

Grauwertänderungen

Bewegungs-
detektion



-



=



Bewegung kann nur dort detektiert werden, wo sich Grauwerte verändern:

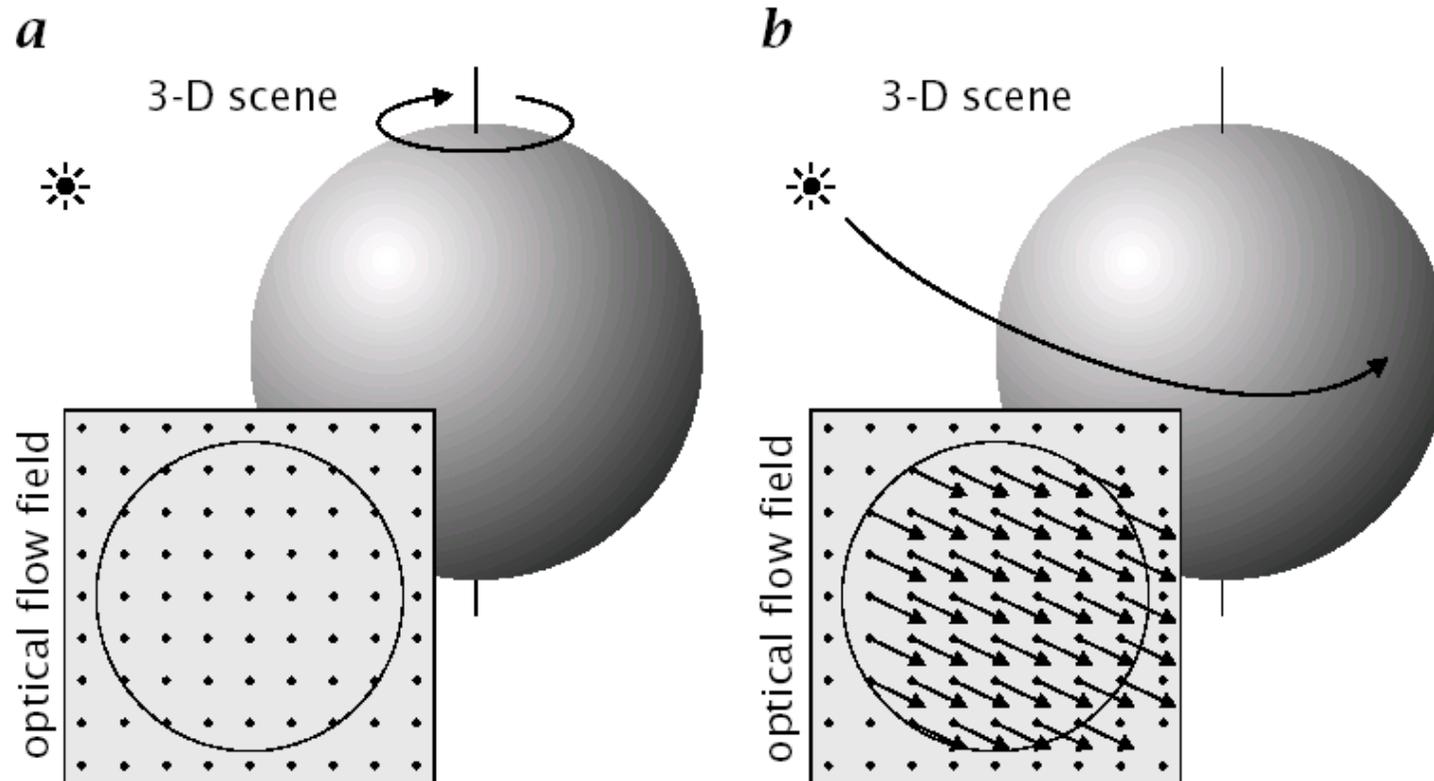
- Rauschen
- Veränderung der Beleuchtung
- Veränderung der Flächennormalen
- Verdeckungen
- Eigenbewegung der Kamera/des Auges
- Positionsveränderungen von Objekten
- Orientierungsänderungen von Objekten
- Verformung von Objekten

Bewegung

Bildverschie-
bungen

Bewegung und Grauwertänderung

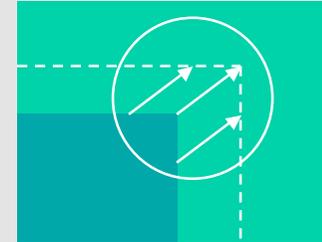
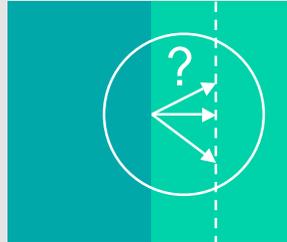
Bewegungs-
detektion



