

Digitale Bildverarbeitung

Einheit 2

Visuelle Wahrnehmung des Menschen

Lehrauftrag WS 06/07

Fachbereich M+I der FH-Offenburg



Dr. Bernard Haasdonk

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Ziele der Einheit

- Das **Menschliche Auge** als Beispiel für ein Kamerasystem
 - Anatomie und Physiologie des Auges
- Der **Mensch** als Beispiel für ein **BV-System**
- **Visuelle Phänomene**
 - erlauben einen Einblick in den Prozess der Menschlichen BV
- Die **enorme Leistungsfähigkeit** des menschlichen Sehsystems
 - verdeutlicht die Schwierigkeit und die Anforderungen an maschineller BV
 - gibt aber auch Anregungen für neue Entwicklungen

Beispiele zur Bildwahrnehmung



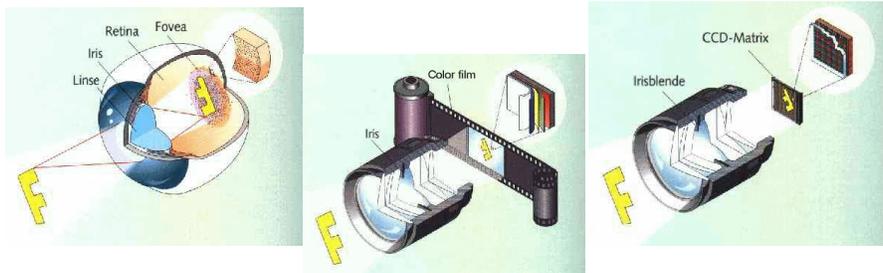
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

3

Das Auge als Kamera

- Das **Linsen-Auge** und **moderne Bildaufnahmetechniken** haben erstaunliche Parallelen:



- Gründe für „gemeinsames, funktionell ähnliches Ergebnis“:
 - **Verständnis** und Anwendung der **geometrischen Optik** erlaubt Konstruktion effektiver Abbildungssysteme
 - Das menschliche Auge hat sich durch die **Evolution** ideal an die optischen Gesetze der physikalischen Welt angepasst
 - Menschliche Konstruktionen beruhen oft auf „**Nachahmen**“ der Natur

6.11.2006

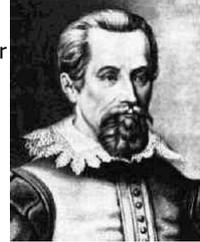
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

4

Das Auge als Kamera

■ Johannes Kepler (1571 - 1630)

- Deutscher **Mathematiker, Astronom, Astrologe** („letzter wissenschaftlicher Astrologe“, „erster Astrophysiker“)
- Bekannteste Leistung: die „**3 Kepler'sche Gesetze**“ der Planetenbewegung
- Erster Vergleich des Auges mit Kamera
 - „*Paralipomena in Vitellionem*“ 1604:
 - ***Visionem fieri dico, cum totius hemisphaerii mundani, quod est ante oculum, et amplius paulo, idolum statuitur ad album subrufum retinae causae superficiei parietem.*** Ich sage, daß beim Sehen die gesamte Hemisphäre der Welt, die vor dem Auge liegt, und etwas mehr, auf der weißen Wand, die mit etwas Rot durchsetzt ist, der konkaven Oberfläche der Retina abgebildet wird
 - Feststellung, dass das **Bild kopfüber** steht
 - Vergleich des Auges mit der **Camera obscura**, (Lochkamera ohne Linsensystem)
 - Auge ist komplizierter: **Pupille ist viel zu groß** für scharfe Abbildung
 - Daher resultiert Abbildung auf der Retina durch Zusammenwirken von Hornhaut, Kammerwasser, Linse und den Glaskörper.
 - Konzept einer modernen Kamera mit Objektiv!
 - Kepler selbst macht keine Experimente diesbezüglich



6.11.2006

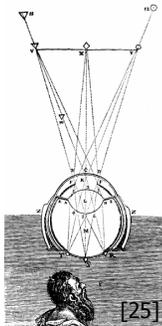
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

