

6. Erkennung und Analyse von Texturen

Was ist Textur?

- *Textur charakterisiert die Oberflächenbeschaffenheit von Phänomenen und Objekten. Oberflächenbeschaffenheit kann sowohl visuell als auch taktil wahrgenommen werden*
[Wechsler 1980]
- *Textur ist aus mehr oder minder geordneten Elementen (Muster) zusammengesetzte Struktur. Keinem der Elemente kommt – für sich allein genommen – eine wesentliche Bedeutung zu.*
[Gool et al. 1985]
- *Textur ist eine flächenhafte Verteilung von Grauwerten mit zugehörigen Regelmäßigkeiten und gegenseitigen Abhängigkeiten innerhalb begrenzter Bildbereiche*
[Bähr und Vögtle 1991]
- *„Strukturen, die sich aus sich wiederholenden kleineren Mustern aufbauen, die sich wiederum aus sich wiederholenden Grauwerten in einer lokalen Nachbarschaft zusammensetzen, wobei die Grauwerte in einer solchen lokalen Nachbarschaft auch variieren dürfen, können als Textur bezeichnet werden.“*
[Hermes 1999]
- *"Die Strukturierung des Grauwerts wird allgemein als "Textur" bezeichnet. Texturen sind gerade dadurch gekennzeichnet, dass es nicht leicht ist, sie mit einem einfachen Merkmal zu charakterisieren, obwohl wir sie mit unserem visuellen System leicht erfassen und unterscheiden können."* (Jähne 1989, zit. nach Voss & Süße 1991)

Texturdefinition = Voraussetzung für quantitative Charakterisierung von Texturen und zur Textur-Segmentierung

methodische Arbeit in der Texturanalyse setzt voraus:

- großer Fundus von Texturbeispielen (z.B. Album von Brodatz 1966)

und / oder

- Syntheseverfahren für Texturen (vgl. Vorlesung Computergrafik, Kap. 13: prozedurale Texturen)

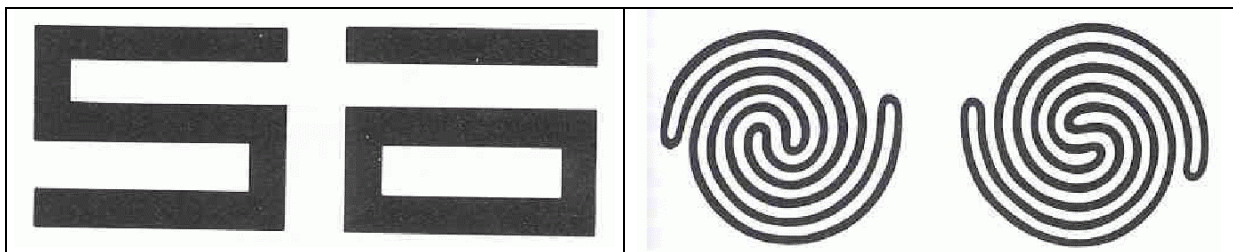
Wahrnehmung von Texturen durch den Menschen:

- Textur wird i.d.R. im Kontext wahrgenommen (Farbe oder andere Texturen)
- Meist sofortige Klassifikation
- Experimente von Gibson und Bridgeman (1987)
 - Ohne Kontext nur ca. 66% Klassifikationsrate

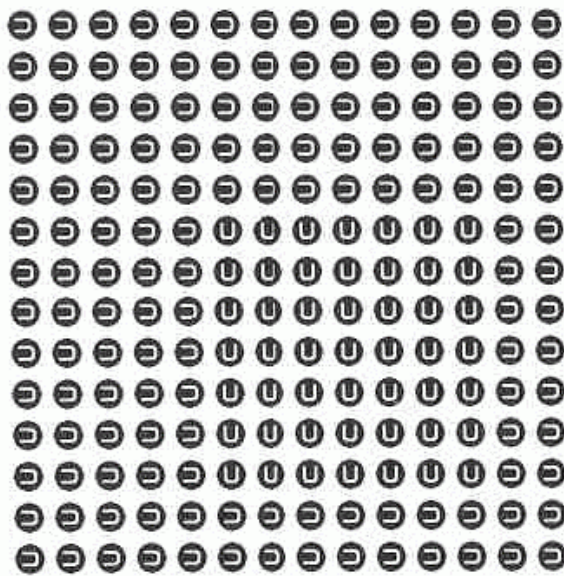
Man unterscheidet zwischen sog. präattentiver (gewissermaßen unwillkürlicher) und attentiver Wahrnehmung – letztere erfordert eine bewusste Erkennungsanstrengung.

