

# Numerikus módszerek C

3. előadás: A GE alkalmazásai, a GE kicsit másképp

Krebsz Anna

ELTE IK

- 1 A Gauss-elimináció alkalmazásai
- 2 Műveletigény
- 3 Alsó háromszögmátrixok és Gauss-elimináció
- 4 Háromszögmátrixokról
- 5  $LU$ -felbontás Gauss-eliminációval

- 1 A Gauss-elimináció alkalmazásai
- 2 Műveletigény
- 3 Alsó háromszögmátrixok és Gauss-elimináció
- 4 Háromszögmátrixokról
- 5  $LU$ -felbontás Gauss-eliminációval

- LER megoldása (láttuk példán is)
- Determináns meghatározása: mivel a GE lépései determináns tartók, ezért

$$\det(A) = \det(\Delta_{\text{alak}}) = \prod_{k=1}^n a_{kk}^{(-)}$$

Vigyázzunk : ha sort vagy oszlopot cserélünk, a determináns értéke változik.

- Több jobb oldallal ( $b$ ) megoldás: lehet egyszerre, így a mátrixon csak egyszer eliminálunk.

$$[A|b_1|b_2|b_3] \rightarrow \text{GE} \rightarrow \text{visszahely} \rightarrow [I|x_1|x_2|x_3]$$

- Mátrix inverzének meghatározása az  $A \cdot X = I$  mátrixegyenlet megoldását jelenti.

$$A \cdot [x_1 | \dots | x_n] = [e_1 | \dots | e_n] \Leftrightarrow \begin{array}{rcl} Ax_1 & = & e_1 \\ \dots & & \\ Ax_n & = & e_n \end{array} \quad \text{☑}$$

Visszavezettük az előző pontra. A GE-t kiterjesztett mátrixon hajtjuk végre

$$[A | I] \rightarrow \text{GE} \rightarrow \text{visszahely} \rightarrow [I | A^{-1}],$$

visszahelyettesítés után jobb oldalon kapjuk az inverz mátrixot. Sor csere esetén az inverz nem változik, oszlopcsere esetén változik (lásd gyak.).

**Példa:** mátrix determinánsának és inverzének számítása  
GE-val

Mi az előző példa mátrixának determinánsa és inverze?




$$\det(A) = \det(\Delta_{alak}) = \begin{vmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 2 \cdot 5 \cdot (-1) = -10$$

**Az elimináció:**

**1. lépés:**

$$2. \text{ sor} - \underbrace{\left(\frac{-4}{2}\right)}_{+2} * 1. \text{ sor}$$

$$3. \text{ sor} - \underbrace{\left(\frac{6}{2}\right)}_3 * 1. \text{ sor}$$


$$\left[ \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ -4 & 5 & -2 & 0 & 1 & 0 \\ 6 & -5 & 4 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & -5 & -5 & -3 & 0 & 1 \end{array} \right] \rightarrow$$

**2. lépés:**

$$3. \text{ sor } - \underbrace{\left( \frac{-5}{5} \right)}_{+1} * 2. \text{ sor}$$

$$\left[ \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & -5 & -5 & -3 & 0 & 1 \end{array} \right] \rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 \end{array} \right] \rightarrow$$



**A visszahelyettesítés:**3. sor  $/(-1)$ 2. sor  $- 4 * \text{új 3. sor.}$ 1. sor  $- 3 * \text{új 3. sor.}$ 

$$\left[ \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 \end{array} \right] \rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & -2 & 3 & 3 \\ 0 & 5 & 0 & -2 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{array} \right]$$

2. sor /5

1. sor /2.



$$\left[ \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & -2 & 3 & 3 \\ 0 & 5 & 0 & -2 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{array} \right] \rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{2}{5} & 1 & \frac{4}{5} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{array} \right] = [I|A^{-1}]$$

Az inverz a jobb oldalon álló mátrix.

Megoldható-e egyáltalán a LER? Vizsgáljuk?

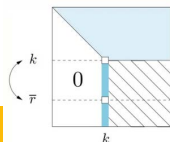
*Majd GE közben kiderül.*

Megoldható, de mégsem tudjuk a GE-t végigcsinálni?

