Optimalizace

Simplexová metoda

Tomáš Kroupa Tomáš Werner

2024

Fakulta elektrotechnická
ČVUT v Praze

Co zatím víme o úloze LP

$$\min\{\, \mathbf{c}^T\mathbf{x} \mid \underbrace{\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b},\ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n}_{X} \,\}, \qquad \mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n},\ \mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$$

- Je-li úloha přípustná ($X \neq \emptyset$), konvexní polyedr X neobsahuje přímku a tedy X má alespoň jeden vrchol
- Je-li navíc úloha omezená (minimum lineární funkce $\mathbf{c}^T\mathbf{x}$ na X existuje), minima se nabývá v nějakém vrcholu
- Je tedy klíčové umět efektivně procházet vrcholy polyedru X

Simplexová metoda (Dantzig, 1947)

- Založena na prohledávání grafu polyedru (vrcholy–hrany) a iterativním zlepšování hodnot účelové funkce
- Výběr dalšího vrcholu odpovídá výběru *pivota*

Základní předpoklady

1. Úloha LP v rovnicovém tvaru

$$\min\{\, \mathbf{c}^T\mathbf{x} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \,\}, \qquad \mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n},\ \mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$$

2. $\operatorname{rank} \mathbf{A} = m$

Báze a bázová řešení

Definice

Báze je m-prvková množina $J \subseteq \{1, \ldots, n\}$ taková, že sloupce matice $\mathbf{A}$ indexované množinou J jsou lineárně nezávislé.

Bázové řešení

Pro každou bázi J má soustava $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ jediné řešení $\mathbf{x}$ splňující $x_j = 0$ pro všechna $j \notin J$. Takové řešení se nazývá

- přípustné, pokud $\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$,
- degenerované, pokud $x_j = 0$ pro nějaké $j \in J$.

Příklad

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{array}{cccccc|c} -1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 1 & 4 & 4 \\ -1 & 0 & 4 & 1 & 1 & 4 & 2 \end{array}$$

-

Příklad

$$\begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{b}\end{bmatrix} = \begin{matrix} -1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 1 & 4 & 4 \\ -1 & 0 & 4 & 1 & 1 & 4 & 2 \end{matrix}$$

- $\{2, 3, 5\}$ není báze (sloupce jsou lineárně závislé)

Příklad

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{array}{rrrrrrr} -1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 1 & 4 & 4 \\ -1 & 0 & 4 & 1 & 1 & 4 & 2 \end{array}$$

$$\mathbf{x} = \begin{array}{rrrrrr} 3 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \end{array}$$

- $\{1, 4, 5\}$ je báze. Bázové řešení $\mathbf{x}$ je řešením soustavy

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix}, \qquad x_2 = x_3 = x_6 = 0.$$

Je přípustné, není degenerované.

Příklad

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{array}{rrrrrrr} -1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 1 & 4 & 4 \\ -1 & 0 & 4 & 1 & 1 & 4 & 2 \end{array}$$

$$\mathbf{x} = \begin{array}{rrrrrr} 4 & -1 & 0 & 6 & 0 & 0 \end{array}$$

- $\{1, 2, 4\}$ je báze. Bázové řešení je nepřípustné, není degenerované.

Příklad

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{matrix} -1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 1 & 4 & 4 \\ -1 & 0 & 4 & 1 & 1 & 4 & 2 \end{matrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{matrix} 0 & 0 & 1 & -2 & 0 & 0 \end{matrix}$$

- $\{3, 4, 5\}$ je báze. Bázové řešení je nepřípustné a degenerované.

Příklad

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{array}{rrrrrrr} -1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 1 & 4 & 4 \\ -1 & 0 & 4 & 1 & 1 & 4 & 2 \end{array}$$

$$\mathbf{x} = \begin{array}{rrrrrr} 0 & 0 & 1 & -2 & 0 & 0 \end{array}$$

- Stejné bázové řešení odpovídá bázi $\{3, 4, 6\}$.

  Degenerované bázové řešení odpovídá více bázím!

