



Verhaltensbasierter Entwurf technischer visueller Systeme

Gerald Sommer

Der Entwurf von technischen visuellen Systemen nach sehr allgemeinen Prinzipien einer universellen Wahrnehmungsaufgabe hat sich als Irrweg erwiesen. Am Horizont erscheint das Paradigma des verhaltensbasierten Entwurfes. Die Entwicklung dieses Konzeptes bedeutet eine breitere Orientierung an den Leistungen biologischer Systeme als im Falle des klassischen Kognitionsparadigmas. Die Selbstorganisation vorbegrifflicher Kategorien erfordert eine dominante Rolle der Signalverarbeitung gegenüber der Symbolverarbeitung. Der Beitrag konzentriert sich auf die Motivierung und Charakterisierung verhaltensbasierter visueller Systeme ohne Details ihrer Architektur oder Funktion darzustellen.

1. Computer Vision – eine Disziplin im Umbruch

Ein Ziel von Computer Vision ist die Entwicklung technischer visueller Systeme. Das Spektrum möglicher Anwendungen ist weit gefächert. Die Wünsche orientieren sich meist an Fähigkeiten der visuellen Wahrnehmung, die wir Menschen mit traumhafter Sicherheit und mit Selbstverständlichkeit einsetzen. Dementsprechend konzentriert sich der Forschungsgegenstand von Computer Vision um die Probleme der Gewinnung visueller Information aus sensorisch registrierten Bildsignalen der Umwelt, also die Erkennung von Objekten, von Bewegungen oder räumlich-zeitlichen Strukturierungen einer Szene.

Vergleicht man den weltweiten Umfang akademischer Aktivitäten mit dem aktuellen Stand der Integration ihrer Ergebnisse in Anwendungen, so wird schnell ein enormes Mißverhältnis deutlich. Es äußert sich zum Beispiel darin, daß heute nur einfache und hochspezialisierte Probleme visueller Wahrnehmung angewendet werden. Den von den Anwendern in berechtigter Weise erhobenen Forderungen nach Robustheit bezüglich nicht exakt erfaßbarer Einsatzbedingungen, Adaptivität an ähnliche Einsatzfelder oder Echtzeitfähigkeit kann nur selten entsprochen werden. Außerdem vernachlässigt die akademische Forschung den in der Anwendung dominanten Systemcharakter einer Problemlösung. Die geringsten Diskrepanzen sind auf dem Gebiet der Anwendung visueller Sensoren für Meßaufgaben festzustellen. Dies wundert nicht, denn Physik und Signaltheorie stellen uns ein methodisches Repertoire zur Verfügung, das sich auf den Fall visueller Sensoren erweitern läßt. Dieser methodische Hintergrund fehlt aber bezüglich