*Előfordulhat. . .  $\rightsquigarrow$  sort cserélünk  $\rightsquigarrow$  nem változik a megoldás. Ha oszlopot cserélünk, akkor a megoldás komponensei a cserének megfelelően változnak.*

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot x = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Biztos és stabil megoldás a főelemkiválasztás.

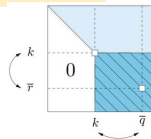


**Definíció:** részleges főelemkiválasztás

A  $k$ -adik lépésben válasszunk egy olyan  $m$  indexet, melyre  $|a_{mk}^{(k-1)}|$  maximális ( $m \in \{k, k+1, \dots, n\}$ ), majd cseréljük ki a  $k$ -adik és  $m$ -edik sort.

**Definíció:** teljes főelemkiválasztás

A  $k$ -adik lépésben válasszunk egy olyan  $(m_1, m_2)$  indexpárt, melyre  $|a_{m_1 m_2}^{(k-1)}|$  maximális ( $m_1, m_2 \in \{k, k+1, \dots, n\}$ ), majd cseréljük ki a  $k$ -adik és  $m_1$ -edik sort, valamint a  $k$ -adik és  $m_2$ -edik oszlopot.



**Tétel:**

A GE elvégezhető sor és oszlopcsere nélkül

$$\Leftrightarrow a_{kk}^{(k-1)} \neq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n-1).$$

**Biz.:** trivi a rekurzióból.

**Definíció: főminorok**

Az  $A$  főminorai a

$$D_k = \det \left( \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \dots & a_{kk} \end{bmatrix} \right), \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

determinánsok. Ezek az  $A$  bal felső  $k \times k$ -s részmátrixaimak determinánsai.

**Tétel:**

$$D_k \neq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n-1) \quad \Leftrightarrow \quad a_{kk}^{k-1} \neq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n-1).$$

**Biz.:** A GE átalakításai determináns tartók, ezért

$$D_k = a_{11} \cdot a_{22}^{(1)} \cdot \dots \cdot a_{kk}^{(k-1)} = D_{k-1} \cdot a_{kk}^{(k-1)},$$

amiből az állítás adódik. A  $D_n \neq 0$  illetve az  $a_{nn}^{(n-1)} \neq 0$  feltétel nem szükséges a GE-hoz, csak a LER megoldhatóságához.  $\square$

**Megj.:**

- Numerikus szempontból jobb, ha alkalmazunk főelemkiválasztást. Ezzel a GE-s hányadosaink pontosabbak lesznek.
- Determináns számításakor a cserékkel vigyázni kell!

- 1 A Gauss-elimináció alkalmazásai
- 2 Műveletigény**
- 3 Alsó háromszögmátrixok és Gauss-elimináció
- 4 Háromszögmátrixokról
- 5  $LU$ -felbontás Gauss-eliminációval

## Tétel: A Gauss-elimináció műveletigénye

$$\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2)$$

**Biz.:** Rögzített  $k$ -ra: a  $k$ . lépés képletéből számolva

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} - \frac{a_{ik}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}} \cdot a_{kj}^{(k-1)} \quad \begin{array}{l} k = 1, \dots, n-1; \\ i = k+1, \dots, n; \\ j = k+1, \dots, n, n+1. \end{array}$$

$(n-k)$  osztás,  $(n-k)(n-k+1)$  szorzás és  $(n-k)(n-k+1)$  összeadás kell.

Összesen  $(n-k)(2(n-k)+3)$  művelet. ( $n-k =: s$ )



$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(2(n-k)+3) &= \sum_{s=1}^{n-1} s(2s+3) = 2 \sum_{s=1}^{n-1} s^2 + 3 \sum_{s=1}^{n-1} s = \\ &= 2 \frac{(n-1)n(2n-1)}{6} + 3 \frac{(n-1)n}{2} = \frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2). \quad \square\end{aligned}$$

**Definíció:**  $\mathcal{O}(n^2)$  függvény

Az  $f(n)$  függvényt  $\mathcal{O}(n^2)$ -es nagyságrendűnek nevezzük, ha  $\frac{f(n)}{n^2}$  korlátos minden  $n \in \mathbb{N}$ -re.

# A visszahelyettesítés műveletigénye

A felső háromszögmátrixú LER megoldásának műveletigénye.

