

## Flöde i nätverk

Det ligger högar av "viktiga saker" på några platser, och de ska transporteras till andra platser. Kostnaderna är linjära.

Variabeldefinition:  $x_{ij}$  = flöde i båge  $(i, j)$ .

Bågdata för båge  $(i, j)$ :

- $c_{ij}$ : flödeskostnad per enhet.
- $u_{ij}$ : övre gräns för flödet.
- $l_{ij}$ : undre gräns för flödet.

Bivillkor:  $l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij}$

Noddata för nod  $i$ :

- $b_i$ : källstyrka/sänkstyrka. (måste vara givet)

Nodjämviktsvillkor:  $\sum_{j:(j,i) \in B} x_{ji} - \sum_{j:(i,j) \in B} x_{ij} = b_i$  för alla  $i \in N$  (in - ut)

Krav på indata:  $\sum_i b_i = 0$ .

# Flöde i nätverk

## Sats

Varje anslutningsmatris är fullständigt unimodulär.

## Slutsats

Flödesproblem kan betraktas som LP-problem. Flödet blir automatiskt heltal.

Obs: Inga andra bivillkor får finnas.

## Minkostnadsflödesproblemet

Skicka efterfrågade mängder så billigt som möjligt.

$$\min \sum_{(i,j) \in B} c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{då} \quad \sum_{j:(j,i) \in B} x_{ji} - \sum_{j:(i,j) \in B} x_{ij} = b_i \quad \text{för alla } i \in N$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad \text{för alla } (i,j) \in B$$

# Specialfall av minkostnadsflödesproblemet

**Billigaste väg-problemet:** Minkostnadsflödesproblem med en källa och en sänka, båda av styrka ett.

$$b_i = \begin{cases} -1 & \text{då } i = s \\ 1 & \text{då } i = t \\ 0 & \text{f ö} \end{cases}$$

$l_{ij} = 0$  och  $u_{ij}$  stor (men i praktiken 1) för alla bågar.

**Riktade brevbärarproblemet:** Cirkulerande minkostnadsflödesproblem med undre gräns ett för alla bågar.

## Specialfall av minkostnadsflödesproblemet

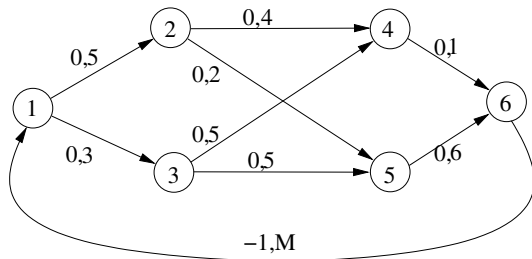
**Maxflödesproblemet:** Inför återbåge  $(t, s)$ . Sätt  $c_{ts} = -1$  och  $c_{ij} = 0$  för alla  $(i, j) \in B \setminus (ts)$ . Sök cirkulerande flöde (inga källor eller sänkor).

max  $f$

$$\text{då } \sum_{j:(j,i) \in B} x_{ji} - \sum_{j:(i,j) \in B} x_{ij} = \begin{cases} -f & \text{då } i = s \\ f & \text{då } i = t \\ 0 & \text{f ö} \end{cases} \text{ för alla } i \in N$$

$$0 \leq x_{ij} \leq u_{ij} \text{ för alla } (i, j) \in B$$

$f$  fri



## Specialfall av minkostnadsflödesproblemet

**Transportproblemet:** Minkostnadsflödesproblem i tudelad graf.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{då} \quad & \sum_{j=1}^n x_{ij} = s_i \quad i = 1, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j \quad j = 1, \dots, n \\ & x_{ij} \geq 0 \quad \text{för alla } i, j \end{aligned}$$

Kan ses som ett matrisproblem, där  $i$  står för rader och  $j$  för kolumner. Bivillkoren specificerar radsummor och kolumnsummor.

(Eftersom detta är ett minkostnadsflödesproblem blir lösningen heltal.)

## Specialfall av minkostnadsflödesproblemet

**Tillordningsproblemet:** Transportproblem med all tillgång och efterfrågan lika med ett.

Varje person  $i$  skall göra en uppgift och varje uppgift  $j$  ska göras en gång.

Variabeldefinition:  $x_{ij} = 1$  om person  $i$  gör uppgift  $j$ .

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{då} \quad & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \\ & x_{ij} \geq 0 \quad \text{för alla } i, j \end{aligned}$$

Lösningmetod: **Ungerska metoden**. Baseras på LP-dualen.

(Eftersom detta är ett minkostnadsflödesproblem blir lösningen heltal.)

# Lösningssmetod för minkostnadsflödesproblemet

$$\min \sum_{(i,j) \in B} c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{då} \quad \sum_{j:(j,i) \in B} x_{ji} - \sum_{j:(i,j) \in B} x_{ij} = b_i \quad \text{för alla } i \in N$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad \text{för alla } (i,j) \in B$$

## Simplexmetoden

### Baslösning:

Icke-basvariabler:  $x_{ij} = l_{ij}$  eller  $x_{ij} = u_{ij}$ .