qualitativer Probleme, zu denen die Erkennung von Objekten gehört. Computer Vision erfordert mehr als Bildverarbeitung, Mustererkennung und Sensorphysik anbieten. Computer Vision ist der Künstlichen Intelligenz zuzuordnen. Insofern ist Computer Vision abhängig von deren Paradigmen und Metaphern. Gleichzeitig ist diese Disziplin aber auch Gestalter der Künstlichen Intelligenz. Die von Mühlenbein vorgestellte Diskussion zu den Grenzen der Künstlichen Intelligenz im Heft 1 dieses Jahrganges der KI [1] hat nicht zuletzt ihre Ursache in den Problemen des Verständnisses des Wesens visueller Wahrnehmung und ihrer technischen Beherrschung. Die innerhalb der Künstlichen Intelligenz geführte Diskussion bezüglich ihrer paradigmatischen Ausgangsbasis wurde unter anderem durch die innerhalb Computer Vision erkannten Konflikte befördert. So wundert es nicht, daß sich diese Disziplin heute in der Fachliteratur sehr kontrovers ringend und unterschiedliche Wege gehend präsentiert. In [2] wird eine Diskussion um die Rolle der Repräsentation in Computer Vision geführt, welche die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der aktuellen Ausprägungen *Active*, *Qualitative*, *Animate*, *Purposive* oder *Behavioral Vision* erkennen läßt. Ich meine, daß sich die Essenz dieser Ausprägungen in einem Konzept zusammenfassen läßt, das ich den *verhaltensbasierten Entwurf* technischer visueller Systeme nenne. Das Paradigma der Verhaltensbasiertheit visueller Wahrnehmung orientiert sich weit umfassender an den Erkenntnissen über biologische Systeme, als dies das klassische Paradigma eines wissensbasierten Entwurfes vermag. Wenn wir verstehen, warum biologische Systeme sehen können, haben wir auch den Schlüssel für dessen technische Realisierung. Daß dies nicht bedeutet, biologische visuelle Systeme zu kopieren, wird aus der Definition verhaltensbasierter Systeme deutlich werden. Die Gestaltung des Konzeptes verhaltensbasierter Systeme erfordert allerdings, daß Computer Vision nicht mehr als Einzeldisziplin der KI wirkt, sondern mit Robotik und Neuroinformatik unter dem Aspekt der Echtzeitfähigkeit verschmilzt. Wir sind in der glücklichen Lage, in Deutschland Forschungsgruppen zu wissen, die sich seit einiger Zeit mit dem verhaltensbasierten Entwurf visueller Systeme [3] bzw. mit den neuronalen Architekturprinzipien visueller Systeme auseinandersetzen. Die Relevanz des Paradigmas für internationale Förderprojekte wird in [5], [6] deutlich.



Prof. Dr.-Ing. Gerald Sommer leitet seit 1993 die Arbeitsgruppe Kognitive Systeme des Institutes für Informatik der Uni Kiel. Er studierte an der Uni Jena Physik und promovierte dort 1975 zum Dr. rer. nat. 1988 habilitierte er sich an der Technischen Uni Ilmenau. Für zwei Jahre leitete er seit 1991 die Arbeitsgruppe medizinische Bildanalyse des MEDIS-Institutes der GSF Neuherberg. Interessenschwerpunkte: Prozesse der frühen visuellen Wahrnehmung und Robotik.

2. Die Grenzen von Marr's Theorie für visuelle Wahrnehmung

Die von David Marr [7] vorgestellte *Computational Theory of Vision* bildete den Hintergrund der Forschung auf dem Gebiet Computer Vision in der letzten Dekade. Sie entspringt dem Informationsverarbeitungsparadigma der Kognitionswissenschaft und wurde meist mit dem Symbolverarbeitungsansatz umgesetzt. Das heißt, visuelle Wahrnehmung wurde als formalisierbarer Prozeß auf Symbolstrukturen verstanden. Folglich impliziert die Theorie die Annahme der Formalisierbarkeit der kognitiv erfassbaren Welt, die Abgeschlossenheit der Problemstellung und der Systeme, die Beweisbarkeit der Lösungswege und die Unabhängigkeit der Problemlösung von der speziellen Implementierung. Der Theorie liegt aber auch die Annahme zugrunde, daß die durch visuelle Systeme zu bearbeitende Information per se und unabhängig vom System in der Welt existiert und lediglich aufgesammelt oder abgetastet werden muß [8] [9].

Auf dieser Grundlage postulierte Marr den *top-down-Entwurf* technischer visueller Systeme in den Schritten:

1. Aufstellen einer Berechnungstheorie
2. Spezifikation einer formalen Prozedur
3. Implementierung.

Aloimonos [10] bringt dies auf die einfache Formel: „Finde eine *spezielle Lösung* für ein *allgemeines Problem*.“ Danach würde Sehen als allgemeines Problem des Universums existieren wie die Physik der Festkörper. Marr's Theorie war insofern fruchtbar, als sie uns anspornte, die Zusammenhänge zwischen makroskopischen Phänomenen der Welt (räumlich-zeitliche Strukturierung) und ihrer prinzipiellen visuellen Wahrnehmbarkeit zu formulieren. Aber welchen Sinn macht eine Theorie prinzipieller Zusammenhänge, wenn sie sich nicht praktisch umsetzen läßt. Tatsächlich sind alle heute funktionsfähigen Systeme für Computer Vision *bottom-up* entworfen, das heißt sie bieten eine *spezielle Lösung* für ein *spezielles Problem*. Worin liegen die Ursachen:

1. Sehen ist keine generelle Aufgabe: Die natürliche Begrenzung der Ressourcen visueller Systeme läßt nur die Realisierung spezieller Aufgaben zu.
2. Formalisierung der visuellen Wahrnehmung ist nicht allgemein möglich: Weder die wahrgenommene Welt läßt sich formalisieren noch lassen sich wahrnehmende Systeme als abgeschlossene Systeme modellieren.
3. Integration von Wissen ist nur exemplarisch möglich: Dies ist eine Konsequenz der Nichtformalisierbarkeit. Deshalb können wissensbasierte Systeme nur das Bekannte erkennen. Visuelle Wahrnehmung erfolgt aber in einer Welt von Unbekanntem.
4. Sehen bedeutet nicht Verstehen der Welt: Handeln ist der Sinn des Sehens (für biologische Systeme). Wahrnehmung und Handeln sind zwei Seiten einer Medaille und nur in ihrer gegenseitigen Bedingtheit führen sie zu Konzeptbildungen über die Welt.
5. Visuelle Information existiert nicht per se: Ohne visuell wahrnehmende Systeme gibt es auch keine Transformation potentiell visuell wahrnehmbarer Strukturen der Welt in visuelle Information.
6. Visuelle Wahrnehmung ist nicht unabhängig von der Spezifik des Systems: Dies bedeutet, daß visuelle Wahrnehmung ein kontextabhängiger individueller Prozeß der Konstruktion visueller Information ist.

Eine dramatische Konsequenz der Theorie von Marr besteht darin, daß sie die These stützt, visuelle Wahrnehmung würde in der Rekonstruktion der sensorisch abgebildeten Welt bestehen. Hieraus folgt:

1. Um die rekonstruierten Repräsentationen zu interpretieren, ist ein weiterer Prozeß nötig, den man aber nicht formulieren konnte. Das Erkennen ist folglich nicht gelöst.
2. Wahrnehmung erfordert eine explizite Kontrolle (Anwendung des Wissens über das Wahrzunehmende), was zu einer unendlichen konzeptionellen Kette der Architektur führt.
3. Wahrnehmung bedeutet die Invertierung des generellen Abbildungsoperators, ist also als inverses Problem [8] zu verstehen. Es ist nur durch Spezifizierung von Randbedingungen und Einbeziehung eines Maximums an Zusatzwissen möglich, die schlecht gestellte Aufgabe visuelle Wahrnehmung zu regularisieren. Dies ordnet sich zwar in die Grundannahmen der Kognitionswissenschaft ein, läßt aber nicht erkennen, wie einfache biologische Systeme das Problem lösen.

Mit der Besinnung darauf, daß visuell wahrnehmende biologische Systeme nicht nur sensorisch und perzeptuell sondern auch motorisch befähigt sind [11], gelang es Aloimonos et al. zu zeigen, daß die oben geforderte Regularisierung erleichtert oder überflüssig wird [12]. Dieses Paradigma des **Active Vision** blieb zunächst gebunden an Marr's Theorie der visuellen Wahrnehmung. Es erweiterte aber den konzeptionellen Rahmen, indem es einen Beobachter zuließ, der die Kontrolle über die Freiheitsgrade der sensorischen Abtastung der Umwelt besitzt. Die weiteren Entwicklungen stellen die unmittelbaren Voraussetzungen eines verhaltensbasierten Paradigmas der visuellen Wahrnehmung dar. Ihnen liegen folgende Annahmen zugrunde:

1. Animate Vision [13]:

- (a) Unter der Regie eines Blickkontrollsystems wird die totale Komplexität der visuellen Aufgabe reduziert. Präattentive und attentive Phasen der Wahrnehmung sind zu unterscheiden. Blickkontrolle kompensiert Eigenbewegung. Die wahrgenommene Welt ist eine externe Repräsentation.
- (b) Das Implementierungssubstrat der Wahrnehmung ist eine Verkörperlichung der wahrzunehmenden Kategorien. Folglich werden die wahrnehmbaren Kategorien durch die Struktur der Hardware bedingt und umgekehrt.
- (c) Lernen aus Beispielen ist die Voraussetzung, um der Unvorhersagbarkeit der Welt zu begegnen. Dieses Lernen findet auf dem Niveau körperlicher Erfahrung statt und ist kein abstrakter Prozeß.