**Tétel:** A visszahelyettesítés műveletigénye

$$n^2 + \mathcal{O}(n)$$

**Biz.:**

$$x_n = \frac{a_{nn}^{(n-1)}}{a_{nn}^{(n-1)}}, \quad x_i = \frac{1}{a_{ii}^{(i-1)}} \left( a_{in+1}^{(i-1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}^{(i-1)} \cdot x_j \right) \quad (i = n-1, \dots, 1).$$

Rögzített  $i$ . sorra 1 db osztás,  $(n-i)$  szorzás és  $(n-i)$  összeadás.

Összesen:  $2(n-i) + 1$  művelet ( $n-i =: s$ ).

$$1 + \sum_{s=1}^{n-1} (2s+1) = 1 + 2 \cdot \frac{n(n-1)}{2} + (n-1) = n^2 + \mathcal{O}(n). \quad \square$$

- 1 A Gauss-elimináció alkalmazásai
- 2 Műveletigény
- 3 Alsó háromszögmátrixok és Gauss-elimináció**
- 4 Háromszögmátrixokról
- 5  $LU$ -felbontás Gauss-eliminációval

# Balról szorzás alsó háromszögmátrixokkal

Mi történik, ha az alábbi  $L \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  mátrixszal megszorozunk egy  $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  mátrixot balról?

$$\begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} ? & ? & ? \\ ? & ? & ? \\ ? & ? & ? \end{bmatrix}$$

Az 1. sor kétszeresét hozzáadjuk a 2. sorhoz.

# Balról szorzás alsó háromszögmátrixokkal

Mi történik, ha az alábbi  $L \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  mátrixszal megszorozunk egy  $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  mátrixot balról?

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Az 1. sor kétszeresét hozzáadjuk a 2. sorhoz, valamint az 1. sor háromszorosát levonjuk a 3. sorból. ( $\sim$  GE 1. lépése volt)

# A Gauss-elimináció lépései mátrixszorzással



Írjuk fel a GE  $k$ -adik lépését ugyanilyen módszerrel! ( $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ )

$$L_k = \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 1 & & \\ & & -l_{k+1k} & 1 & \\ & & \vdots & & \ddots \\ & & -l_{nk} & & 1 \end{pmatrix} = I - \ell_k \mathbf{e}_k^\top, \quad \ell_k = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ l_{k+1k} \\ \vdots \\ l_{nk} \end{pmatrix}.$$

(A zérus elemek nincsenek feltüntetve  $L_k$ -ban.)

Tehát ha  $l_{ik} = \frac{a_{ik}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}} \quad (k = 1, \dots, n-1; \quad i = k+1, \dots, n),$

akkor  $L_k \cdot A^{(k-1)} = A^{(k)}$ , vagyis megkaptuk a GE  $k$ -adik lépését.

**Példa:** GE az  $L_k$  mátrixokkal

Írjuk fel a Gauss-elimináció lépéseit mátrixszorzások segítségével a következő mátrix esetén (ua. mint az előző előadáson)!



$$A = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ -4 & 5 & -2 \\ 6 & -5 & 4 \end{bmatrix}$$

**Megoldás:** 1. lépés

$$A^{(1)} = L_1 \cdot A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ -4 & 5 & -2 \\ 6 & -5 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 4 \\ 0 & -5 & -5 \end{bmatrix}$$

## 2. lépés

$$A^{(2)} = L_2 \cdot A^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 4 \\ 0 & -5 & -5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} =: U$$

Tehát  $A^{(2)} = L_2 \cdot L_1 \cdot A =: U$ , a kapott felsőháromszög alakot  $U$ -val jelöljük.

Fejezzük ki  $A$ -t a képletből:



$$A = \underbrace{L_1^{-1} \cdot L_2^{-1}}_{=:L} \cdot U = L \cdot U.$$

Ezzel megkaptuk az  $A$  mátrix  $LU$ -felbontását. Ennek az elméletét tárgyaljuk a következőkben.



