

# 6. Registrierung

## 6. Registrierung

- 6.1 Aufgabenstellung der Registrierung
- 6.2 Lineare Registrierung
  - 6.2.1 Intensitätsbasierte Registrierung
  - 6.2.2 Transinformati**o**n**s**basier**e**te Registrierung
- 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung

## 6 Registrierung

- Voraussetzung für Fusion: **Gemeinsamer Kontext**
- **Übereinstimmung der Definitionsbereiche** der durch die Daten repräsentierten Informationen (örtlich: kollokiert bzw. zeitlich: synchron)
- Registrierung: Anpassung der Definitionsbereiche (z.B. durch Verschiebung, Verzerrung)
- Unterschiedliche **Registrierungsverfahren** je nach
  - Art der zu fusionierenden Daten
  - Zusammenhang zwischen den zu fusionierenden Daten
  - Anforderungen an Genauigkeit, Variabilität, Robustheit, Suchbereich

### Beispiel: Zeitliche Registrierung

Vorliegende Daten:

- Videostrom (von der Kamera)
- Audiostrom (vom Mikrofon)

Ziel: Synchronisation der Daten zu vertontem Film

## 6 Registrierung – Eliminierbare und nicht eliminierbare Unterschiede

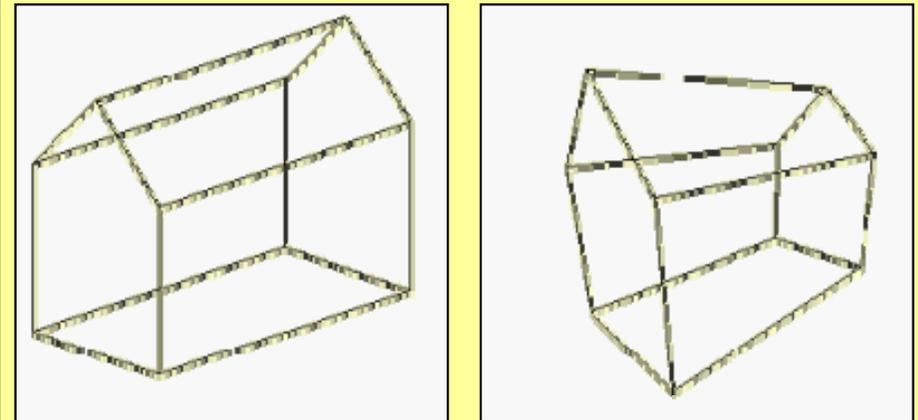
- **Eliminierbare Unterschiede** bei homogenen Sensorsystemen  
Anpassung durch Anwendung von geometrischen Transformationen, z.B.
    - (Bereichsweise) Verschiebung (Translation)
    - Perspektivische Projektion
    - Drehung (Rotation)
    - Größenänderung
- Kompatible, evtl. teilweise komplementäre Definitionsbereiche,  
**kompatible Wertebereiche**
- **Registrierung**: Vollständige Beseitigung der Unterschiede

### Bsp.: Verschiebung des Sensorsystems



Quelle: Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

### Bsp.: Perspektivische Verzerrungen



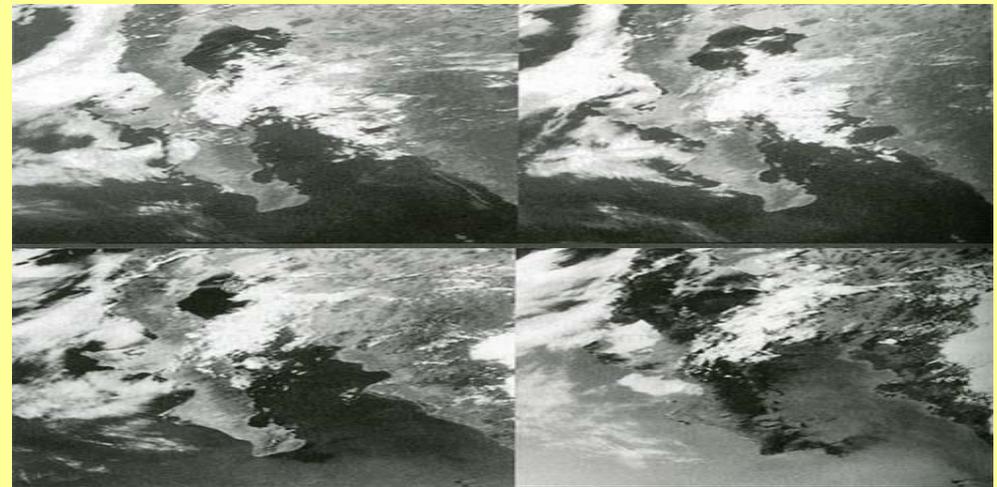
# 6 Registrierung – Eliminierbare und nicht eliminierbare Unterschiede

- **Nicht eliminierbare Unterschiede** resultierend aus
    - Heterogenen Sensorsystemen
    - Veränderung der Szene zwischen den Beobachtungen (z.B. Beleuchtung)
    - Sensorsystemen mit unterschiedlichen Beobachtungsparametern
- Kompatible Definitionsbereiche, **unterschiedliche Wertebereiche**
- Kein vollständiger Ausgleich der Daten durch geometrische Transformationen möglich
- **Registrierung**: Bestmöglicher Ausgleich der Unterschiede