2. Purposive Vision [14]:

- (a) Ein wahrnehmendes System und dessen Umwelt bilden eine Einheit. Das System ist die Verkörperlichung seiner Beziehungen zu seiner Umwelt. Diese Beziehungen werden erlernt, das heißt, die Systemstrukturen adaptieren sich während des Lernens.
- (b) Diese systemspezifischen Beziehungen definieren die für das System nützliche visuelle Information. Dies bedeutet selektive Wahrnehmung der Umwelt (partielle Rekonstruktion).
- (c) Wahrnehmung ist Teil eines komplexeren Systems, das auch die Fähigkeit zum Handeln umfaßt. Der Sinn der Wahrnehmung ist Handeln. Dies bestimmt die Selektivität der Wahrnehmung.
- (d) Aus dem Prinzip der opportunistischen Selektion visueller

Information folgt auch Verzicht auf überflüssige Repräsentation der Welt, d.h. Minimierung des notwendigen Wissens (**Qualitative Vision**).

Diese Entwicklung bedeutet die Negation einer allgemeinen Sehaufgabe und die Akzeptanz der systemspezifischen Ausprägung visueller Wahrnehmung. Somit lautet das Entwurfsprinzip: „Finde eine *allgemeine Lösung* für ein *spezielles Problem*“.

3. Informationsverarbeitung verhaltens-basierter visueller Systeme

Verhalten ist ein aus der Ethologie entlehnter Begriff. Es ist die grundlegende Fähigkeit biologischer Systeme, um Eignung zum Überleben der Art und Effizienz beim Überleben des Individuums zu sichern. Anders als die Fähigkeit zu Symbolverarbeitung ist die Fähigkeit, Verhalten zu zeigen ein für alle lebenden Organismen gültiges Charakteristikum. Verhalten ist die (beobachtbare) Äußerungsform, welche Kompetenz in der Auseinandersetzung mit der Umwelt voraussetzt. Diese Kompetenz ist Ausdruck der Fähigkeit, Kategorien oder Konzepte bezüglich der Umwelt zu bilden. Visuelle Wahrnehmung erfordert die Kompetenz, räumlich-zeitliche makroskopische Strukturen zu erkennen. Intelligenz als spezielle Kompetenz, Operationen über Kategorien oder Begriffen ausführen zu können, ist nicht erforderlich für visuelle Wahrnehmung. Sie gestattet zwar dem menschlichen visuellen System die Ausprägung besonderer Fähigkeiten. Der größte Teil des vom menschlichen visuellen Systems geleisteten Aufwandes verbindet uns aber stärker mit unseren Vorfahren der Evolution, als er trennt [20]. Dies ist die Fähigkeit, aus der aktiven Auseinandersetzung mit der Umwelt, visuelle (allgemein perzeptorische) und motorische Konzepte zu entwickeln, ohne diese Begriffen zuordnen zu müssen.

Verhalten ist der durch Selbstorganisation erworbene und beobachtbare makroskopische Ordnungszustand biologischer Systeme in ihrer Umwelt. Er setzt das „Erkennen“ der Umwelt und der Beziehungen zu dieser voraus. Dieses Erkennen bedeutet Strukturbildung und Konstruktion einer von der Spezifik und der Zielstellung des Systems subjektiv geprägten Umwelt. Informationsverarbeitung eines zu Wahrnehmung und Handlung befähigten Systems [15] ist kein passiver, perzeptiver sondern ein aktiver Prozeß. Informationsverarbeitung setzt also die aktive Auseinandersetzung mit der Welt voraus. Die hierbei gewonnene Information bedeutet soviel wie den Wert einer erkannten Strukturierung im Kontext der Aufgabe des Beobachters.