5

Das Auge als Kamera

■ René Descartes (Cartesius, 1596 - 1650)

- Französischer **Philosoph, Mathematiker, Händler** („Gründer der modernen Philosophie“, „Vater der modernen Mathematik“)
- Hauptwerk „**La Géométrie**“: Verbindung von Algebra und Geometrie, „**Kartesisches Koordinatensystem**“
- Bekannter Ausspruch "**Cogito ergo sum**"
- Werk „**La Dioptrique**“, 1637
 - Beschreibung geometrischer Optik, optischer Geräte und des Auges
 - Experimente zum **Aufbau des Auges**
 - In einem seiner Experimente schabte Descartes die der Linse gegenüberliegende Fläche eines Ochsenauges an, so dass diese durchsichtig wurde und sah auf der Retina das **umgekehrte verkleinerte Bild** seines Objekts.



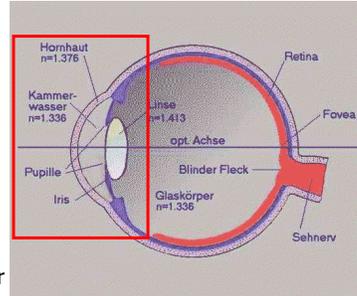
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

6

Das Physiologische Auge

- **Hornhaut:**
 - Grenzfläche zwischen Luft und Hornhaut hat **größten Beitrag zur Gesamtbrechkraft**:
 $n_{\text{Luft}} / n_{\text{Hornhaut}} = 1.00 / 1.376$.
 - Bewirkt die Abbildung eines anvisierten Objektes auf die Netzhaut
- **Pupille:**
 - Öffnung der vor der Linse liegenden **Regenbogenhaut (Iris)**
 - Entspricht der *Aperturblende* bei der Kamera.
 - Stellt sich auf ca. **2 mm bis 8 mm Durchmesser** d.h. 16-fache Veränderung der Lichtmenge!
- **Linse:**
 - Einzelne Schichten, deren Brechzahl von außen nach innen hin zunimmt.
 - Hat **nur einen Korrektoreinfluss** auf die Abbildung, da sie in Medien mit wenig abweichender Brechzahl eingebettet ist
 - Anpassung an die jeweilige Objektentfernung durch **Akkommodation**: Kontraktion des Akkomodationsmuskels => stärkere Krümmung der Linse => kürzere Brennweite
 - Einstellbare **Brennweite** zwischen 70 mm und 40 mm



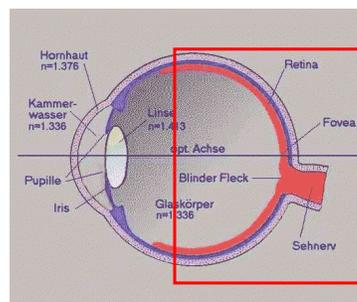
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

7

Das Physiologische Auge

- **Netzhaut, Retina:**
 - bekommt ein **umgekehrtes, reelles Bild**
 - **Rezeptorfläche** mit zwei Empfängerarten:
ca. 75-150 Millionen *Stäbchen (Helligkeit)*,
ca. 6-7 Millionen *Zapfen (Farben)*.
 - Empfängerarten sind ungleichmäßig verteilt:
Mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse nimmt die Zapfendichte ab und die Stäbchendichte zunächst zu.
- **Fovea, gelber Fleck, Netzhautgrube:**
 - Kleiner zentraler Bereich, 1° - 4° Raumwinkel
 - Hohe Konzentration von Zapfen (ca. 150.000 pro mm^2), wenige Stäbchen
 - Hohe Sehschärfe (d.h. Auflösungsvermögen von ca. 1 Bogenminute).
- **Sehnerv:**
 - Die Zapfen und Stäbchen sind mit Nervenfasern verbunden, die zum *Sehnerv* zusammengefasst sind. Er leitet die Reizempfindung an das Gehirn weiter.
 - Die Eintrittsstelle des Sehnervs in den Augapfel ist nicht lichtempfindlich und heißt deshalb *blinder Fleck*.