Bsp.: Unterschiedliche Beleuchtungen



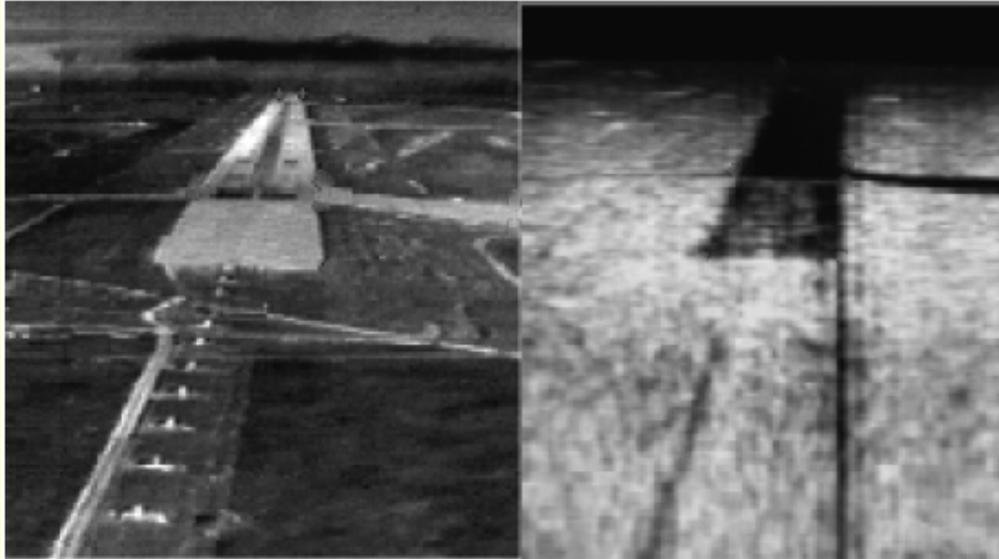
Bsp.: Wolkenformationen



Quelle: Rick S. Blum & Zheng Liu: *Multi Sensor Image Fusion and Its Applications*. Taylor & Francis, 2006

# 6 Registrierung – Eliminierbare und nicht eliminierbare Unterschiede

## Beispiele: Nicht eliminierbare Unterschiede



Quelle: [www.resy.informatik.uni-kl.de](http://www.resy.informatik.uni-kl.de)

### **Wärme- und Radarbild**

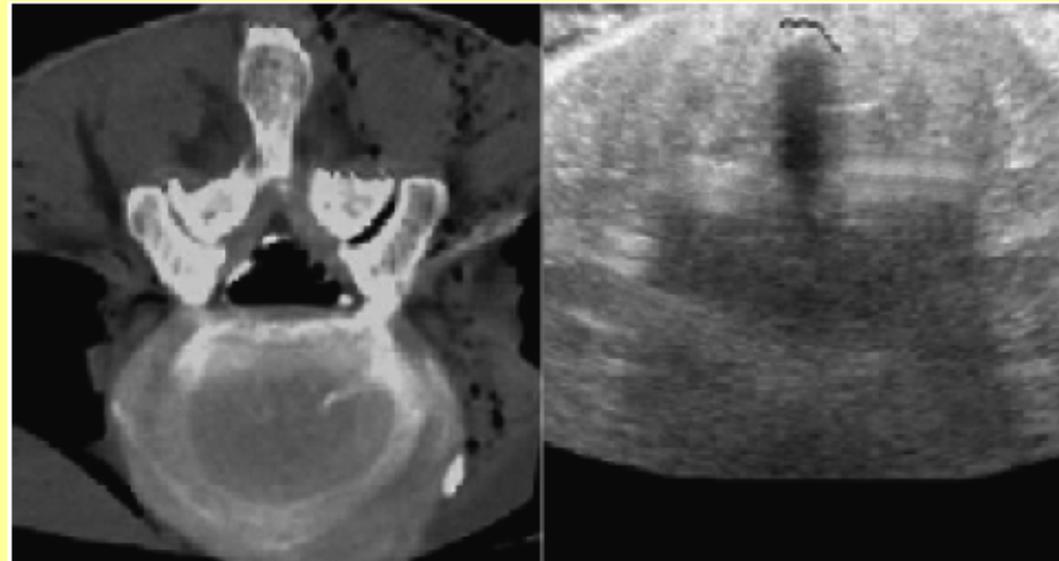
Flugzeug beim Landeanflug

IR-Bild: Dunkelheit

Radarbild: Nebel

### **CT- und Ultraschallaufnahme**

Erkennung von Anomalien,  
Operationsnavigation



Quelle: [www.resy.informatik.uni-kl.de](http://www.resy.informatik.uni-kl.de)

## 6.1 Aufgabenstellung der Registrierung

---

- **Gegeben:** Beobachtung von Sensorsystem 1  $\rightarrow$  Template  $T(x)$   $x \in \mathbb{R}^q$   
Beobachtung von Sensorsystem 2  $\rightarrow$  Referenz  $R(x)$
- **Aufgabe:** Gesucht ist eine **geometrische Transformation**  $F : \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^q$  derart, dass Referenz  $R(x)$  und angepasstes Template  $T_F(x) := T(F(x))$  möglichst „gut“ übereinstimmen. Dann sind die eliminierbaren Unterschiede vollständig und die nicht eliminierbaren Unterschiede bestmöglich beseitigt.
- **Anforderungen an  $F$ :** Erzielung möglichst hoher Übereinstimmung zwischen  $R$  und  $T_F$

## 6.1 Aufgabenstellung der Registrierung

- **Bei nicht eliminierbaren Unterschieden:**

Unterscheiden sich Template  $T(F(x))$  und Referenz  $R(x)$  in ihren Funktionswerten (z.B. aufgrund heterogener Sensorsysteme), so ist eine **zusätzliche Funktion  $f$**  zur Berücksichtigung dieser Unterschiede sinnvoll:

- **Allgemeines Registrierungsproblem:**

Gegeben sei ein reellwertiges Distanzmaß  $d$  sowie ein Template  $T$  und eine Referenz  $R$ .

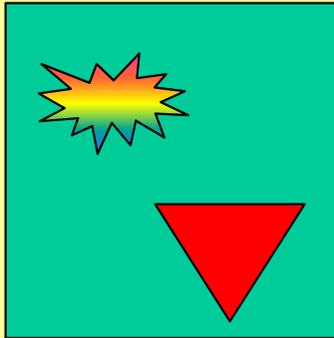
Finde Funktionen  $F : \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^q$  und  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , so dass gilt

$$d(R, f \bullet T \bullet F) \rightarrow \text{Minimum}$$

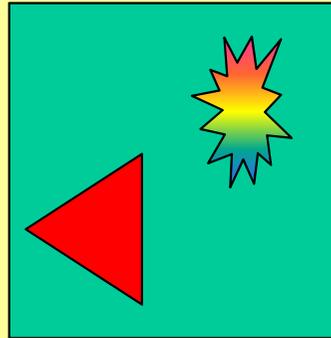
Dabei bezeichnet  $\bullet$  die Hintereinanderausführung von Operatoren.