Unter der Prämisse der Verhaltensbasiertheit bilden Beobachter und Umwelt eine Einheit. Diese Einheit ist durch folgende Aspekte der Verhaltensbasiertheit charakterisiert:

1. Situiertheit:

Die Umwelt ist äußerer Speicher des Systems, auf den bei Bedarf zugegriffen werden kann. Die Wechselwirkung von System und Umwelt geschieht in konkreten und nicht in (modellierten) abstrakten Situationen. Damit wird diese Wechselwirkung geprägt von Kontinuität, Überraschungen und Vorgeschichte. Wichtig für das System ist das Beherrschen der situationsbezogenen Relationen zur Umwelt und nicht maximales Wissen über die Umwelt. Die Reaktionen haben in angemessener Zeit zu erfolgen.

2. Körperlichkeit:

Die physikalische Welt ist Ursache von Erfahrung und Ab-

straktion. Die Systeme sind sensorisch/aktorisch mit der Umwelt verkoppelt. Aktionen des Systems schließen einen äußeren Regelkreis und sind somit Teil der Dynamik der Umwelt. Konzeptbildung erfolgt durch körperliche Auseinandersetzung. Spezifische Körperlichkeit hat spezifische Wahrnehmung/Handlung zur Folge und umgekehrt.

3. Kompetenz:

Die Kompetenz ist charakterisiert durch die Qualität der Wechselwirkung mit der Welt und bestimmt durch die Dynamik dieser Wechselwirkung. Sie drückt den Ordnungszustand interner Systemparameter aus, der den Ordnungszustand externer Systemparameter (Verhalten) zur Folge hat. Kompetenz erwirbt die Art (bezüglich allgemeiner Kategorien) durch Vererbung oder wird (bezüglich spezifischer Kategorien) individuell erlernt.

4. Emergenz:

Die Emergenz ist die Konsequenz von Situiertheit und Körperlichkeit selbstorganisierender Systeme. Sie drückt den Wechsel der Beziehungen System/Umwelt in einen durch neue Qualitäten gekennzeichneten Zustand aus. Sie ist eine Alternative zur externen Kontrolle eines Optimierungsprozesses. Die durch Emergenz erworbene Kompetenz zeichnet sich durch Robustheit und Fehlertoleranz aus.

4. Probleme des Entwurfes verhaltens-basierter visueller Systeme

Aus dem vorhergehenden Abschnitt wird deutlich, daß der Entwurf verhaltensbasierter visueller Systeme

1. die Integration von Computer Vision und Robotik erfordert,
2. Systemmodularisierung nach *Verhaltensmodulen* darstellt,
3. eine *bottom-up-Synthese* im Sinne eines bootstrap ermöglicht,
4. die Konzeptbildung im vorbegrifflichen Bereich signalnaher Informationsverarbeitung (*frühe visuelle Wahrnehmung*) bedeutet,
5. eine a priori Definition einer *systemimmanenten Zielstellung* erfordert,
6. Repräsentationen mit *vielen inneren Freiheitsgraden* erfordert, die sich organisieren können, wodurch ein Konflikt zwischen dem internen Systemzustand und dem Zustand der Umgebung reduziert wird.

Aus folgenden Disziplinen können Anregungen zur Entwicklung verhaltensbasierter Systeme entnommen werden:

1. Brooks' Schule reaktiver Robotik [16],
2. Synergetik als Lehre der Bildung makroskopischer Strukturen aus der nichtlinearen dynamischen Wechselwirkung von Teilsystemen mit vielen Freiheitsgraden [17],
3. Molekulargenetik [18],
4. Entwicklungspsychologie [19],
5. Kognitive Neurobiologie [20],

6. Theorie selbstüberwacht lernender neuronaler Netze [21].

Eine sehr kondensierte Diskussion verhaltensbasierter visueller Systeme schrieb J. Koenderink [22].

Drei zentrale Probleme sind dem verhaltensbasierten Entwurf visueller Systeme immanent, die sämtlich mit unseren begrenzten Möglichkeiten zur Modellierung von Repräsentationen im Zusammenhang stehen.