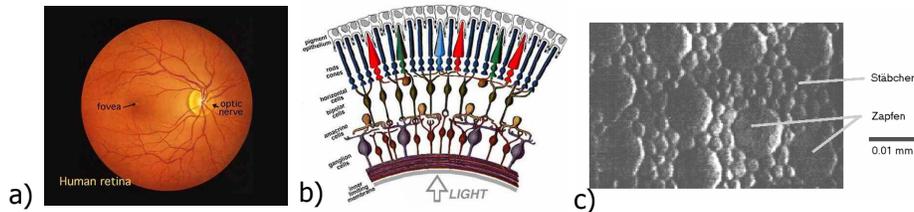


6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

8

Das Physiologische Auge



- a) Die Sauerstoffversorgung
 - geschieht über Adern, die beim Sehnerv in das Auge eintreten
 - Ebenfalls gut zu sehen ist die relativ kleine Fovea
- b) Die Zapfen und Stäbchen
 - Es gibt drei Arten von Zapfen für die Lichtkomponenten **Rot, Grün, Blau**
 - Kein direkter Kontakt zum Glaskörper, sondern davor liegen noch einige Zellschichten, die das Licht, durchdringen muss.
- c) Elektronenmikroskopisches Bild
 - durch eine mittlere Ebene der Zellschicht mit Zapfchen und Stäbchen.
 - Stäbchen liegen dicht gepackt, Dichte der Zapfen ist weitaus geringer.

6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

9

Das Physiologische Auge

- Stäbchen und Zapfen im menschlichen Auge
 - Reagieren auf Licht mit **Spannungs- und Stromänderungen**, Schwankungen bis zu 25 mV bzw. 30pA pro Sinneszelle
 - Elektrochemische Abläufe: Membranen, Änderung der Durchlässigkeit für **Kalium- und Natrium-Ionen**
- Sakkaden
 - Kleine **Zitterbewegungen** des Auges von etwa 1/20s Dauer
 - Verhindern eine Ermüdung der Sinneszellen

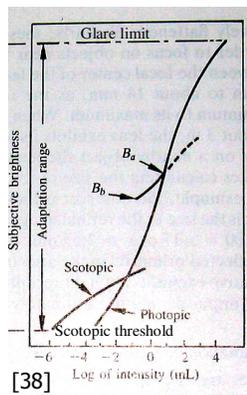
Stäbchen	Zapfen
Kein Farbsehen	Farbsehen
Große Helligkeitsempfindlichkeit	Geringe Helligkeitsempfindlichkeit
Wichtig beim Nachtsehen	Wichtig beim Tagesehen
75-150 Millionen	6-7 Millionen
2µm Durchmesser	4µm Durchmesser
Höchste Dichte bei 25°	Höchste Dichte bei 0°
Großes Gesichtsfeld mit geringer Sehschärfe	Kleines Gesichtsfeld mit hoher Sehschärfe
Ansprechzeit 300ms	Ansprechzeit 80-90ms

6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

10

Helligkeits-Wahrnehmung



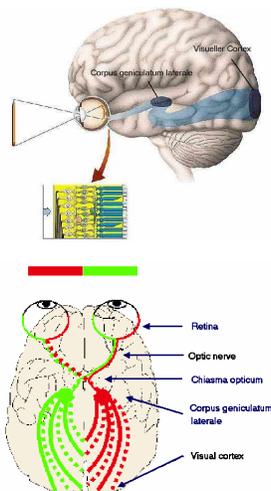
- Hoher Intensitätsbereich wird vom Auge erfasst
 - 10 Größenordnungen: 0.000001 bis 10000 mL
 - Bei niedrigen Intensitäten: Stäbchen-Sehen (scotopic)
 - Bei höheren Intensitäten: Zapfen-Sehen (photopic)
 - Nicht simultan, sondern ausschnittsweise durch Helligkeitsadaptation:
- Helligkeitsadaptation durch zwei Mechanismen
 - 1. Änderung des Pupillendurchmessers und
 - 2. Änderung der Empfindlichkeit der Sehzellen.
 - z.B. Adaption auf Punkt „Ba“ ermöglicht Helligkeitsempfinden bis Punkt „Bb“, darunter ist alles schwarz
- Subjektiv wahrgenommene Intensität
 - In etwa logarithmische Kurve der physikalischen Intensität