## 6.1 Aufgabenstellung der Registrierung

### Beispiel: Registrierung zweier Bilder



Template  $T$

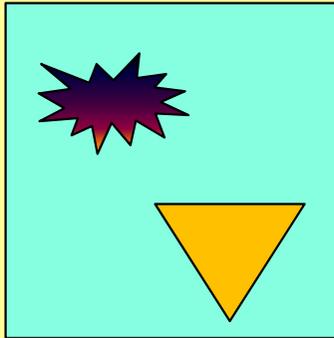


Referenz  $R$

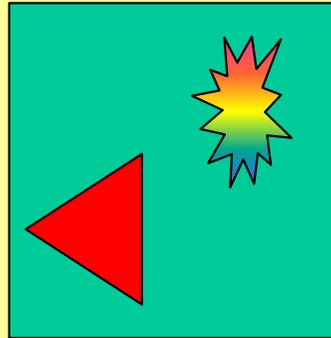
- Homogenes Sensorsystem, daher wird  $f$  als Identität gewählt
- Finde die beste Funktion  $F$ , die die Beobachtungen  $T$  und  $R$  der Sensorsysteme bestmöglich kombiniert und somit ein geeignetes Distanzmaß minimiert
- Lösung für  $F$ : Drehung des Templates  $T$  um  $90^\circ$  im Uhrzeigersinn
- Dann gilt  $T(F(x)) = R(x)$ , d.h. größtmögliche Übereinstimmung ist erreicht.

## 6.1 Aufgabenstellung der Registrierung

### Beispiel: Registrierung zweier Bilder



Template  $T$



Referenz  $R$

- Heterogenes Sensorsystem, Wahl von  $f$  z.B. als Histogramm-Transformation oder Look-Up-Tabelle
- Optimierung von  $F$  und  $f$ , so dass  $d(R(x), f(T(F(x))))$  minimal wird.

## 6.1 Aufgabenstellung der Registrierung

---

### Restriktion des Suchraumes → Einschränkungen von $F$

- Im Allgemeinen ist die Minimierung der Vergleichsfunktion nicht bezüglich beliebiger Funktionen

$$F : \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^q$$

durchführbar.

- Deshalb **zusätzliche Forderungen an  $F$**  (z.B. Glattheit) oder **Beschränkung auf bestimmte Klassen von Funktionen** wie
  - Affine Abbildungen  
(inkl. Translationen, Kongruenzen, Ähnlichkeiten)
  - Projektive Abbildungen
  - Polynomialtransformationen
  - Spline-Transformationen

## 6.2 Lineare Registrierung

Einschränkung des **Suchraumes für geeignete Transformationen** auf die Menge der  $q$ -dimensionalen affinen (linearen) Abbildungen

Gesucht ist  $F_p : \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^q$ , so dass  $d(R, f \bullet T \bullet F_p) \rightarrow \text{Minimum}$

$F_p$  parametrisierbar durch  $\mathbf{p} = (p_{10}, \dots, p_{1q}, \dots, p_{q0}, \dots, p_{qq})^T \in \mathbb{R}^{q(q+1)}$  :

$$F_p(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{q1} & \cdots & p_{qq} \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} p_{10} \\ \vdots \\ p_{q0} \end{pmatrix}$$

## 6.2.1 Intensitätsbasierte Registrierung

Festlegung der **Vergleichsmetrik** durch Wahl der Distanzfunktion:  
**Summe der Quadrate der Intensitätsdifferenzen**  
(Sum of Squared Differences, SSD):

$$d_{\text{SSD}}(R, T_p) := \frac{1}{2} \|T_p - R\|_{L_2}^2 = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^q} (T_p(\mathbf{x}) - R(\mathbf{x}))^2 d\mathbf{x} \quad T_p := T \bullet F_p$$

**Optimaler Parametersatz  $p$ :**

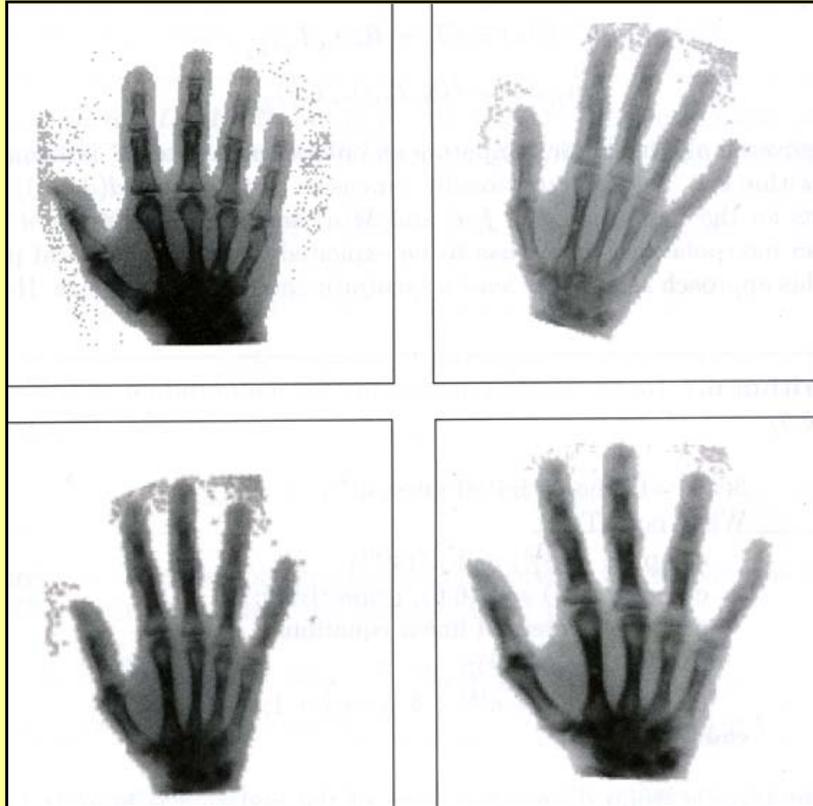
Notwendige Bedingung für Minimum:

$$\frac{\partial}{\partial p_{ij}} d_{\text{SSD}}(R, T_p) \stackrel{!}{=} 0 \quad \forall p_{ij}$$