1. Erweiterung der Signaltheorie:

Die Signaltheorie erfuhr in den letzten Jahren eine wesentliche Erweiterung durch die Einführung der Klasse selbstähnlicher Waveletfunktionen [23]. Es ist möglich, die Freiheitsgrade der Wavelets mit den Invarianten der Lie-Algebra in Verbindung zu bringen. Diese Klasse von Funktionen dürfte eine große Rolle spielen als universelles Basissystem zur Projektion visueller Signale in den ersten Schichten neuronaler Konstruktion visueller Strukturinformation [24]. Die mit der lokalen Hilberttransformation verbundene Möglichkeit der Behandlung lokaler spektraler Konzepte [25] ermöglicht außerdem die Projektion von Signalfunktionen auf die Symmetriekonzepte der komplexen Ebene. Hieraus entstehen Invarianzeigenschaften begrenzten Umfanges. Es wird erforderlich sein, Einbettungen reeller Signale in höherdimensionale Räume zu realisieren, um den Zugang zur Invarianz mit geometrischem Bezug besser modellieren zu können. Einen Zugang hierzu bietet die Geometrische Algebra [26].

2. Entwicklung der Neuroinformatik:

Neuronale Strukturen bilden Träger von Repräsentationen mit vielen Freiheitsgraden, die im Sinne der Synergetik zur Emergenz von Konzepten führen können. Das neuronale Berechnungsparadigma wird zur Zeit fast ausschließlich im Sinne der Computational Theory of Mind eingesetzt. Es ist entsprechend den Charakteristika verhaltensbasierter Systeme zu erweitern. Mit den RBF-Netzen [27] wurde eine interessante Architektur mit gutem Generalisierungsverhalten vorgeschlagen, deren Topologie sich an die Spezifik der Problemstellung anpassen kann [28]. RBF-Netze schlagen eine Brücke zur Wavelet-Repräsentation. Verhaltensbasierte Konzepte entsprechen aber Multiagentenkonzepten, wo jeder Agent wahrscheinlich nicht nur ein Netz erfordert. Vielmehr ist die Kooperation hierarchisch und heterarchisch verbundener Netzarchitekturen zu entwickeln. Außerdem sind die Konzepte rückgekoppelter Netze zu erweitern.

3. Entwicklung von Lernstrategien:

Die Lernkonzepte für neuronale Netze sind noch nicht weit genug entwickelt, um echtzeitfähiges Lernen zu ermöglichen. Genetische Algorithmen sind vielleicht ungeeignet für das ontogenetische Erlernen von Konzepten. Situationsbezogene selektive Rückkopplungen auf das Lernverhalten von Agenten [29] sind zu entwickeln.

Weitere Defizite sind u.a. bei der Konzipierung von Invariantendefinitionen und bei der Kontrolle verhaltensbasierter Systeme auf dem Niveau diskreter Ereignis-Systeme festzustellen.

Die schrittweise Entwicklung verhaltensbasierter visueller Systeme kann als erfolgversprechender Weg betrachtet werden, robuste, adaptive und echtzeitfähige technische visuelle Wahrnehmung zu entwickeln. Damit kann gleichzeitig das Tor geöffnet werden für Realweltbedingungen und autonome Robotik. Die Forschung wird den experimentellen Umgang mit

Komplettsystemen erforderlich machen, die Wahrnehmungs-Handlungszyklen realisieren. Gleichzeitig muß die theoretische Basis für Architekturkonzepte erweitert werden. Es muß verstanden werden, was eine allgemeine Lösung für ein spezielles Problem ausmacht.