6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

11

Menschliche Bildverarbeitung



- Der Signalweg bis zur Wahrnehmung
 - Die **Stäbchen** und **Zäpfchen** produzieren Signale
 - Weiterleitung durch den **Sehnerv**
 - Am Kreuzungspunkt **Chiasma opticum** kommen die Informationen beider Augen zusammen
 - Ende des Sehnervs in der Relaisstation **Corpus geniculatum laterale**
 - **Weiterverteilung** an z.B. Augenmuskulatur und den **Occipitallappen** des **visuellen Cortex**
 - Von dort Ausbreitung zu Bereichen der **Hirnrinde**, wo Dinge wie Form, Farbe und Bewegung verarbeitet werden
- Die Bahnen der Sehnerven von oben.
 - Wie bei den meisten unserer Organe gibt es einen **Spiegelungseffekt**: Der rechte Halbraum wird von der Linken Gehirnhälfte verarbeitet, der linke Halbraum von der Rechten.

6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

12

Menschliche Bildverarbeitung

- Das Auge ist also ähnlich zur Kamera, aber wie ist die weitere **Verarbeitung und Speicherung**?
 - Weiterleitung und Speicherung wie in einem Fotoalbum in voller Auflösung?
- Unbewusste **Vorverarbeitung**
 - **Informationsfülle** eines Echtzeitbilderstroms ist **zu hoch** für vollständige Informationsübertragung und Speicherung im Gehirn.
 - Daher führt bereits das **Auge** eine **Reduktion** und Vorverarbeitung der Signale aus, so dass nur noch ein Bruchteil zur tatsächlichen Verarbeitung ins Gehirn weitergeleitet wird
 - Z.B. **Informationsreduktion durch Sakkaden**: Das Auge reduziert Information in homogenen Flächen
 - Nicht nur Informationsreduktion, sondern auch **Ergänzungen von Informationen im blinden Fleck**
- Probleme durch die Vorverarbeitung/Informationsreduktion:
 - Informationen im blinden Fleck sind **nicht real**
 - Z.B. Unterschiedliche oder widersprüchliche **Zeugenaussagen**
 - Wenn es darauf ankommt, Details über längere Zeit **fotografisch genau** festzuhalten, ist das menschliche Sehsystem **ungeeignet**.

6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

13

Menschliche Bildverarbeitung

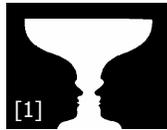
- **Speicherung** von Seherfahrungen in Modellen:
 - Beispiel Papierblatt: Wir bezeichnen die Form als **rechteckig**, obwohl es als Trapez auf der Retina abgebildet wird.
 - Irgendwo im Gehirn muß also der Begriff **Rechteck** in abstrakter Form abgespeichert sein, und zwar so, daß wir es aus jeder Lage wiedererkennen.
 - Aus Seherfahrungen und Gelerntem bilden wir durch Verknüpfungen im Gehirn „Modelle“ von Szenen und Objekten
- **Modellbasiertes Sehen**:
 - Wir können aus diesen Modellen heraus Gesehenes mit **Neuem vergleichen**, es in unserer Sprache **wiedergeben**, es aber auch **manipulieren** oder in Frage stellen.
 - Aus dem Retinabild werden in Zukunft bevorzugt nur die Informationen weiterverarbeitet, die auf abgespeicherte Modelle passen
 - Dabei ist es durchaus möglich, dass das Modell mit jedem visuellen Eindruck noch **verfeinert** wird: Beispiel Türkнопf statt Türgriff
 - Durch diese Modellbildung ist der Mensch in der Lage, in Bruchteilen von Sekunden eine wahre **Informationsflut** aufzunehmen und zu verarbeiten.
- **Modellentstehung** ist noch immer Gegenstand der Gehirnforschung
- **Optische Täuschungen** und Phänomene erlauben Einblicke in die Prozesse der menschlichen Bildverarbeitung