(Övre och undre gränser behandlas implicit.)

Hur många basvariabler?

Ett av nodjämviktsvillkoren är redundant. En  $n \times n$ -matris vore linjärt beroende. Kan bara ha bas av dimension  $n - 1$ . Alltså  $n - 1$  basvariabler.

En cykel motsvarar linjärt beroende. Alltså ingen cykel i basen.

Slutsats: En bas motsvarar ett **uppspännande träd**.

# Simplexmetoden för minkostnadsflödesproblemet

## En iteration:

Basvariablerna ger ett *uppspännande träd*.

Inkommande variabel bildar en unik *cykel*.

Man vill skicka runt så mycket som möjligt i cykeln.

Utgående variabel begränsar flödesändringen i cykeln. Den hamnar på övre eller undre gräns.

Utgående variabel bryter upp cykeln.



# Simplexmetoden för minkostnadsflödesproblemet

## Hur välja inkommande variabel?

$y$ : dualvariabler till nodjämviktsvillkoren.  $y_i$  kallas nodpris för nod  $i$ .

Reducerade kostnader:  $\hat{c}_{ij} = c_{ij} + y_i - y_j$ .

(Nod  $i$  till  $j$ : Jämför skillnaden i nodpris,  $y_j - y_i$ , med direktvägen,  $c_{ij}$ .)

### Minimering

$\hat{c}_{ij} < 0 \Rightarrow$  Båge  $(i, j)$  billig.  $\Rightarrow$  Skicka så mycket som möjligt.  $\Rightarrow$  Öka  $x_{ij}$ .  
 $x_{ij} = u_{ij}$  är optimalt.

$\hat{c}_{ij} > 0 \Rightarrow$  Båge  $(i, j)$  dyr.  $\Rightarrow$  Skicka så lite som möjligt.  $\Rightarrow$  Minska  $x_{ij}$ .  
 $x_{ij} = l_{ij}$  är optimalt.

### Optimalitetsvillkor

$\hat{c}_{ij} < 0 \Rightarrow x_{ij} = u_{ij}$ , (billig ickebas)

$\hat{c}_{ij} > 0 \Rightarrow x_{ij} = l_{ij}$  (dyr ickebas)

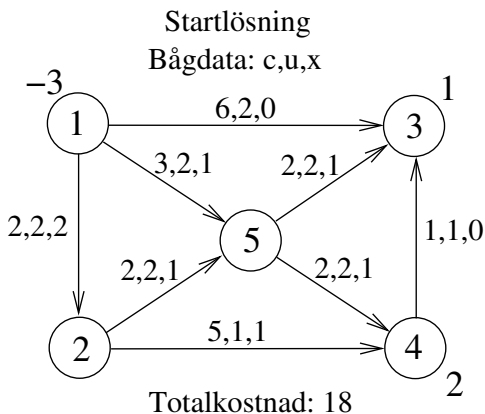
samt  $l_{ij} < x_{ij} < u_{ij} \Rightarrow \hat{c}_{ij} = 0$  (bas). (Används för att räkna ut  $y$ .)

# Simplexmetoden för minkostnadsflödesproblemet

0. Finn tillåten startbas (träd).
1. Sätt  $y_1 = 0$ . Beräkna resterande  $y$  via basträdet. ( $c_{ij} = y_j - y_i$  för alla basbågar.)
2. Beräkna reducerade kostnader  $\hat{c}_{ij} = c_{ij} + y_i - y_j$  för alla icke-basbågar.
3. Kontrollera optimalitet. Om optimum: Stopp.
4. Välj mest lovande variabel som inkommande.
5. Finn cykeln som bildas.
6. Ändra flödet i cykeln maximalt i önskad riktning.
7. Välj den variabel som begränsar ändringen som utgående variabel.
8. Gå till 1.

# Simplexmetoden för minkostnadsflöde: Exempel

Indata:



## Känslighetsanalys

Ändring av kostnad för icke-basbåge eller införande av ny båge:

Beräkna ny reducerad kostnad,  $\hat{c}_{ij} = c_{ij} + y_i - y_j$  och kontrollera optimalitet.

# Tillordningsproblemet

Varje person  $i$  skall göra en uppgift och varje uppgift  $j$  ska göras en gång.

Variabeldefinition:  $x_{ij} = 1$  om person  $i$  gör uppgift  $j$ .

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{då} \quad & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \\ & x_{ij} \geq 0 \quad \text{för alla } i, j \end{aligned}$$

Metod: Formulera och lös LP-dualen.

Arbeta med dualvariabler och reducerade kostnader.