Lösung z.B. mittels Newton-Verfahren (iterativ)

## 6.2.1 Intensitätsbasierte Registrierung

### Bsp: Intensitätsbasierte Registrierung (SSD)



Oben links: **Referenz**

Oben rechts: **Template**

Unten links: **Template nach Registrierung mit  
Festkörper-Transformationen**

Unten rechts: **Template nach Registrierung mit  
affinen Transformationen**

Quelle: Jan Modersitzki: Numerical Methods for Image Registration. Oxford University Press, 2004

## 6.2.2 Transinformationsbasierte Registrierung

Auf Transinformation (Mutuelle Information, MI) basierende Registrierung:

Vergleichsfunktion  $d_{\text{MI}}(R, T) := H\{p_R\} + H\{p_T\} - H\{p_{R,T}\}$

$H\{p_x\} = E_{p_x}\{-\log_2 p_x\}$ : Entropie (für diskrete Werte)

$p_{R,T}$  : Verbundverteilung der Grauwerte

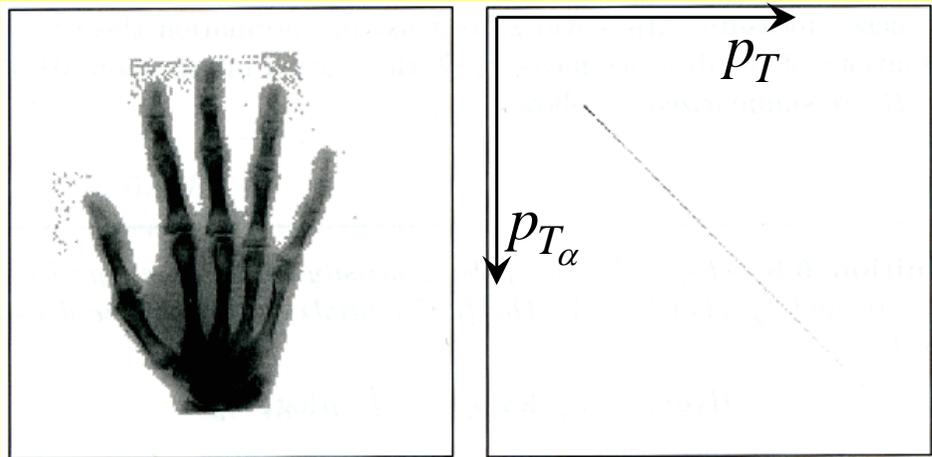
$p_R, p_T$  : Grauwertverteilungen von  $R, T$

Eigenschaften von  $d_{\text{MI}}(R, T)$ :

- $d_{\text{MI}}(R, T) = E_{p_{R,T}} \left\{ -\log_2 \frac{p_R p_T}{p_{R,T}} \right\}$
- $H\{p_{R,T}\} \leq H\{p_R\} + H\{p_T\} \Rightarrow d_{\text{MI}}(R, T) \geq 0$
- $R, T$  unabhängig:  $p_{R,T} = p_R p_T \Rightarrow d_{\text{MI}}(R, T) = 0$
- $d_{\text{MI}}(R, T)$  ist maximal g.d.w.  
Abhängigkeit zwischen  $p_R$  und  $p_T$  maximal
- $d_{\text{MI}}(R, T)$  ist keine Metrik

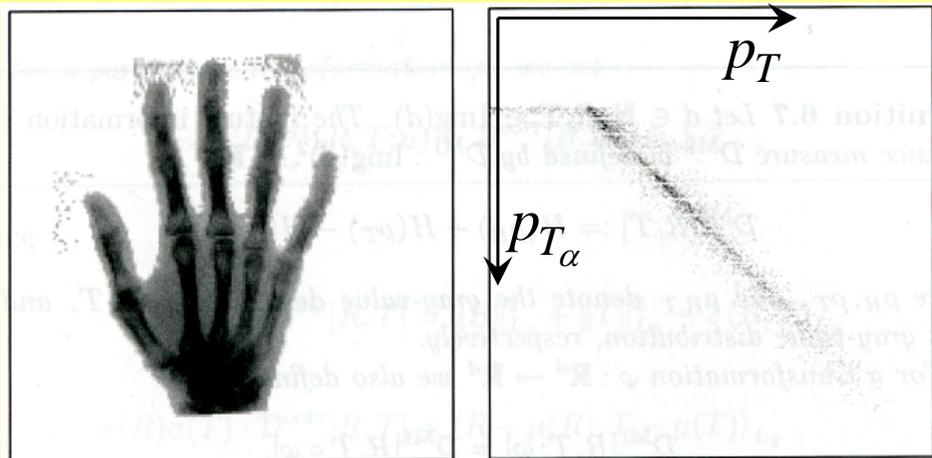
## 6.2.2 Transinformatiionsbasierte Registrierung

