
Visual Computing

Zusammenfassung
Fabian Damken



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	6
1.1	Visual Computing	6
1.1.1	3D-Internet	6
1.1.2	Skalierbare Objektmodellierung/-erkennung	6
1.1.3	Big Data, Visual Analytics	6
1.1.4	Scene Understanding	6
1.2	Generalisierte Dokumente	6
1.2.1	Retro-Digitalisierung, Digital Creation	6
1.2.2	Generative Modeling Language	6
2	Wahrnehmung	7
2.1	Human-Computer-Interaction	7
2.2	Überblick	7
2.2.1	Menschliche Informationsverarbeitung	7
2.3	Wahrnehmung	9
2.3.1	Das Auge	9
2.3.2	Vorverarbeitung visueller Informationen	10
2.3.3	Informationsextraktion	12
2.4	Aufmerksamkeit	14
2.4.1	Limitierung der Wahrnehmung	14
2.4.2	Das Gedächtnis und „Gateway to Memory“	14
3	Computer Vision: Objekterkennung und Bayes	16
3.1	Computer Vision	16
3.2	Bayesian Decision Theory	16
3.2.1	Konzepte und Bayes Theorem	16
3.2.2	Problemstellung	17
3.2.3	Entscheidungsregel	17
3.2.4	Naive Bayes Classifier	19
3.3	Probability Density Estimation	19
3.4	Gesichtsdetektion	19
3.4.1	Sliding Window Ansatz	19
3.4.2	Beispiel: Gesichtsdetektion	19
3.4.3	Erkennungsarten	20
4	Fouriertheorie	21
4.1	Mathematische Grundlagen	21
4.1.1	Vektorraum	21
4.1.2	Basis eines Vektorraums	21
4.1.3	Krummlinige Koordinatensysteme	21
4.1.4	Andere Räume	21
4.1.5	Komplexe Zahlen	21
4.1.6	Gerade/Ungerade Funktionen	21
4.2	Fourier-Reihe	21
4.2.1	Dirichlet-Bedingungen	21

4.2.2	2π -periodische Funktion	21
4.2.3	Skalarprodukt, Orthogonale Basis	21
4.2.4	Berechnung der Koeffizienten a_n, b_n	21
4.2.5	Beispiel: Rechteck-Schwingung	21
4.3	Fourier-Transformation	21
4.3.1	Mathematische Herleitung	21
4.3.2	Zusammenfassung	21
4.3.3	Beispiel: Rechteckimpuls	21
4.3.4	Fourier-Darstellung	22
4.3.5	Transformationspaare	22
4.4	2D-Fourier-Transformation	22
4.5	Faltung	22
4.5.1	Anwendung: Filter	22
4.6	Abtastung	22
4.6.1	Diskrete Abtastung	22
4.6.2	Abtasttheorie	22
4.6.3	Abtasttheorem von Whittaker-Shannon	22
5	Bilder	23
5.1	Bildverbesserung	23
5.1.1	Histogramm	23
5.1.2	Pixeloperationen	23
5.1.3	Kontrastspreizung	23
5.1.4	Histogrammausgleich	23
5.1.5	Mittelung	23
5.2	Bildfilterung	23
5.2.1	Ortsraum	23
5.2.2	Frequenzraum	24
5.2.3	Vergleich: Orts- und Frequenzraum-Filter	24
5.3	Bildkompression	24
5.3.1	Harmonische Transformation	24
6	Bildverarbeitung	25
6.1	Deblurring	25
6.1.1	Inverser Operator	25
6.1.2	Rekonstruktion	25
6.1.3	Rauschen	25
6.1.4	Korrekt gestellte Probleme	25
6.2	Einschrittverfahren	25
6.2.1	Wiener Filter	25
6.2.2	Ansatz mit mehreren Komponenten	25
6.3	Mehrschrittverfahren (Iterative Methoden)	25
6.3.1	Variationsableitung	25
6.3.2	Alternativen	25
6.3.3	Perona-Malik	25
6.3.4	Eingeschränkte Evolution: Totale Variation	26
7	Grafikpipeline	27
7.1	Hardware	27
7.1.1	Large-Scale-Computing	27

7.1.2	Personal/Desktop Computing	27
7.1.3	Networked Computing	27
7.1.4	Mobile Computing	27
7.1.5	Collaborative Computing	27
7.1.6	Virtual Reality	27
7.1.7	Augmented Reality	27
7.1.8	Ambient/Invisible	27
7.1.9	Wearable/Ubiquitous	27
7.2	Computergrafik	27
7.2.1	Geschichte	27
7.2.2	Virtuelle Charaktere	28
7.3	Grafikpipeline	28
7.4	Eingabe grafischer Daten	28
7.5	Repräsentation von 3D-Daten	28
7.5.1	Grafische Primitive	28
7.5.2	Transformationen	28
7.6	Räumliche Datenstrukturen	28
7.6.1	Hüllkörper (Bounding Volumes)	28
7.6.2	Hüllkörperhierarchien	28
7.6.3	Raumunterteilung	28
7.7	Geometrieverarbeitung	28
7.7.1	Modelltransformation (Orientierung, Position)	28
7.7.2	Simulation der Beleuchtung	28
7.7.3	Perspektivische Transformation und Clipping (Abschneiden)	29
7.7.4	Culling (Verdeckungsrechnung im Objektraum)	29
7.7.5	Projektion	29
7.8	Rasterisierung	29
7.8.1	Scan-Konvertierung	29
7.8.2	Verdeckungsrechnung	29
7.9	Ausgabe	29
7.10	Beispiele	29
8	Transformationen	30
8.1	Affine Abbildungen	30
8.1.1	Eigenschaften	30
8.1.2	Translation	30
8.1.3	Homogene Koordinaten	30
8.1.4	Matrizenschreibweise	30
8.2	Skalierung, Scherung, Rotation	30
8.2.1	Skalierung	30
8.2.2	Scherung	30
8.2.3	Rotation	30
8.2.4	Nicht-Kommutativität von Transformationen	30
8.2.5	Rechenaufwand	30
8.3	Projektion	30
8.3.1	Perspektive Projektion	30
8.3.2	Parallele Projektion	31
8.3.3	Ein-, Zwei- und Dreipunktperspektive	31
8.4	3D-Interaktion	31
8.4.1	Manipulatoren	31