Beispiel:

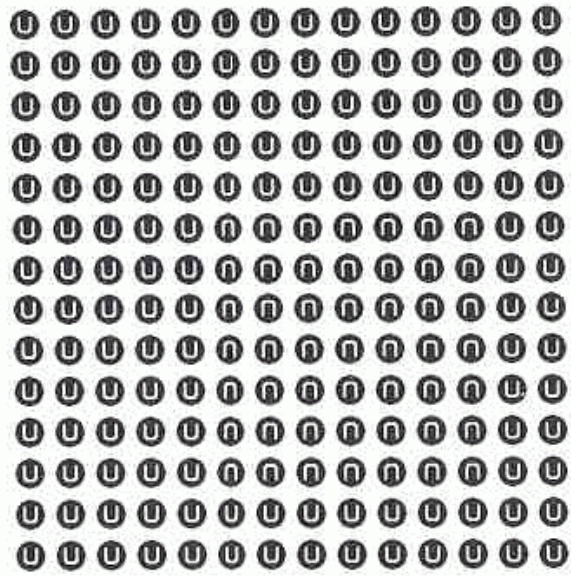
das Merkmal "Zusammenhang" wird im linken Beispiel präattentiv wahrgenommen, rechts nur attentiv



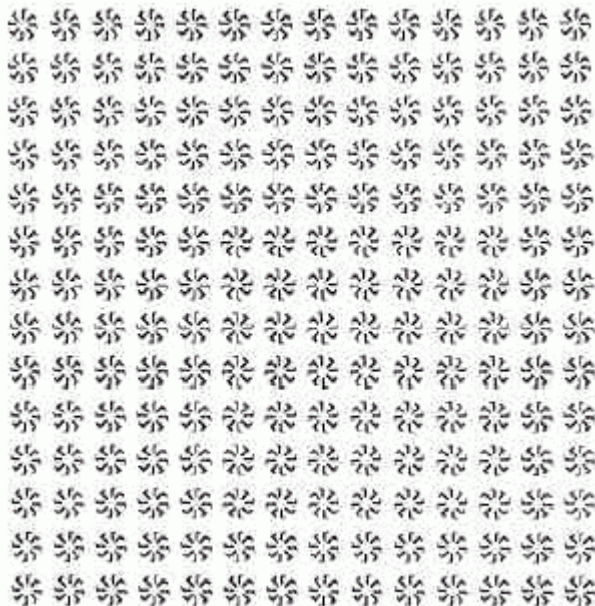
Einige Texturmerkmale und -unterschiede werden präattentiv wahrgenommen, einige nur attentiv:



präattentiv



attentiv



attentiv

(aus Hermes 2002)

einfache mathematische Merkmale (beschreibende Statistik):
 n -te Momente

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) x^p y^q dx dy$$

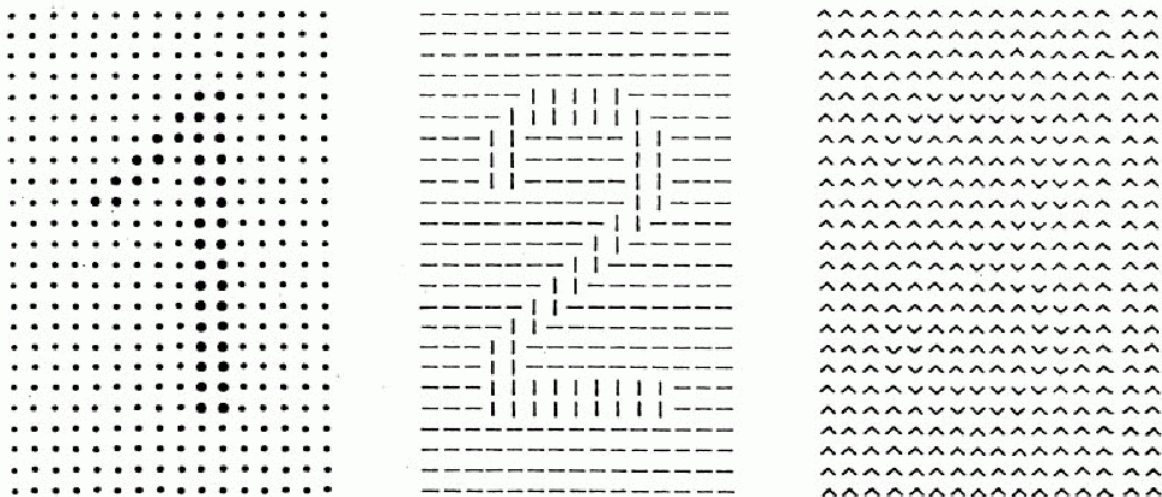
mit $p, q = 0, 1, 2, \dots$

(f Bildfunktion, kontinuierlicher Fall, $p+q = n$).

– vgl. im 1-dim. Fall: Mittelwert (erstes Moment), Varianz (enthält zweites Moment), Schiefe (enth. drittes Moment) (siehe Übung 1).