6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

14

Bistabile Bilder



[1]



[1]



[1]

Bistabile Bilder:

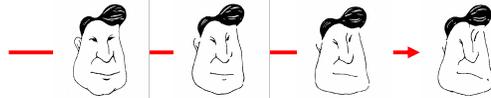
- Bilder können wahlweise eines von **zwei Objekten stabil** darstellen, man „sieht“ jedoch nicht beide simultan
- Das gesehene Objekt kann durch eine Zeitsequenz von **vorhergehenden Bildern beeinflusst** werden

Mögliche Erklärung:

- Unser Gehirn hat **Modelle für Objekte** gespeichert, auf welche Seheindrücke abgebildet werden.
- Das visuelle System nimmt bevorzugt **„Stetigkeit“** zwischen registrierten Objekten in Sequenzen an.



[1]



6.11.2006

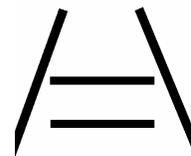
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

15

Längentäuschungen

Die *Railway lines* Illusion:

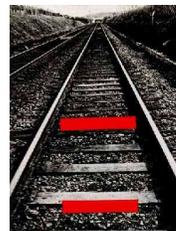
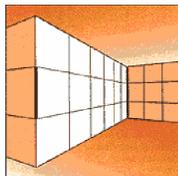
- Welcher der beiden waagerechten Balken erscheint länger?
- Tatsächlich sind die Balken **gleich lang**, es handelt sich also um eine Längentäuschung



Mögliche Erklärung:

- Unser Gehirn versucht, das Gesehene in den **3D-Raum einzubetten**.
- Schräg nach oben führende Linien werden als in die Tiefe gehend interpretiert.
- Damit liegt der obere Balken weiter hinten, wird also als länger empfunden.

Dreidimensionales Äquivalent:



[9]

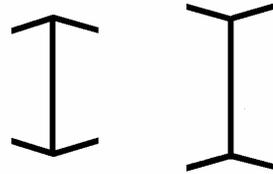
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

16

Längentäuschungen

- Die *Müller-Lyer* Illusion:
 - Welcher der beiden senkrechten Balken erscheint länger?
 - Tatsächlich sind beide wieder **gleichlang**, es liegt also eine Längentäuschung vor
- Mögliche Erklärung:
 - Wieder kann eine **3D-Einbettung** Grund für das Phänomen sein
 - Der rechte Balken scheint eine hinten liegende Kante eines Zimmers- o.ä. zu sein. Dieser muss daher bei gleicher optischer Ausdehnung länger sein als der andere Balken.
- Das dreidimensionale Äquivalent:



[9]

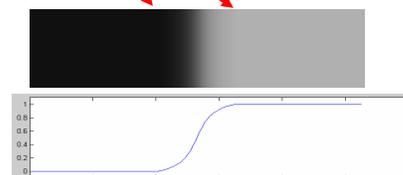
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

17

Intensitätstäuschungen

- Überschwing-Phänomene bei Kontrastübergängen:
 - Treppeneffekt:** kein Grauwertverlauf innerhalb der Stufen!
 - Mach-Band-Effekt:** Dunkler und heller Streifen!



- Umgebungsabhängige Intensität
 - Quadrate mit **identischem Grauton!**



- Erklärung:
 - Wahrgenommene Intensitäten sind **nicht** einfach eine **Funktion** der physikalischen Intensität
 - Lokaler Kontrast** spielt eine wesentliche Rolle.