9	3D-Visualisierung	32
9.1	3D-Daten	32
9.2	Triangulation von Punktwolken	32
9.2.1	Ideal Triangulation	32
9.2.2	Voronoi-Diagramm und Delaunay-Triangulation	32
9.3	Indirekte Volumenvisualisierung	32
9.3.1	3D-Volumen und Nachbarschaft	32
9.3.2	2D: Konturlinien	32
9.3.3	3D: Isoflächen	32
9.3.4	2D: Marching Squares	32
9.3.5	3D: Marching Cubes	32
9.3.6	Große Polygonmodelle und Performanz	32
9.4	Direkte Volumenvisualisierung	33
9.4.1	Density Emitter Model	33
9.4.2	Volumen-Rendering-Gleichung	33
9.5	Volumen-Rendering-Pipeline	33
9.5.1	Pipeline	33
9.5.2	Transferfunktion	33
10	Szenengraphen am Beispiel X3DOM	34
10.1	Strukturierung von 3D-Szenendaten	34
10.2	Szenengraph	34
10.3	X3DOM	34
11	Informationsvisualisierung	35
11.1	Informationsdesign	35
11.1.1	Referenzmodell von Card	35
11.2	Datentypen	35
11.2.1	1D-Daten, Zeitreihen	35
11.2.2	2D-Daten	35
11.2.3	mD-Daten (multidimensional)	35
11.2.4	Hierarchien	35
11.2.5	Graphen/Netzwerke	35
11.3	Kuchendiagramm (1D)	35
11.4	Balkendiagramm (1D)	35
11.5	Liniendiagramm (Zeitreihe)	35
11.6	Scatterplot (2D, 3D)	35
11.7	Scatterplotmatrix (nD)	35
11.8	Parallele Koordinaten (3D, nD)	35
11.9	Node-Link-Diagramm (Hierarchien, Graphen)	36
11.10	Treemap (Hierarchien)	36
11.11	Zusammenfassung	36
12	Farbe	37
12.1	Dimensionalität	37
12.2	Wahrnehmungskorrelate	37
12.3	Reproduktion	37
12.4	Berechnung von Farbattributen	37
12.4.1	Das Auge	37
12.4.2	Spektrale Charakterisierung des Auges	37

12.4.3	Spektralwertfunktion	37
12.4.4	Cone Fundamentals	37
12.5	Objektfarben, Lichtmatrix und XIEXYZ-Farbraum	37
12.6	Metamerie	37
12.7	Gegenfarbtheorie	37
12.8	Stevenssche Potenzfunktion	37
12.9	CIELAB Farbraum	37
12.10	Technische Farbräume	37
12.10.1	Geräte RGB	37
12.10.2	Geräteunabhängige RGB	37
12.10.3	YCbCr	37
12.10.4	HSI/HSV/HSL	38
12.10.5	CMY/CMYK	38
12.11	Komplexität von Farbe	38
12.11.1	Chromatische Adaptation	38
12.11.2	Farbwahrnehmungsphänomene	38
12.11.3	Farbwahrnehmungsmodelle	38
12.11.4	Kontrastsensitivität	38
13	User Interfaces	39
13.1	Interaktion	39
13.1.1	Möglichkeiten	39
13.1.2	Designprozess	39
13.2	GUI: Benutzeroberflächen	39
13.2.1	Das WIMP-Interface	40
13.2.2	Menübasierte Programme	40
13.2.3	GUI-Anwendungen und Event-basiertes Programmieren	40
13.3	3D-Interaktion	40
14	Multimedia Information Retrieval	41
14.1	Inhaltsbasierte Suche	41
14.1.1	Mathematische Beschreibung	41
14.1.2	Retrieval Ergebnis	41
14.2	Distanzmaße	41
14.3	Query-Modalitäten	41
14.3.1	Text	41
14.3.2	Example	41
14.3.3	Example-Bilder	41
14.3.4	Sketch	41
14.4	Explorative Suche	41
14.4.1	Research Data	41

1 Einführung

1.1 Visual Computing

1.1.1 3D-Internet

1.1.2 Skalierbare Objektmodellierung/-erkennung

1.1.3 Big Data, Visual Analytics

1.1.4 Scene Understanding

1.2 Generalisierte Dokumente

1.2.1 Retro-Digitalisierung, Digital Creation

1.2.2 Generative Modeling Language

2 Wahrnehmung

2.1 Human-Computer-Interaction

Abbildung 2.1 zeigt den klassischen Zyklus der *Human-Computer-Interaction* (HCI), d. h. der Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Dabei dient insbesondere die visuelle Interaktion und Kommunikation über das Auge eine große Rolle.

2.2 Überblick

Der Mensch hat fünf grundlegende Sinne: Sehen, Hören, Fühlen, Schmecken und Riechen, wobei das Sehen, Hören und Fühlen derzeit dominant sind. Der heute sicherlich relevanteste Sinn ist dabei das Sehen und das menschliche Auge. Da die meisten erzeugten Bilder der Kommunikation von und zum Menschen dienen sollen, ist es gut, das menschliche visuelle System zu kennen, um den Informationstransfer optimal zu gestalten (der Monitorausgang ist nicht das Ende des Informationsflusses).

Hören und Fühlen sind dabei relevant für die Informationsaufnahme und Interaktion mit der realen Welt (außerhalb der Mensch-Maschine-Interaktion).

Bei der Gestaltung von Kommunikation gibt es zwei große Probleme:

- Die Wahrnehmung ist nicht objektiv.
- Das visuelle System ist stark nichtlinear (es ist keine einfache Interpolation oder Extrapolation von Versuchsergebnissen möglich).

2.2.1 Menschliche Informationsverarbeitung

Abbildung 2.2 zeigt die drei Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung:

- *Wahrnehmung* von Eindrücken durch die Sinne,
- *Entscheidungsfindung* im Gehirn und
- *Reaktion* durch den Körper.

Dabei verhält sich die Ausführungszeit additiv und die Funktionen werden durch neurologisch getrennte Gehirnteile ausgeführt, die „elektronisch“ verbunden sind.

Dabei braucht jede Bearbeitung in den einzelnen Stufen unterschiedlich lange und die benötigten Zeiten können verwendet werden, um die Performanz abzuschätzen, bzw. vorherzusagen (bspw. für die Bildfrequenz von Filmen, die maximale Morserate, ...). Typische Zeiten sind in Tabelle 2.1 abgebildet.

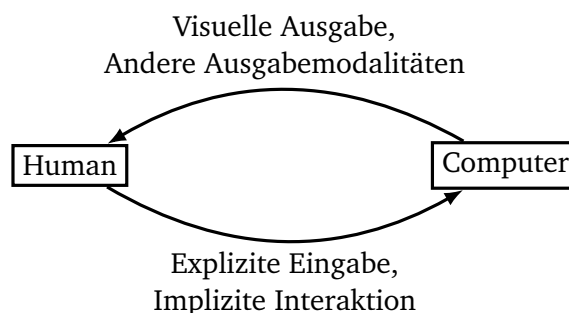


Abbildung 2.1: Klassischer Zyklus der Human-Computer-Interaction (HCI).

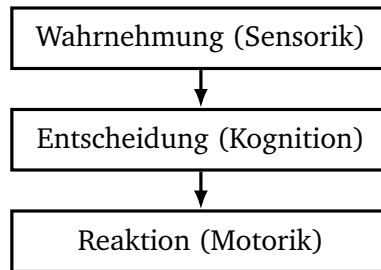


Abbildung 2.2: Modulares Drei-Stufenmodell der menschlichen Informationsverarbeitung.

