

### Příklad

Bylo provedeno měření výšky  $x_1$  (v cm) a váhy  $x_2$  (v kg) u pěti dětí. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do matice  $\mathbf{X}$ :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 101 & 16 \\ 105 & 18 \\ 103 & 42 \\ 98 & 23 \\ 93 & 6 \end{bmatrix}.$$

U tohoto datového souboru proveďte analýzu hlavních komponent.

### Řešení:

U analýzy hlavních komponent potřebujeme nejprve spočítat kovarianční matici  $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}$ . Pro výpočet kovarianční matice potřebujeme znát průměrnou výšku a váhu u  $n = 5$  dětí:

$$\bar{\mathbf{x}} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i1} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i2} \right] = \left[ \frac{1}{5} (101 + 105 + 103 + 98 + 93) \quad \frac{1}{5} (16 + 18 + 42 + 23 + 6) \right] = [100 \quad 21]$$

Jednotlivé prvky kovarianční matice poté spočítáme následujícím způsobem:

$$\begin{aligned} \text{Rozptyl výšky: } s_{11} &= \frac{1}{n-1} ((x_{11} - \bar{x}_1)^2 + (x_{21} - \bar{x}_1)^2 + (x_{31} - \bar{x}_1)^2 + (x_{41} - \bar{x}_1)^2 + (x_{51} - \bar{x}_1)^2) = \\ &= \frac{1}{5-1} ((101 - 100)^2 + (105 - 100)^2 + (103 - 100)^2 + (98 - 100)^2 + (93 - 100)^2) = \\ &= \frac{1}{4} (1 + 25 + 9 + 4 + 49) = \frac{1}{4} \cdot 88 = 22 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rozptyl váhy: } s_{22} &= \frac{1}{n-1} ((x_{12} - \bar{x}_2)^2 + (x_{22} - \bar{x}_2)^2 + (x_{32} - \bar{x}_2)^2 + (x_{42} - \bar{x}_2)^2 + (x_{52} - \bar{x}_2)^2) = \\ &= \frac{1}{5-1} ((16 - 21)^2 + (18 - 21)^2 + (42 - 21)^2 + (23 - 21)^2 + (6 - 21)^2) = \frac{1}{4} (25 + 9 + 441 + 4 + \\ &225) = \frac{1}{4} \cdot 704 = 176 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kovariance výšky a váhy: } s_{12} = s_{21} &= \frac{1}{n-1} ((x_{11} - \bar{x}_1)(x_{12} - \bar{x}_2) + (x_{21} - \bar{x}_1)(x_{22} - \bar{x}_2) + \\ &(x_{31} - \bar{x}_1)(x_{32} - \bar{x}_2) + (x_{41} - \bar{x}_1)(x_{42} - \bar{x}_2) + (x_{51} - \bar{x}_1)(x_{52} - \bar{x}_2)) = \frac{1}{5-1} ((101 - 100)(16 - \\ &21) + (105 - 100)(18 - 21) + (103 - 100)(42 - 21) + (98 - 100)(23 - 21) + (93 - 100)(6 - \\ &21)) = \frac{1}{4} (-5 - 15 + 63 - 4 + 105) = \frac{1}{4} \cdot 144 = 36 \end{aligned}$$

$$\text{Kovarianční matice je tedy: } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22 & 36 \\ 36 & 176 \end{bmatrix}.$$

Nyní spočítáme vlastní čísla a vlastní vektory kovarianční matice – tzn., spočítáme následující deter-

$$\text{minant: } \begin{vmatrix} 22 - \lambda & 36 \\ 36 & 176 - \lambda \end{vmatrix}$$

Vypočteme charakteristický polynom:  $(22 - \lambda) \cdot (176 - \lambda) - 36^2 = 3872 - 176\lambda - 22\lambda + \lambda^2 - 1296 = \lambda^2 - 198\lambda + 2576$

A jeho kořeny, které odpovídají vlastním číslům:

$$\lambda_1 = \frac{198 + \sqrt{(-198)^2 - 4 \cdot 1 \cdot 2576}}{2 \cdot 1} = \frac{198 + 170}{2} = 184$$

$$\lambda_2 = \frac{198 - \sqrt{(-198)^2 - 4 \cdot 1 \cdot 2576}}{2 \cdot 1} = \frac{198 - 170}{2} = 14$$

Následně spočítáme vlastní vektor  $\mathbf{v}_1$  odpovídající prvnímu vlastnímu číslu  $\lambda_1 = 184$ :

$$\begin{bmatrix} 22 - 184 & 36 \\ 36 & 176 - 184 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} -162 & 36 \\ 36 & -8 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} -162 & 36 \\ -162 & 36 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} -4,5 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$v_{12} = a$ ;  $(-4,5) \cdot v_{11} + v_{12} = 0 \rightarrow v_{11} = \frac{a}{4,5}$ ; např. pro  $a = 4,5$  pak dostáváme:  $\mathbf{v}_1 = [1 \quad 4,5]$ , který je po normalizaci roven  $\mathbf{v}_1 = \left[ \frac{1}{\sqrt{1^2 + 4,5^2}} \quad \frac{4,5}{\sqrt{1^2 + 4,5^2}} \right] = [0,2169 \quad 0,9762]$ . Kontrola, že vektor má jednotkovou délku:  $(0,2169)^2 + (0,9762)^2 = 1$ .