5. Literatur

- [1] Mühlenbein, E.: Grenzen der Künstlichen Intelligenz – ein Plädoyer für Bescheidenheit, *Künstliche Intelligenz* Heft 1 (1995) 46–51
- [2] Dialog zu M. J. Tarr, M. J. Black: A computational and evolutionary perspective on the role of representation in vision, *CVGIP: Image Understanding* 60 (1994) 1, 65–118
- [3] Von Seelen, W., et al.: Visual information processing in neural architecture, in: *Mustererkennung 1994* (Hrsg.: W. Kropatsch, H. Bischof), Springer Verlag, 1994, 36–57
- [4] Von der Malsburg, C.: Considerations for a visual architecture, in: *Advanced Neural Computers* (Ed.: R. Eckmüller), Elsevier Science Publ., 1990, 303–312
- [5] Japan's Real World Computing Program (RWC), *Nachrichten Neuronale Netze*, Fachgruppe 0.0.2 der GI, 2/93, Oktober 93, 2–12
- [6] M. Arbib: The brain is a metaphor for sixth generation computing, in: *Computing with Biological Metaphors* (Ed.: R. Paton), Chapman & Hall, London, 1994, 105–123
- [7] Marr, D.: *Vision*, W.H. Freeman, San Francisco, 1982
- [8] Sommer, G.: Signal theory and visual systems, in: *Proc. MEASUREMENT'92*, Smolenice, 1992, 31–46
- [9] Sommer, G.: *Architektur und Funktion visueller Systeme*, Skript KIFS'94, Göttingen, 1994
- [10] Aloimonos, Y.: Active vision revisited, in: *Active Perception* (Ed. Y. Aloimonos), Lawrence Erlbaum, Hillsdale, 1993, 1–18
- [11] Bajcsy, R.: Active perception, *Proc. IEEE* 76 (1988) 8, 996–1005
- [12] Aloimonos, Y., Weiss, I., Bandopadhyay, A.: Active vision, *Int. J. Comp. Vision* 7 (1988) 333–356
- [13] Ballard, D. H.: Animate vision, *Artificial Intelligence* 48 (1991) 57–86
- [14] Aloimonos, Y.: Purposive and qualitative active vision, in: *Proc. Image Understanding Workshop*, 1990, 816–828
- [15] Küppers, B.O.: *Der Ursprung biologischer Information*, Serie Piper Bd. 1313, Piper, München, 1990
- [16] Brooks, R.A.: Intelligence without representation, *Artificial Intelligence* 47 (1991) 139–159
- [17] Haken, H.: *Entwicklungslinien der Synergetik*, *Naturwissenschaften* 75 (1988) 163–172, 225–234
- [18] Schuster, P.: *Molekulare Evolution und Ursprung des Lebens*, in: *Ordnung aus dem Chaos* (Hrsg. B.O. Küppers), Serie Piper Bd. 743, Piper, München, 1991, 49–84
- [19] Furth, H.G.: *Intelligenz und Erkennen*, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, Bd. 160, Suhrkamp, Frankfurt, 1976
- [20] Roth, G.: *Das Gehirn und seine Wirklichkeit*, Suhrkamp, Frankfurt, 1994
- [21] Ritter, H., T. Martinetz, K. Schulten: *Neuronale Netze*, Addison-Verlag, Bonn, 1991
- [22] Koenderink, J. I.: Wechsler's vision, *Ecological Psychology* 4 (1992) 121–128
- [23] Daubechies, I.: *Wavelets*, CBMS-NSF Ser. Appl. Math., SIAM Publ., Philadelphia, 1992
- [24] Michaelis, M.: *Low Level Image Processing Using Steerable Filters*, Diss. Universität Kiel, Techn. Fak., 1995
- [25] Hauske, G., Zetzsche C.: Die Bedeutung des analytischen Signals in Bildanalyse und Bildcodierung, *Frequenz* 44 (1990) 68–73
- [26] Hestenes, D., G. Sobczyk: *Clifford Algebra to Geometric Calculus*, D. Reidel Publishing, 1984
- [27] Poggio, T., F. Gerosi: Networks for approximation and learning, *Proc. IEEE* 78 (1990) 1481–1497
- [28] Bruske, J., G. Sommer: Dynamic cell structure learns perfectly topology preserving map, *Neural Computation* 7 (1995) 845–864
- [29] Manderick, B.: The importance of selectionist systems for cognition, in: *Computing with Biological Metaphors* (Ed. R. Paton), Chapman & Hall, London, 1995, 373–392