Untersystem	Durchschnitt	Bereich
Wahrnehmung (Perzeption)	100 ms	50 ms to 200 ms
Entscheidung (Kognition)	70 ms	25 ms to 170 ms
Reaktion (Motorik)	70 ms	30 ms to 100 ms

Tabelle 2.1: Typische Bearbeitungszeiten der Untersysteme der menschlichen Informationsverarbeitung.

Eingabe (Wahrnehmung)

Die Untersysteme der Wahrnehmung,

- Visuell (Sehen)
- Akustisch (Hören)
- Haptisch (Fühlen)

können dabei (theoretisch) parallel arbeiten.

Klangwahrnehmung

Die Hauptkomponenten von Klängen sind

- Klangfarbe,
- Tonlage und
- Lautstärke.

Diese werden durch verschiedene Mechanismen wahrgenommen und Informationen (z. B. der Ursprung eines Geräuschs) extrahiert.

Berührungswahrnehmung

Die Hauptkomponenten der Haptik sind

- Fühl- und Tastsinn (Temperatur, Schmerz, Druck, Oberflächen) und
- Propriozeption (Wahrnehmung der Bewegung und Lage der eigenen Körperteile).

Dabei interagiert die Haptik stark mit Sehen und Hören, was bei sich widersprechenden Informationen Illusionen hervorrufen kann. Ein User-Interface-Designer nutzt Illusionen dabei gezielt aus, um bestimmte Informationen zu vermitteln.

Ausgabe (Reaktion)

Die Untersysteme der Reaktion,

- Artikulation (Sprechen)
- Motorisch (Bewegen)

können dabei (theoretisch) parallel arbeiten.

Die motorische Ausgabe kann dabei auf verschiedene Weisen angewandt werden:

- Diskret (Schalter) oder
- Kontinuierlich (Heben).

Sie ist dabei beschränkt durch Geschwindigkeit, Stärke, Koordinationsvermögen, Wendigkeit, Neurologisch ist die motorische Ausgabe dabei mit dem haptischen System verbunden (Reflexe).

Das *Muskelgedächtnis* hilft dabei, relevante Positionen im Raum (z. B. die Gangschaltung im Auto) zu lernen.

2.3 Wahrnehmung

2.3.1 Das Auge

Reiz und Licht

Einer äußerer, visueller Reiz (Licht) erzeugt beim Menschen eine physikalische Rezeption des äußeren Reizes (Input). Dies geschieht durch einen Sensor (bspw. das Auge) und die Reizung produziert ein neuro-physiologisches Signal. Dieses wird anschließend verarbeitet und interpretiert.

Physikalisch ist ein solcher Reiz elektromagnetische Strahlung. Dabei wird monochromatisches, d. h. einfarbiges, Licht durch die Angabe der Frequenz ν , bzw. der Wellenlänge λ , beschrieben. Diese beiden Größen sind durch die Beziehung

$$\nu\lambda = c, \quad c \approx 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

miteinander verknüpft, wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts ist.

Das menschliche Auge kann dabei Frequenzen im Wellenlängenbereich 380 nm to 750 nm wahrnehmen. Kleinere Wellenlängen haben z. B. Ultraviolett-Licht, Röntgen- und γ -Strahlung. Darüber liegende Wellenlängen haben z. B. Infrarot-Licht und Rundfunk-Wellen.

Das visuelle System

Das menschliche Auge ist aufgebaut aus:

- Hornhaut (Kornea)
- Linse (zur Scharfstellung)
- Iris (Blendenmechanismus)
- Retina (Netzhaut)
 - Blinder Fleck: Hier geht der Sehnerv ab.
 - Fovea Centralis (Gelber Fleck): Bereich mit der höchsten Auflösung.

Photorezeptoren

Die Photorezeptoren (welche auf der Retina platziert sind), bestehen aus:

- Stäbchen
 - Hauptsächlich außerhalb der Fovea.
 - Das Empfindlichkeitsmaximum liegt bei 498 nm („grün“).
- Zapfen
 - Vor allem in der Fovea platziert.
 - Es gibt drei Zapfentypen für Farbsehen.
 - Das Empfindlichkeitsmaximum dieser Zapfen liegt bei 420 nm („blau“), 534 nm („grün“) und 564 nm („rot“).

Skotopisches und Photopisches Sehen

- Nachtsehen (skotopisch): Dominanz der Stäbchen.
- Tagsehen (photopisch): Dominanz der Zapfen.

Zapfenverteilung

2.3.2 Vorverarbeitung visueller Informationen

Signalverarbeitung in der Retina

Neben den Photorezeptoren gibt es noch weitere Zellen zur Signalverarbeitung in der Retina:

- Horizontale Zellen
Kombination von mehreren Rezeptoren einer Region.
- Amakrin-Zellen
Zeitliche Verarbeitung.
- Bipolar-Zellen
Informationsfilter (Sammeln, Gewichten und Weiterleiten).
- Ganglien-Zellen
Integration Informationen (z. B. Kontrastwahrnehmung).

Helligkeit

- *Helligkeit (brightness)* entspricht der wahrgenommenen Menge an Licht, das von einer selbstleuchtenden Lichtquelle ausgeht.
- *Helligkeit (lightness)* entspricht der wahrgenommenen Menge an Licht, das von einer reflektierenden Oberfläche ausgeht.
 - Dies ist keine absolute Wahrnehmungsgröße und abhängig von

- * Reizstärke (Leuchtdichte)
 - * Vorherige Leuchtdichte (Adaption)
 - * Umgebungsleuchtdichte
 - * Größe (Fläche) des Reizes
- Somit subjektiv!

- Dies wirft einige nicht so einfach zu beantwortende Fragen auf, z. B.: Was ist weiß? Was ist schwarz? Was ist mittelgrau?
- Der Hell-Dunkel-Kontrast ist dabei eine wichtige Empfindungsgröße zum Form- und Objektsehen. Daher muss der Unterschied groß genug sein (für kleine Details mindestens 3 : 1, besser 10 : 1).

Kontrast als Reizverhältnis

Für den Kontrast gibt es verschiedene Definitionen, z. B. (dabei ist L stets die Leuchtdichte):

$$m = k = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$

oder

$$K = \frac{L_R - L_H}{L_H} = \frac{\delta L}{L_H}$$

wobei L_R die Leuchtdichte des Vordergrunds und L_H die Leuchtdichte des Hintergrunds darstellt.

Erkennung von Details

Die Erkennung kleiner Details ist begrenzt durch

- Optische Eigenschaften des Auges, z. B. Beugungserscheinungen,
- Abtastung durch Rezeptoren und
- nervöse Verarbeitung.

Zwei mögliche Maße zur „Erkennbarkeit“ sind:

- Kontrastempfindlichkeit
- Schwellenkontrast

Kontrastempfindlichkeit

Die Kontrastempfindlichkeit ist die Auflösung des menschlichen Auges im Frequenzraum. Veränderliche Intensität kann dabei mit Sinus-förmigen Mustern gemessen werden.