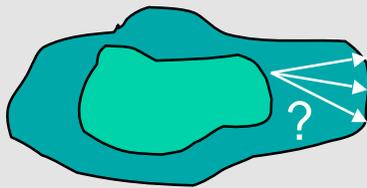
Mehrdeutigkeit der Bildverschiebung

Bewegungs-
detektion

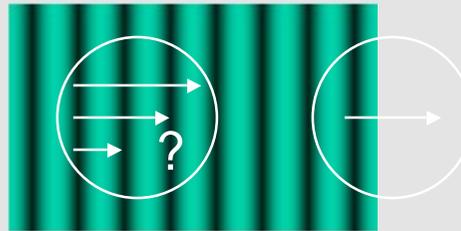
Aperturproblem:



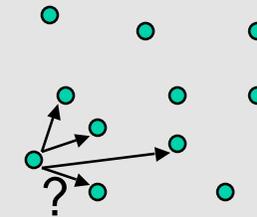
Korrespondenzproblem:



Deformierbare Fläche



Periodische Struktur

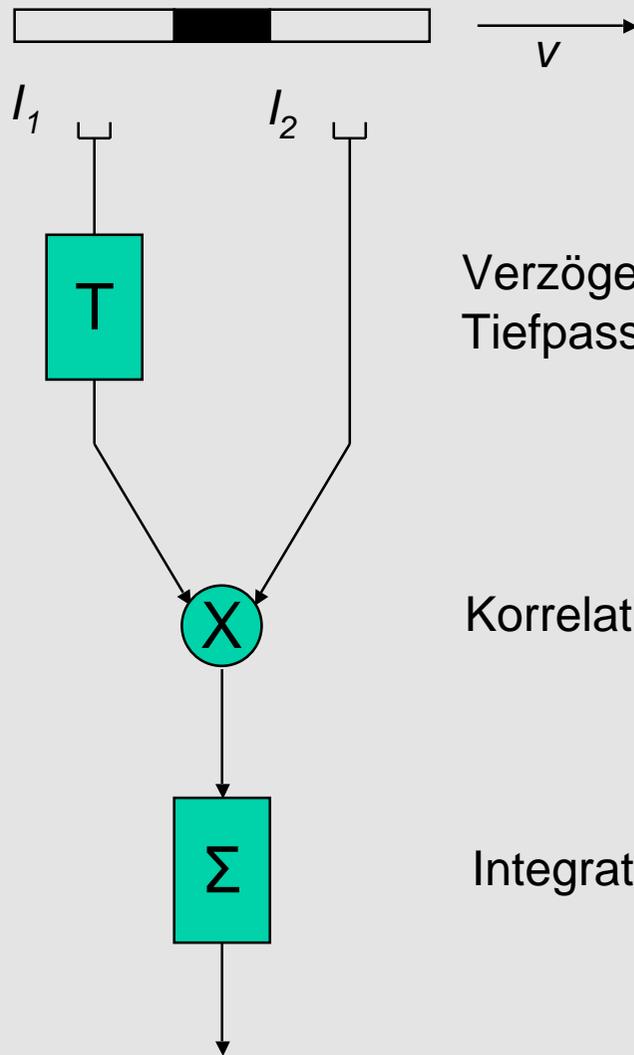


Nicht unterscheidbare
Bildmerkmale

1. Es kann visuelle ohne physikalische Korrespondenz geben
2. Trotz physikalischer Korrespondenz fehlt die visuelle.

Korrelationsdetektor

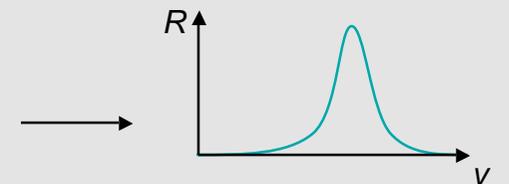
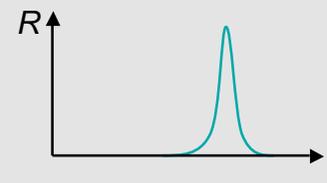
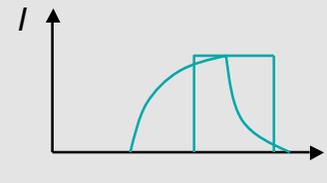
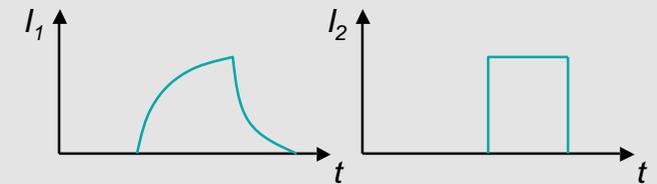
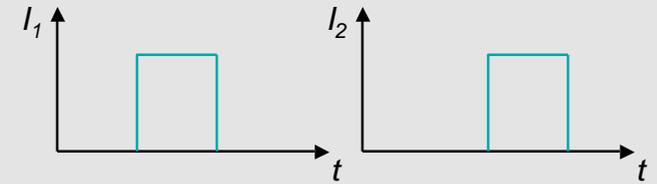
Bewegungs-
detektion