"Statistik n -ter Ordnung": Ordnung meint hier Variablenzahl.
 es werden n Variablen berücksichtigt
 – auch aus m_{02} und m_{20} (Stat. 1. Ordn.; auf lokales Fenster angewandt) lassen sich Richtungsinformationen gewinnen

Statistik 1.,2. und 3. Ordnung



(aus Liedtke 2002)

- Gleiche Statistiken n -ter Ordnung implizieren auch gleich Statistiken 1 -ter bis $(n-1)$ -ter Ordnung
- Ergebnisse der Experimente
 - Texturen mit unterschiedlichen Statistiken 2 -ter Ordnung lassen sich gut diskriminieren
 - (Globale) Statistiken 1 -ter Ordnung sind nicht geeignet, um Texturen zu diskriminieren (lokale schon!)
 - Höhere (>2) Statistiken haben keinen wesentlichen Einfluss auf Diskriminierung

Texturbeschreibung / -merkmale:

Grobe Unterscheidung in

➤ statistisch/stochastisch

- rein stochastisch
- Punkt-basierte Statistiken n-ter Ordnung
- Globale Statistiken
- Filter-basierte (lokale)

➤ strukturelle Verfahren

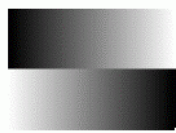
- Strukturierende Elemente (Texel)
- Aufbauregeln

einfache statistische Merkmale (vgl. Übung 1):

Grau100



Grauverlauf



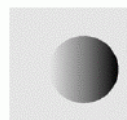
Objekte



3Kasten



Verlauf



Elch



Name	Min	Max	Mittelwert	Abweichung	Entropie	Schiefe
Grau100	100	100	100,00	0,00	0,00	0,00
Grauverlauf	0	255	126,02	5479,26	4,60	592,48
Objekte	0	255	40,80	8739,71	0,44	1515430,34
3Kasten	100	140	120,00	201,00	1,04	5,36
Verlauf	0	255	202,13	2903,40	1,72	-307702,41
Elch	0	255	155,55	2775,19	4,22	17397,20

(aus Hermes 2002)

oft auch Anwendung dieser Merkmale auf lokale Fenster F mit k Spalten und l Zeilen

Kontrast einer Textur:

verschiedene Definitionen in der Literatur

oft als Verhältnis von Varianz zu Mittelwert bzgl. Fenster F

$$K_F = \frac{\sigma_F^2(x, y)}{\bar{z}_F(x, y)}$$

$$\bar{z}_F(x, y) = \frac{1}{kl} \sum_{i=-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} \sum_{j=-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} E(x+i, y+j)$$

$$\sigma_F^2(x, y) = \frac{1}{kl-1} \sum_{i=-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} \sum_{j=-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} (E(x+i, y+j) - \bar{z}_F(x, y))^2$$

➤ Deutung:

- Keine Streuung, dann kein Kontrast
- $K_F < 1$ -> kontrastarm, $K_F > 1$ -> kontrastreich

(lokales Texturmerkmal)

Momente:

werden innerhalb einer lokalen Umgebung R berechnet (oft rechteckiges Fenster)
anschließend kann noch eine Clustering folgen

Im diskreten Fall müssen Koordinaten normiert werden auf $[-0,5; +0,5]$ mit W als Breite bzw. Höhe der Fensters (Region R)

sei (i, j) Zentrumspixel, für jeden Nachbarpunkt (k, l) ergeben sich die normalisierten Koordinaten (x_k, y_l) zu:

$$x_k = \frac{(k-i)}{2 \left\lfloor \frac{W}{2} \right\rfloor} \text{ bzw. } y_l = \frac{(l-j)}{2 \left\lfloor \frac{W}{2} \right\rfloor}$$

somit ergeben sich die Momente $m_{pq}(i, j)$ zu

$$m_{pq}(i, j) = \sum_{k=-\left\lfloor \frac{W}{2} \right\rfloor}^{+\left\lfloor \frac{W}{2} \right\rfloor} \sum_{l=-\left\lfloor \frac{W}{2} \right\rfloor}^{+\left\lfloor \frac{W}{2} \right\rfloor} f(i+k, j+l) x_k^p y_l^q$$

$$m_{pq}(i, j) = \sum_{k=-\lfloor \frac{W}{2} \rfloor}^{+\lfloor \frac{W}{2} \rfloor} \sum_{l=-\lfloor \frac{W}{2} \rfloor}^{+\lfloor \frac{W}{2} \rfloor} f(i+k, j+l) x_k^p y_l^q$$

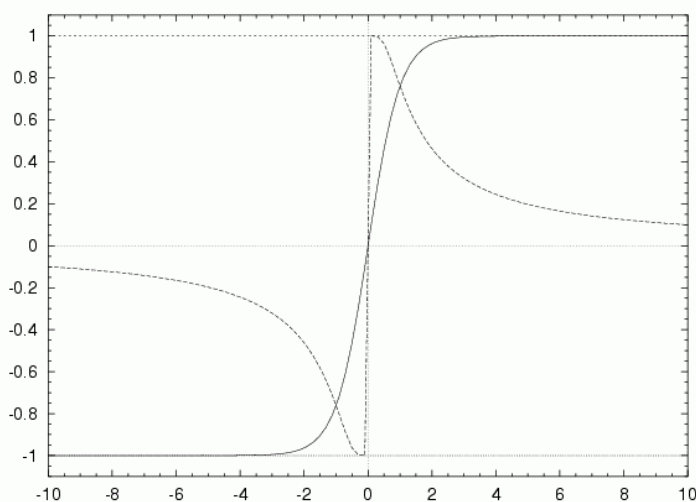
kann als Faltungsmaske interpretiert werden