Frühe Wahrnehmung

Das Auge nimmt einige Veränderungen der Umgebung schneller wahr als andere. Um die Aufmerksamkeit auf etwas zu lenken, können beispielsweise

- Farbe,
- Richtung,

-
- Bewegung,
 - Größe,
 - Beleuchtung/Schattierung

variiert werden.

2.3.3 Informationsextraktion

Ein reiner Reiz ist noch keine *Wahrnehmung*. Dazu kommen noch andere Faktoren wie Kontext, Erwartungen, Adaption. Das Messen der tatsächlichen Wahrnehmung ist leider sehr schwierig, weshalb häufig nur statistische Aussagen auf Basis von User-Tests getätigt werden können.

Dabei wird erschwert, dass die Wahrnehmung nicht immer der Realität entspricht. Es wird hingegen das Bild durch einen Wahrnehmungsprozess im Gehirn produziert. Dabei wird die menschliche Wahrnehmung adaptiert, bspw. dreht sich das Bild bei einem Kopfstand.

Raumwahrnehmung

Die Wahrnehmung des Raums (Raumwahrnehmung) enthält unter anderem

- Tiefenwahrnehmung,
- Entfernungs- und Distanzwahrnehmung und
- Ausrichtung des Körpers im Raum.

Daran sind viele Wahrnehmungssysteme beteiligt:

- Vestibuläres System (im Innenohr)
- Haptisch-somatisches System (Tasten und Berühren)
- Auditives Sehen (Gehört)
- Propriozeptives System (Eigenwahrnehmung)
- Visuelles System

Dabei ist die Raumwahrnehmung auch mit einem Auge (Monokular) möglich (tatsächlich sind 5 % to 10 % aller Menschen stereoblind und 20 % haben eine Stereo-Schwäche).

Tatsächlich ist die Raumwahrnehmung ein sehr komplexer Prozess, der auch heute nur zu Teilen verstanden wird. Dabei fließen noch viele weitere Phänomene ein, z. B. Größenkonstanz, Annahme starrer Körper oder Vektion. Letzteres ist dabei die scheinbare Eigenbewegung bei einem statischen Vordergrund als Referenzrahmen und einem bewegtem Hintergrund.

Depth Cue Theorie

Die Annahme der *Depth Cue Theorie* ist, dass die Raumwahrnehmung des visuellen Systems auf Hinweisreizen (sogenannten *Depth Cues*) basiert. Diese werden in drei Kategorien eingeteilt:

1. Binokulare Depth Cues (mit zwei Augen)
 - Disparität/Parallaxe
 - Akkomodation (Krümmung der Augenlinsen)

-
- Konvergenz (die Augen nach innen drehen)

2. Pictorial Depth Cues (mit einem Auge)

- Linearperspektive
- Verdeckung
- Texturgradient
- Fokus und Blur
- Atmosphärische Tiefe
- Vertraute Größe
- Höhe im Gesichtsfeld
- Beleuchtung
- Schattenwurf
- Luminanzänderung
- Transluzenz
- Schattierung

3. Dynamische Depth Cues (Animation)

- Bewegungsparallaxe
- Kinetischer Tiefeneffekt
- Interposition
- Bewegung von Highlights

Stereoskopie

Bei der Stereoskopie nehmen beide Augen ein leicht unterschiedliches Bild wahr, woraus die Entfernung zu einem Objekt berechnet werden kann.

Pictorial Depth Cues

Linearperspektive:

Texturgradient: Sind als parallel angenommene Linien nicht mehr parallel, so ergibt sich eine scheinbare Tiefe (als wenn kariertes Papier um einen Ball gerollt und von oben betrachtet wird).

Fokus und Blur: Das Auge fokussiert einen Punkt und produziert somit eine Tiefenschärfe. Daran kann erahnt werden, welche Objekte im Vorder- oder Hintergrund sind.

Atmosphärische Tiefe: Anhand der Atmosphäre (z. B. durch Nebel ausgelöst) wird erkannt, was vermutlich im Hintergrund liegt. So kann zum Beispiel bei einem Foto von einem Berg geschätzt werden, dass der Boden niedriger ist, wenn Wolken über diesem hängen.

Schattenwurf: Annahme: Beleuchtung von oben und Vorhandensein einer Grundebene. Dann kann durch den Abstand von Schatten zum Objekt erahnt werden, wie weit dieses vom Boden entfernt ist.

Dynamische Depth Cues

Motion Parallax:

Raumwahrnehmung durch Bewegung: Wird z. B. eine schaukelnde Vase von oben betrachtet, so bewegt sich die Öffnung charakteristisch, sodass eine Wahrnehmung der Tiefe entsteht.

Kinetic Depth Effect, Structure from Motion:

Auswertung von Depth Cues

Unterschiedliche Depth Cues haben im Allgemeinen einen unterschiedlichen Informationsgehalt. Dabei sind sie nicht redundant, sondern additiv. Durch ein kompliziertes Zusammenspiel (flexible Gewichtung, Dominanz eines Depth Cue) bildet sich das Gehirn ein Bild. Dabei bildet es sich allerdings kein tatsächliches 3D-Modell, sondern verwendet sie unterschiedlichen Cues für verschiedene Aufgaben. Diese können z. B. sein:

- Einschätzen von Objektgrößen
- Einschätzen von Entfernungen
- Verfolgung von Pfaden
- Navigation
- Einschätzen der Eigenbewegung
- Abschätzung der Kollisionszeit

2.4 Aufmerksamkeit

2.4.1 Limitierung der Wahrnehmung

Die initiale Reizaufnahme hat viele Limitierungen, sodass nur ein Bruchteil des äußeren Reizes zur kognitiven Verarbeitung zur Verfügung steht. Dabei sind Aufmerksamkeit und externe Faktoren wichtige Einflüsse auf die tatsächliche Wahrnehmung. Die Wahrnehmung ist dabei eher eine partielle Hypothese, die auf Basis unvollständiger Informationen generiert wurde. Es wird dabei periodisch aktualisiert aufgrund von Beobachtungen, d. h. die Hypothese wird gegen sensorische Daten getestet. Durch eine dynamische Suche des visuellen Systems wird nach der besten Hypothese/Interpretation/Modell gesucht.