Verzögerung,
Tiefpass

Korrelation

Integration



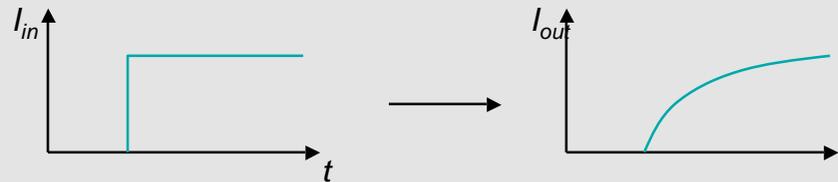
Antwortcharakteristik

Korrelation und Tiefpass

Bewegungs-
detektion

Tiefpass:

unterdrückt schnelle zeitliche Veränderungen bzw. hohe Frequenzen



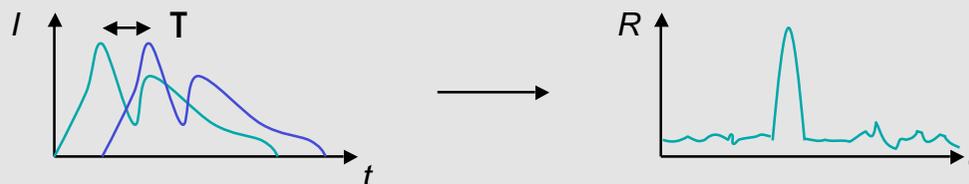
z.B. zeitdiskreter, rekursiver Tiefpass 1. Ordnung:

$$s[n+1] = a x[n] + (1 - a) s[n], \quad 0 < a < 1$$

Korrelation:

Maß für die Ähnlichkeit zweier Signale

$$R_{xy} = \int x(t) y(t) dt \quad \text{bzw.} \quad R_{xy} = \sum_i x(t_i) y(t_i)$$



Korrelationsdetektor - Eigenschaften

Gradienten-
verfahren

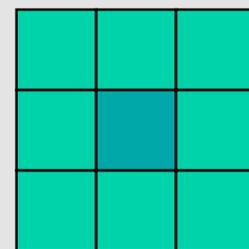
- Detektorantwort steigt monoton (nicht linear) mit der Mustergeschwindigkeit bis zu Maximalwert, sinkt dann wieder ab.
- Muster darf sich zeitlich nicht verändern, nur reine Translation erlaubt
- Detektorantwort hängt vom Musterkontrast ab (wg. Korrelation)
- misst nur die die Geschwindigkeitskomponente entlang der Vorzugsrichtung
- keine Detektorantwort für exakt entgegengesetzte Bewegung
- reagiert auch auf konstante Muster

Erweiterungen:

- Ergänzung eines zweiten Halbdetektors in entgegengesetzter Richtung und Subtraktion beider Signale (=> bidirektionale Antwort, keine Reaktion auf konstante

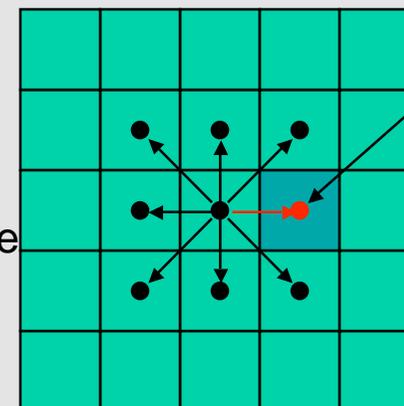
Muster)

- 2D patch correlation:
(Bülthoff et al., 1989)



Ausschnitt aus
Bild 1

→
2-D-Suche



Maximale
Korrelation
in Bild 2

Grauwerte werden analog einer strömenden Flüssigkeit behandelt => optischer Fluß

Kontinuitätsgleichung 1D (Erhaltung des Grauwertes):

$$\frac{\partial g}{\partial t} + u \frac{\partial g}{\partial x} = 0 \quad \Rightarrow \quad u = - \frac{\partial g}{\partial t} / \frac{\partial g}{\partial x}$$

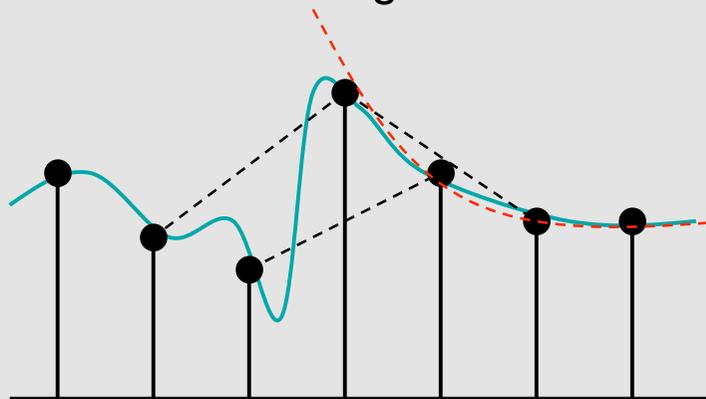
Kontinuitätsgleichung 2D: $\frac{\partial g}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla g = 0$

- Vorsicht! - Objekte ändern bei Drehung relativ zur Kamera ihre Helligkeit
- Bei divergenter Beleuchtung (Punktlichtquellen) ist die Objekthelligkeit abstandsabhängig
 - Glanzlichter bewegen sich i.A. nicht mit dem Objekt

Ableitungsoperatoren

Gradienten-
verfahren

Problem: Ableitungen können auf diskreten Gittern nur angenähert werden.