Báze a vrcholy

Tvrzení

Pro bod $\mathbf{x}$ konvexního polyedru jsou tato tvrzení ekvivalentní.

- $\mathbf{x}$ je přípustné bázové řešení.
- $\mathbf{x}$ vrchol.

Báze jsou sousední, pokud mají společných $m - 1$ prvků.

- Sousední báze odpovídají dvěma vrcholům spojených hranou anebo jedinému degenerovanému vrcholu
- Simplexová metoda přechází mezi sousedními bázemi, přičemž zachovává přípustnost řešení a účelová funkce neroste

Standardní báze

Simplexová metoda používá jen standardní bázi:

- Nenulové složky bázového řešení $\mathbf{x}$ jsou jednoduše složky $\mathbf{b}$
- Tedy bázové řešení $\mathbf{x}$ je přípustné, právě když $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$

Standardní báze

Simplexová metoda používá jen standardní bázi:

- Nenulové složky bázového řešení $\mathbf{x}$ jsou jednoduše složky $\mathbf{b}$
- Tedy bázové řešení $\mathbf{x}$ je přípustné, právě když $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{array}{cccccc|c} 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{array}$$

$$\mathbf{x} = \begin{array}{cccccc} 3 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \end{array}$$

Bázové řešení příslušné standardní bázi $\{1, 4, 5\}$ je řešením soustavy

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}, \qquad x_2 = x_3 = x_6 = 0$$

Základní prvky algoritmu

Přechod k sousední standardní bázi

Chceme bázový sloupec $j' \in J$ nahradit nebázovým sloupcem $j \notin J$:

- Pivot je prvek a_{ij}, kde i je řádek splňující $a_{ij'} = 1$
- Ekvivalentní úprava kolem pivotu a_{ij} spočívá v nastavení $a_{ij} := 1$ a $a_{i'j} := 0$ pro každé $i' \neq i$:

Přechod k sousední standardní bázi

Chceme bázový sloupec $j' \in J$ nahradit nebázovým sloupcem $j \notin J$:

- Pivot je prvek a_{ij}, kde i je řádek splňující $a_{ij'} = 1$
- Ekvivalentní úprava kolem pivotu a_{ij} spočívá v nastavení $a_{ij} := 1$ a $a_{i'j} := 0$ pro každé $i' \neq i$:

$$
\begin{array}{cccccccc}
 & 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\
 & 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\
i & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \\
 & & j & & & j' & &
\end{array}
$$

Přechod k sousední standardní bázi

Chceme bázový sloupec $j' \in J$ nahradit nebázovým sloupcem $j \notin J$:

- Pivot je prvek a_{ij}, kde i je řádek splňující $a_{ij'} = 1$
- Ekvivalentní úprava kolem pivotu a_{ij} spočívá v nastavení $a_{ij} := 1$ a $a_{i'j} := 0$ pro každé $i' \neq i$:
    1. Vyděl řádek i pivotem a_{ij}.

$$\begin{array}{cccccccc}
 & 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\
 & 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\
i & 0 & \color{red}{1} & -1 & 0 & -1 & -2 & -1 \\
 & & j & & & j' & &
\end{array}$$

Přechod k sousední standardní bázi

Chceme bázový sloupec $j' \in J$ nahradit nebázovým sloupcem $j \notin J$:

- Pivot je prvek a_{ij}, kde i je řádek splňující $a_{ij'} = 1$
- Ekvivalentní úprava kolem pivotu a_{ij} spočívá v nastavení $a_{ij} := 1$ a $a_{i'j} := 0$ pro každé $i' \neq i$:
  1. Vyděl řádek i pivotem a_{ij}.
  2. Pro každé $i' \neq i$ odečti $a_{i'j}$-násobek řádku i od řádku i'.

$$
\begin{array}{cccccccc}
 & 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\
 & 1 & {\color{red}0} & 4 & 0 & 1 & 0 & 4 \\
i & 0 & {\color{red}1} & -1 & 0 & -1 & -2 & -1 \\
 & & j & & & j' & &
\end{array}
$$