- 1 A Gauss-elimináció alkalmazásai
- 2 Műveletigény
- 3 Alsó háromszögmátrixok és Gauss-elimináció
- 4 Háromszögmátrixokról**
- 5  $LU$ -felbontás Gauss-eliminációval

**Definíció:** alsó háromszögmátrix

Az  $L \in \mathbb{R}^{n \times n}$  mátrixot *alsó háromszögmátrixnak* nevezzük, ha  $i < j$  esetén  $l_{ij} = 0$ . (A főátló felett csupa nulla.)

$$\mathcal{L} := \{ L \in \mathbb{R}^{n \times n} : l_{ij} = 0 \ (i < j) \},$$

$$\mathcal{L}_1 := \{ L \in \mathbb{R}^{n \times n} : l_{ij} = 0 \ (i < j), \ l_{ii} = 1 \}.$$

**Definíció:** felső háromszögmátrix

Az  $U \in \mathbb{R}^{n \times n}$  mátrixot *felső háromszögmátrixnak* nevezzük, ha  $i > j$  esetén  $u_{ij} = 0$ . (A főátló alatt csupa nulla.)

$$\mathcal{U} := \{ U \in \mathbb{R}^{n \times n} : u_{ij} = 0 \ (i > j) \},$$

$$\mathcal{U}_1 := \{ U \in \mathbb{R}^{n \times n} : u_{ij} = 0 \ (i > j), \ u_{ii} = 1 \}.$$



## Állítás: háromszögmátrixról

- 1 Ha  $L', L'' \in \mathcal{L}$ , akkor  $L' \cdot L'' \in \mathcal{L}$ .
- 2 Ha  $U', U'' \in \mathcal{U}$ , akkor  $U' \cdot U'' \in \mathcal{U}$ .
- 3 Ha  $L', L'' \in \mathcal{L}_1$ , akkor  $L' \cdot L'' \in \mathcal{L}_1$ .
- 4 Ha  $U', U'' \in \mathcal{U}_1$ , akkor  $U' \cdot U'' \in \mathcal{U}_1$ .
- 5 Ha  $L \in \mathcal{L}$  és  $\exists L^{-1}$ , akkor  $L^{-1} \in \mathcal{L}$ .
- 6 Ha  $U \in \mathcal{U}$  és  $\exists U^{-1}$ , akkor  $U^{-1} \in \mathcal{U}$ .
- 7 Ha  $L \in \mathcal{L}_1$ , akkor  $\exists L^{-1}$  és  $L^{-1} \in \mathcal{L}_1$ .
- 8 Ha  $U \in \mathcal{U}_1$ , akkor  $\exists U^{-1}$  és  $U^{-1} \in \mathcal{U}_1$ .

**Biz.:** házi feladat (beadható).



**Definíció:**  $L_k$ 

$L_k := I - \ell_k e_k^\top \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , ahol  $\ell_k \in \mathbb{R}^n$ ,  $(\ell_k)_i = 0$  ( $i \leq k$ ) és  $e_k \in \mathbb{R}^n$  a  $k$ -adik egységvektor.

**Állítás:**  $L_k$  inverze

$$L_k^{-1} = I + \ell_k e_k^\top.$$

**Biz.:**

$$L_k \cdot L_k^{-1} = (I - \ell_k e_k^\top)(I + \ell_k e_k^\top) = I - \underbrace{\ell_k e_k^\top + \ell_k e_k^\top}_0 - \underbrace{\ell_k e_k^\top \ell_k e_k^\top}_0 = I. \quad \square$$

Szemléletesen?

Hogyan szorzunk össze két ilyen mátrixot?

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \color{red}{2} & 1 & 0 \\ \color{red}{1} & \color{red}{3} & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \color{red}{2} & 1 & 0 \\ \color{red}{7} & \color{red}{3} & 1 \end{pmatrix}$$

A bal oldali sorrendben „szépen” szorzódik. Általában is.

**Állítás:**  $L_k$  mátrixok szorzata

$$L_1^{-1} \cdot L_2^{-1} \cdots L_{n-1}^{-1} = I + \ell_1 \mathbf{e}_1^\top + \ell_2 \mathbf{e}_2^\top + \dots + \ell_{n-1} \mathbf{e}_{n-1}^\top.$$

Szemléletesen?