- Die ersten sechs Momente werden berechnet m_{00} , m_{10} , m_{01} , m_{11} , m_{20} und m_{02}
- Zwischenergebnis sechs Merkmalsbilder M_1 bis M_6

- Tangens hyperbolicus als logistische FKT angewendet auf die Zwischenergebnisbilder
- Ein Texturmerkmal F_k bzgl. M_k ergibt sich zu

$$F_k(i, j) = \frac{1}{L^2} \sum_{(a,b) \in W_{ij}} \left| \tanh\left(\sigma\left(M_k(a,b) - \overline{M}\right)\right) \right|$$

mit \overline{M} als Mittelwert, W_{ij} als Fenster (Region R) der Größe $L \times L$ und σ als Kontrollparameter, der die hyperbolische FKT bestimmt



Graph von tanh und coth

Autoregressive Modelle für Texturen

(nach Voss & Süße 1991):

Autoregression:

- aus der Zeitreihenanalyse
- Zeitreihe = zeitl. Folge von Messergebnissen
- wird als Realisierung eines stochastischen Prozesses (X_1, X_2, \dots) betrachtet, wobei alle X_i die gleiche Verteilungsfunktion haben sollen
- autoregressives Modell N -ter Ordnung:

es gibt Zahlen b_n , so dass

$$S_i = \sum_{n=0}^N b_n X_{i-n}$$

eine Folge stochastisch unabhängiger Zufallsgrößen mit Erwartungswert 0 und gleichen Varianzen σ^2 sind.

D.h. es gibt eine Korrelation der Zufallsgrößen X_i in einem lokalen Fenster, die durch geeignete Wahl der Koeffizienten b_i modelliert werden kann.

Unter der Annahme $b_0 \neq 0$ und mit $a_n = -b_n/b_0$, $R_i = S_i/b_0$ kann man auch schreiben:

$$X_i = \sum_{n=1}^N a_n X_{i-n} + R_i \quad (*)$$

Simulation einer konkreten Realisierung:

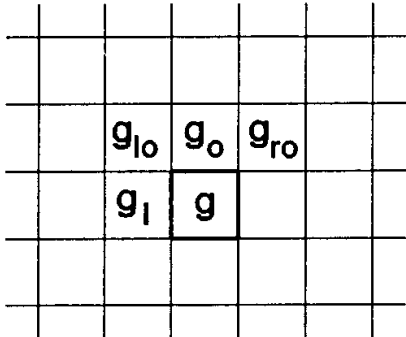
- Vorgeben eines Anfangsstücks der Zeitreihe
- weitere Realisierungen mittels der Rekursion (*) berechnen
- (Pseudo-) Zufallszahlen für R_i nehmen

Verallgemeinerung auf 2D:

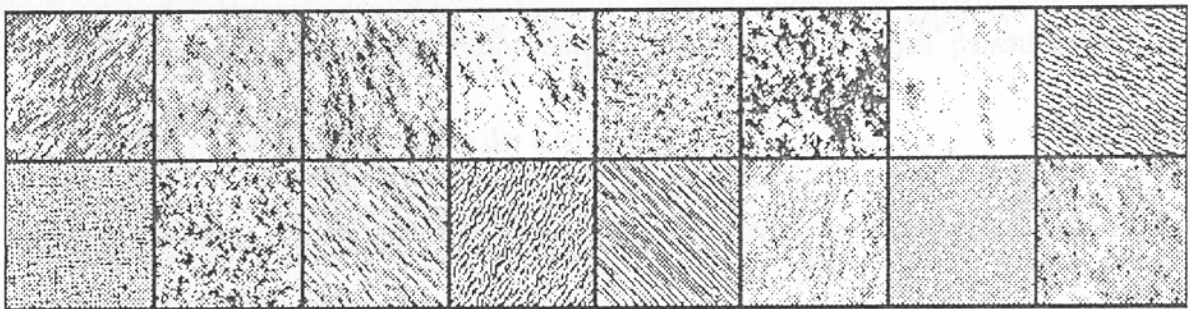
- Berechnung des aktuellen Grauwertes aus 4 Nachbar-Grauwerten
- zeilenweise Synthese des Bildes
- links und oberhalb des aktuellen Pixels befindliche Pixel werden als "vorangehend" angesehen
- Startwerte: Grauwerte der obersten Bildzeile und der linken und rechten Randspalte

Berechnung gemäß

$$g_{x,y} = a_{lo} g_{x-1,y-1} + a_o g_{x,y-1} + a_{ro} g_{x+1,y-1} + a_l g_{x-1,y} + r_{x,y}$$



Beispiele für derart erzeugte synthetische Texturen:



Umkehrung:

Berechnung der Parameter des (angenommenen) autoregressiven Modells aus der gegebenen Bildinformation

Vorgehensweise:

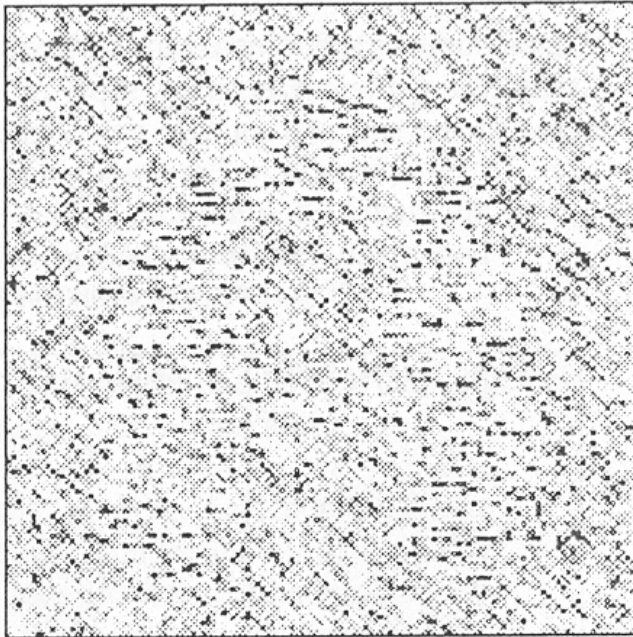
Bestimme die Parameter a_{lo} , a_o , a_{ro} , a_l so, dass die quadratische Abweichung zwischen dem Grauwert eines Pixels und seinem theoretischen Grauwert nach der Berechnungsformel minimiert wird (Extremalproblem, über partielle Ableitung zu lösen, führt auf lin. Gleichungssystem).

Nachteil des Verfahrens:

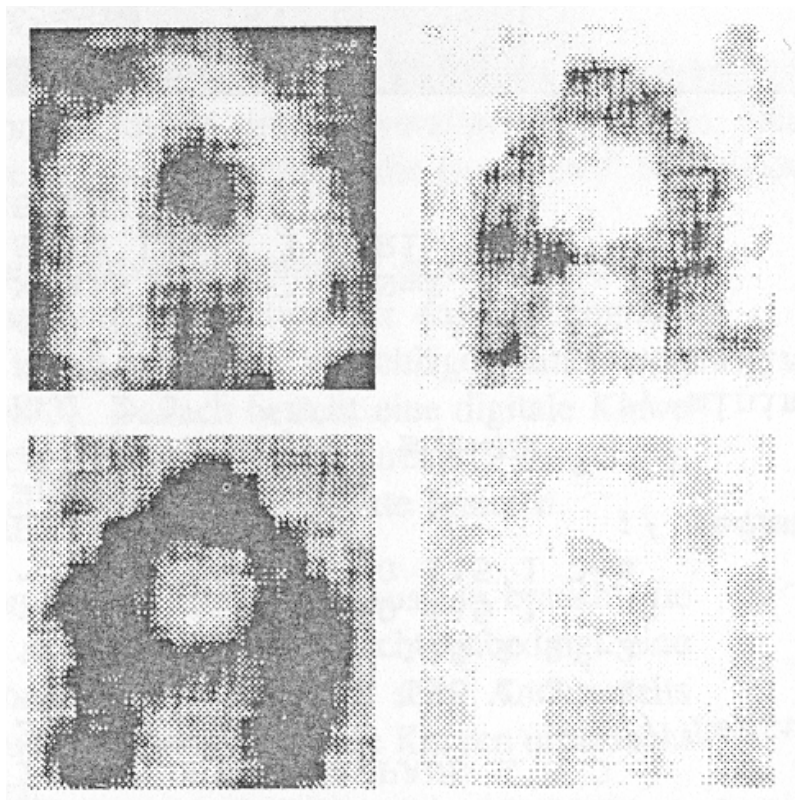
- Rechenaufwand
- Bildbereiche, aus denen Parameter bestimmt werden, müssen groß genug sein

Beispiel:

gegebenes Bild



Darstellung von Parametern aus dem autoregressiven Modell:



weitere statistische Verfahren:

Co-occurrence-Matrix (Paar-Grauwerte-Matrix)
(vgl. Übung 1)

Punkt-basierte Statistik 2. Ordnung, liefert
Richtungsinformationen verallgemeinerter Art

- Berechnung für vier Richtungen (0° , 45° , 90° und 135°)
- Bild E habe die Dimension N_x (horizontaler) und N_y (vertikal), sowie N_g Grauwerte
- Horizontale räumliche Ausdehnung $L_x = \{1, 2, \dots, N_x\}$ bzw. vertikale $L_y = \{1, 2, \dots, N_y\}$ und $G = \{1, 2, \dots, N_g\}$ ist Menge der GW

Bild als Funktion E :

$$E : L_x \times L_y \rightarrow G$$

- Annahmen
 - Texturinformation ist über gesamtes Bild verteilt und
 - Information steckt in der Beziehung zwischen benachbarten Punkten, die durch GW repräsentiert werden
- Folgerung
 - Information kann adäquat durch eine (oder mehrere) Matrizen spezifiziert werden
 - In den Matrizen ist das relative Vorkommen P_{ij} eingetragen