Přechod k sousední standardní bázi

Chceme bázový sloupec $j' \in J$ nahradit nebázovým sloupcem $j \notin J$:

- Pivot je prvek a_{ij}, kde i je řádek splňující $a_{ij'} = 1$
- Ekvivalentní úprava kolem pivotu a_{ij} spočívá v nastavení $a_{ij} := 1$ a $a_{i'j} := 0$ pro každé $i' \neq i$:
  1. Vyděl řádek i pivotem a_{ij}.
  2. Pro každé $i' \neq i$ odečti $a_{i'j}$-násobek řádku i od řádku i'.

$$
\begin{array}{cccccccc}
 & 0 & 0 & 8 & 1 & 2 & 8 & 6 \\
 & 1 & 0 & 4 & 0 & 1 & 0 & 4 \\
i & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & -2 & -1 \\
 & & j & & & j' & &
\end{array}
$$

Bude nové bázové řešení přípustné?

Jak se změní **b** po ekvivalentní úpravě kolem pivotu a_{ij}?

- $b_i := b_i / a_{ij}$
- Pro každé $i' \neq i$ bude $b_{i'} := b_{i'} - a_{i'j} \dfrac{b_i}{a_{ij}}$

Tato čísla musejí zůstat nezáporná, což nastane právě když

$$a_{ij} > 0 \quad \text{a} \quad \forall i' \neq i \text{ platí } a_{i'j} \leq 0 \text{ nebo } \frac{b_i}{a_{ij}} \leq \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

$$\begin{array}{cccccccc} 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & & 1 \end{array}$$

Bude nové bázové řešení přípustné?

Jak se změní $\mathbf{b}$ po ekvivalentní úpravě kolem pivotu a_{ij}?

- $b_i := b_i / a_{ij}$
- Pro každé $i' \neq i$ bude $b_{i'} := b_{i'} - a_{i'j} \dfrac{b_i}{a_{ij}}$

Tato čísla musejí zůstat nezáporná, což nastane právě když

$$a_{ij} > 0 \quad \text{a} \quad \forall i' \neq i \text{ platí } a_{i'j} \leq 0 \text{ nebo } \frac{b_i}{a_{ij}} \leq \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

$$\begin{array}{cccccc c}
0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\
1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\
0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1
\end{array}$$

- Po úpravě kolem $(3, 2)$ nebude $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$, neboť $-1 \not\geq 0$

Bude nové bázové řešení přípustné?

Jak se změní $\mathbf{b}$ po ekvivalentní úpravě kolem pivotu a_{ij}?

- $b_i := b_i / a_{ij}$
- Pro každé $i' \neq i$ bude $b_{i'} := b_{i'} - a_{i'j} \dfrac{b_i}{a_{ij}}$

Tato čísla musejí zůstat nezáporná, což nastane právě když

$$a_{ij} > 0 \quad \text{a} \quad \forall i' \neq i \text{ platí } a_{i'j} \leq 0 \text{ nebo } \frac{b_i}{a_{ij}} \leq \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

$$\begin{array}{cccccc|c} 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & \color{red}{1} & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{array}$$

- Po úpravě kolem $(2,2)$ nebude $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$, neboť $\frac{3}{1} \not\leq \frac{4}{2}$

Bude nové bázové řešení přípustné?

Jak se změní $\mathbf{b}$ po ekvivalentní úpravě kolem pivotu a_{ij}?

