



Geometrische Transformationen



Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.1 ©Konen, Zielke

Inhalt

- Einführung
- Transformationen und Homogene Koordinaten
- Interpolation der Grauwerte
 - nächster Nachbar
 - bilinear
- Nichtlineare Transformationen
- Warming-Algorithmus



Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.2 ©Konen, Zielke

Geometrische Bildtransformationen

Einführung (1)

- ❑ Geometrische Transformationen sind übliche Operationen in der Computergrafik.
- ❑ Bei der Bildanalyse werden geometrische Transformationen zur Korrektur von Verzerrungen (z.B. verursacht durch das Kameraobjektiv) angewandt, beziehungsweise allgemein als Normierungsoperation vor einer Mustererkennung oder Objektvermessung eingesetzt.
- ❑ Grundsätzlich wird bei der geometrischen Transformation eines Bildes jeder Pixelwert des Quellbildes $I(x,y)$ auf eine neue Position (x', y') im Zielbild abgebildet. Die Nachbarschaftsverhältnisse bleiben dabei erhalten!
- ❑ Die Zielposition eines transformierten Pixels liegt i.A. nicht exakt auf einer Rasterposition im Zielbild:
 - Die Zielkoordinaten (x',y') sind Gleitkommazahlen.
 - Um das transformierte Pixel im Zielbild abbilden zu können, muss **interpoliert** werden.

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.3 ©Konen, Zielke

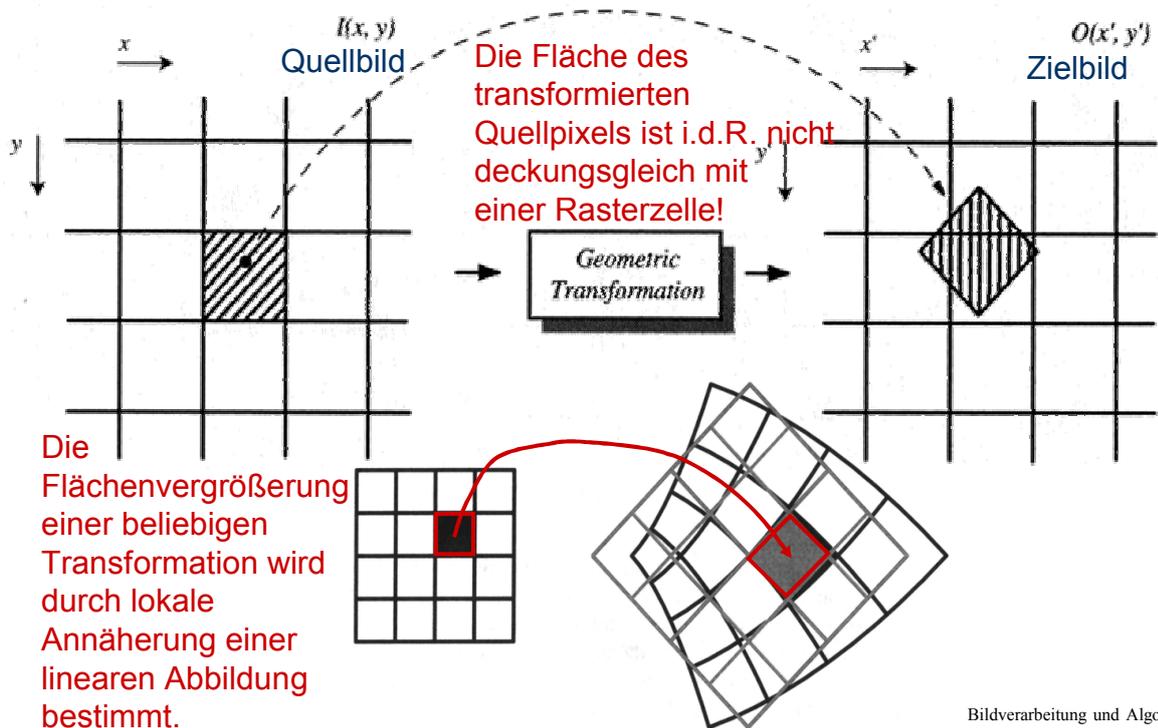
Geometrische Bildtransformationen

Einführung (2)

- ❑ Geometrische Bildtransformationen verändern nicht nur die Position eines Pixels, sondern oft auch die Bildfläche (Anzahl der Rasterpunkte), die das Pixel im Zielbild ausfüllen soll.
 - Je nachdem, ob das Quellpixel im Zielbild genau eine, weniger als eine oder mehr als eine Rasterzelle ausfüllt, ist der **Flächenvergrößerungsfaktor** der Transformation genau 1,0 , $< 1,0$ oder $> 1,0$.
- ❑ **Lineare** geometrische (affine) Transformationen haben einen konstanten (ortsinvarianten) Flächenvergrößerungsfaktor. Beispiele: Translation, Rotation, Skalierung.
- ❑ **Nicht-lineare** geometrische Transformationen (*warping transformations*) haben einen variierenden (ortsvarianten) Flächenvergrößerungsfaktor. Beispiele: Perspektivische Abbildung, Linsenverzerrung.