2.4.2 Das Gedächtnis und „Gateway to Memory“

Das Gehirn kann sich auf bestimmte Dinge fokussieren und den Rest ignorieren. Dabei gibt es drei verschiedene Arten der Aufmerksamkeit:

- *Gewählte Aufmerksamkeit* (selective): Zwischen mehreren Möglichkeiten wird eine zu fokussierende Sache aktiv ausgewählt.
 - Das Auge folgt den Objekten von Interesse.
 - Der Kopf folgt den Klängen von Interesse.
 - Es gibt nur einen einzigen „Ort der Aufmerksamkeit“.
- *Geteilte Aufmerksamkeit* (divided): Ein Versuch durch „Multitasking“ mehrere Dinge zu fokussieren.
 - Entweder „gleichzeitig“ oder durch schnelles Umschalten (time multiplexing).
 - Dies wirkt sich negativ auf die Verarbeitung aus, wenn die Aufgaben überfordernd sind.
 - Die Aufgaben beeinträchtigen sich gegenseitig.
- *Erfasste Aufmerksamkeit* (captured): Ein äußerer Reiz zieht alle Aufmerksamkeit auf sich.
 - Im Gegensatz zur gewählten Aufmerksamkeit wird der „Ort“ nicht aktiv ausgewählt.

– Dies geschieht z. B. wenn man von einem Tier angefallen wird.

Das menschliche Gedächtnis ist in mehrere „Teilgedächtnisse“ aufgeteilt. Voran steht das *Arbeitsgedächtnis*, auf das ein schneller Zugriff (ca. 70 ms) möglich ist, welches aber einen schnellen Verfall hat (nach ca. 200 ms). Nach wenigen Sekunden wird der Inhalt jedoch an das Langzeitgedächtnis weitergegeben. Es stellt sozusagen das „Schmierblatt“ des Gehirns da.

Das Langzeitgedächtnis ist langsamer (ca. 100 ms), dafür aber auch sehr viel größer (die genaue Größe ist unbekannt). Das Langzeitgedächtnis hat dabei drei Hauptaufgaben:

- Informationen speichern und sich an diese erinnern,
- Informationen abrufen und
- Informationen vergessen.

3 Computer Vision: Objekterkennung und Bayes

Die *Computer Vision* beschäftigt sich mit dem maschinellen Sehen, d. h. der Suche nach einem Modell des menschlichen Sehens. Anwendungsgebiete sind bspw. Autos, die Fußgänger erkennen, medizinische Bildverarbeitung, Überwachung, Unterhaltung, Computergraphik, . . .

3.1 Computer Vision

Das einfachste Standardmodell einer Lochkamera ist ein Kasten mit einem kleinen Loch. Um ein digitales Bild eines solchen Kameramodells zu erhalten, wird das Bild rasterisiert. Demnach ist ein Graustufenbild eine Matrix an Pixeln mit jeweils einem Wert (die „Grauigkeit“ des Pixels).

Die Computer Vision beschäftigt sich nun damit, aus einem solchen Bild Informationen zu extrahieren. Bei der Objekterkennung ist es wichtig, eine gute lokale Beschreibung/Merkmale zu haben (z. B. Augen, Mund, Nase) und eine globale Anordnung der lokalen Merkmale (z. B. relative Positionen, relative Größen). Es ist aber auch eine schnelle Generierung guter Hypothesen, Segmentierung der Bildbereiche und kennen des Szenenkontextes wichtig.

Nach Fischler und Elschlager hat das Modell eines Bildes zwei Komponenten: Teile (2D Bildfragmente) und den Aufbau (die Anordnung der Teile). Mit diesem abstrakten Modell lassen sich viele Dinge (z. B. ein Gesicht) charakterisieren.

3.2 Bayesian Decision Theory

Beispiel: Buchstabenerkennung. Es soll ein neu aufgenommener Buchstabe so klassifiziert werden, dass die Wahrscheinlichkeit der Fehlklassifikation minimiert wird.

3.2.1 Konzepte und Bayes Theorem

Vorbemerkung: Wahrscheinlichkeitsdichte und Wahrscheinlichkeit

Ist $p(x)$ eine Wahrscheinlichkeitsdichte, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass x im Intervall (x_0, x_1) liegt, gegeben durch:

$$P(x_0 < x < x_1) = \int_{x_0}^{x_1} p(\tau) d\tau$$

Da für die Wahrscheinlichkeit, dass x im Intervall $(x, x + \Delta x)$ mit $\Delta x \rightarrow 0$ gilt:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} P(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} P(x < t < x + \Delta x) = p(x) \cdot \Delta x$$

kann Wahrscheinlichkeitsdichte und Wahrscheinlichkeit in den meisten Fällen gegeneinander ausgetauscht werden.

1. Konzept: A-Priori Wahrscheinlichkeit (Prior)

Die *a-priori Wahrscheinlichkeit* (Prior) enthält die Information, wie wahrscheinlich eine beliebige Messung der Klasse zugehört (d. h. die „Klassenhäufigkeit“). Ist C_k eine Klasse, so ist $P(C_k)$ der Prior bzgl. der Klasse C_k (analog für $p(C_k)$).

2. Konzept: Bedingte Wahrscheinlichkeit (Likelihood)

Ist \mathbf{x} der Merkmalsvektor (Feature), welcher Eigenschaften der Messung beschreibt (Anzahl schwarzer Pixel, Höhe/Breite, ...) und C_k eine Klasse, so ist $P(\mathbf{x} | C_k)$ die *Likelihood*, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass \mathbf{x} für einen Buchstaben der Klasse C_k gemessen wird (analog für $p(\mathbf{x} | X_k)$).

3. Konzept: A-Posteriori Wahrscheinlichkeit (Posterior), Bayes Theorem

Die *a-posteriori Wahrscheinlichkeit* (Posterior) ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Merkmalsvektor \mathbf{x} einer Klasse C_k angehört, d. h. $P(C_k | \mathbf{x})$. Dieser Posterior kann durch Bayes Theorem gefunden werden:

$$P(C_k | \mathbf{x}) = \frac{P(\mathbf{x} | C_k) \cdot P(C_k)}{P(\mathbf{x})}$$

Oder Namentlich:

$$\text{Posterior} = \frac{\text{Likelihood} \times \text{Prior}}{\text{Normalisierung}}$$

3.2.2 Problemstellung

Abbildung 3.1 zeigt die Likelihood, Prior und den Posterior auf. Die Zielstellung eines Bayesian Classifier ist nun, die Wahrscheinlichkeit der Fehlklassifikation zu minimieren und somit eine Entscheidungsgrenze zu bestimmen. Die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers ist gegeben durch:

$$\begin{aligned} P(\text{Fehler}) &= P(x \in R_2, C_1) + P(x \in R_1, C_2) \\ &= P(x \in R_2 | C_1)P(C_1) + P(x \in R_1 | C_2)P(C_2) \\ &= \int_{R_2} p(x \in R_2 | C_1)P(C_1) dx + \int_{R_1} p(x \in R_1 | C_2)P(C_2) dx \end{aligned}$$

Dabei ist $P(x \in R_i, C_j)$ die Wahrscheinlichkeit, dass x zu Klasse R_i gehört, aber als Klasse C_j klassifiziert wurde (für $i \neq j$ entspricht dies einer Fehlklassifikation).