- $b_i := b_i / a_{ij}$
- Pro každé $i' \neq i$ bude $b_{i'} := b_{i'} - a_{i'j} \dfrac{b_i}{a_{ij}}$

Tato čísla musejí zůstat nezáporná, což nastane právě když

$$a_{ij} > 0 \quad \text{a} \quad \forall i' \neq i \text{ platí } a_{i'j} \leq 0 \text{ nebo } \frac{b_i}{a_{ij}} \leq \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

$$\begin{array}{cccccc c} 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{array}$$

- Po úpravě kolem $(3,6)$ bude $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$, neboť $2 > 0$, $\frac{1}{2} \leq \frac{3}{2}$, $\frac{1}{2} \leq \frac{4}{4}$

Nekladný sloupec

Když jsou všechny prvky v nebázovém sloupci $j \notin J$ nekladné:

- Sloupec j se nemůže stát bázovým (nelze v něm vybrat pivot)
- Existuje směr $\mathbf{v}$ tak, že $\mathbf{x} + \alpha\mathbf{v} \in X$ pro každé $\alpha \geq 0$

$$\begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{b}\end{bmatrix} = \begin{matrix} 0 & -2 & 6 & 1 & 0 & 4 & & 4 \\ 1 & -1 & 3 & 0 & 0 & 2 & & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & & 1 \end{matrix}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{matrix} 3 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \end{matrix} \\ \mathbf{v} &= \begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 \end{matrix} \end{aligned}$$

Ekvivalentní úpravy účelového řádku

Lineární program v rovnicovém tvaru

$$\min\{\, \mathbf{c}^T\mathbf{x} - d \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \,\}$$

reprezentujeme simplexovou tabulkou

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix}.$$

- Přičti k prvnímu řádku tabulky lineární kombinaci ostatních řádků,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \end{bmatrix} + \mathbf{y}^T \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^T + \mathbf{y}^T\mathbf{A} & d + \mathbf{y}^T\mathbf{b} \end{bmatrix}$$

- Pro přípustné $\mathbf{x}$ se tím hodnota účelové funkce nezmění, protože

$$(\mathbf{c}^T + \mathbf{y}^T\mathbf{A})\mathbf{x} - (d + \mathbf{y}^T\mathbf{b}) = \mathbf{c}^T\mathbf{x} - d$$

Redukované ceny

Bázové složky c_j vektoru $\mathbf{c}$ vynulujeme:

$$
\begin{array}{rcccccccc}
\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \end{bmatrix} = & 1 & -2 & -3 & -1 & 2 & 1 & & 4 \\
 & \color{red}{0} & 2 & 6 & \color{red}{1} & \color{red}{0} & 4 & & 4 \\
\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = & \color{red}{1} & 1 & 3 & \color{red}{0} & \color{red}{0} & 2 & & 3 \\
 & \color{red}{0} & -1 & 1 & \color{red}{0} & \color{red}{1} & 2 & & 1 \\
 & & & & & & & & \\
\mathbf{x} = & 3 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 & &
\end{array}
$$

Redukované ceny

Bázové složky c_j vektoru $\mathbf{c}$ vynulujeme:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{c}^T & d\end{bmatrix} = \begin{array}{cccccc|c} 0 & -3 & -6 & -1 & 2 & -1 & 1 \end{array}$$

$$\begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{b}\end{bmatrix} = \begin{array}{cccccc|c} 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{array}$$

$$\mathbf{x} = \begin{array}{cccccc} 3 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \end{array}$$

Redukované ceny

Bázové složky c_j vektoru $\mathbf{c}$ vynulujeme:

$$
\begin{aligned}
\begin{bmatrix}\mathbf{c}^T & d\end{bmatrix} &= \quad \begin{array}{cccccc|c} \color{red}{0} & -1 & 0 & \color{red}{0} & 2 & 3 & 5 \end{array} \\
\begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{b}\end{bmatrix} &= \quad \begin{array}{cccccc|c} \color{red}{0} & 2 & 6 & \color{red}{1} & \color{red}{0} & 4 & 4 \\ \color{red}{1} & 1 & 3 & \color{red}{0} & \color{red}{0} & 2 & 3 \\ \color{red}{0} & -1 & 1 & \color{red}{0} & \color{red}{1} & 2 & 1 \end{array} \\
\mathbf{x} &= \quad \begin{array}{cccccc} 3 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \end{array}
\end{aligned}
$$