**Biz.:** Indukcióval.

•

$$\begin{aligned} L_1^{-1} \cdot L_2^{-1} &= (I + \ell_1 \mathbf{e}_1^\top)(I + \ell_2 \mathbf{e}_2^\top) = \\ &= I + \ell_1 \mathbf{e}_1^\top + \ell_2 \mathbf{e}_2^\top + \ell_1 \underbrace{(\mathbf{e}_1^\top \ell_2)}_0 \mathbf{e}_2^\top = \\ &= I + \ell_1 \mathbf{e}_1^\top + \ell_2 \mathbf{e}_2^\top \end{aligned}$$

- Tegyük fel, hogy  $k + 1 \leq n - 1$  és

$$L_1^{-1} \cdot L_2^{-1} \cdots L_k^{-1} = I + \ell_1 \mathbf{e}_1^\top + \ell_2 \mathbf{e}_2^\top + \cdots + \ell_k \mathbf{e}_k^\top.$$

- $L_1^{-1} \cdot L_2^{-1} \cdots L_k^{-1} \cdot L_{k+1}^{-1} =$

$$= (I + \ell_1 \mathbf{e}_1^\top + \ell_2 \mathbf{e}_2^\top + \cdots + \ell_k \mathbf{e}_k^\top)(I + \ell_{k+1} \mathbf{e}_{k+1}^\top) =$$

$$= I + \ell_1 \mathbf{e}_1^\top + \ell_2 \mathbf{e}_2^\top + \cdots + \ell_k \mathbf{e}_k^\top + \ell_{k+1} \mathbf{e}_{k+1}^\top +$$

$$+ \underbrace{\ell_1 \mathbf{e}_1^\top \ell_{k+1} \mathbf{e}_{k+1}^\top + \cdots + \ell_k \mathbf{e}_k^\top \ell_{k+1} \mathbf{e}_{k+1}^\top}_{\text{kiesnek}} =$$

$$= I + \ell_1 \mathbf{e}_1^\top + \ell_2 \mathbf{e}_2^\top + \cdots + \ell_k \mathbf{e}_k^\top + \ell_{k+1} \mathbf{e}_{k+1}^\top = \checkmark.$$



- 1 A Gauss-elimináció alkalmazásai
- 2 Műveletigény
- 3 Alsó háromszögmátrixok és Gauss-elimináció
- 4 Háromszögmátrixokról
- 5  $LU$ -felbontás Gauss-eliminációval**



## Definíció: LU-felbontás

Az  $A$  mátrix LU-felbontásának nevezzük az  $L \cdot U$  szorzatot, ha

$$\boxed{\text{☐}} A = LU, \quad L \in \mathcal{L}_1, \quad U \in \mathcal{U}.$$

A Gauss-eliminációt felírhatjuk alsó háromszögmátrixok segítségével:

$$L_{n-1} \cdots L_2 \cdot L_1 \cdot A = U,$$

majd az inverzekkel egyesével átszorozva:

$$A = \underbrace{L_1^{-1} \cdot L_2^{-1} \cdots L_{n-1}^{-1}}_L \cdot U = LU.$$

A fenti szorzat is alsó háromszögmátrix. Láttuk az előző tételből, hogy az  $L$  mátrix elemeit egy egységmátrixból kapjuk úgy, hogy minden oszlopba ez egyesek alá beletesszük a neki megfelelő  $\ell_k$  vektor nem nulla elemeit (ezek a GE-s hányadosok). Tehát ennek előállításához nem kell több művelet, mint amit a GE-val végzünk.

**Példa:**  $LU$ -felbontás GE-val

Készítsük el a példamátrixunk  $LU$ -felbontását

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ -4 & 5 & -2 \\ 6 & -5 & 4 \end{bmatrix}$$

- a** részletezve az  $L_k$  mátrixokat, a számítás menetét,
- b** majd „tömör” írásmóddal!