3.2.3 Entscheidungsregel

Durch die Minimierung des Erwartungswertes des Fehlers kann die Entscheidungsregel, wann x in eine Klasse einsortiert wird, hergeleitet werden. Dabei soll x genau dann in Klasse C_1 sortiert werden, wenn

$$P(C_1 | x) > P(C_2 | x)$$

Da die Posteriors im Allgemeinen nicht bekannt sind, werden die über Bayes Theorem berechnet:

$$\begin{aligned} &P(C_1 | x) > P(C_2 | x) \\ \Leftrightarrow &\frac{P(x | C_1)P(C_1)}{P(x)} > \frac{P(x | C_2)P(C_2)}{P(x)} \\ \Leftrightarrow &P(x | C_1)P(C_1) > P(x | C_2)P(C_2) \\ \Leftrightarrow &\frac{P(x | C_1)}{P(x | C_2)} > \frac{P(C_2)}{P(C_1)} \end{aligned}$$

Dies wird auch *Likelihood Ratio Test* genannt.

Dieser Test kann sich für mehr als zwei Klassen verallgemeinern lassen: Wähle Klasse k genau dann, wenn

$$P(C_k | x) > P(C_j | x) \quad \forall j \neq k$$

gilt. Äquivalent zu dem zwei-Klassen-Fall kann dies in einen Likelihood Ratio Test umgeformt werden:

$$\frac{P(x | C_k)}{P(x | C_j)} > \frac{P(C_j)}{P(C_k)} \quad \forall j \neq k$$

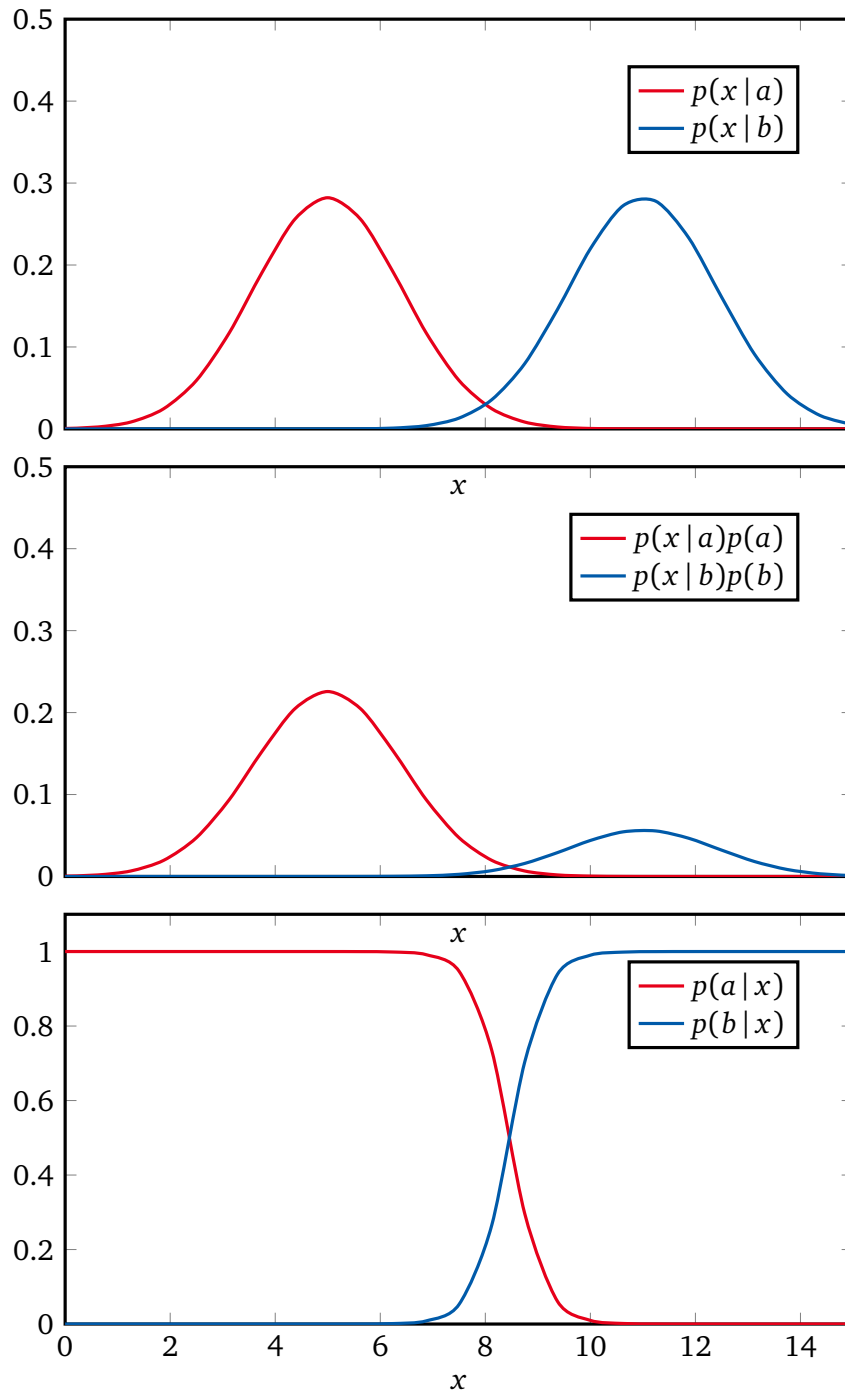


Abbildung 3.1: Likelihood, Likelihood \times Prior und Posterior.

3.2.4 Naive Bayes Classifier

Bei mehr als zwei Merkmalen (z. B. Höhe und Breite) werden $P(x_1, x_2 | C_k)$ und $P(x_1, x_2)$ mehrdimensional und eine Schätzung der Dichte ist nicht immer möglich. Daher nimmt ein *Naive Bayes Classifier* an, dass die Merkmale statistisch unabhängig sind. Damit gilt:

$$P(x_1, x_2 | C_k) = P(x_1 | C_k)P(x_2 | C_k)$$
$$P(x_1, x_2) = P(x_1)P(x_2)$$

In der Realität ist diese Annahme oft nicht korrekt, liefert aber häufig gute Ergebnisse und ist somit eine gute Basis zum Vergleich.

3.3 Probability Density Estimation

Bisher wurden die Wahrscheinlichkeiten $P(x | C_k)$ und $P(C_k)$ als bekannt vorausgesetzt. In der Realität ist dies oft nicht der Fall, weshalb die Wahrscheinlichkeitsdichte geschätzt werden muss. Siehe hierzu auch Vorlesung Statistical Machine Learning.