Redukované ceny

Bázové složky c_j vektoru $\mathbf{c}$ vynulujeme:

$$
\begin{aligned}
\begin{bmatrix}\mathbf{c}^T & d\end{bmatrix} &= \begin{array}{cccccccc} \color{red}{0} & 1 & -2 & \color{red}{0} & \color{red}{0} & -1 & & 3 \end{array} \\
\begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{b}\end{bmatrix} &= \begin{array}{cccccccc} \color{red}{0} & 2 & 6 & \color{red}{1} & \color{red}{0} & 4 & & 4 \\ \color{red}{1} & 1 & 3 & \color{red}{0} & \color{red}{0} & 2 & & 3 \\ \color{red}{0} & -1 & 1 & \color{red}{0} & \color{red}{1} & 2 & & 1 \end{array} \\
\mathbf{x} &= \begin{array}{cccccc} 3 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \end{array}
\end{aligned}
$$

Redukované ceny

Bázové složky c_j vektoru $\mathbf{c}$ vynulujeme:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \end{bmatrix} = \quad \begin{matrix} 0 & 1 & -2 & 0 & 0 & -1 & & 3 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \quad \begin{matrix} 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & & 1 \end{matrix}$$

$$\mathbf{x} = \quad \begin{matrix} 3 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \end{matrix}$$

- Protože $\mathbf{c}^T\mathbf{x} = 0$, platí $\mathbf{c}^T\mathbf{x} - d = -d = -3$
- Z toho je vidět, co udělá vstup sloupce $j \notin J$ do báze:
  - Pokud $c_j \geq 0$, účelová hodnota neklesne
  - Pokud $c_j \leq 0$, účelová hodnota nestoupne
- Pokud v některém sloupci j je $c_j < 0$ a $a_{ij} \leq 0$ pro všechna i, účelovou funkci lze libovolně zmenšovat $\Rightarrow$ úloha je neomezená

Základní algoritmus

Tvar simplexové tabulky

Na vstupu a při běhu algoritmu všechny simplexové tabulky

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix}$$

splňují:

- Podmnožina sloupců **A** tvoří standardní bázi
- $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$
- Platí $c_j = 0$ v bázových sloupcích $j \in J$

Iterace simplexového algoritmu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{rrrrrr|r} 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ \hline 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{array}\right]$$

1. Vyber sloupec j pivotu tak, aby $c_j < 0$ (minimalizace)

Iterace simplexového algoritmu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccccc|c} 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ \hline 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{array}\right]$$

1. Vyber sloupec j pivotu tak, aby $c_j < 0$ (minimalizace)
2. Vyber řádek i pivotu tak, aby nové bázové řešení bylo přípustné:

$$i \in \operatorname*{arg\,min}_{i' \mid a_{i'j} > 0} \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

Iterace simplexového algoritmu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{rrrrrr|r} 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ \hline 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & \color{red}{2} & 1 \end{array}\right]$$

1. Vyber sloupec j pivotu tak, aby $c_j < 0$ (minimalizace)
2. Vyber řádek i pivotu tak, aby nové bázové řešení bylo přípustné:

$$i \in \operatorname*{arg\,min}_{i' \mid a_{i'j} > 0} \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

3. Udělej ekvivalentní úpravu okolo pivotu (i, j) a redukuj cenu c_j:

Iterace simplexového algoritmu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccccc|c} 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ \hline 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & \color{red}{2} & 1 \end{array}\right]$$

1. Vyber sloupec j pivotu tak, aby $c_j < 0$ (minimalizace)
2. Vyber řádek i pivotu tak, aby nové bázové řešení bylo přípustné:

$$i \in \operatorname*{arg\,min}_{i' \mid a_{i'j} > 0} \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

3. Udělej ekvivalentní úpravu okolo pivotu (i, j) a redukuj cenu c_j:
   - nastav pivot na jedničku

Iterace simplexového algoritmu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{rrrrrr|r} 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ \hline 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & -0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & \color{red}{1} & 0.5 \end{array}\right]$$

1. Vyber sloupec j pivotu tak, aby $c_j < 0$ (minimalizace)
2. Vyber řádek i pivotu tak, aby nové bázové řešení bylo přípustné:

$$i \in \operatorname*{arg\,min}_{i' \mid a_{i'j} > 0} \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