Rückwärtsgradient:

$$\frac{\partial g}{\partial x}[x] \approx g[x] - g[x-1] \Rightarrow \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Vorwärtsgradient:

$$\frac{\partial g}{\partial x}[x] \approx g[x+1] - g[x] \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Realisierung über diskrete
Filteroperation:

$$\frac{\partial g}{\partial x}[x] \approx \sum_{k=-N/2}^{N/2} D[k] * g[x-k]$$

Symmetrischer Gradient:

$$\frac{\partial g}{\partial x}[x] \approx \frac{1}{2} g[x+1] - \frac{1}{2} g[x-1] \Rightarrow \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

Symmetrische Näherung 2. Ordnung:

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{12} & \frac{2}{3} & 0 & -\frac{2}{3} & \frac{1}{12} \end{pmatrix}$$

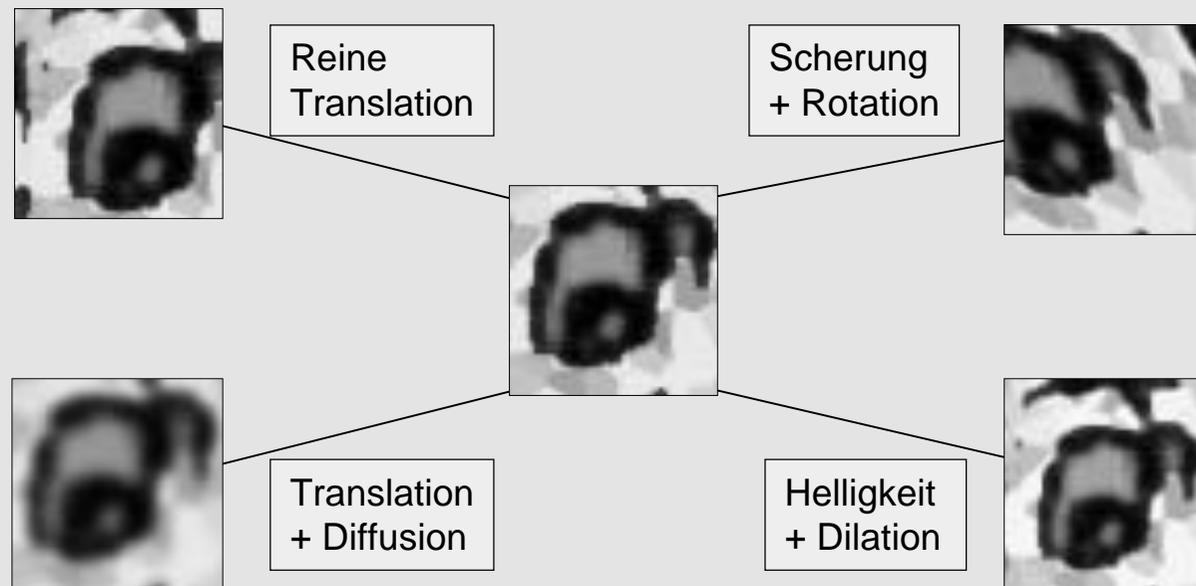
Aliasing und Bewegungsmodell

Gradienten-
verfahren

Bei zeitlich diskreten Ableitungsoperatoren entsteht bei schnellen Veränderungen sog. Aliasing



Beispiele für
Bewegungs-
modelle:



Kontinuitätsgleichung ist unterbestimmt => nur die Normalkomponente des optischen Flusses ist bestimmbar (Aperturproblem!):

$$u_{\perp} = -\frac{\partial g}{\partial t} / |\nabla g|$$

Lösung durch Ortsintegration, d.h. durch zusätzliche Annahmen über die Glattheit des Verschiebungsvektorfeldes.