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.4 ©Konen, Zielke

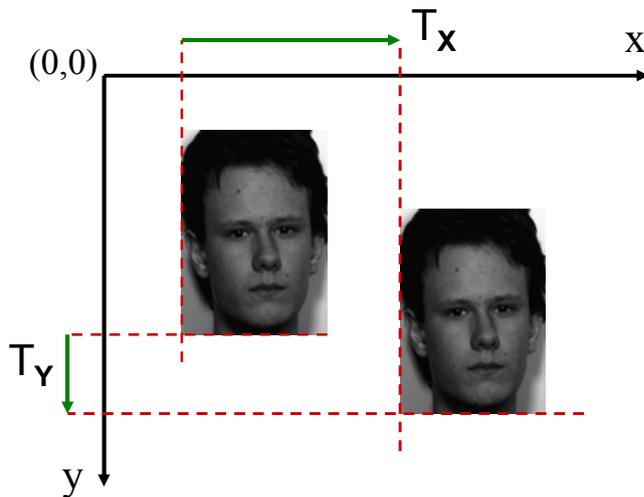
Illustrationen zur geometrischen Transformation eines Quellpixels in das Zielbild



Inhalt

- Einführung
- Transformationen und Homogene Koordinaten
- Interpolation der Grauwerte
 - nächster Nachbar
 - bilinear
- Nichtlineare Transformationen
- Waring-Algorithmus

Translation



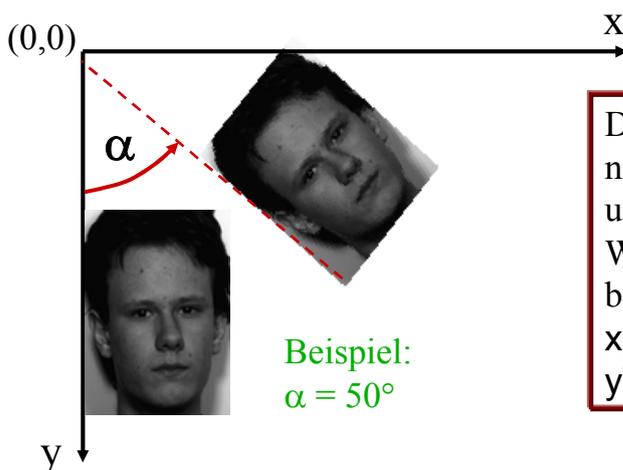
Die Position (x',y') eines Pixels nach einer Verschiebung (Translation) um T_x in positive x-Richtung und T_y in positive y-Richtung wird wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} x' &= x + T_x \\ y' &= y + T_y \end{aligned}$$

Die Transformationsgleichung für die Translation in Vektorschreibweise:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Rotation



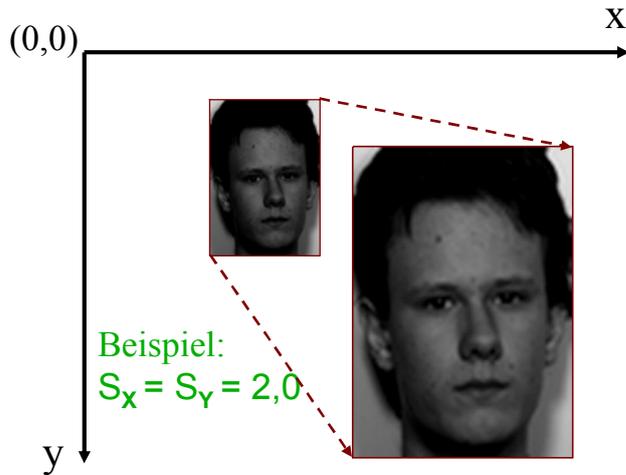
Die Position (x',y') eines Pixels nach einer Drehung (Rotation) um den Ursprung $(0,0)$ mit dem Winkel α wird wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \alpha + y \sin \alpha \\ y' &= -x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{aligned}$$

Die Transformationsgleichung für die Rotation in Vektorschreibweise:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Skalierung



Die Position (x',y') eines Pixels nach einer Skalierung relativ zum Ursprung $(0,0)$, mit dem horizontalen Skalierungsfaktor S_X und dem vertikalen Skalierungsfaktor S_Y wird wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}x' &= x S_X \\y' &= y S_Y\end{aligned}$$

Die Transformationsgleichung für die Skalierung in Vektorschreibweise:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_X & 0 & 0 \\ 0 & S_Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.9 ©Konen, Zielke

Affine Transformationen in Matrix-Darstellung: Homogene Koordinaten

- Zweidimensionale lineare Transformationen lassen sich einheitlich durch eine 3x3 Matrix darstellen.
- Die Transformation eines Punkts (x, y) zu einem neuen Punkt (x', y') durch eine beliebige Folge von Translationen, Rotationen und Skalierungen wird beschrieben durch:

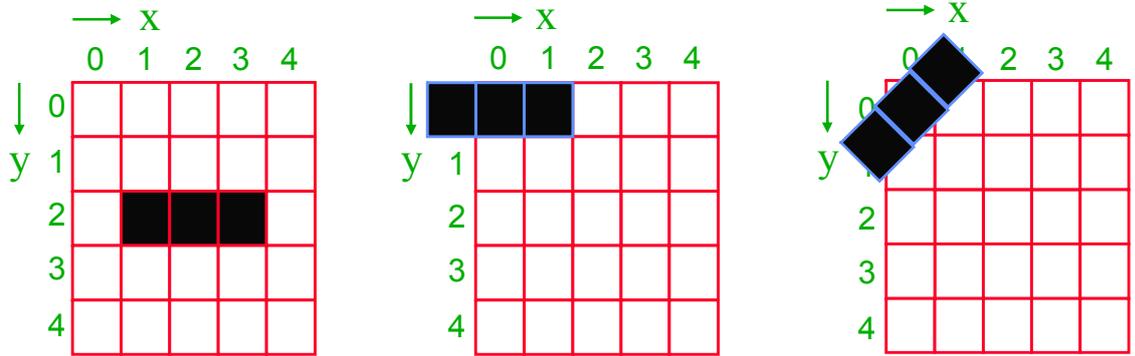
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Rotation, Skalierung
Translation

- Zwei oder mehrere affine Transformationen, die hintereinander ausgeführt werden sollen, lassen sich Verketteten (Konkatenation) und durch die Anwendung **einer** Transformationsmatrix ausführen.