3. Udělej ekvivalentní úpravu okolo pivotu (i, j) a redukuj cenu c_j:
    - nastav pivot na jedničku
    - vynuluj prvky nad a pod pivotem

Iterace simplexového algoritmu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{rrrrrr|r} 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ \hline 0 & 2 & 6 & 1 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & -1 & \color{red}{0} & 2 \\ 0 & -0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & \color{red}{1} & 0.5 \end{array}\right]$$

1. Vyber sloupec j pivotu tak, aby $c_j < 0$ (minimalizace)
2. Vyber řádek i pivotu tak, aby nové bázové řešení bylo přípustné:

$$i \in \operatorname*{arg\,min}_{i' \mid a_{i'j} > 0} \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

3. Udělej ekvivalentní úpravu okolo pivotu (i, j) a redukuj cenu c_j:
   - nastav pivot na jedničku
   - vynuluj prvky nad a pod pivotem

Iterace simplexového algoritmu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{rrrrrr|r} 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ \hline 0 & 4 & 4 & 1 & -2 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & -1 & 0 & 2 \\ 0 & -0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 \end{array}\right]$$

1. Vyber sloupec j pivotu tak, aby $c_j < 0$ (minimalizace)
2. Vyber řádek i pivotu tak, aby nové bázové řešení bylo přípustné:

$$i \in \operatorname*{arg\,min}_{i' \mid a_{i'j} > 0} \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

3. Udělej ekvivalentní úpravu okolo pivotu (i, j) a redukuj cenu c_j:
   - nastav pivot na jedničku
   - vynuluj prvky nad a pod pivotem

Iterace simplexového algoritmu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{rrrrrr|r} 0 & -3.5 & 2.5 & 0 & 1.5 & \color{red}{0} & 1.5 \\ \hline 0 & 4 & 4 & 1 & -2 & \color{red}{0} & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & -1 & \color{red}{0} & 2 \\ 0 & -0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & \color{red}{1} & 0.5 \end{array}\right]$$

1. Vyber sloupec j pivotu tak, aby $c_j < 0$ (minimalizace)
2. Vyber řádek i pivotu tak, aby nové bázové řešení bylo přípustné:

$$i \in \operatorname*{arg\,min}_{i' \mid a_{i'j} > 0} \frac{b_{i'}}{a_{i'j}}$$

3. Udělej ekvivalentní úpravu okolo pivotu (i, j) a redukuj cenu c_j:
   - nastav pivot na jedničku
   - vynuluj prvky nad a pod pivotem

Ukončení algoritmu

Algoritmus končí, když je splněna jedna z podmínek:

- Všechny ceny c_j jsou nezáporné (jsme v minimu).

$$\begin{array}{rrrrrr|r}
0 & 0 & 7 & 1 & 0 & 1 & 4 \\
\hline
0 & 1 & 3 & 0.5 & 0 & 2 & 2 \\
1 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 4 & 0.5 & 1 & 4 & 3
\end{array}$$

Ukončení algoritmu

Algoritmus končí, když je splněna jedna z podmínek:

- Všechny ceny c_j jsou nezáporné (jsme v minimu).

$$\begin{array}{rrrrrr|r} 0 & 0 & 7 & 1 & 0 & 1 & 4 \\ \hline 0 & 1 & 3 & 0.5 & 0 & 2 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 4 & 0.5 & 1 & 4 & 3 \end{array}$$

- V každém sloupci j, ve kterém $c_j < 0$, je $a_{ij} \leq 0$ pro všechna i (úloha je neomezená).

$$\begin{array}{rrrrrr|r} 0 & 0 & 7 & -1 & 0 & 1 & 4 \\ \hline 0 & 1 & 3 & -0.5 & 0 & 2 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 4 & -0.5 & 1 & 4 & 3 \end{array}$$

Cyklení

Algoritmus nemusí vždy skončit kvůli *cyklení*.