Beispiel: Drehung eines Bildes  $T$  um den Winkel  $\alpha$

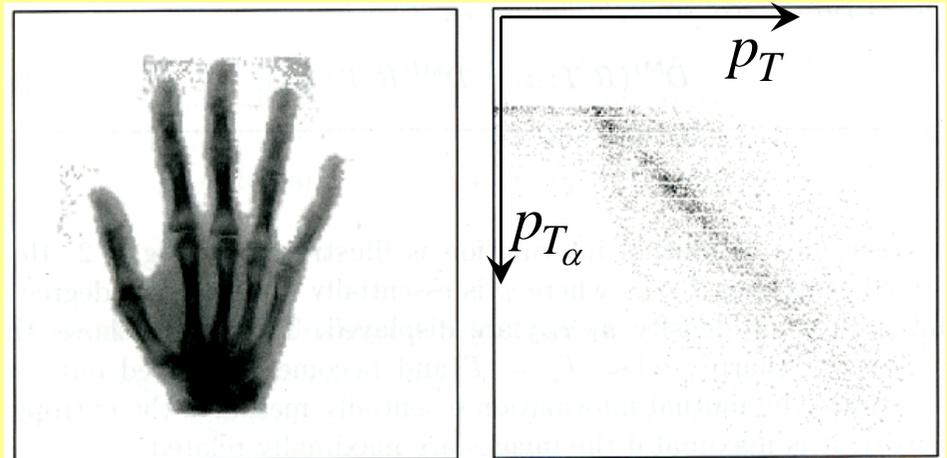


$$\alpha = 0^\circ: d_{\text{MI}}(T, T \bullet F_\alpha) \approx 1,71$$

Rechtes Bild: Deformiertes Template  $T$   
Linkes Bild: Verbunddicke



$$\alpha = 1^\circ: d_{\text{MI}}(T, T \bullet F_\alpha) \approx 1,02$$



$$\alpha = 5^\circ: d_{\text{MI}}(T, T \bullet F_\alpha) \approx 0,80$$

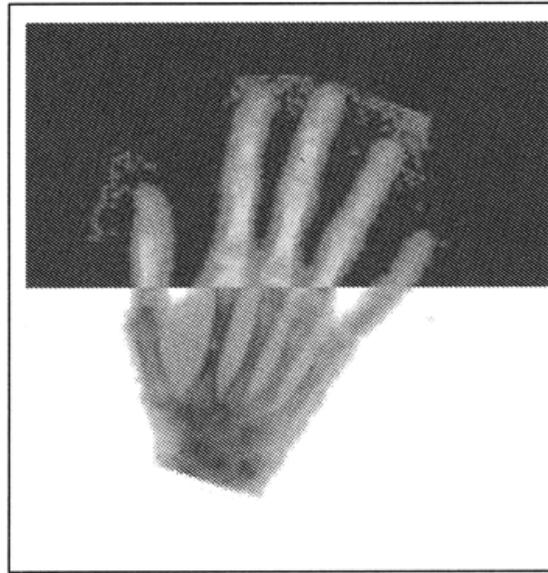
Quelle: Jan Modersitzki: Numerical Methods for Image Registration. Oxford University Press, 2004

## 6.2.2 Transinformationsbasierte Registrierung

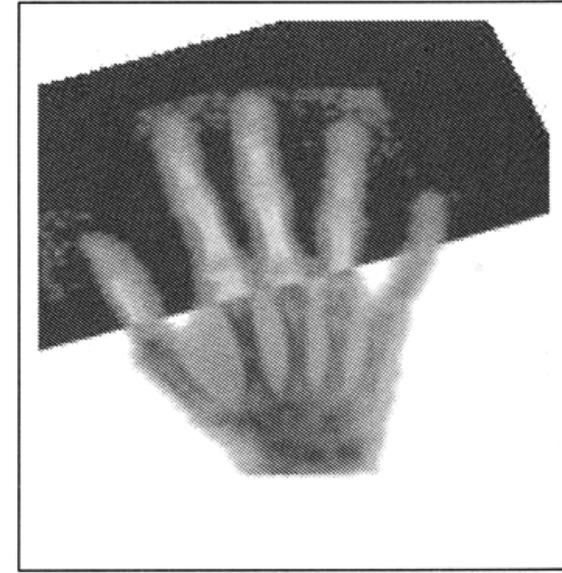
### Beispiel: Registrierung bei teilinvertiertem Template



Referenz



Template



Registriertes Template

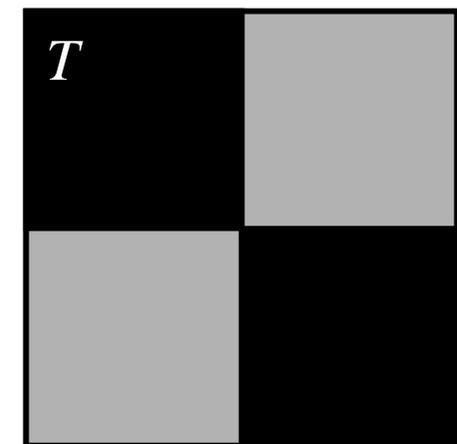
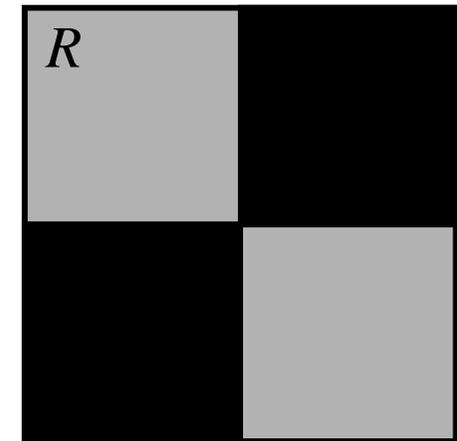
Quelle: Jan Modersitzki: Numerical Methods for Image Registration. Oxford University Press, 2004

- Mutuelle Information vergleicht nicht Intensitäten, sondern im Wesentlichen die **Entropie der Verbunddichte**  $p_{R,T}$ .