Hier: Zusammenfassung mehrerer benachbarter Pixel unter der Annahme, daß sich die **Bewegung innerhalb der Nachbarschaft nicht verändert**:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial x}(1) & \frac{\partial g}{\partial y}(1) \\ \frac{\partial g}{\partial x}(2) & \frac{\partial g}{\partial y}(2) \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g}{\partial x}(N) & \frac{\partial g}{\partial y}(N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial t}(1) \\ \frac{\partial g}{\partial t}(2) \\ \vdots \\ \frac{\partial g}{\partial t}(N) \end{pmatrix}$$

(überbestimmtes lineares
Gleichungssystem)

Methode der kleinsten Quadrate

Gradienten-
verfahren

Minimierung des gewichteten quadratischen Fehlers:

$$E = \sum_i w_i \left| \frac{\partial g(i)}{\partial x} u_x + \frac{\partial g(i)}{\partial y} u_y + \frac{\partial g(i)}{\partial t} \right|^2$$

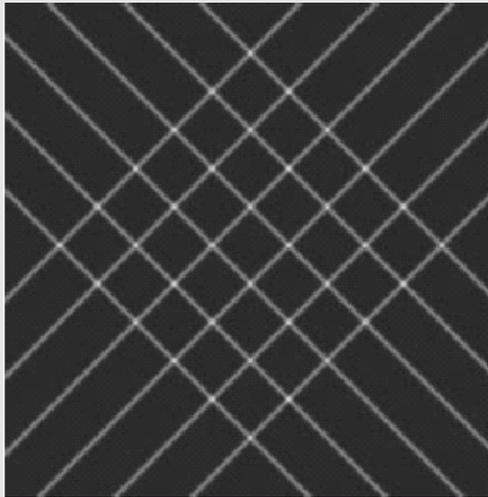
Lösung:

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = -A^{-1}b = -A^{-1} \begin{pmatrix} \sum_i w_i \frac{\partial g(i)}{\partial t} \frac{\partial g(i)}{\partial x} \\ \sum_i w_i \frac{\partial g(i)}{\partial t} \frac{\partial g(i)}{\partial y} \end{pmatrix}$$

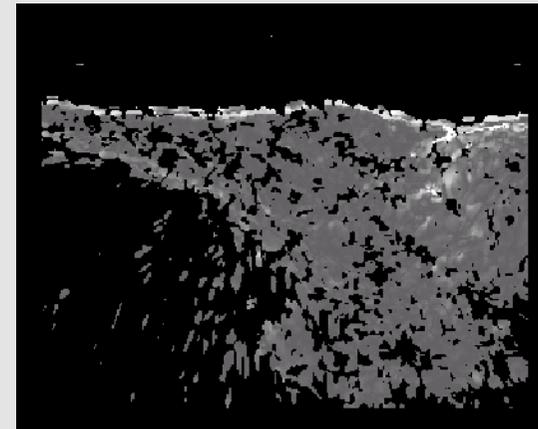
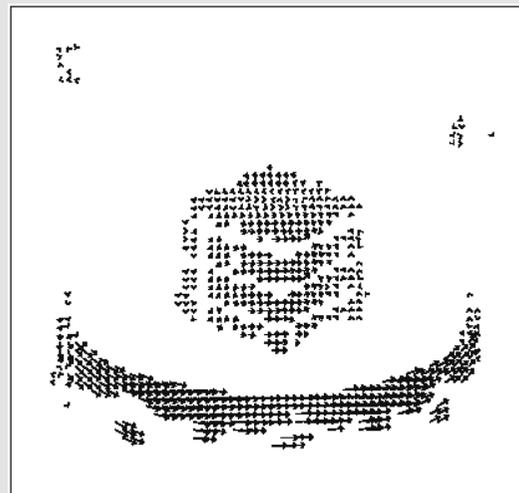
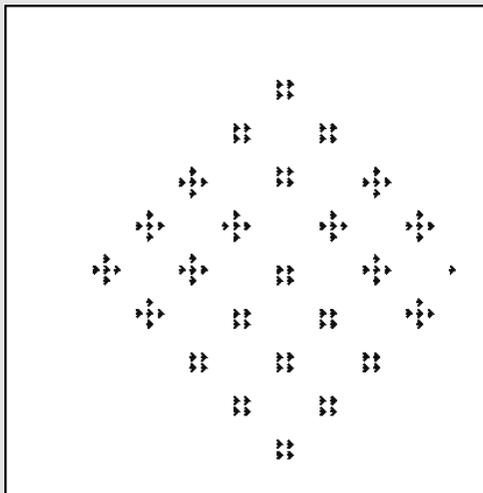
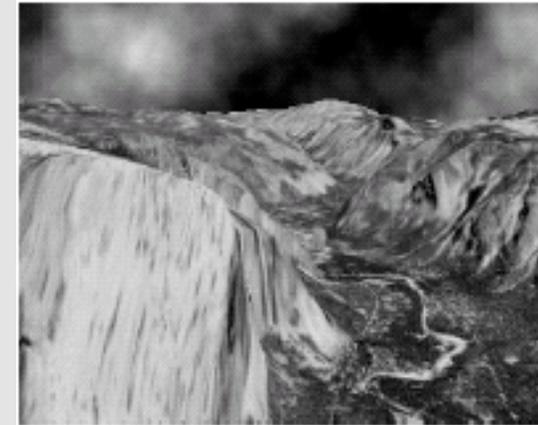
$$A = \begin{pmatrix} \sum_i w_i \left(\frac{\partial g(i)}{\partial x} \right)^2 & \sum_i w_i \frac{\partial g(i)}{\partial x} \frac{\partial g(i)}{\partial y} \\ \sum_i w_i \frac{\partial g(i)}{\partial x} \frac{\partial g(i)}{\partial y} & \sum_i w_i \left(\frac{\partial g(i)}{\partial y} \right)^2 \end{pmatrix}$$