-2.3	-2.15	13.55	0.4	0	0	0
0.4	0.2	-1.4	-0.2	1	0	0
-7.8	-1.4	7.8	0.4	0	1	0

Cyklení

Algoritmus nemusí vždy skončit kvůli *cyklení*.

0	-1	5.5	-0.75	5.75	0	0
1	0.5	-3.5	-0.5	2.5	0	0
0	2.5	-19.5	-3.5	19.5	1	0

Cyklení

Algoritmus nemusí vždy skončit kvůli *cyklení*.

0	0	-2.3	-2.15	13.55	0.4	0
1	0	0.4	0.2	-1.4	-0.2	0
0	1	-7.8	-1.4	7.8	0.4	0

Tohle je počáteční tabulka se sloupci rotovanými o dva doprava.

Další 4 iterace dospějí do počáteční tabulky!

Cyklení

Algoritmus nemusí vždy skončit kvůli *cyklení*.

$$
\begin{array}{rrrrrr|r}
0 & 0 & -2.3 & -2.15 & 13.55 & 0.4 & 0 \\
\hline
1 & 0 & 0.4 & 0.2 & -1.4 & -0.2 & 0 \\
0 & 1 & -7.8 & -1.4 & 7.8 & 0.4 & 0
\end{array}
$$

Tohle je počáteční tabulka se sloupci rotovanými o dva doprava.
Další 4 iterace dospějí do počáteční tabulky!

Cyklům se vyhne Blandovo anticyklící pravidlo:

- Při výběru pivotového sloupce vyber sloupec s nejnižším indexem
- Při výběru pivotového řádku vždy vyber řádek s nejnižším indexem

Inicializace algoritmu – speciální případ

Pro zahájení simplexového algoritmu musíme úlohu převést na tvar

$$\min\{\, \mathbf{c}^T\mathbf{x} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \,\}$$

kde podmnožina sloupců $\mathbf{A}$ tvoří standardní bázi a $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$.

- Někdy je to snadné. Např. když má vstupní úloha tvar

$$\min\{\, \mathbf{c}^T\mathbf{x} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \,\}, \qquad \mathbf{b} \geq \mathbf{0}$$

- Přidáním slackových proměnných $\mathbf{u}$ ji převedeme na úlohu

$$\min\{\, \mathbf{c}^T\mathbf{x} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{u} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0},\ \mathbf{u} \geq \mathbf{0} \,\}$$

  se simplexovou tabulkou

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{A} & \mathbf{I} & \mathbf{b} \end{bmatrix}$$

  ve které sloupce příslušné proměnným $\mathbf{u}$ tvoří standardní bázi $\mathbf{I}$

Inicializace algoritmu – obecný případ

- Vstupní lineární program lze vždy efektivně převést na tvar

$$\min\{\, \mathbf{c}^T\mathbf{x} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0}\,\}$$

  kde $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$
- Ale $\mathbf{A}$ nemusí obsahovat standardní bázi!

Dvoufázová simplexová metoda

Dvoufázová simplexová metoda

Vyřeš pomocnou úlohu

$$\min\{\, \mathbf{1}^T\mathbf{u} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{u} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0},\ \mathbf{u} \geq \mathbf{0} \,\} \tag{1}$$

se simplexovou tabulkou $\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1}^T & 0 \\ \mathbf{A} & \mathbf{I} & \mathbf{b} \end{bmatrix}$.

- Vstupní úloha nepřípustná $\Leftrightarrow$ (1) má kladnou optimální hodnotu
- Vstupní úloha **přípustná** $\Leftrightarrow$ (1) má nulovou optimální hodnotu
  - Je-li optimální řešení **nedegenerované**, pak všechny sloupce příslušné proměnným $\mathbf{u}$ jsou nebázové, proto matice $\mathbf{A}$ obsahuje standardní bázi
  - Je-li je optimální řešení **degenerované**, některé sloupce příslušné proměnným $\mathbf{u}$ mohou být bázové.
    Dalším pivotováním je možno bázi z těchto sloupců 'vyhnat'.