## 6.2 Lineare Registrierung – Vergleich

### Intensitätsbasierte Registrierung:

- Geeignet, wenn **Intensitäten** von Template und Referenz in (linearem) Bezug stehen
- Ähnlichkeiten entsprechen weitgehend der **menschlichen Wahrnehmung**
- Im Beispiel:  $d_{SSD}$  hat **zwei Minima**: Drehung um  $\pi/2$ ,  $3\pi/2 \rightarrow$  Übereinstimmung der Intensitäten



### Transinformationsbasierte Registrierung:

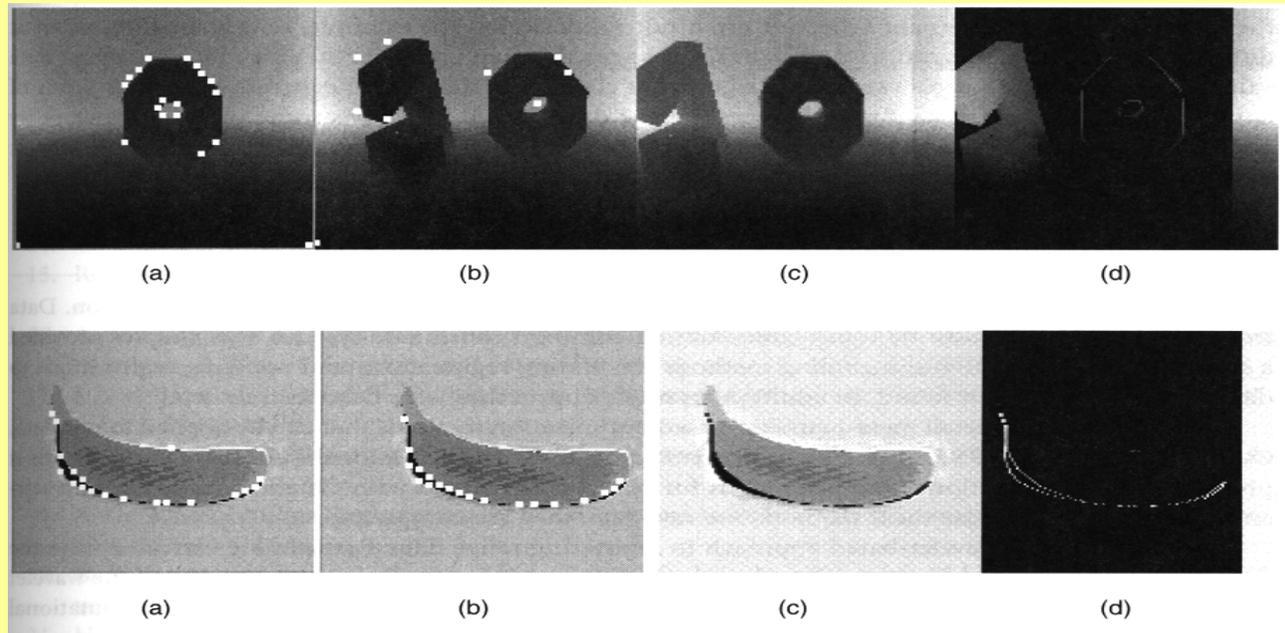
- Intensitäten müssen nicht notwendigerweise in linearem oder stetigem Bezug zueinander stehen
- Im Beispiel: **vier optimale Drehwinkel**:  $k\pi/2$ ,  $k = 0,1,2,3$
- Schätzung stochastischer Eigenschaften der Bilder erforderlich  $\rightarrow$  Abhängigkeit von den jeweiligen Bildern (Zufallsgrößen)

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung

- Matchen von **charakteristischen Merkmalen (Landmarks)**
- **Wahl des Merkmalsraums (Feature Space):**  
Kanten, Ecken, Konturen, je nach Aufgabenstellung und Sensoren
  - „Harte“ Merkmale: Bei der Beobachtung **bereits vorhandene** Merkmale (Reale Objekteigenschaften oder Marker)
  - „Weiche“ Merkmale: **Nach Beobachtung (evtl. interaktiv) markierte** Objekteigenschaften
- **Ziel:** Auffinden und Ausrichten der Merkmale in den Datensätzen

### Beispiel:

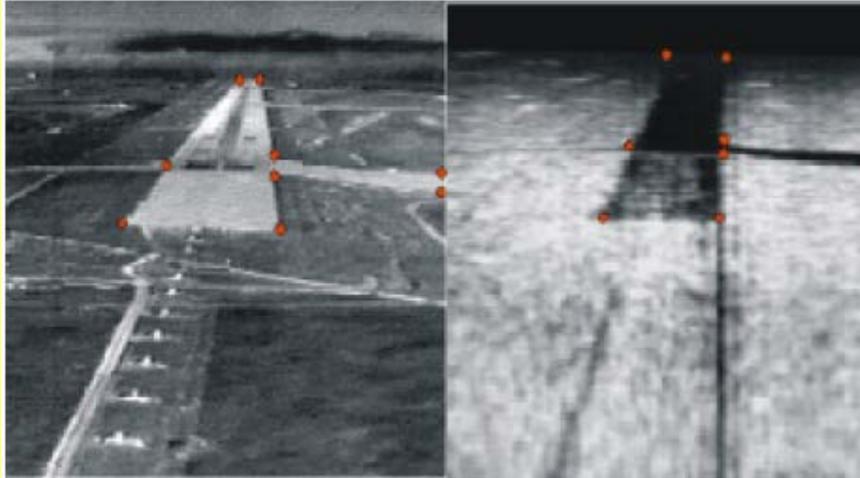
- (a) Referenz mit markierten Merkmalen
- (b) Template mit markierten Merkmalen
- (c) Registrierungsergebnis (gemittelte Intensitäten)
- (d) Registrierungsergebnis (Differenz der Intensitäten)



Quelle: David L. Hall & James Llinas: *Handbook of Multisensor Data Fusion*. CRC Press, 2001

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung

### Beispiele: Charakteristische Merkmale



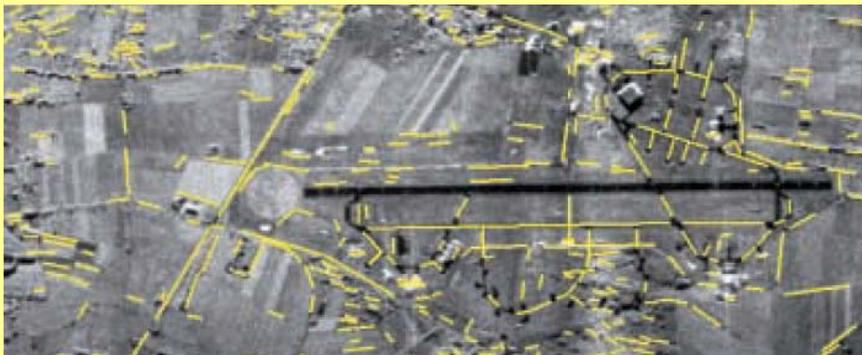
Quelle: [www.resy.informatik.uni-kl.de](http://www.resy.informatik.uni-kl.de)