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.10 ©Konen, Zielke

Affine Transformation, Beispiel (1): Rotation und Skalierung einer Linie aus drei Pixeln



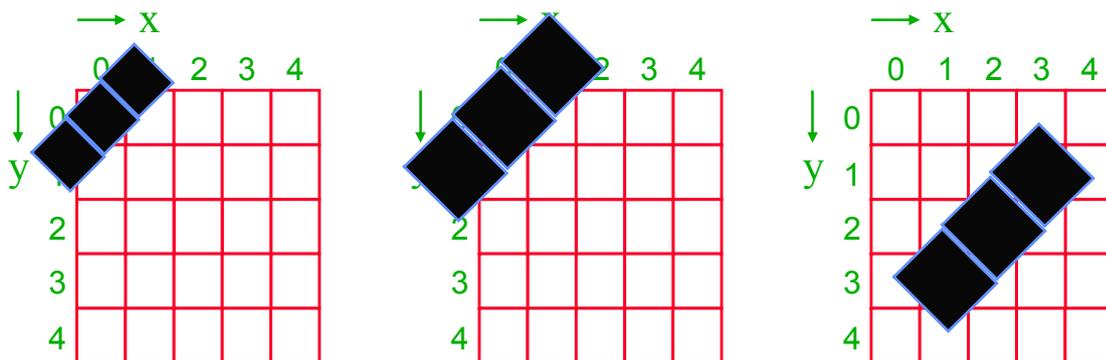
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ & 0 \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Translation ($T_X=-2 / T_Y=-2$)

Drehung um $\alpha=45^\circ$

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.11 ©Konen, Zielke

Affine Transformation, Beispiel (2): Rotation und Skalierung einer Linie aus drei Pixeln



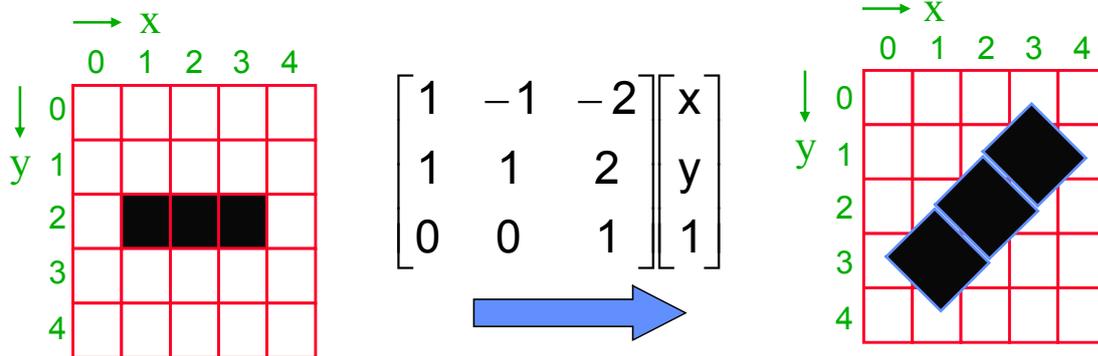
$$\begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Skalierung ($S_X=1,4142 / S_Y=1,4142$)

Translation ($T_X=2 / T_Y=2$)

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.12 ©Konen, Zielke

Affine Transformation, Beispiel (3): Rotation und Skalierung einer Linie aus drei Pixeln Verkettung der Teiltransformationen



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ & 0 \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Verkettung: Multiplikation der Matrizen in der Reihenfolge der Transformationen

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.13 ©Konen, Zielke

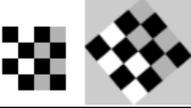
Typisierung analytischer Transformationen

Euclidean / Procrustes	$\begin{aligned} x' &= ax + by + t_x & , & \quad a = s \cos \alpha \\ y' &= -bx + ay + t_y & , & \quad b = s \sin \alpha \end{aligned}$
Affine / 1 st order polynomial	$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1x + a_2y \\ y' &= b_0 + b_1y + b_2y \end{aligned}$
Bilinear	$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1xy + a_2x + a_3y \\ y' &= b_0 + b_1xy + b_2x + b_3y \end{aligned}$
Perspective	$\begin{aligned} x' &= (a_0 + a_1x + a_2y)/(c_0x + c_1y + 1) \\ y' &= (b_0 + b_1x + b_2y)/(c_0x + c_1y + 1) \end{aligned}$
2 nd order polynomial / Biquadratic	$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy \\ y' &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + b_5xy \end{aligned}$
General polynomial	$\begin{aligned} x' &= \sum_i \sum_j a_{ij} x^i y^j \\ y' &= \sum_i \sum_j b_{ij} x^i y^j \end{aligned}$

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.14 ©Konen, Zielke

Typisierung analytischer Transformationen

□ Eigenschaften, Aussehen

Euklid / Procrustes	Geraden bleiben Geraden, Quadrate bleiben Quadrate	
Affin	Geraden bleiben Geraden, Parallelen bleiben parallel, Rechteck → Parallelogramm	
Bilinear	Geraden werden zu Kurven	
perspektivisch (projektiv)	Geraden bleiben Geraden, Parallelen → Geraden mit gemeinsamen Fluchtpunkt	
Biquadratisch	Geraden werden zu Kurven	