**Megoldás: (a) 1. lépés**

$$A^{(1)} = L_1 \cdot A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ -4 & 5 & -2 \\ 6 & -5 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 4 \\ 0 & -5 & -5 \end{bmatrix}$$

$L_1^{-1}$ -et úgy kapjuk, hogy  $L_1$  1. oszlopában az átló alatti elemeket  $(-1)$ -szeresére változtatjuk. Megfigyelhetjük, hogy ezek a tényleges GE-s hányadosok. Láttuk, hogy  $L$  meghatározáshoz csak  $\ell_1$ -re van szükségünk.

$$L_1^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 2. lépés

$$A^{(2)} = L_2 \cdot A^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 4 \\ 0 & -5 & -5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} =: U$$

$L_2^{-1}$ -et úgy kapjuk, hogy  $L_2$  2. oszlopában az átló alatti elemeket  $(-1)$ -szeresére változtatjuk. Megfigyelhetjük, hogy ez a tényleges GE-s hányados. Láttuk, hogy  $L$  meghatározáshoz csak  $\ell_2$ -re van szükségünk.

$$L_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Tehát  $A^{(2)} = L_2 \cdot L_1 \cdot A =: U$

Fejezzük ki  $A$ -t a képletből:

$$A = \underbrace{L_1^{-1} \cdot L_2^{-1}}_{=:L} \cdot U = L \cdot U.$$

Tehát  $L = L_1^{-1} \cdot L_2^{-1}$ . Az  $L_k$  mátrixok szorzatára felírt tétel alapján ehhez nem kell mátrixot szoroznunk, csak az  $\ell_k$  vektorokból kell összeraknunk  $L$ -et.

$$L = L_1^{-1} \cdot L_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \\ 3 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

A kapott eredményt szorzással is ellenőrizhetjük.

**(b) Tömör írásmódban: 1. lépés**

A GE-s hányadosokat minden lépésben az eliminált pozíciókon tudjuk tárolni (éppen ennyi nulla van az oszlopban). Könnyen megjegyezhető ezek képzése: az eliminálandó mátrix rész 1. oszlopában az első elemmel leosztjuk az alatta levőket. Ezzel minden a helyére került. Vonalakkal jelezzük, hogy itt már tárolásról is szó van. A jobb alsó  $2 \times 2$ -es mátrix részen elvégezzük az eliminációt.

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ -4 & 5 & -2 \\ 6 & -5 & 4 \end{bmatrix} \rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|cc} 2 & 0 & 3 & & \\ \hline -4 & 5 & -2 & -2 & \\ 6 & -5 & 4 & 3 & \end{array} \right] \rightarrow$$

## 2. lépés:

Ugyanúgy dolgozunk tovább, de most már csak a jobb alsó  $2 \times 2$ -es mátrix részen, a többi változatlanul leírjuk.

$$\left[ \begin{array}{ccc|cc} 2 & 0 & 3 & & \\ \hline -2 & & & 5 & 4 \\ 3 & & & -5 & -5 \end{array} \right] \rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|cc} 2 & 0 & 3 & & \\ \hline -2 & & & 5 & 4 \\ 3 & & & \hline & -5 & & -1 \end{array} \right]$$

Olvassuk ki a keresett mátrixokat!

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ -4 & 5 & -2 \\ 6 & -5 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \\ 3 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = L \cdot U$$



## **Tétel:** $LU$ -felbontás létezése

Ha a Gauss-elimináció végrehajtható sor és oszlopcsere nélkül (azaz  $a_{kk}^{(k-1)} \neq 0$  ( $k = 1, \dots, n-1$ )), akkor az  $A$  mátrix  $LU$ -felbontása létezik.

**Biz.:** Ha a GE végrehajtható sor és oszlopcsere nélkül, akkor az  $L_k$  mátrixok felírhatók és  $L, U$  előállítható.  $\square$

**Megj.:**

- $u_{kk} = a_{kk}^{(k-1)}$  és  $D_k = a_{11} \cdot a_{22}^{(1)} \cdots a_{kk}^{(k-1)}$
- Ha van  $A$ -nak  $LU$ -felbontása, ahol  $U$  átlójában nem nullák állnak, akkor  $u_{kk} = a_{kk}^{(k-1)} \neq 0$ .
- $a_{nn}^{(n-1)} \neq 0 \Leftrightarrow \det(A) = D_n \neq 0$ .
- Ha a GE végrehajtható, de  $a_{nn}^{(n-1)} = 0$ , akkor létezik  $LU$ -felbontás, de  $\det(A) = \det(L) \cdot \det(U) = \det(U) = 0$ -ból  $u_{nn} = 0$ . Ebben az esetben a LER vagy nem oldható meg vagy nem egyértelműen.