**Wärme- und Radarbild:**  
Ecken

**CT- und Ultraschall-  
Datensätze:**  
Konturen



Quelle: [www.resy.informatik.uni-kl.de](http://www.resy.informatik.uni-kl.de)



Quelle: Fraunhofer IOSB, Karlsruhe, Dr. Krüger

**Luftbild (SAR) und Karte:**  
Liniensegmente

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung

### Formalisierung der Problemstellung:

$M(R, j)$   $j$ -tes Merkmal in der Referenz  $R$ ,

$M(T, j)$   $j$ -tes Merkmal im Template  $T$

mit  $j = 1, \dots, m$ ,  $m \in \mathbb{N}$ ,  $m$  : Anzahl der Merkmale

Distanzfunktion  $d_M(\mathbf{F}) = \sum_{j=1}^m \|\mathbf{M}(R, j) - \mathbf{F}(\mathbf{M}(T, j))\|_{\mathbb{R}^q}^2$

**Aufgabe:** Finde eine Funktion  $\mathbf{F} : \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^q$ , so dass

$d_M(\mathbf{F}) \rightarrow \text{Minimum}$

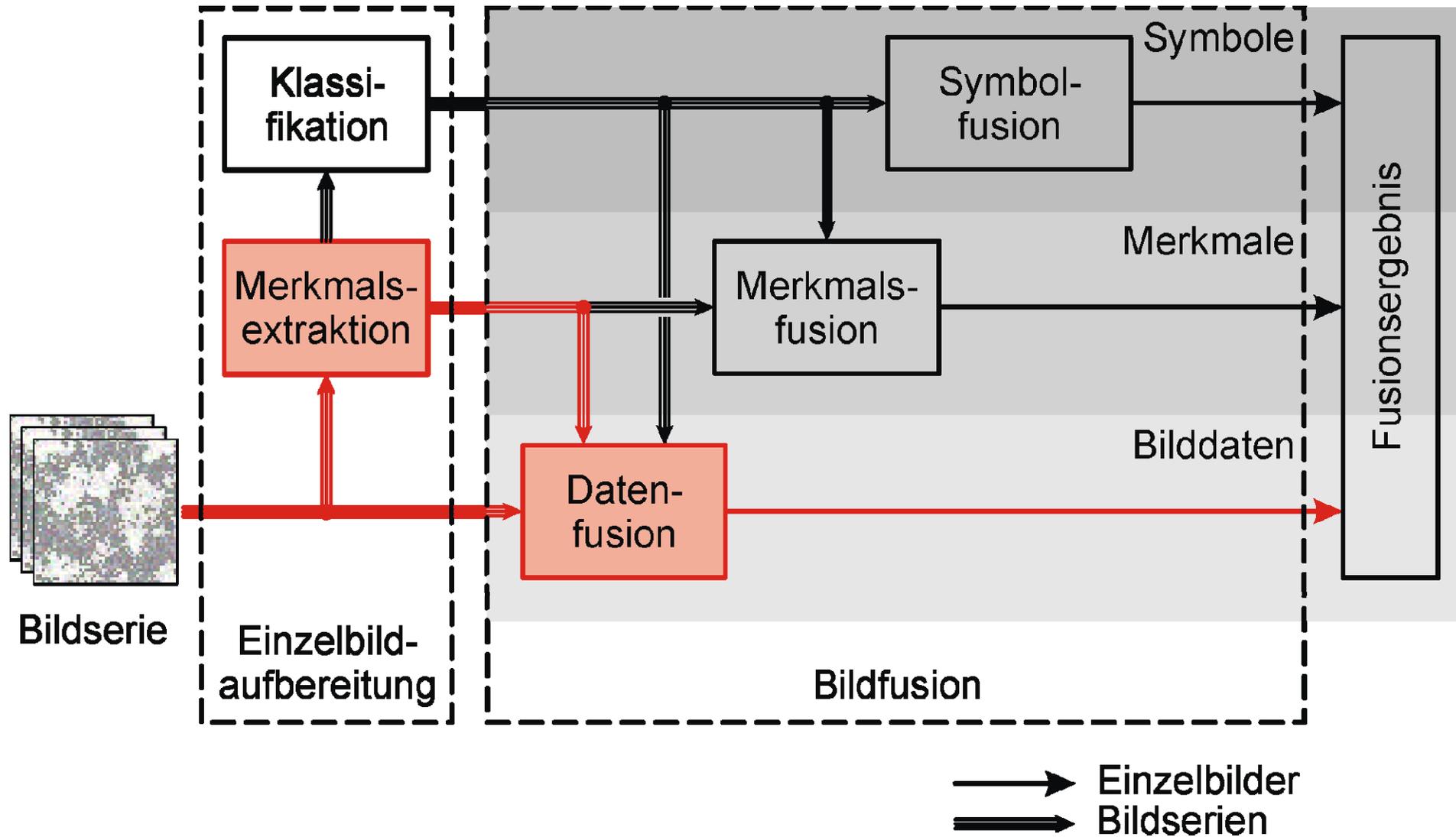
Merkmale entsprechen **Positionsangaben im Raum:**

$$\mathbf{M}(R, j) := \mathbf{x}^{R,j}, \quad \mathbf{M}(T, j) := \mathbf{x}^{T,j}, \quad j = 1, \dots, m, \quad m \in \mathbb{N}$$

$$\Rightarrow d_M(\mathbf{F}) = \sum_{j=1}^m \|\mathbf{M}(R, j) - \mathbf{F}(\mathbf{M}(T, j))\|_{\mathbb{R}^q}^2 = \sum_{j=1}^m \|\mathbf{x}^{R,j} - \mathbf{F}(\mathbf{x}^{T,j})\|_{\mathbb{R}^q}^2$$

# 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung

## Einordnung nach Abstraktionsgrad



## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung – Beispiel



Quelle: Fraunhofer IOSB, Karlsruhe, Dr. Krüger

SAR-Bild



Satellitenbild  
(visuelles Spektrum)

- **Kalibrierte Kameras:** Intrinsische Parameter bekannt (Maßstabsfaktoren, Lage der optischen Achse, Brennweite, geom. Verzerrungen)
- Schätzung der **extrinsischen Kameraparameter** (Lage und Orientierung im Raum) mittels GPS, Inertialnavigation  
→ Initiale Schätzung für merkmalsgestützte Registrierung

Quelle: W. Krüger: Robust and efficient map-to-image registration with line segment. Machine Vision and Application 13, pp. 38-50, 2001.