Gradientenverfahren - Beispiele

Gradienten-
verfahren



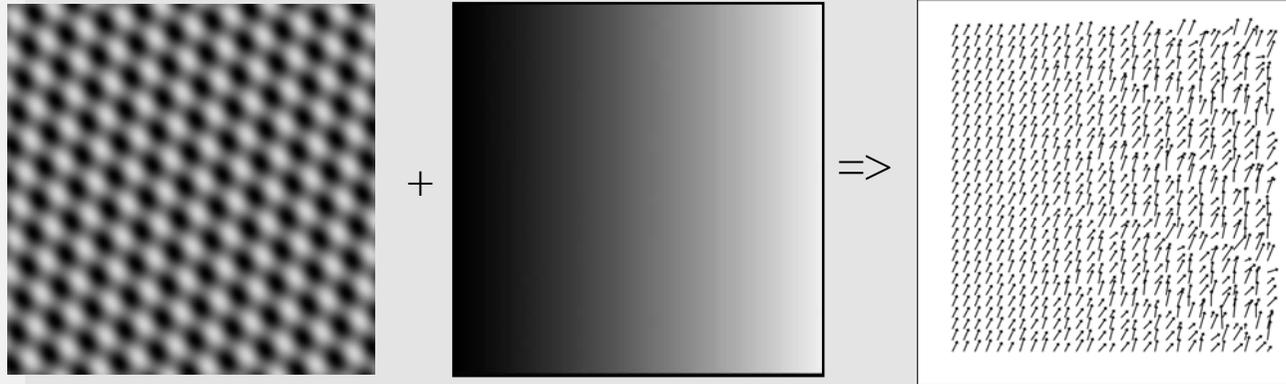
Bewegung →



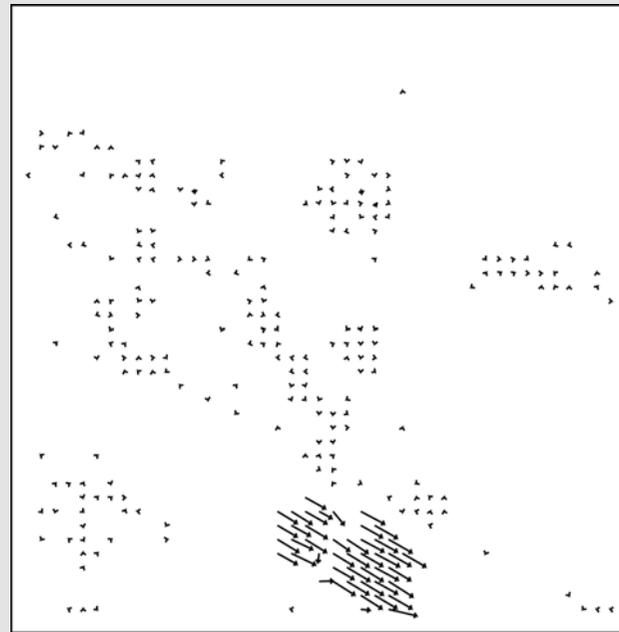
Fehlerbild

Grenzen des Translationsmodells

Gradienten-
verfahren



Beleuchtungs-
veränderungen



Verdeckungen

Hauptachsentransformation:

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i w_i \frac{\partial g(i)}{\partial x} \frac{\partial g(i)}{\partial t} / \sum_i w_i \left(\frac{\partial g(i)}{\partial x} \right)^2 \\ \sum_i w_i \frac{\partial g(i)}{\partial y} \frac{\partial g(i)}{\partial t} / \sum_i w_i \left(\frac{\partial g(i)}{\partial y} \right)^2 \end{pmatrix}$$