## Tillordningsproblemet: Lös LP-dualen

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{då} \quad & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \\ & x_{ij} \geq 0 \quad \text{för alla } i, j \end{aligned}$$

$$\text{LP-dual: } \max v = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{j=1}^n \beta_j \quad \text{då} \quad \alpha_i + \beta_j \leq c_{ij} \quad \text{för alla } (i, j).$$

Komplementaritetsvillkor:  $x_{ij}(\alpha_i + \beta_j - c_{ij}) = 0$  för alla  $(i, j)$ .

Metod: Lös dualen: Öka  $\alpha$  och  $\beta$ , utan att överskrida duala bivillkoren.

Försök sedan finna en tillåten primallösning som uppfyller komplementaritetsvillkoren. Ändra  $\alpha$  och  $\beta$  om det inte går.

# Ungerska metoden för tillordningsproblemet

Arbeta med reducerade kostnader:

$$\hat{c}_{ij} = c_{ij} - \alpha_i - \beta_j \text{ för alla } (i, j).$$

Duala bivillkoren (primal optimalitet):  $\hat{c}_{ij} \geq 0$  för alla  $(i, j)$

Komplementaritetstvillkoren:  $\hat{c}_{ij}x_{ij} = 0$  för alla  $(i, j)$

Optimalitetstvillkor:  $\hat{c}_{ij} > 0 \Rightarrow x_{ij} = 0$ ,  $x_{ij} > 0 \Rightarrow \hat{c}_{ij} = 0$

Tillåtna positioner: där  $\hat{c}_{ij} = 0$ .

Mål: Placera exakt en etta i varje rad och i varje kolumn på de tillåtna positionerna.

# Ungerska metoden för tillordningsproblemet

Lös dualen.

- Sätt  $\alpha_i = 0$  för alla  $i$  och  $\beta_j = 0$  för alla  $j$  (vilket ger  $\hat{c}_{ij} = c_{ij}$ ).
- Öka enstaka  $\alpha_i$  och  $\beta_j$  så mycket som möjligt (utan att  $\hat{c}_{ij}$  blir negativt).
- Kan en etta placeras i varje rad och kolumn på de tillåtna positionerna? Om ja, stopp.
- Om inte, ändra dualvariablerna i par:  
Öka  $\alpha_i$  och minska  $\beta_j$  så att inget  $\hat{c}_{ij}$  blir negativt.

Gör detta så att nya tillåtna positioner,  $\hat{c}_{ij} = 0$ , bildas, samtidigt som  $\hat{c}_{ij} \geq 0$  för alla  $i, j$ .

Upprepa tills tillåten lösning fås.



# Ungerska metoden för tillordningsproblemet

Matris av reducerade kostnader,  $\hat{C}$ .

Stryk alla tillåtna positioner med minsta möjliga antal streck.

## Sats

Högsta antalet ettor som kan placeras ut är lika med minsta antalet streck som behövs.

Öka  $\alpha_i$  för ostrukna rader, och minska  $\beta_j$  för strukna kolumner.

Effekt: Ostrukna element minskas,  
enkelt strukna element oförändrade,  
dubbelt strukna element ökas.

$\hat{c}_{ij}$  minskas inte för någon tillåten position.

Inget  $\hat{c}_{ij}$  blir negativt.

Minst en ny tillåten position bildas.

# Ungerska metoden för tillordningsproblemet

0. Starta med de ursprungliga kostnaderna ( $\alpha = 0, \beta = 0$ ).
1. Dra bort det minsta elementet i varje rad från alla elementen i raden (öka  $\alpha$ ).
2. Dra bort minsta elementet i varje kolumn från alla elementen i kolumnen (öka  $\beta$ ).
3. Stryk alla nollor med minsta möjliga antal streck.  
Om antalet streck är lika med  $n$ , finn tillåten lösning, och sluta.
4. Dra bort minsta ostrukna element från alla ostrukna element och addera till alla dubbelt strukna element. (Öka  $\alpha_i$  för ostrukna rader, och minska  $\beta_j$  för strukna kolumner.) Gå till 3.

# Ungerska metoden: Exempel

$$\hat{c}_{ij} = c_{ij} - \alpha_i - \beta_j$$

					$\alpha$
	0	0	0	1	3
	1	1	0	0	6
	0	0	1	0	2
	0	2	5	1	5
$\beta$	0	1	-1	1	

Till slut återstår bara en nolla.

## Ungerska metoden: Exempel

$$\text{Optimallösning: } x = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Person 1 gör uppgift 2, person 2 gör uppgift 3, person 3 gör uppgift 4, person 4 gör uppgift 1.

Total kostnad: 17

Duallösning:

$$\alpha = (3, 6, 2, 5)$$

$$\beta = (0, 1, -1, 1)$$

Kolla gärna starka dualsatsen:  $v = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{j=1}^n \beta_j$

Summan av dualvariablerna ska vara lika med totala kostnaden.