

## Numerisches Programmieren, Übungen

### 8. Übungsblatt: Gaußelimination mit Pivotsuche, LR-Zerlegung, Matrixnorm

#### 1) Gauß-Elimination und Pivotsuche

Lösen Sie das lineare Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} -10^{-3} & 1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

mit der Gauß-Elimination:

- Ohne Spalten-Pivotsuche in exakter Arithmetik (d.h. keine Zeilenvertauschungen und ohne Runden rechnen)
- Ohne Spalten-Pivotsuche und mit Rundungsfehlern (korrektes Runden in dezimaler Gleitkomma-Darstellung mit 3 signifikanten Stellen. Bsp.:  $0.01236 = 1.236 \cdot 10^{-2}$  ergibt 0.0124).
- Mit Spalten-Pivotsuche und mit Rundungsfehlern wie in b).

#### 2) LR-Zerlegung

In dieser Aufgabe wollen wir den Algorithmus der LR-Zerlegung aus der Vorlesung an Beispielen nachvollziehen und vergleichen.

Die LR-Zerlegung zur Lösung eines linearen Gleichungssystems  $Ax = b$  besteht aus drei Teilen:

- Zerlegung der Matrix  $A$ :**  $A = L \cdot R$
- Vorwärtssubstitution:**  $Ly = b$
- Rückwärtssubstitution:**  $Rx = y$

- Lösen Sie unter Verwendung der Gauß-Elimination das lineare Gleichungssystem  $Ax = b$  mit

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

- Berechnen Sie die LR-Zerlegung (1.) der Matrix  $A$ .
- Führen Sie nun zur Lösung von  $Ax = b$  die Vorwärts- und Rückwärtssubstitution (2.) und (3.) durch. Verwenden Sie den Vektor  $b$  aus Teilaufgabe a).
- Setzen Sie die LR-Zerlegung ebenfalls zur Lösung von  $Ax = c$  mit  $c = (2, 1, 2)^T$  ein. Wie groß ist der zusätzliche Aufwand?

### 3) Matrixnorm

Die Matrix-Grenzen-Norm-2 (auch als Spektralnorm bekannt) ist eine der wichtigsten Matrixnormen:

$$\|A\|_2 = \sup_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_2}{\|x\|_2}$$

wobei die Vektornorm  $\|\cdot\|_2$  die bekannte Euklidische Länge entspricht:

$$\|x\|_2 = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}.$$

Zeigen Sie, dass **für eine diagonale Matrix  $D$**  gilt:

$$\|D\|_2 = \max_{i=1,\dots,n} |d_{ii}|.$$

**Hinweis:** Sei  $j$  so dass  $|d_{jj}| = \max_{i=1,\dots,n} |d_{ii}|$ . Zeigen Sie:

- a)  $\|D\|_2 \geq |d_{jj}|$  (Betrachten Sie ein Eigenvektor zu Eigenwert  $d_{jj}$ ),
- b)  $\|D\|_2 \leq |d_{jj}|$ .

(Im Allgemeinen, die 2-Norm von  $A$  ist gleich dem größten Singulärwert von  $A$ :  $\|A\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(A^T A)} = \sigma_{\max}(A)$ .)

### 4) Orthogonale Matrizen

Eine Matrix  $Q$  heißt Orthogonal, wenn gilt

$$QQ^T = Q^T Q = I,$$

wobei  $I$  der Einheitsmatrix entspricht.

Zeigen Sie die folgenden Eigenschaften orthogonaler Matrizen:

- a)  $\det Q = \pm 1$ ,
- b)  $\|Q\|_2 = 1$ .

**Hinweis:** Verwenden Sie  $\det(AB) = \det A \det B$  und  $\|x\|_2 = \sqrt{x^T x}$ .

**Zusatz:** Wie stellen sich diese Eigenschaften für  $2 \times 2$  diagonale Matrizen graphisch dar? Zeichnen Sie die Kurven  $\det D = \pm 1$ , und  $\|D\|_2 = 1$  in einem Diagramm von  $d_{22}$  gegen  $d_{11}$ .

## Zusatzaufgabe: Image Stitching mit Gauß-Elimination

In dieser Aufgabe verwenden wir die Gauß-Elimination zum Lösen linearer Gleichungssysteme im Bereich des Rechnersehens. Eine der Aufgaben, die durch Techniken der Bildverarbeitung bewältigt werden, ist das Zusammensetzen von Einzelbildern (engl. image stitching) bzw. die Erzeugung von Panoramabildern.

Will man zwei Bilder  $I_1$  und  $I_2$  "aneinandernähen", detektiert der entsprechende Algorithmus zunächst sogenannte Merkmalspunkte (engl. feature points) in beiden Bildern. Unter der Annahme, dass beide Bilder einen gemeinsamen Teil einer Szenerie zeigen, gibt es solche Merkmalspunkte in beiden Bildern. Anschließend findet eine Verknüpfung der Merkmalspunkte im ersten Bild  $I_1$  mit den zugehörigen Punkten im Bild  $I_2$  statt, wie in Abbildung 1 gezeigt.

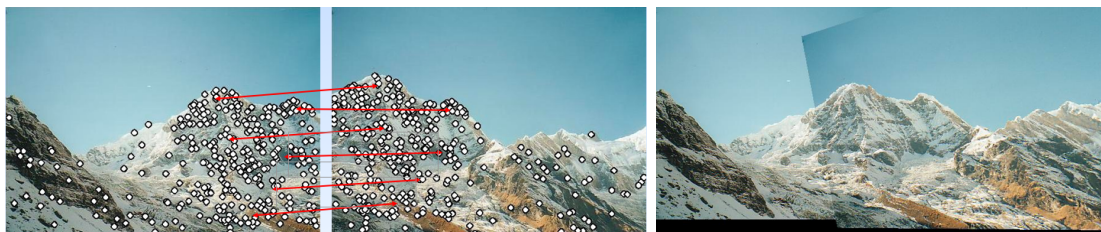


Abbildung 1: Image stitching.

In der Praxis treten viele Fehler beim Finden gemeinsamer Bildmerkmale auf. Allerdings gehen wir hier von perfekten Beziehungen zwischen den Punkten aus. Da sich die Punkte in der Bildebene befinden, existiert eine lineare Transformation  $H$  (im Englischen als homomorphie bezeichnet), die die Mengen von Merkmalspunkten aufeinander abbildet. Bezeichnet man die Merkmalspunkte in Bild  $I_1$  als  $\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, n$  und in Bild  $I_2$  als  $\mathbf{x}'_i, i = 1, \dots, n$ , so kann die Korrespondenz zwischen ihnen durch  $\mathbf{x}' = H\mathbf{x}$  ausgedrückt werden.

**Aufgabe:** Gegeben seien die beiden Punktepaare

$I_1$	$I_2$
$x_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$	$x'_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$
$x_2 = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}$	$x'_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix}$

Bestimmen Sie die entsprechende 2x2-Transformationsmatrix  $H$ .