# $LU$ -felbontás létezése és egyértelműsége

## **Tétel:** $LU$ -felbontás létezése és egyértelműsége (főminorokkal)

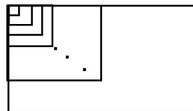
- Ha  $D_k \neq 0$  ( $k = 1, \dots, n-1$ ), akkor létezik az  $A$  mátrix  $LU$ -felbontása és  $u_{kk} \neq 0$  ( $k = 1, \dots, n-1$ ).
- Ha  $\det(A) \neq 0$ , akkor a felbontás egyértelmű.



**Biz.: létezés:** az  $LU$ -felbontás létezése a GE-nál tanult tételünkből következik.  $D_k \neq 0 \Leftrightarrow a_{kk}^{(k-1)} \neq 0$  a megadott indexekre, ezért a GE végrehajtható és az  $L, U$  mátrixok előállíthatóak.

**Egyértelműség:** indirekt tegyük fel, hogy az  $A$  invertálható mátrix  $LU$ -felbontása nem egyértelmű, azaz legalább két különböző felbontás létezik:

$$A = L_1 \cdot U_1 = L_2 \cdot U_2.$$



$$A = L_1 \cdot U_1 = L_2 \cdot U_2.$$

Az egyenlőséget  $U_2^{-1}$ -zel jobbról, majd  $L_1^{-1}$ -zel balról szorozva kapjuk, hogy

$$U_1 \cdot U_2^{-1} = L_1^{-1} \cdot L_2.$$

A szóban forgó inverzek léteznek, hiszen

$$\det(A) = \det(L_i) \cdot \det(U_i) = \det(U_i) \neq 0, \quad i = 1, 2\text{-re.}$$

Az egyenlőség bal oldalán egy felső háromszögmátrix, jobb oldalán pedig egy 1 főátlójú alsó háromszögmátrix áll. Ez csak úgy lehet, ha az egységmátrixról van szó. Tehát

$$U_1 \cdot U_2^{-1} = I \quad \implies \quad U_1 = U_2,$$

$$L_1^{-1} \cdot L_2 = I \quad \implies \quad L_1 = L_2.$$

Ellentmondásra jutottunk, vagyis az  $LU$ -felbontás egyértelmű.  $\square$

## $L$ és $U$ megadása GE-val

Az eddigieket összefoglalva felírhatjuk az  $A = LU$  felbontást:

$$L \in \mathcal{L}_1 \text{ és } l_{ij} = \frac{a_{ij}^{(j-1)}}{a_{jj}^{(j-1)}} \quad (i > j), \quad U \in \mathcal{U} \text{ és } u_{ij} = a_{ij}^{(i-1)} \quad (i \leq j).$$

Tegyük fel, hogy

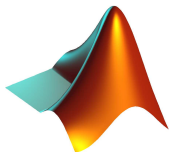
- az  $Ax = b$  LER megoldható, és
- rendelkezésünkre áll az  $A = LU$  felbontás.

Ekkor  $Ax = L \cdot \underbrace{U \cdot x}_y = b$  helyett  $(\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2))$

- 1 oldjuk meg az  $Ly = b$  alsó háromszögű,  $(n^2 + \mathcal{O}(n))$
- 2 majd az  $Ux = y$  felső háromszögű LER-t.  $(n^2 + \mathcal{O}(n))$

Összehasonlításul: egy mátrix-vektor szorzás műveletigénye:  
 $n \cdot (2n - 1) = 2n^2 + \mathcal{O}(n)$ .

Persze valamikor elő kell állítani az  $LU$ -felbontást.  $(\frac{2}{3}n^3 + \mathcal{O}(n^2))$   
Előnyös, ha sokszor ugyanaz  $A$ .



- 1 Az  $LU$ -felbontás működése „kisebb” ( $n \approx 7$ ) mátrixokra,
- 2 valamint „nagyobb” mátrixokra ( $n \approx 50$ ) színkóddal.
- 3 LER megoldása  $LU$ -felbontás segítségével.
- 4 Sok LER ( $m \approx 10, 100$ ) megoldása futási idejének összevetése nagyobb mátrixok ( $n \approx 50, 100, 200$ ) esetén: GE-val valamint az  $LU$ -felbontás kihasználásával.