- P_{ij} bedeutet:
 - benachbarte Punkte mit Abstand d und
 - ein Punkt weist GW i und der andere Punkt weist GW j auf
- *Solche Matrizen sind FKTn, die unter Berücksichtigung eines Winkels ($0^\circ, \dots, 135^\circ$) die räumlich Beziehung zwischen benachbarten Bildpunkten mit Abstand d repräsentieren*
- 2D-Histogramm

Definitionen der Matrix-Einträge:

$$P(i, j, d, 0^\circ) = \# \left\{ \left\{ (k, l), (m, n) \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) \right\} \right. \\ \left. k - m = 0, |l - n| = d, E(k, l) = i, E(m, n) = j \right\}$$

$$P(i, j, d, 45^\circ) = \# \left\{ \left\{ (k, l), (m, n) \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) \right\} \right. \\ \left. (k - m = d, l - n = -d) \text{ oder} \right. \\ \left. (k - m = -d, l - n = d), \right. \\ \left. E(k, l) = i, E(m, n) = j \right\}$$

$$P(i, j, d, 90^\circ) = \# \left\{ \left\{ (k, l), (m, n) \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) \right\} \right. \\ \left. |k - m| = d, l - n = 0, E(k, l) = i, E(m, n) = j \right\}$$

$$P(i, j, d, 135^\circ) = \# \left\{ \left\{ (k, l), (m, n) \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) \right\} \right. \\ \left. (k - m = d, l - n = d) \text{ oder} \right. \\ \left. (k - m = -d, l - n = -d), \right. \\ \left. E(k, l) = i, E(m, n) = j \right\}$$

Normierung (für $d = 1$) durch:

$2N_y(N_x - 1)$ (für 0° und 90°) sowie $2(N_y - 1)(N_x - 1)$ (für 45° und 135°)

➤ Merkmale (Auswahl): Entropie

ASM(Energie) $f_3 = -\sum_i \sum_j p(i, j) \log(p(i, j))$

$$f_1 = \sum_i \sum_j \{p(i, j)\}^2$$

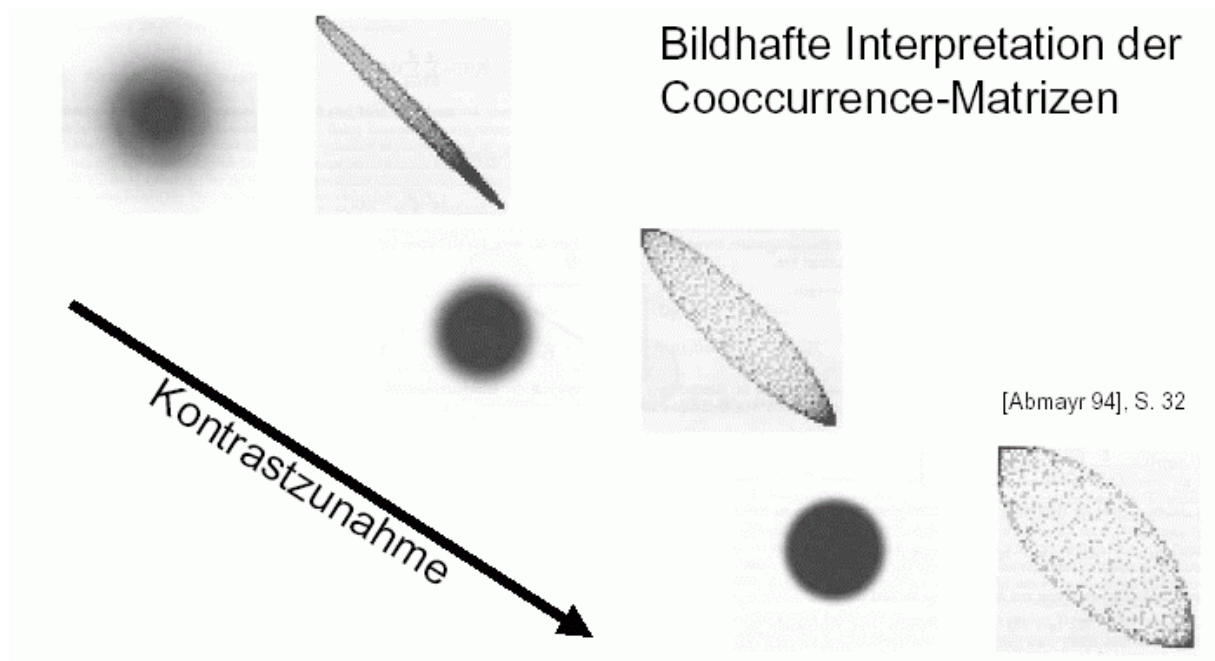
Korrelation

Kontrast $f_4 = \frac{1}{\sigma_m \sigma_n} \left(\sum_i \sum_j ij p(i, j) - \mu_m \mu_n \right)$

$$f_2 = \sum_i \sum_j (i - j)^2 p(i, j)$$

$\mu_m, \mu_n, \sigma_m, \sigma_n$ Mittelwerte und Standardabweichung von p_m und p_n

$$p_m(i) = \sum_j p(i, j) \text{ bzw. } p_n(j) = \sum_i p(i, j)$$



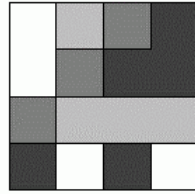
Grauwert-Lauflängen-Matrizen:

Punkt-basierte Statistik n-ter Ordnung (i.d.R. Grauwertlauflängen)

- beschreibt die Anzahl der Bildpunkte, die bzgl. einer Richtung θ k Nachbarpunkte (mit GW G) aufweisen
- N_g Anzahl der GW, N_r Anzahl der unterschiedlichen Lauflängen
- α Richtung, in der der Lauf betrachtet wird
- Ein Run-Length-Matrix $M_{glrl}(\alpha)$ hat die Dimension $N_g \times N_r$
- $p(i,j)$ ist die Anzahl der GW-Läufe mit GW i und Länge j

Spalte der Matrix: entspr. Länge des Laufes
 Zeile: entspricht jeweils einem Grauwert

0	1	2	3
0	2	3	3
2	1	1	1
3	0	3	0



$$M_{grt}(0^\circ) = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{grt}(45^\circ) = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{grt}(90^\circ) = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{grt}(135^\circ) = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

aus diesen Matrizen abgeleitete Merkmale:

short run emphasis

$$RF_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} \frac{p(i,j)}{j^2}}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i,j)}$$

long run emphasis

$$RF_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i,j) j^2}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i,j)}$$

gray level nonuniformity

$$RF_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \left(\sum_{j=1}^{N_r} p(i,j) \right)^2}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i,j)}$$

run length nonuniformity

$$RF_4 = \frac{\sum_{j=1}^{N_r} \left(\sum_{i=1}^{N_g} p(i,j) \right)^2}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i,j)}$$

run percentage

$$RF_5 = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i,j)}{P}$$

weitere statistische Verfahren der Texturanalyse:

- Filter-basierte Verfahren
 - Faltungsmasken in verschiedenen Formen
 - Berechnung von Texturenergie
 - Definition von 1D-Faltungsmasken für
 - Levels – L (3x3 und 5x5)
 - Edges – E (3x3 und 5x5)
 - Spots – S (3x3 und 5x5)
 - Waves – W (5x5)
 - Ripple – R (5x5)
- $L3 = \begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \end{matrix}$
- $E3 = \begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \end{matrix}$
- $S3 = \begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \end{matrix}$

Kombinationen für 3x3 Faltungsmasken:

1	2	1
2	4	2
1	2	1

L3L3

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

L3E3

-1	2	-1
-2	4	-2
-1	2	-1

L3S3

-1	2	-1
0	0	0
1	2	1

E3L3

1	0	-1
0	0	0
-1	0	1

E3E3

1	-2	-1
0	0	0
-1	2	-1

E3S3

-1	-2	-1
2	4	2
-1	-2	-1

S3L3

-1	0	-1
-2	0	-2
-1	0	-1

S3E3

1	-2	1
-2	4	-2
1	-2	1

S3S3

➤ Kombinationen für 5x5 Faltungsmasken:

- $L5 = \begin{matrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{matrix}$
- $E5 = \begin{matrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{matrix}$
- $S5 = \begin{matrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{matrix}$
- $W5 = \begin{matrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{matrix}$
- $R5 = \begin{matrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{matrix}$

-1	-2	0	2	1
-4	-8	0	8	4
-6	-12	0	12	6
-4	-8	0	8	4
-1	-2	0	2	1

L5E5

-1	0	2	0	-1
-2	0	4	0	-2
0	0	0	0	0
2	0	-4	0	2
1	0	-2	0	1

E5S5

-1	0	2	0	-1
-4	0	8	0	-4
-6	0	12	0	-6
-4	0	8	0	-4
-1	0	2	0	-1

L5S5

1	-4	6	-4	1
-4	16	-24	16	-4
6	-24	36	-24	6
-4	16	-24	16	-4
1	-4	6	-4	1

R5R5

- Jede Faltung ergibt Zwischenbild Z_n
- Für 3x3-Masken ergeben sich neun Zwischenbilder
- Energie berechnet sich zu

$$E(x, y) = \sqrt{(Z_1(x, y))^2 + (Z_2(x, y))^2 + \dots + (Z_9(x, y))^2}$$

- Zur Segmentierung besser geeignet als Statistiken 2-ter Ordnung

Texturmerkmal Gerichtetheit

ausgehend von Gradientenbestimmung (siehe lokale Bildoperationen):

Richtungshistogramm

Kantenrichtung:

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta v / \Delta h) + \frac{\pi}{2}$$