Spočítáme vlastní vektor  $\mathbf{v}_2$  odpovídající druhému vlastnímu číslu  $\lambda_2 = 14$ :

$$\begin{bmatrix} 22 - 14 & 36 \\ 36 & 176 - 14 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 8 & 36 \\ 36 & 162 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 36 & 162 \\ 36 & 162 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 1 & 4,5 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$v_{22} = b$ ;  $v_{21} + 4,5 \cdot v_{22} = 0 \rightarrow v_{21} = -4,5b$ ; např. pro  $b = 1$  pak dostáváme:  $\mathbf{v}_2 = [-4,5 \quad 1]$ , který je po normalizaci roven  $\mathbf{v}_2 = \left[ \frac{-4,5}{\sqrt{(-4,5)^2 + 1^2}} \quad \frac{1}{\sqrt{(-4,5)^2 + 1^2}} \right] = [-0,9762 \quad 0,2169]$ . Kontrola, že vektor má jednotkovou délku:  $(-0,9762)^2 + (0,2169)^2 = 1$ .

Vlastní vektory můžeme uspořádat do matice  $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1^T \quad \mathbf{v}_2^T] = \begin{bmatrix} 0,2169 & -0,9762 \\ 0,9762 & 0,2169 \end{bmatrix}$ , přičemž pořadí vlastních vektorů odpovídá pořadí vlastních čísel seřazených od největšího k nejmenšímu.

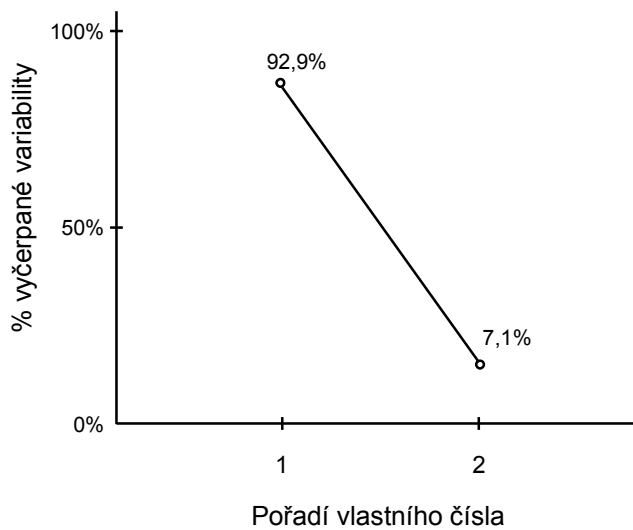
Nyní vyjádříme hlavní komponenty odpovídající vlastním číslům seřazeným od největšího k nejmenšímu – hlavní komponenty jsou lineární kombinace původních proměnných, přičemž koeficienty jsou souřadnice příslušného vlastního vektoru:

1. hlavní komponenta:  $\mathbf{y}_1 = 0,2169 \cdot \mathbf{x}_1 + 0,9762 \cdot \mathbf{x}_2$  (pro  $\lambda_1 = 184$ )
2. hlavní komponenta:  $\mathbf{y}_2 = -0,9762 \cdot \mathbf{x}_1 + 0,2169 \cdot \mathbf{x}_2$  (pro  $\lambda_2 = 14$ )

Výpočet procent vyčerpané variability:

1. hlavní komponenta vyčerpává:  $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{184}{14 + 184} = 0,9293$  (tzn., 92,93% variability v datech)
2. hlavní komponenta vyčerpává:  $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{14}{14 + 184} = 0,0707$  (tzn., 7,07% variability v datech)

Výčerpanou variabilitu můžeme znázornit i pomocí sutinového grafu:



Dále spočítáme korelace hlavních komponent s původními proměnnými:

$$R(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1) = \frac{v_{11} \cdot \sqrt{\lambda_1}}{\sqrt{s_{11}}} = \frac{0,2169 \cdot \sqrt{184}}{\sqrt{22}} = 0,6274$$

$$R(\mathbf{x}_2, \mathbf{y}_1) = \frac{v_{12} \cdot \sqrt{\lambda_1}}{\sqrt{s_{22}}} = \frac{0,9762 \cdot \sqrt{184}}{\sqrt{176}} = 0,9981$$

$$R(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_2) = \frac{v_{21} \cdot \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{s_{11}}} = \frac{-0,9762 \cdot \sqrt{14}}{\sqrt{22}} = -0,7787$$

$$R(\mathbf{x}_2, \mathbf{y}_2) = \frac{v_{22} \cdot \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{s_{22}}} = \frac{0,2169 \cdot \sqrt{14}}{\sqrt{176}} = 0,0612$$

První hlavní je vysoce korelována s váhou a středně korelována s výškou. Druhá hlavní komponenta je středně záporně korelována s výškou.

