Pak GEM lze provést bez výměny řádků a sloupců.
- Nechť matice A je ryze řádkově diagonálně dominantní. Pak GEM lze provést bez výměny řádků a sloupců.

Věta

Nechť matice A je symetrická a její všechny hlavní minory matice $A \in \mathcal{M}_n$ jsou různé od nuly, tj.

$$a_{11} \neq 0, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \neq 0, \quad \dots, \quad \det A \neq 0.$$

Pak existuje taková horní trojúhelníková matice $T \in \mathcal{M}_n$, že $A = T^T T$.

Prvky matice $T = (t_{ij})$:

- $t_{11} = \sqrt{a_{11}}, \quad t_{1j} = \frac{a_{1j}}{t_{11}}, \quad j = 2, \dots, n,$

- $t_{ii} = \sqrt{a_{ii} - \sum_{l=1}^{i-1} t_{li}^2}, \quad i = 2, \dots, n$

- $t_{ij} = \frac{1}{t_{ii}}(a_{ij} - \sum_{l=1}^{i-1} t_{li}t_{lj}), \quad j > i \quad t_{ij} = 0, \quad j < i$

Příklad

$$\begin{aligned}x_1 + 2x_2 - x_3 &= 4 \\2x_1 + 2x_2 + 4x_3 &= 1 \\-x_1 + 4x_2 + 8x_3 &= -8\end{aligned}$$