3.4 Gesichtsdetektion

Bei *Appearance-Bases Methods* wird ein Erscheinungsmodell aus (üblicherweise) großen Mengen von Bildern gelernt. Dabei wird am häufigsten der Sliding Window Ansatz genutzt (siehe 3.4.1). Dabei sind vor allem drei Aspekte relevant:

1. Repräsentation des Objektes (lokale Merkmale, globale Anordnung)
2. Trainingsdaten (positive und negative Beispiele)
3. Klassifikator und Lernmethode

3.4.1 Sliding Window Ansatz

Bei dem *Sliding Window Ansatz* wird ein Bild in Ein-Pixel-Schritten horizontal und vertikal gescannt. Nach jedem Durchlauf wird das Bild immer wieder verkleinert, bis das Bild zu klein ist. So können auch mit einem Klassifikator, der nur Bilder einer Größe entgegen nehmen kann, große Bilder durchsucht werden.

3.4.2 Beispiel: Gesichtsdetektion

1. Repräsentation des Objekts
 - Die Bilder werden in Wavelets zerlegt, d. h. die Gesichtsmerkmale werden mit Frequenzen und deren Ort und Orientierung dargestellt.
 - Lokale Merkmale: Wavelet Koeffizienten (Frequenzen von z. B. Auge und Mund).
 - Globale Merkmale: Absolute Position der Frequenzen im Bild.
2. Trainingsdaten
 - Positive Beispiele
 - Möglichst vielfältig.

-
- Jedes Bild eines Gesichts wird manuell an den Rändern abgeschnitten und auf eine Größe normalisiert.
 - Zusätzlich werden virtuelle Beispiele erstellt (z. B. durch Spiegelung).
 - Negative Beispiele
 - Beliebige Bilder, die keine Gesichter enthalten.
 - Teilbilder von großen Bildern.

3. Klassifikator und Lernmethode

- Naive Bayes Classifier
- Merkmale x_i : Wavelet Koeffizienten an einer bestimmten Position.
- Zwei-Klasse-Problem:
 - C_1 : Gesichter
 - C_2 : Alles andere (keine Gesichter)
- Das „Lernen“ entspricht dem Schätzen der Wahrscheinlichkeiten der Wavelet-Koeffizienten.
- Durch Diskretisierung von Koeffizienten und Positionen gibt es eine diskrete und endliche Anzahl von x_i .
- Schätzen: Zählen, wie häufig jedes x_i in Bildern mit und ohne Gesichtern vorkommt.
- Dann wird ein Likelihood Ratio Test verwendet.

Um Bilder aus verschiedenen Perspektiven zu erkennen, wird für jede Ansicht ein eigener Detektor verwendet (jeder für eine Ansicht) und diese kombiniert.

3.4.3 Erkennungsarten

Eine Gesichtserkennung zählt zu den biometrischen Verfahren und werden bspw. in sicherheitstechnischen, kriminalistischen und forensischen Gebieten eingesetzt. Der Zweck ist die Identifikation und Verifikation natürlicher Personen.

- Verifikation: Die Person muss dem System ihren Namen oder User-ID mitteilen und das System entscheidet, ob die Person dazu gehört.
- Identifikation: Die Person offenbart ausschließlich ihre biometrischen Merkmale und das System ermittelt daraus den Namen oder die User-ID.

4 Fouriertheorie

4.1 Mathematische Grundlagen

4.1.1 Vektorraum

4.1.2 Basis eines Vektorraums

4.1.3 Krummlinige Koordinatensysteme

4.1.4 Andere Räume

4.1.5 Komplexe Zahlen

4.1.6 Gerade/Ungerade Funktionen

4.2 Fourier-Reihe

4.2.1 Dirichlet-Bedingungen

4.2.2 2π -periodische Funktion

4.2.3 Skalarprodukt, Orthogonale Basis

4.2.4 Berechnung der Koeffizienten a_n, b_n

4.2.5 Beispiel: Rechteck-Schwingung

4.3 Fourier-Transformation

4.3.1 Mathematische Herleitung

4.3.2 Zusammenfassung

4.3.3 Beispiel: Rechteckimpuls

4.3.4 Fourier-Darstellung

4.3.5 Transformationspaare

4.4 2D-Fourier-Transformation

4.5 Faltung

4.5.1 Anwendung: Filter

4.6 Abtastung

4.6.1 Diskrete Abtastung

4.6.2 Abtasttheorie

4.6.3 Abtasttheorem von Whittaker-Shannon

5 Bilder

5.1 Bildverbesserung

5.1.1 Histogramm

5.1.2 Pixeloperationen

Bildnegativ

Binärisierung/Thresholding

Graufenfensterung

5.1.3 Kontraststreckung

5.1.4 Histogrammausgleich

5.1.5 Mittelung

5.2 Bildfilterung

5.2.1 Ortsraum

Lineare Filterung (Faltung)

Tiefpass-Filter

Mittelwert-Filter

Gauss-Filter

Median-Filter

Hochpass-Filter

Diskretisierte Ableitungen

Laplacian-Filter

Laplacian of Gaussian Filter

Bilateral Filter

5.2.2 Frequenzraum

Idealer Tiefpass-Filter

Gaußscher Tiefpass-Filter

Idealer Hochpass-Filter

5.2.3 Vergleich: Orts- und Frequenzraum-Filter

5.3 Bildkompression

5.3.1 Harmonische Transformation

JPEG

Schritt 1: Umwandlung in den YCC-Farbraum

Schritt 2: Farb-Subsampling

Schritt 3: Diskrete Kosinustransformation

Schritt 4: Quantisierung

Schritt 5: Kodierung der Koeffizienten

MH17

6 Bildverarbeitung

6.1 Deblurring

6.1.1 Inverser Operator

6.1.2 Rekonstruktion

6.1.3 Rauschen

6.1.4 Korrekt gestellte Probleme

6.2 Einschrittverfahren

6.2.1 Wiener Filter

6.2.2 Ansatz mit mehreren Komponenten

Scale-Space-Ansatz

Gaußscher Scale-Space

6.3 Mehrschrittverfahren (Iterative Methoden)

6.3.1 Variationsableitung

6.3.2 Alternativen

6.3.3 Perona-Malik

Nichtlineare Diffusionsgleichungen

Die Perona-Malik-Gleichung

Implementierung

Einfluss und Wahl von k

Stopzeit

6.3.4 Eingeschränkte Evolution: Totale Variation

Distance Penalty

Basisenergien

Totale Variation

Erweiterungen

7 Grafikpipeline

7.1 Hardware

7.1.1 Large-Scale-Computing

7.1.2 Personal/Desktop Computing

7.1.3 Networked Computing

7.1.4 Mobile Computing

7.1.5 Collaborative Computing

7.1.6 Virtual Reality

7.1.7 Augmented Reality

7.1.8 Ambient/Invisible

7.1.9 Wearable/Ubiquitous

7.2 Computergrafik

7.2.1 Geschichte

Die Anfänge

60er Jahre

70er Jahre

80er Jahre

90er Jahre

2000 bis 2005

2006 bis 2020

7.2.2 Virtuelle Charaktere

7.3 Grafikpipeline

7.4 Eingabe grafischer Daten

7.5 Repräsentation von 3D-Daten

7.5.1 Grafische Primitive

7.5.2 Transformationen

7.6 Räumliche Datenstrukturen

7.6.1 Hüllkörper (Bounding Volumes)

7.6.2 Hüllkörperhierarchien

7.6.3 Raumunterteilung

Achsenparallele Gitter (Grids)