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.15 ©Konen, Zielke

Typisierung analytischer Transformationen

□ Anzahl Kontrollpunkte \geq Anzahl Freiheitsgrade/2

Euklid / Procrustes	Kombination Translation + Rotation + globale Skalierung	mind. 2 Kontrollpunkte
Affin	Kombination Translation + Rotation + x-Skalierung + y-Skalierung	mind. 3 Kontrollpunkte
Bilinear		mind. 4 Kontrollpunkte
perspektivisch (projektiv)		mind. 4 Kontrollpunkte
Biquadratisch		mind. 6 Kontrollpunkte

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.16 ©Konen, Zielke

Inhalt

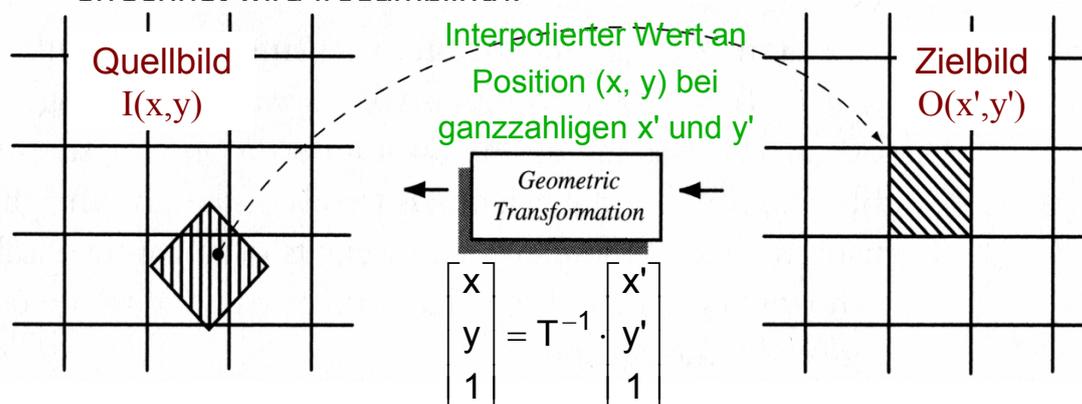
- Einführung
- Transformationen und Homogene Koordinaten
- **Interpolation der Grauwerte**
 - nächster Nachbar
 - bilinear
- Nichtlineare Transformationen
- Waring-Algorithmus

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.17 ©Konen, Zielke

Interpolation bei geometrischen Bildtransformationen (1)



- Bei der geometrischen Transformation von Rasterbildern wird meist eine Ziel-zu-Quelle (target-to-source, backwards) Abbildung implementiert.
- Im Zielbild wird jedes Pixel mit einem Wert besetzt, der durch Interpolation aus einer Pixelnachbarschaft im Quellbild errechnet wird (*resampling*).

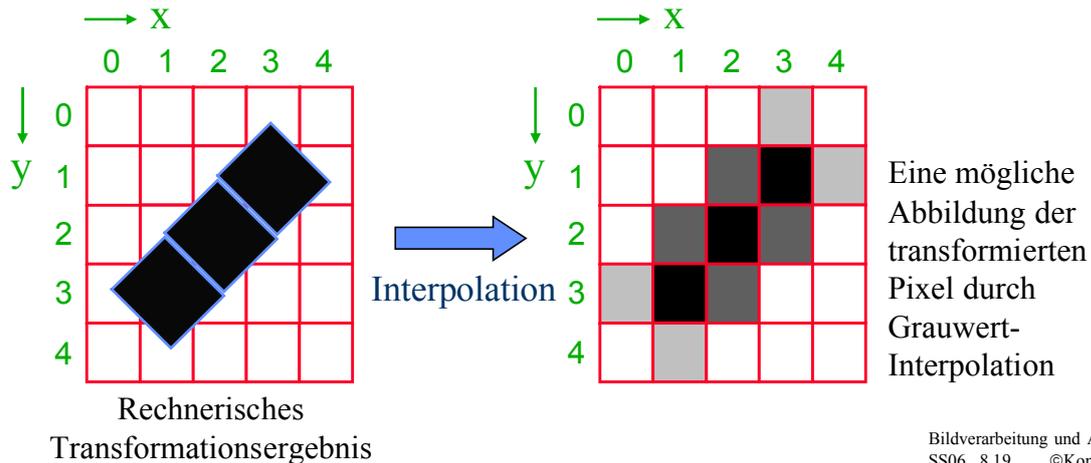


T^{-1} ist die Inverse der Transformationsmatrix für die Quelle-zu-Ziel Abbildung T

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.18 ©Konen, Zielke

Interpolation bei geometrischen Bildtransformationen (2)

- Ein transformiertes Pixel überdeckt (ganz oder teilweise) ein oder mehrere Rasterzellen im Zielbild.
- Ein einfaches Verfahren zur Interpolation der Grauwerte im Zielbild beruht darauf, den Grauwert aus allen beteiligten Quellbild-Pixeln zu berechnen, wobei diese proportional zu ihren Flächenanteilen gewichtet werden.



Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.19 ©Konen, Zielke

Interpolation bei geometrischen Bildtransformationen (2)

Die in der Praxis am häufigsten eingesetzten Interpolationsverfahren bei Bildtransformationen sind:

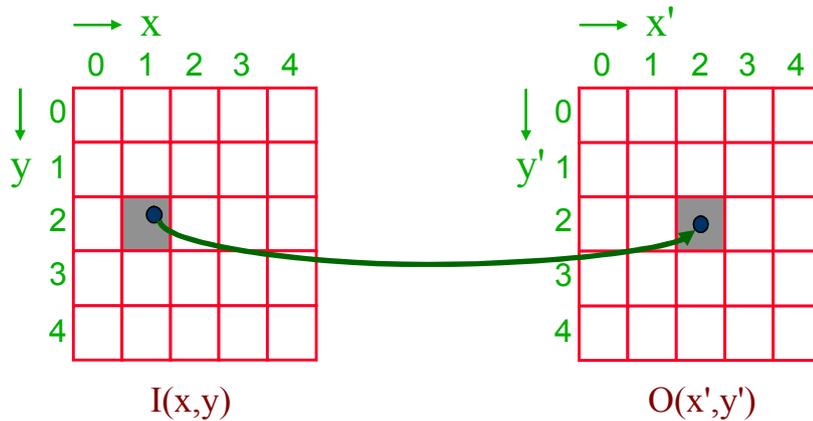
- Nächster-Nachbar-Interpolation (nearest neighbor)
- Bilineare Interpolation (bilinear)
Interpolation 1. Ordnung aus 4-er Bildnachbarschaft
- Bikubische Interpolation (bicubic)
Interpolation 2. Ordnung aus 16-er Bildnachbarschaft

Wieso nicht biquadratisch? – kommt später!

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.20 ©Konen, Zielke

Nächster-Nachbar-Interpolation (nearest neighbor)

Die Nächster-Nachbar Interpolation weist dem Punkt (x',y') den Grauwert des nächsten Punkts $I(x,y)$ im diskreten Raster zu.

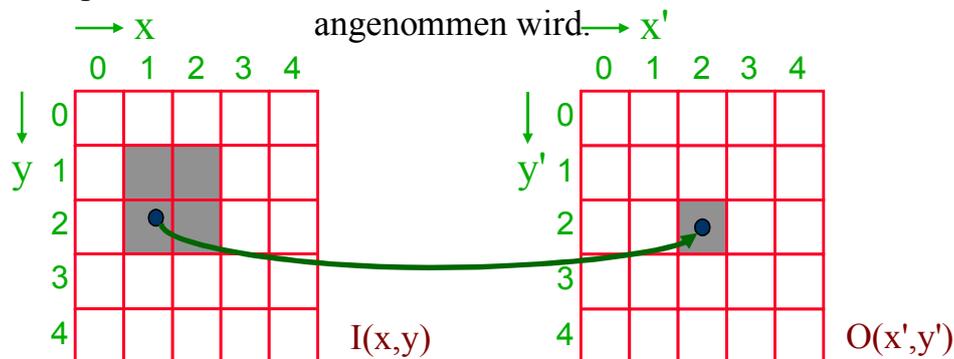


$$O(x',y') = I(\text{ROUND}(x), \text{ROUND}(y))$$

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.21 ©Konen, Zielke

Bilineare Interpolation

Die bilineare Interpolation berechnet den Grauwert aus den 4 nächsten Nachbarpunkten im Raster, wobei ein lokal linearer Grauwertverlauf angenommen wird.



$$O(x',y') = (1-a)(1-b) I(n, m) + a(1-b) I(n+1, m) + (1-a)b I(n, m+1) + ab I(n+1, m+1)$$

$$a = x - n$$

$$b = y - m$$

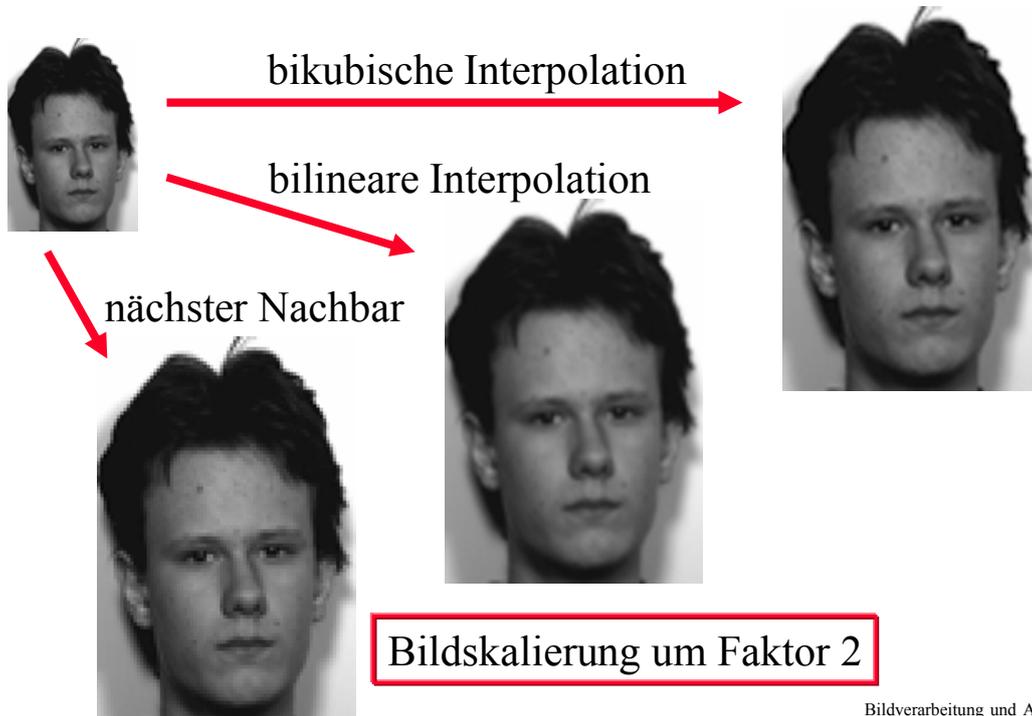
$$n = \text{TRUNCATE}(x) *$$

$$m = \text{TRUNCATE}(y)$$

*größte ganze Zahl kleiner x

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.22 ©Konen, Zielke

Effekt der verschiedenen Interpolationsverfahren Beispiel: Bildvergrößerung (magnification)



Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.23 ©Konen, Zielke

Inhalt

- Einführung
- Transformationen und Homogene Koordinaten
- Interpolation der Grauwerte
 - nächster Nachbar
 - bilinear
- Nichtlineare Transformationen**
- Waring-Algorithmus

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.24 ©Konen, Zielke

Nicht-lineare geometrische Transformationen

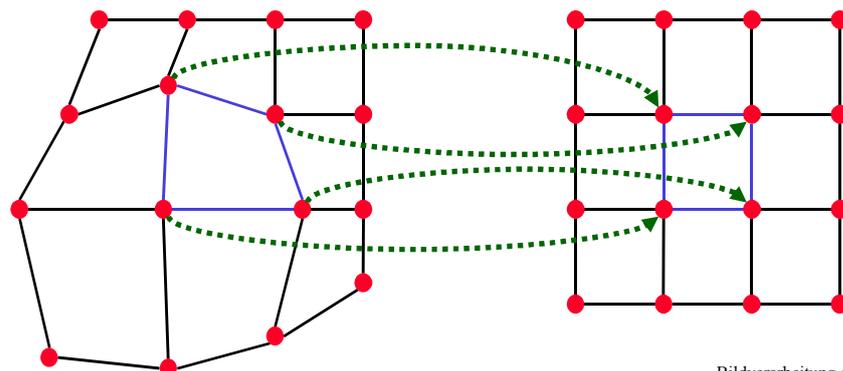
- Bei den nicht-linearen Transformationen variiert die lokale Bildverzerrung (ortsvarianter Flächenvergrößerungsfaktor).
Beispiele:
Perspektivische, sphärische und zylindrische Abbildungen.



Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.25 ©Konen, Zielke

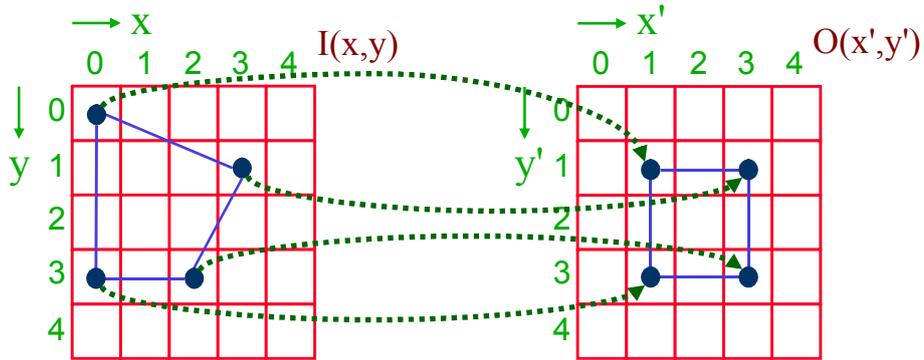
Korrektur von nicht-linearen Bildverzerrungen durch eine stückweise lineare Transformation

- Bei dem sogenannten **Warping** werden für eine Menge von ausgewählten Passpunkten (landmarks, fiducial points) im Quellbild die jeweils korrespondierenden Punkte im Zielbild bestimmt.
- Um eine geometrische Bildverzerrung zu korrigieren kann man ein Gitter von Passpunkten erstellen, das auf ein regelmäßiges (unverzerrtes) Gitter abgebildet werden soll.
- Die gesamte Bildtransformation wird in Regionen aufgeteilt, wobei jede Region im Gitter ein Viereck darstellt.



Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.26 ©Konen, Zielke

Herleitung einer stückweise linearen Warping-Transformation



Ein beliebiges Viereck (4-seitiges Polygon) kann mit einem bi-linearen Transformationsmodell auf ein anderes Viereck (z.B. Quadrat) abgebildet werden:

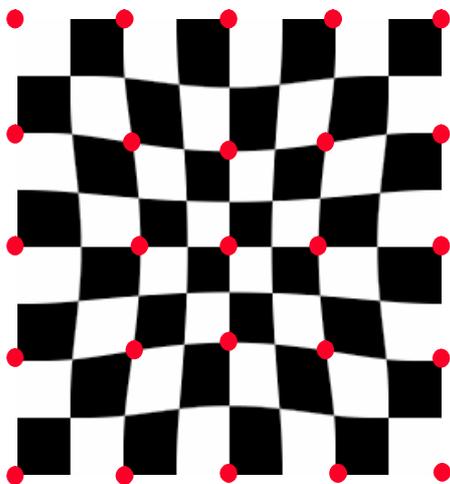
$$x' = a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4$$

$$y' = b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4$$

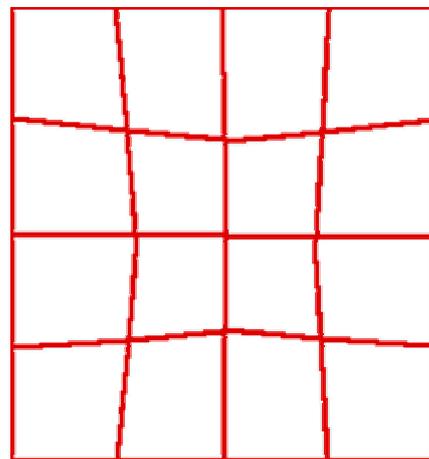
Mit den korrespondierenden 4 Passpunkten erhält man acht Gleichungen. Dieses Gleichungssystem wird nach den 8 Unbekannten ($a_1 \dots a_4, b_1 \dots b_4$) aufgelöst.