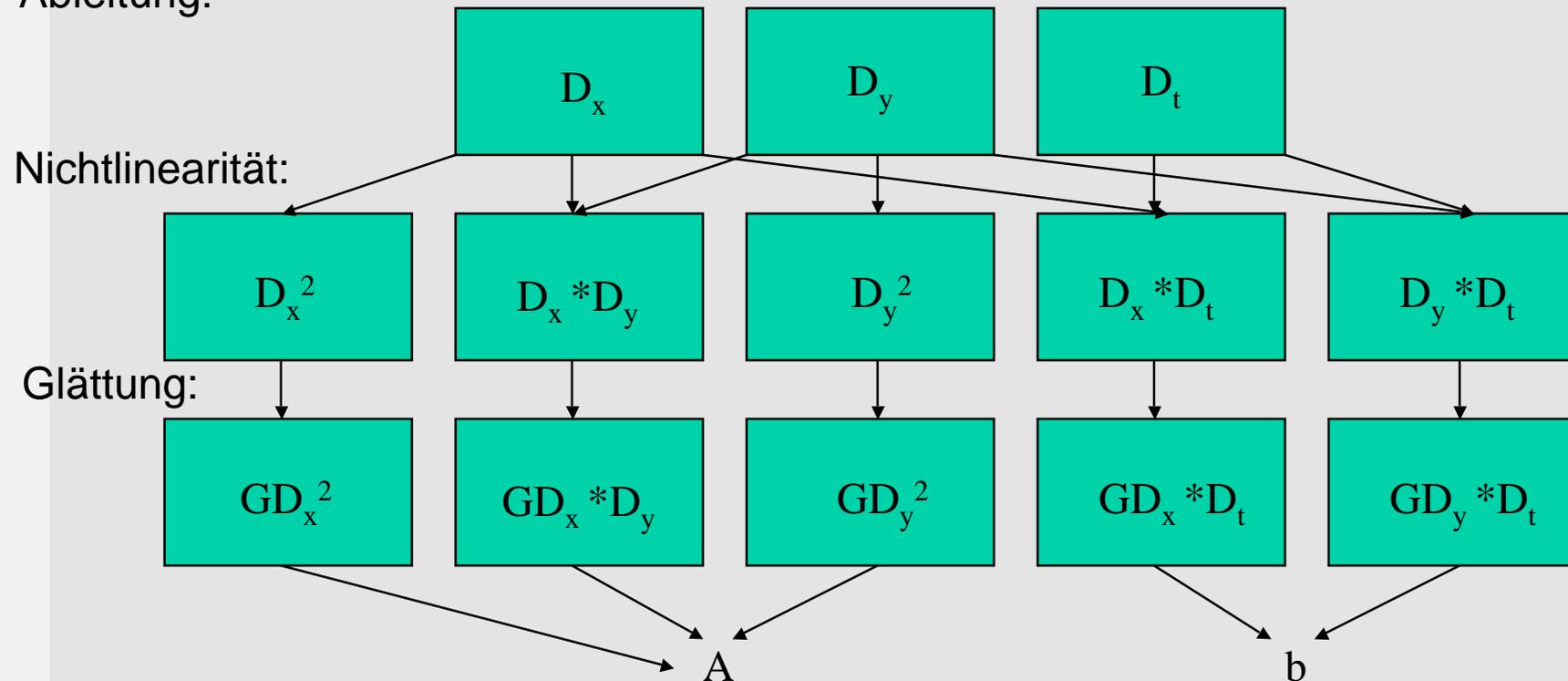
- Der Beitrag jedes Punktes im Fenster wird quadratisch mit dem Betrag der Ableitung gewichtet.
- Je steiler der Grauwertgradient, desto verlässlicher ist die Verschiebungsschätzung
- Fehler ist umso kleiner, je besser die Gradientenrichtungen verteilt sind
- Fehler ist umso kleiner, je größer das Fenster ist
- Fehler ist umso kleiner, je geringer das Kamerarauschen ist
- Fehler wird groß bei Bewegungsdiskontinuitäten (Verletzung der Grundannahme)
- Verschiebung ist nur bestimmbar, wenn nicht alle Ableitungen 0 sind, d.h. es darf keine konstante Grauwertfläche vorliegen
- Die Gradienten dürfen nicht alle in die gleiche Richtung zeigen (Aperturproblem)
- Allein die räumliche Struktur der Grauwerte bestimmt, ob und wie genau Verschiebungen detektiert werden können.

Umsetzung in Bildoperatoren

Gradienten-
verfahren

Räumliche Ableitung -> symmetrischer Ableitungsoperator D_x oder D_y
Zeitliche Ableitung -> Rückwärtsgradient D_t
Gewichtete Mittelung über Fenster -> Glättungsoperator G

Ableitung:



Vor Invertierung von A werden beide Eigenwerte $\lambda_1 > \lambda_2 > 0$ bestimmt:

1. $\lambda_1 > \lambda_2 > \theta$: Voller 2-D-Flussvektor aus Invertierung von A
2. $\lambda_1 > \theta > \lambda_2$: Aperturproblem \Rightarrow Bestimmung des Normalenflusses
3. $\theta > \lambda_1 > \lambda_2$: Kein Kontrast \Rightarrow Kein Flußvektor berechenbar

Konfidenzmaße:

1. Kleinster Eigenwert λ_2
2. Quadratischer Fehler der Kontinuitätsgleichung

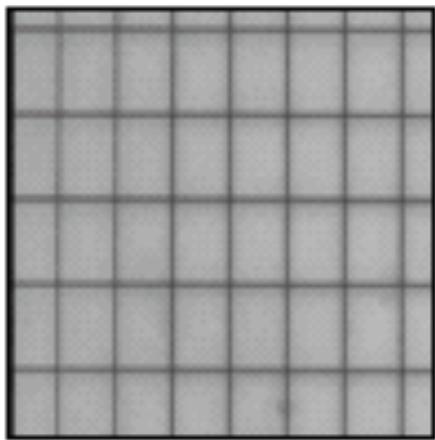
Fehlermaße:

1. Betragsquadrat des Geschwindigkeitsfehlers: $\|u - \hat{u}\|^2$

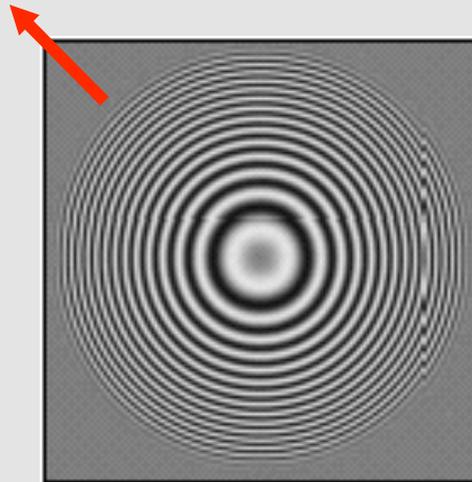
2. Fehlerwinkel:
$$\arccos \frac{1 + \hat{u}_x u_x + \hat{u}_y u_y}{\sqrt{1 + \hat{u}_x^2 + \hat{u}_y^2} \sqrt{1 + u_x^2 + u_y^2}}$$

Konfidenzmaß - Beispiele

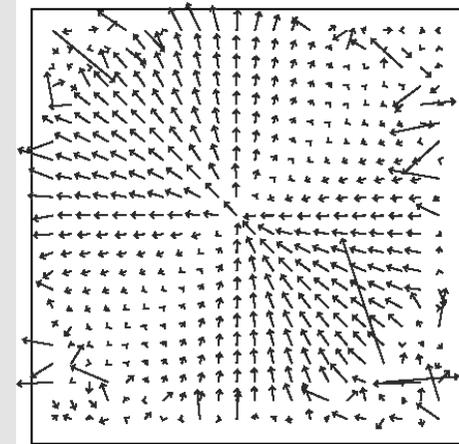
Gradienten-
verfahren



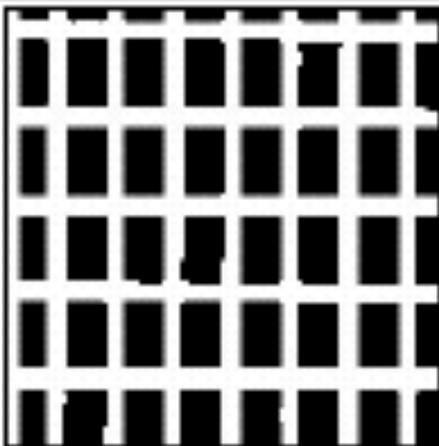
Testmuster 1



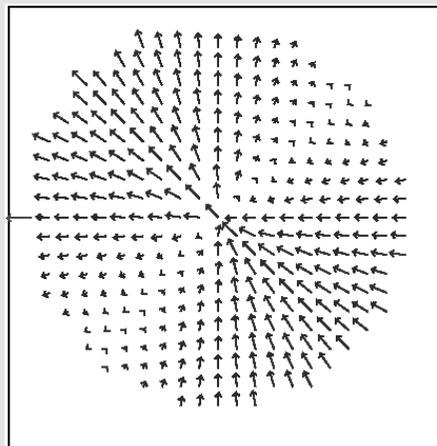
Testmuster 2



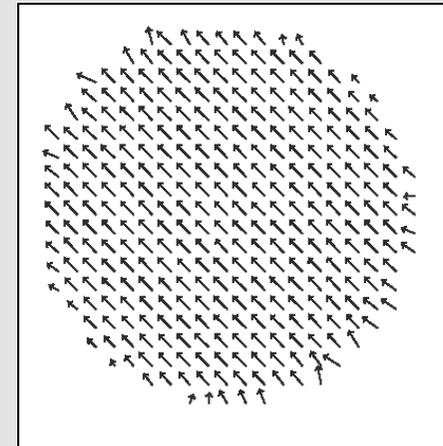
Fluß ohne Maskierung



Konfidenz



Fluß mit Maskierung



Fluß mit Aperturkorrektur

Orientierung im Orts-Zeit-Bild

Gradienten-
verfahren

Beispiel: Schwarze Fläche bewegt sich
nach rechts

Geschwindigkeit ist charakterisiert durch den
raumzeitlichen Orientierungsvektor des Musters:

$$v = \begin{pmatrix} 1 & u_x & u_y \end{pmatrix}$$

Schätzfehler in der Geschwindigkeit können
durch die Winkeldifferenz zwischen dem wahren
und dem geschätzten raumzeitlichen Orientierungs-
vektor beschrieben werden

$$Err = \arccos \frac{v \cdot \hat{v}}{\|v\| \|\hat{v}\|}$$

(relatives Fehlermaß, d.h. unabhängig vom Absolutbetrag der Geschwindigkeit)