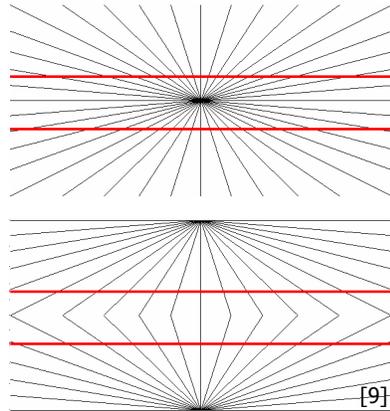
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

18

Vortäuschung von Krümmung

- Die *Hering lines* Illusion:
 - Sind die beiden roten horizontalen Linien **waagrecht**?



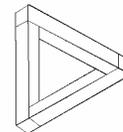
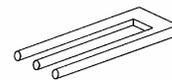
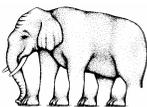
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

19

3D Paradoxa

- Phänomen:
 - Bei machen Bildern gibt es **keine konsistente** räumliche **Interpretation**, diese wird ständig modifiziert, ist **instabil**
- Erklärung:
 - Unser visuelles System versucht, dreidimensionale Objekte zu sehen, auch wenn ganz klar ist, dass ein solches Objekt nicht möglich ist.
- Beispiel: „**Waterfall**“ von M. C. Escher (1898 - 1972) und weitere



[17]



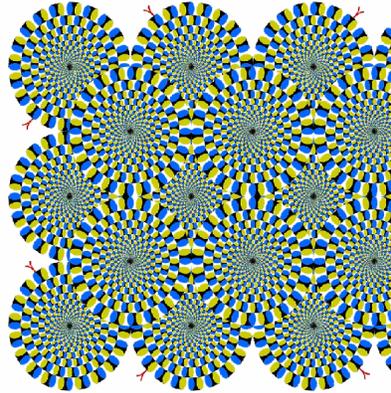
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

20

Vortäuschen von Bewegung

- Phänomen:
 - Drehen sich die Zahnräder wirklich?



- Weitere Beispiele: Siehe <http://www.michaelbach.de/ot/> oder WBT von Prof. A. Erhardt.

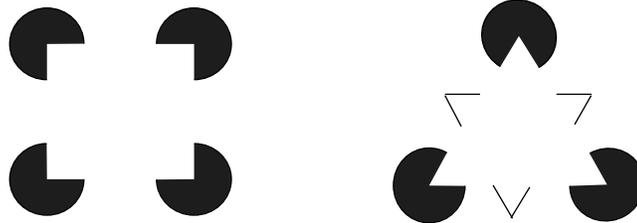
6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

21

Fähigkeit: Kontur-Interpolation

- Kreissegmente oder Quadrat und Dreieck?



- Das Gehirn ist bestrebt, möglichst **einfache Erklärungen** für gegebene Situationen zu finden
- **Einfache Figuren** werden bevorzugt erkannt: gerade Linien, Dreiecke, Quadrate, Kreise
- Eher wird eine „3D“-Interpretation aus sich verdeckenden einfachen Objekten als eine komplizierte 2D-Beschreibung gesehen.
- **Kontur-Interpolation** ist eine starke Fähigkeit des menschlichen Sehens

6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

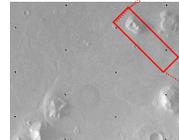
22

Fähigkeit: Gesichtserkennung

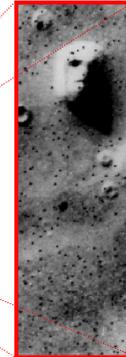
- Sensibilität für Gesichter ist Eigenheit des menschlichen visuellen Systems
- Gesichtserkennung, Personenerkennung, Mimikerkennung auch bei stark verzerrten Bildern ist möglich
- Erstaunliche Fähigkeit: Hängt von sehr diffizilen Details ab
- Erklärung in sozialer Evolutionsgeschichte: Gruppenmitglieder unterscheiden, Mimik deuten sind überlebenswichtig.
- Pareidolia: „Mann im Mond“-Phänomen: Manchmal übertreibt es unsere „Gesichtserkennung“



Krabbe oder Mensch?