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung – Beispiel

- Karten: Menge von  $M$  Liniensegmenten im Template:  $L = \{l_1, \dots, l_M\}$   
Menge von  $D$  Liniensegmenten in der Referenz:  $L' = \{l'_1, \dots, l'_D\}$



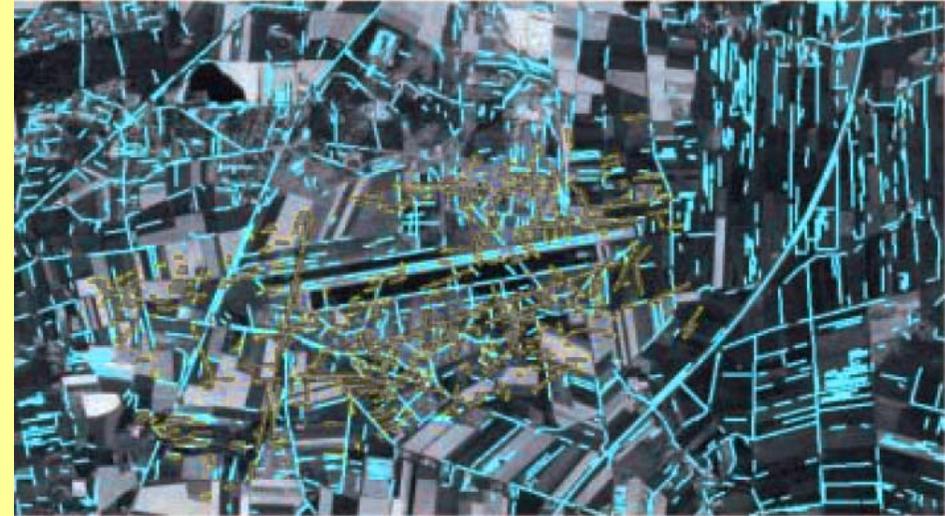
- Registrierung: Möglichst gute Abbildung von  $L$  auf  $L'$  durch projektive Transformation
- Projektive Abbildung erhält Kollinearität von Liniensegmenten

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung – Beispiel

**Ergebnisse:**     ■ Registrierung von SAR- und Satellitenbild



SAR-Bild mit Liniensegmenten



Satellitenbild mit Liniensegmenten



Satellitenbild mit ausgerichteten  
Liniensegmenten des SAR-Bildes



Ausgerichtete Bilder

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung – Beispiel

### Weitere Anwendungen:

- Generierung von **Bildteppichen** aus Videobildfolgen (→ Beispiele)
- **Bildstabilisierung** für komplexe Kamerabewegungen (→ Beispiele)
- Registrierung multisensorieller/multispektraler Bilder
- Detektion von Bewegungen bei bewegter Kamera

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung – Beispiel

- Generierung von **Bildteppichen** aus Videobildfolgen



Quelle: Fraunhofer IOSB, Karlsruhe

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung – Beispiel

- Generierung von **Bildteppichen** aus Videobildfolgen



Quelle: Fraunhofer IOSB, Karlsruhe

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung – Beispiel

- **Bildstabilisierung** für komplexe Kamerabewegungen



Quelle: Fraunhofer IOSB, Karlsruhe

## 6.3 Merkmalsbasierte Registrierung – Beispiel

- **Bildstabilisierung** für komplexe Kamerabewegungen



Quelle: Fraunhofer IOSB, Karlsruhe

- Blum, Rick S.; Liu, Zheng (Hrsg.): *Multi Sensor Image Fusion and Its Applications*. Taylor & Francis, 2006.
- Brendel, B.; Winter, S.; Rick, A.; Stockheim, M.; Ermert, H.: *Registration of 3D CT- and ultrasound-datasets of the spine using bone structures*. *Computer Aided Surgery*, 7: S. 146-155, 2002.
- Clark, James J.; Yuille, Alan L.: *Data Fusion for Sensory Information Processing Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1990.
- Hall, David L.; Llinas, James: *Handbook of Multisensor Data Fusion*. CRC Press, 2001.
- Hartley, Richard; Zisserman, Andrew: *Multiple view Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2003.
- Krüger, Wolfgang: *Robust and efficient map-to-image registration with line segments*. *Machine Vision and Applications* 13: S. 38-50, 2001.
- Modersitzki, Jan: *Numerical Methods for Image Registration*. Oxford University Press, 2004.

- Wells, W. M.; Viola, P.; Atsumi, H.; Nakajima, S.: *Multi-Modal Volume Registration by Maximization of Mutual Information*. Medical Image Analysis, 1(1) pp. 35-51, 1996.
- Winter, S.; Brendel, B.; Rick, A.; Stockheim, M.; Schmieder, K.; Ermert, H.: *Registrierung 3-dimensionaler CT- und Ultraschall-Bilddaten anhand von Knochenstrukturen*. 1. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboter assistierte Radiologie und Chirurgie (CURAC), 2002.
- Blake, A.; Zisserman, A.: *Visual Reconstruction*. MIT Press, Cambridge, USA, 1987.
- Geiger, D.; Girosi, F.: *Parallel and deterministic algorithms from MRFs: Integration and Surface Reconstruction*. MIT AI Lab Memo No. TR-1114, Juni 1989.
- Hanning, Tobias: *Vektorielle Mehrniveaupassung – Anwendungen in der Bildsegmentierung*. Dissertation, Universität Passau, 2002.