➤ k= Anzahl der zu unterscheidenden Richtungen/Winkel

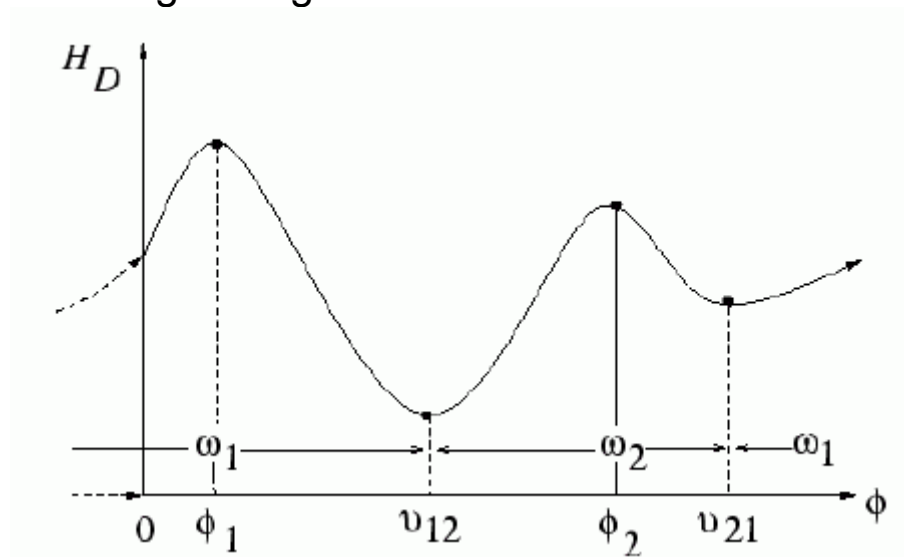
Absolutes Histogramm $N_{\theta}(k)$ entspr. Anzahl der Punkte, f, r die gilt :

$$(2k-1)\frac{\pi}{2n} \leq \theta \leq (2k+1)\frac{\pi}{2n} \quad \text{und} \quad |\Delta G > th|$$

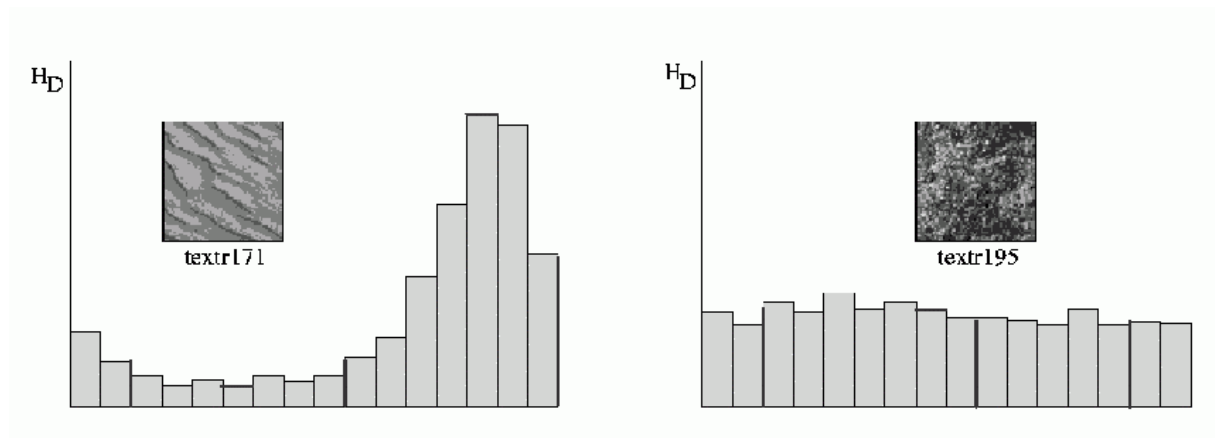
Normiertes Histogramm

$$H_D(k) = \frac{N_{\theta}(k)}{\sum_{i=0}^{n-1} N_{\theta}(i)}, \quad \text{mit} \quad k = 0, 1, \dots, n-1$$

Richtungshistogramm



Beispiel:



Deutung des Richtungshistogramms:

- flaches Histogramm entspricht ungerichteten Texturen
- ein lokales Maximum: gerichtete Textur, Grad der Gerichtetheit ergibt sich aus der Schärfe der Spitze im Histogramm
- multimodales Histogramm (mehrere Spitzen): keine einheitliche, vorherrschende Richtung

Quantifizierung der Gerichtetheit mit Kenngrößen des Richtungshistogramms möglich (s. Hermes 2002).

Strukturelle Verfahren:

- Beschreibung von Texturen durch
 - sog. Texel (texture elements) und
 - Aufbauregeln
- Besonders geeignet, um deterministische Texturen zu beschreiben
- Unterteilung in
 - Verfahren zur Texel-Extraktion
 - Verfahren, die Texturen aus Texel bestimmen
 - Verfahren, die sowohl Texel-Extraktion als auch Bestimmung von Aufbauregeln behandeln

Texel-Extraktion:

- kantenbasiert
Texel lassen sich durch signifikante (Teil-) Konturen bestimmen (vgl. Kontursegmentierung)
- bereichsbasiert
Texel als Areal homogener Grauwerte

Beisp.: oben besser kantenbasiert, unten besser bereichsbasiert