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.27 ©Konen, Zielke

Beispiel: Restauration eines verzerrten Schachbrettmusters (1)



25 manuell gewählte Passpunkte auf dem verzerrten Schachbrettbild



Verzerrtes Gitter

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.28 ©Konen, Zielke

Beispiel: Restauration eines verzerrten Schachbrettmusters (2)

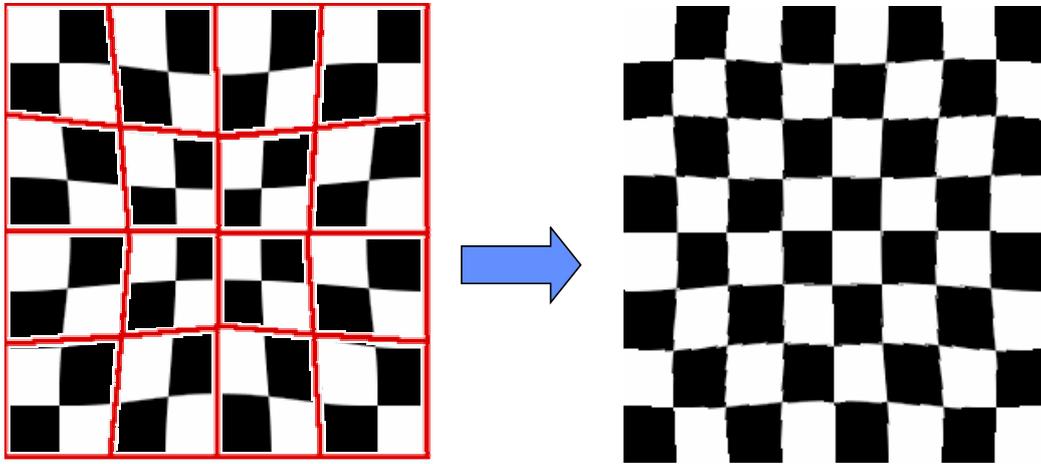
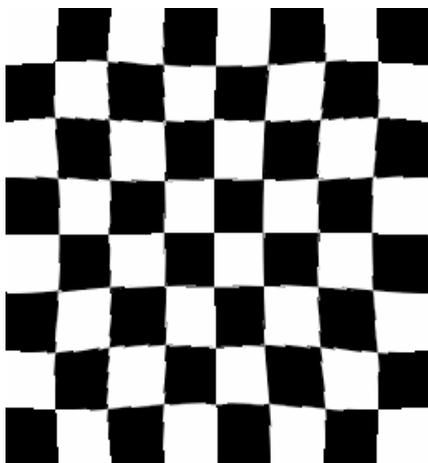


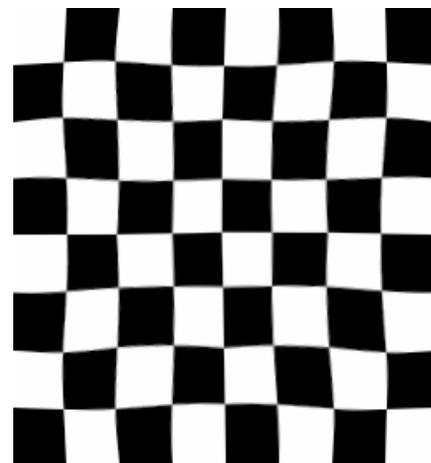
Abbildung eines verzerrten Gitters auf
das regelmäßige Normalgitter.

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.29 ©Konen, Zielke

Einfluss des Interpolationsverfahrens beim Warping



"Nächster Nachbar"



"Bi-linear"

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.30 ©Konen, Zielke

Inhalt

- Einführung
- Transformationen und Homogene Koordinaten
- Interpolation der Grauwerte
 - nächster Nachbar
 - bilinear
- Nichtlineare Transformationen
- Warping-Algorithmus**

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.31 ©Konen, Zielke

Die Schritte des Warping-Algorithmus

- Schritt 1:** Passpunkte finden
 - automatisch oder manuell
- Schritt 2:** Suche zu den Passpunkten die beste Transformation
 - analytisch (z.B. Vertreter aus Klasse der affinen Transformationen)
 - oder stückweise linear für jeden Pixelort \mathbf{x}' im Zielbild (**Gridding**)
- Schritt 3:** Grauwerte der Zielpixel festlegen
 - durch Interpolation am Quellort (nächster Nachbar, bilinear, bikubisch, ...)

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.32 ©Konen, Zielke

Warping, Schritt 1

Passpunkte finden

- manuell
 - o.k. für **Bildbearbeitung**, aber keine (automatisierte) **Bildverarbeitung**
 - mühsam, wenn viele Bilder
 - ungenau: optional: Passpunkte per Kreuzkorrelation verbessern
- automatisch: möglich, wenn korrespondierende Punkte in 2 Bildern vorliegen
- diese Aufgabe heißt **Matching** oder **Registrierung**
- 2 Teilprobleme:
 - das Auffinden geeigneter Punkte im Bild
 - ◆ "salient points", Landmarken
 - ◆ Kanten ungeeignet >> Aperturproblem (!)
 - ◆ Ecken >> s. Projekt Eckendetektor
 - das genaue Wiederfinden im anderen Bild
 - ◆ Template Matching
 - ◆ s. Projekt Tracking

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.33 ©Konen, Zielke

Warping, Schritt 2

Geometrische Transformation T

- Wie genau macht man den Warp in ImageJ/Jama?
 1. T aus Passpunkten berechnen:
 - a) wenn T aus bestimmter Klasse (z.B. Euklid) sein soll: beste Transformation im Least-Square-(LS-)Sinne suchen
 - b) freier Warp: stückweise-linear interpolieren zwischen Passpunkten
 2. T invertieren und auf jedes (homogene) Ziel-Pixel anwenden