Na závěr vypočítáme nové souřadnice původních bodů po transformaci pomocí obou hlavních komponent spočítaných pomocí PCA:

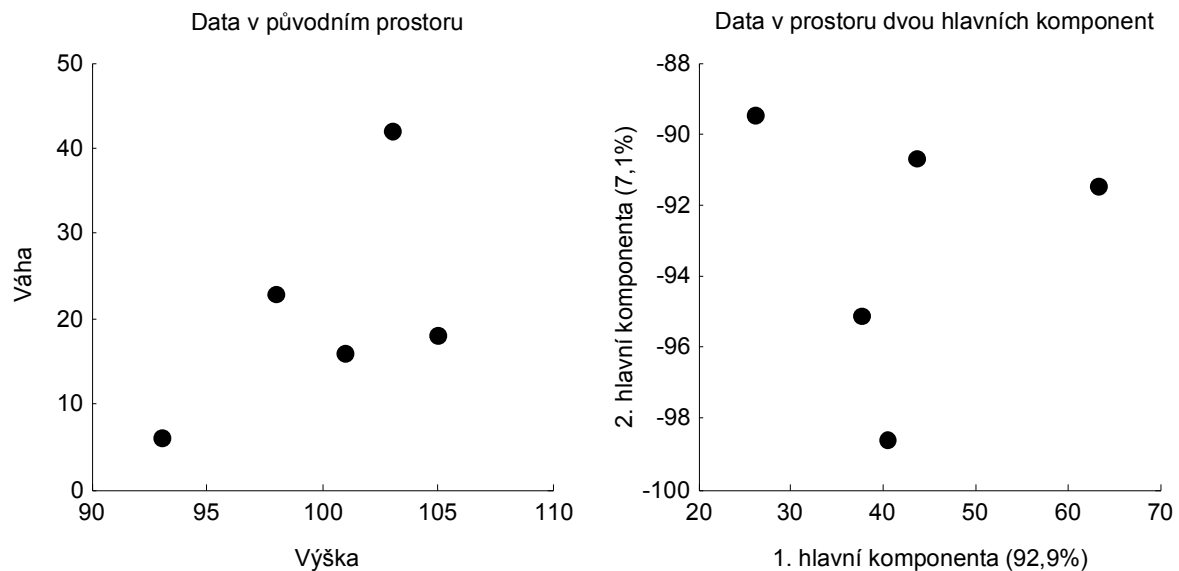
$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{V} = \begin{bmatrix} 101 & 16 \\ 105 & 18 \\ 103 & 42 \\ 98 & 23 \\ 93 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,2169 & -0,9762 \\ 0,9762 & 0,2169 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 101 \cdot 0,2169 + 16 \cdot 0,9762 & 101 \cdot (-0,9762) + 16 \cdot 0,2169 \\ 105 \cdot 0,2169 + 18 \cdot 0,9762 & 105 \cdot (-0,9762) + 18 \cdot 0,2169 \\ 103 \cdot 0,2169 + 42 \cdot 0,9762 & 103 \cdot (-0,9762) + 42 \cdot 0,2169 \\ 98 \cdot 0,2169 + 23 \cdot 0,9762 & 98 \cdot (-0,9762) + 23 \cdot 0,2169 \\ 93 \cdot 0,2169 + 6 \cdot 0,9762 & 93 \cdot (-0,9762) + 6 \cdot 0,2169 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 37,5 & -95,1 \\ 40,3 & -98,6 \\ 63,3 & -91,4 \\ 43,7 & -90,8 \\ 26,0 & -89,5 \end{bmatrix}$$

Souřadnice subjektů můžeme přímo získat i z hlavních komponent – např. pro první subjekt:

$$y_1 = 0,2169 \cdot x_1 + 0,9762 \cdot x_2 = 0,2169 \cdot 101 + 0,9762 \cdot 16 = 37,5$$

$$y_2 = -0,9762 \cdot x_1 + 0,2169 \cdot x_2 = -0,9762 \cdot 101 + 0,2169 \cdot 16 = -95,1$$

Původní data i data po transformaci pomocí PCA si znázorníme:



Pokud bychom k transformaci použili pouze první vlastní vektor, získáváme data v prostoru první hlavní komponenty:

