

1 Formulácia úloh lineárneho programovania

Máme dané vektory y, x_1, x_2, \dots, x_k . Chceme nájsť parametre $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ také, ktoré pre vektor $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$ minimalizujú normu $\|y - \hat{y}\|_1$, resp. normu $\|y - \hat{y}\|_\infty$.

Vyjadriť vektor \hat{y} ako súčin matice a vektora $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)^T$.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k = \begin{pmatrix} | & | & | & \dots & | \\ \mathbf{1}_n & x_1 & x_2 & \dots & x_k \\ | & | & | & & | \end{pmatrix} \beta =: \mathbf{A}\beta$$

1.1 Minimalizovanie L^1 normy

Prevedieme problém zo zadania do tvaru:

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x \\ \text{s.t.} \quad & Ax \geq b \end{aligned}$$

Zaved'eme si nový vektor premenných $t \in \mathbb{R}^n$, ktorým ohraničíme vektor $y - \mathbf{A}\beta$. Úloha sa teda z minimalizovania normy $\|y - \mathbf{A}\beta\|_1$ prevedie na minimalizáciu $\mathbf{1}_n^T t$.

$$-t \leq y - \mathbf{A}\beta \leq t$$

Pre obe ohraničenia, odseparujeme premenné od konštánt a prevedieme do maticového tvaru.

$$\begin{aligned} (\mathbf{A} \mid \mathbb{I}_n) \begin{pmatrix} \beta \\ t \end{pmatrix} &\geq y \\ (-\mathbf{A} \mid \mathbb{I}_n) \begin{pmatrix} \beta \\ t \end{pmatrix} &\geq -y \end{aligned}$$

Minimalizovanie L^1 normy ako úloha lineárneho programovania vyzerá teda nasledovne.

$$\begin{aligned} \min \quad & (\mathbf{0}_{k+1}^T \mid \mathbf{1}_n^T) \begin{pmatrix} \beta \\ t \end{pmatrix} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{pmatrix} \mathbf{A} \mid \mathbb{I}_n \\ -\mathbf{A} \mid \mathbb{I}_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ t \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} y \\ -y \end{pmatrix} \\ & \beta \in \mathbb{R}^{k+1}, \quad t \geq \mathbf{0}_n \end{aligned} \tag{1}$$

1.1.1 Prípustnosť a optimalita

Dokážme, že (1) je úloha, ktorá nadobúda optimálne riešenie pre ľubovoľné vektory y, x_1, x_2, \dots, x_k . Nech $|y| := (|y_1|, |y_2|, \dots, |y_n|)^T$ pre $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$. Ukážme prípustnosť zvolením $\beta = \mathbf{0}_{k+1}$ a $t = |y|$:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \mathbf{A} \mid \mathbb{I}_n \\ -\mathbf{A} \mid \mathbb{I}_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{k+1} \\ |y| \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} |y| \\ |y| \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} y \\ -y \end{pmatrix} \\ & |y| \geq \mathbf{0}_n \end{aligned}$$

Vidíme, že obe ohraňičenia platia, čiže $(\mathbf{0}_{k+1}^T, |y|^T)^T$ je prípustné riešenie.

Optimalitu ukážeme zo slabej duality. Sformulujme duálnu úlohu pre duálne premenné $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}^n$:

$$\begin{aligned} \max \quad & (y^T \mid -y^T) \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} \\ & (\mathbf{A}^T \mid -\mathbf{A}^T) \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \mathbf{0}_{k+1} \\ & (\mathbb{I}_n \mid \mathbb{I}_n) \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} \leq \mathbf{1}_n \\ & \alpha_1, \alpha_2 \geq \mathbf{0}_n \end{aligned}$$

Vidíme, že táto úloha je prípustná pre $\alpha_1 = \alpha_2 = \mathbf{0}_n$. Z prípustnosti primárnej a duálnej úlohy teda vyplýva, že úloha (1) nadobúda optimálne riešenie pre ľubovoľnú voľbu počiatočných vektorov.

1.2 Minimalizovanie L^∞ normy

Budeme používať rovnaké značenie pre predikovaný vektor hodnôt $\hat{y} = \mathbf{A}\beta$ ako pri formulácii L^1 normy. Zavedme si skalárnu premennú $\gamma \in \mathbb{R}$, vektorom $\gamma\mathbf{1}_n$ ohraňičíme vektor $y - \mathbf{A}\beta$. Úloha sa z minimalizácie $\|y - \mathbf{A}\beta\|_\infty$ prevedie na minimalizáciu γ .

$$-\gamma\mathbf{1}_n \leq y - \mathbf{A}\beta \leq \gamma\mathbf{1}_n$$

Pre jednotlivé ohraňičenia odseparujeme premenné od konštánt a zapíšeme v maticovom tvare.

$$\begin{aligned} (\mathbf{A} \mid \mathbf{1}_n) \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} &\geq y \\ (-\mathbf{A} \mid \mathbf{1}_n) \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} &\geq -y \end{aligned}$$

Minimalizovanie L^∞ normy ako úloha lineárneho programovania vyzerá teda nasledovne.

$$\begin{aligned} \min \quad & (\mathbf{0}_{k+1}^T \mid 1) \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \\ & \left(\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{1}_n \\ -\mathbf{A} & \mathbf{1}_n \end{array} \right) \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} y \\ -y \end{pmatrix} \\ & \beta \in \mathbb{R}^{k+1}, \gamma \geq 0 \end{aligned} \tag{2}$$

1.2.1 Prípustnosť a optimalita

Podobný spôsobom ako vyššie ukážeme optimalitu (2). Nech $\beta = \mathbf{0}_{k+1}$ a $\gamma = |\tilde{y}|$, kde $|\tilde{y}| := |\max(y_1, y_2, \dots, y_n)|$ pre $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$:

$$\left(\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{1}_n \\ \hline -\mathbf{A} & \mathbf{1}_n \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \mathbf{0}_{k+1} \\ |\tilde{y}| \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} |\tilde{y}| \mathbf{1}_n \\ |\tilde{y}| \mathbf{1}_n \end{array} \right) \geq \left(\begin{array}{c} y \\ -y \end{array} \right) \\ |\tilde{y}| \geq 0$$

Obe ohraničenia platia, čiže $(\mathbf{0}_{k+1}^T, |\tilde{y}|)^T$ je prípustné riešenie. Sformulujme duálnu úlohu s duálnymi premennými $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}^n$:

$$\begin{aligned} \max \quad & (y^T \mid -y^T) \left(\begin{array}{c} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{array} \right) \\ & (\mathbf{A}^T \mid -\mathbf{A}^T) \left(\begin{array}{c} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{array} \right) = \mathbf{0}_{k+1} \\ & (\mathbf{1}_n^T \mid \mathbf{1}_n^T) \left(\begin{array}{c} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{array} \right) \leq 1 \\ & \alpha_1, \alpha_2 \geq \mathbf{0}_n \end{aligned}$$

Rovnako vidíme, že táto úloha je prípustná pre $\alpha_1 = \alpha_2 = \mathbf{0}_n$. Teda, zo slabej duality, úloha (2) nadobúda optimálne riešenie pre ľubovoľnú voľbu počiatočných vektorov.