Quadtree/Octree

Binary Space Partition

7.7 Geometrieverarbeitung

7.7.1 Modelltransformation (Orientierung, Position)

7.7.2 Simulation der Beleuchtung

Phong-Beleuchtungsmodell

7.7.3 Perspektivische Transformation und Clipping (Abschneiden)

Painters Algorithmus

7.7.4 Culling (Verdeckungsrechnung im Objektraum)

7.7.5 Projektion

7.8 Rasterisierung

7.8.1 Scan-Konvertierung

Rasterisierung von Linien (Bresenham-Algorithmus)

Rasterisierung von Polygonen (Scanline Algorithmus)

7.8.2 Verdeckungsrechnung

z-Buffer-Algorithmus

7.9 Ausgabe

7.10 Beispiele

8 Transformationen

8.1 Affine Abbildungen

8.1.1 Eigenschaften

8.1.2 Translation

8.1.3 Homogene Koordinaten

Translation

8.1.4 Matrizenschreibweise

8.2 Skalierung, Scherung, Rotation

8.2.1 Skalierung

8.2.2 Scherung

8.2.3 Rotation

Rotation um beliebige Achse

Rotation um beliebige Raumachse

8.2.4 Nicht-Kommutativität von Transformationen

8.2.5 Rechenaufwand

8.3 Projektion

8.3.1 Perspektive Projektion

Kanonisches Sichtvolumen

Allgemeine perspektivische Transformation

8.3.2 Parallele Projektion

8.3.3 Ein-, Zwei- und Dreipunktperspektive

8.4 3D-Interaktion

8.4.1 Manipulatoren

9 3D-Visualisierung

9.1 3D-Daten

Terrain
Laser Scanning
Range Images
Medizinische Bilddaten
Schneiden
Wetter
Klimaforschung

9.2 Triangulation von Punktwolken

9.2.1 Ideal Triangulation

9.2.2 Voronoi-Diagramm und Delaunay-Triangulation

9.3 Indirekte Volumenvisualisierung

9.3.1 3D-Volumen und Nachbarschaft

9.3.2 2D: Konturlinien

9.3.3 3D: Isoflächen

9.3.4 2D: Marching Squares

9.3.5 3D: Marching Cubes

9.3.6 Große Polygonmodelle und Performanz

Culling von Geometrie

Meshreduktion

Mesh-Glättung

9.4 Direkte Volumenvisualisierung

9.4.1 Density Emitter Model

9.4.2 Volumen-Rendering-Gleichung

9.5 Volumen-Rendering-Pipeline

9.5.1 Pipeline

Abtastung

Klassifikation und Beleuchtung

Komposition

Back-to-Front-Komposition:

Front-to-Back-Komposition:

9.5.2 Transferfunktion

10 Szenengraphen am Beispiel X3DOM

10.1 Strukturierung von 3D-Szenendaten

10.2 Szenengraph

10.3 X3DOM

11 Informationsvisualisierung

11.1 Informationsdesign

11.1.1 Referenzmodell von Card

11.2 Datentypen

11.2.1 1D-Daten, Zeitreihen

11.2.2 2D-Daten

11.2.3 mD-Daten (multidimensional)

11.2.4 Hierarchien

11.2.5 Graphen/Netzwerke

11.3 Kuchendiagramm (1D)

11.4 Balkendiagramm (1D)

11.5 Liniendiagramm (Zeitreihe)

Problem: Viele Zeitreihen

Problem: Länge

11.6 Scatterplot (2D, 3D)

Problem: Overplotting

11.7 Scatterplotmatrix (nD)

11.8 Parallele Koordinaten (3D, nD)

Problem: Overplotting

Problem: Viele Dimensionen

11.9 Node-Link-Diagramm (Hierarchien, Graphen)

Problem: Layout

Problem: Viele Knoten

11.10 Treemap (Hierarchien)

Problem: Überlappung

Problem: Größendarstellung

11.11 Zusammenfassung

12 Farbe

12.1 Dimensionalität

12.2 Wahrnehmungskorrelate

12.3 Reproduktion

12.4 Berechnung von Farbattributen

12.4.1 Das Auge

12.4.2 Spektrale Charakterisierung des Auges

12.4.3 Spektralwertfunktion

12.4.4 Cone Fundamentals

12.5 Objektfarben, Lichtmatrix und XIEXYZ-Farbraum

12.6 Metamerie

12.7 Gegenfarbtheorie

12.8 Stevenssche Potenzfunktion

12.9 CIELAB Farbraum

12.10 Technische Farbräume

12.10.1 Geräte RGB

12.10.2 Geräteunabhängige RGB

12.10.3 YCbCr

12.10.4 HSI/HSV/HSL

12.10.5 CMY/CMYK

12.11 Komplexität von Farbe

12.11.1 Chromatische Adaptation

Modellbildung

12.11.2 Farbwahrnehmungsphänomene

Simultankontrast

Crispening Effekt

Stevens Effekt

Hunt Effekt

12.11.3 Farbwahrnehmungsmodelle

CIECAM02

12.11.4 Kontrastsensitivität

S-CIELAB (Spacial-CIELAB)

iCAM (Image Color Appearance Model)

13 User Interfaces

13.1 Interaktion

13.1.1 Möglichkeiten

Kommandozeile

Menüs

Formulare

Fragen und Antworten

Direkte Manipulation

3D-Umgebungen

Natürliche Sprache

Gesten

13.1.2 Designprozess

Wasserfallmodell

Spiralmodell

V-Modell

Dynamic Systems Development Method (DSDM)

Design Process Model

13.2 GUI: Benutzeroberflächen

13.2.1 Das WIMP-Interface

Fenster-Komponenten

Multiple Document Interface (MDI)

Single Document Interface (SDI)

Tabbed Document Interface

Dialogboxen

Checkboxen

Radio Buttons

Listboxen

Comboboxen

Spinner

Slider

Weiteres

13.2.2 Menübasierte Programme

Untermenüs

Auswahl (if-then-else-Struktur)

Verschachtelte Entscheidungsstrukturen

Die case-Struktur

Modularisierung

13.2.3 GUI-Anwendungen und Event-basiertes Programmieren

Graphical User Interfaces (GUIs)

Event-Handler

Nutzerinteraktionen

Das Delegationsmodell

13.3 3D-Interaktion

14 Multimedia Information Retrieval

14.1 Inhaltsbasierte Suche

14.1.1 Mathematische Beschreibung

14.1.2 Retrieval Ergebnis

14.2 Distanzmaße

14.3 Query-Modalitäten

14.3.1 Text

14.3.2 Example

14.3.3 Example-Bilder

14.3.4 Sketch

14.4 Explorative Suche

14.4.1 Research Data