Bildverarbeitung und Algorithmen
SS06 8.34 ©Konen, Zielke

Warping, Schritt 2

2.1.a) Bestes T mit Least-Square-Fit

- Zu 2.1.a): Seien mehr Passpunkte gegeben als man zur Bestimmung von T braucht. Bsp. Rotationsstreckung:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} x' = ax + by \\ y' = -bx + ay \end{cases} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y \\ y & -x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

- Übergang auf mehrere Passpunkte:

Der Trick: Jeder freie Parameter a,b,... taucht genau 1x auf

$$\begin{pmatrix} x_1' \\ \vdots \\ x_n' \\ y_1' \\ \vdots \\ y_n' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \\ y_1 & -x_1 \\ \vdots & \vdots \\ y_n & -x_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{X}' = \mathbf{Zt}$$

Dieses i.d.R. überbestimmte System für Parametervektor $\mathbf{t} = (a,b)^T$ wird durch den Jama¹-Befehl

Matrix $\mathbf{t} = \mathbf{Z.solve}(\mathbf{Xp})$;
im Least-Square-Sinne gelöst.

¹Jama: <http://math.nist.gov/janumerics/jama/>

Warping, Euklid

2.1.a) Bestes T mit Least-Square-Fit

- Zu 2.1.a): Seien mehr Passpunkte gegeben als man zur Bestimmung von T braucht. Bsp. Rotationsstreckung:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & t_x \\ -b & a & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} x' = ax + by + t_x \\ y' = -bx + ay + t_y \end{cases} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y & 1 & 0 \\ y & -x & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

- Übergang auf mehrere Passpunkte:

$$\begin{pmatrix} x_1' \\ \vdots \\ x_n' \\ y_1' \\ \vdots \\ y_n' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 \\ y_1 & -x_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_n & -x_n & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ t_x \\ t_y \end{pmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{X}' = \mathbf{Zt}$$

Der Trick: Jeder freie Parameter a,b,... taucht genau 1x auf

¹Jama: <http://math.nist.gov/janumerics/jama/>

Warping, Schritt 2

2.2 gegebenes T

- Zu 2.2.: aus Parametervektor \mathbf{t} können wir homogene 3x3-Matrix \mathbf{T} bilden, z.B.:

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{T} = \begin{pmatrix} a & b & 0 \\ -b & a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Jama¹-Befehle für jedes Zielpixel $(x',y')=(i,j)$

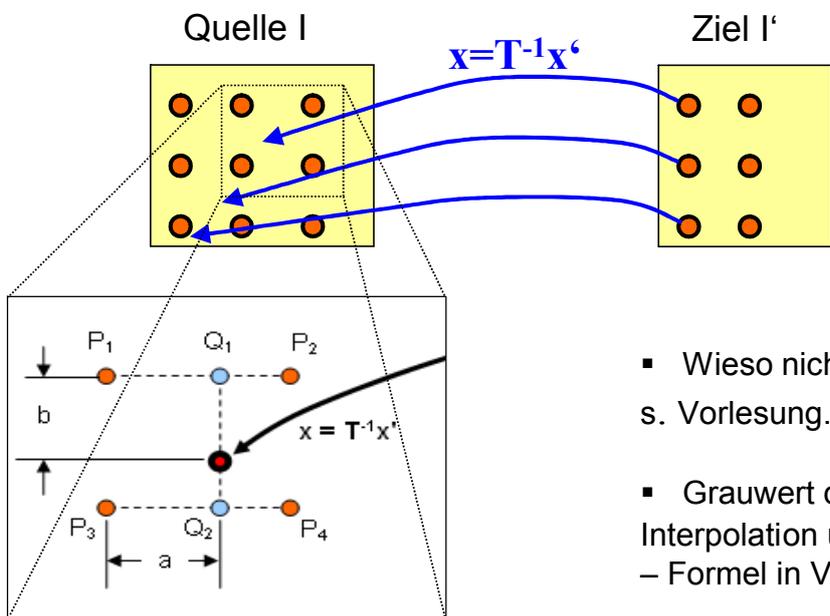
```
Matrix T_inverse = T.inverse();
double [][] valXP = {{i},{j},{1.0}};
Matrix XP = new Matrix(valXP);
Matrix X = T_inverse.times(XP);
double x = X.get(0,0);
double y = X.get(1,0);
```

¹Jama: <http://math.nist.gov/javanumerics/jama/>

Warping, Schritt 3

(Transformationen T und T⁻¹ seien gegeben)

- Backwards-Warp: Zielpixelort \mathbf{x}' wird durch Quellort \mathbf{x} koloriert



- Wieso nicht Vorwärts-Warp? – s. Vorlesung.
- Grauwert durch z.B. bilineare Interpolation um Quellort \mathbf{x} herum – Formel in Vorlesung

Quelle: [aufg_loes.htm](#)

Anwendungen des Warping-Algorithmus

- Kamerakalibrierung
 - (Kissen- oder Tonnenverzeichnung korrigieren)
- Industrielle Prüfaufgaben für deformierbare Objekte
- Luftaufnahmen Landschaft zur Deckung bringen
 - ... und dann Differenz, um Unterschiede zu sehen (Ökologie)
- Inverse Perspektive
- Medizinische Bildverarbeitung
 - Matching und Registrierung bei multimodalen, multitemporalen Aufnahmen >> s. Projekt Matching
- Zwischenbilder berechnen >> s. Projekt Morphing
- Facial Animation, 3D-MM (Morphable Models) [Blaiz, Vetter] >> s. [reanim_exercise.mpg](#)
- Image Mosaicing (mehrere Bilder zusammensetzen) >> s. Projekt Panoramic View