Viking I: Mars-Gesicht



6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

23

Verhältnis Menschliches Sehen / maschinelle Bildverarbeitung

- Menschliches Sehen ist ein „Existenzbeweis“ für algorithmische Bearbeitungsmöglichkeiten
- Der Mensch ist schwach in präzisen Messfragen: Grauwert, Längen, Flächenschätzung.
- Der Mensch ist stark in Objekterkennung, Zweck-Erkennung, 3D-Rekonstruktion, etc. auch bei fehlenden Teilen, „Interpolation von Objektgrenzen“, Gesichtserkennung
- Maschinelles Sehen: nicht so weit entwickelt, aber in einfachen fest definierten Aufgaben sehr erfolgreich, insbesondere bei objektiven Messaufgaben.
- Nachahmen von physiologischen Erkenntnissen für neue Bildverarbeitungsansätze ist fruchtbar: Bildpyramiden, lokale Orientierung, Bewegungsschätzung durch Filterung

6.11.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg WS 06/07, Einheit 2

24

Zusammenfassung

- Das **Auge kann als Kamera** interpretiert werden, die menschliche Bildwahrnehmung als Bildverarbeitungssystem
- Das visuelle System des Menschen legt Information über abstrakte **Modelle** ab, die menschliche Bildverarbeitung ist unbewusst, auf Modelle zurückgreifend
- Das Sehsystem setzt **zweidimensionale Bilder** auf der Retina in **dreidimensionale Information** um
- Es ist programmiert, **Gesichter und Mimik** zu lesen
- **Optische Täuschungen** eröffnen Einblicke in das Wesen visueller Prozesse. Viele optische Täuschungen belegen, daß unsere Modelle im dreidimensionalen Raum eingebettet sind.
- Längen- Flächen- und Helligkeits-Täuschungen belegen einige **Schwächen des menschlichen Sehens**
- Tieferes Verständnis für biologische Sehprozesse motiviert neue Bildverarbeitungsansätze, **Nachahmen der Natur** ist hier fruchtbar

Weiterführende Literatur

- Deutsche Bücher
 - H. A. Mallot, **Sehen und die Verarbeitung visueller Information. Eine Einführung**, Vieweg-Verlag, 2000
 - F. Crick, **Was die Seele wirklich ist. Die naturwissenschaftliche Erforschung des Bewußtseins**, Rowohlt, 1997
 - A. Zajonc, **Die gemeinsame Geschichte von Licht und Bewußtsein**, Rowohlt, 1997
 - S. Pinker, **Wie das Denken im Kopf entsteht**, Kindler Verlag GmbH, 2002
- Englische Bücher
 - F. Crick, **Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul** Scribner Book Company, 1995
 - A. Zajonc, **Catching the Light : The Entwined History of Light and Mind** Oxford University Press, 1995
 - S. Pinker, **How the Mind Works**, W. W. Norton & Company, 1999

(Bild-)Referenzen

Die Bilder wurden entweder selbst erstellt, Referenzen wurden bereits angegeben, stammen aus dem WBT/Skript von Frau Erhardt oder aus folgenden Quellen (identische Numerierung wie in Skript):

- [1] F. Attneave. „Multistability in Perception“. In Image, Object and Illusion, Readings from Scientific American, pp. 90-99, W.H. Freeman and Company, 1974.
- [9] R.L. Gregory. „Visual Illusions“: In Image, Object and Illusion, Readings from Scientific American, pp. 48-58, W.H. Freeman and Company, 1974.
- [10] L.D. Harmon. „The Recognition of Faces“, In Image, Object and Illusion, Readings from Scientific American, pp. 101-112, W.H. Freeman and Company, 1974.
- [17] J.L. Locher, „The Work of M.C. Escher“, Harry N. Abrahamn, Inc., New York, 1974.
- [25] U. Neisser, „The Process of Vision“, In Image, Object and Illusion, Readings from Scientific American, pp. 4-11, W.H. Freeman and Company, 1974.
- [38] R.C. Gonzalez, W.E. Woods, „Digital Image Processing“, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.