

Analyse, Modellierung und Simulation der visuell-räumlichen Kognition bei der Mensch-Maschine-Interaktion

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Carsten Winkelholz
aus Bruchsal, Baden-Württemberg

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher M. Schlick

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Holger Luczak

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting

Tag der mündlichen Prüfung: 14. August 2006

Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung

Band 82

Carsten Winkelholz

**Analyse, Modellierung und Simulation
der visuell-räumlichen Kognition
bei der Mensch-Maschine-Interaktion**

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5526-5

ISBN-13: 978-3-8322-5526-8

ISSN 1434-8519

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für Phung-Gia und Celine

VORWORT

In der heutigen Zeit liegen die Schwierigkeiten bei der Visualisierung von Massendaten in der Regel nicht in der technischen Darstellung, sondern in der inhaltlichen Aufbereitung für den Benutzer. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei, dass die visuelle Informationsverarbeitung des Menschen zwar sehr leistungsfähig, die Fähigkeit, räumliche Relationen verschiedener graphischer Elemente informatorisch effizient miteinander zu verknüpfen, jedoch sehr begrenzt ist. Daher können neue wissenschaftliche Erkenntnisse über die Funktionsweise der kognitiven Verarbeitung visuell-räumlicher Informationen dazu beitragen, innovative Visualisierungsmethoden zu entwickeln, welche die Systembenutzer in ihrer Entscheidungsfindung bezüglich komplexer Sachverhalte wirksam unterstützen.

Die vorliegende Arbeit entwickelt neue Methoden zur Analyse, Modellierung und Simulation der visuell-räumlichen Kognition des Menschen. Zentraler Bestandteil ist die Kodierung der räumlichen Lage von graphischen Objekten in verschiedenen Referenzsystemen. Die zunächst qualitativ formulierte Theorie wird vom Autor anhand empirischer Untersuchungen kritisch hinterfragt. Eine detaillierte statistische Analyse erlaubt darüber hinaus eine genaue Definition der beim visuellen „Abtasten“ von Szenen dynamisch im Gehirn entstehenden Referenzsysteme. Hierzu wird ein vom Autor selbst entwickeltes Verfahren zur Analyse von Interaktionssequenzen basierend auf der Parametrisierung stochastischer Automaten verwendet, welches sehr leistungsfähig ist und damit auch für andere ingenieurwissenschaftliche Bereiche eine hohe Relevanz aufweist. Darüber hinaus gelingt mittels eines Bayes-Ansatzes die Integration von skalaren Dimensionen der Referenzsysteme in die symbolische ACT-R-Architektur der menschlichen Informationsverarbeitung. Die Simulationsergebnisse des auf Basis der ACT-R-Architektur entwickelten kognitiven Modells werden quantitativ mit den Experimentaldaten verglichen. Die geringen Differenzen zwischen Modellprognosen und empirischen Daten in Verbindung mit der Integration von bisher in der Literatur isoliert betrachteten Effekten in einen Rahmen belegen die hohe Qualität des wissenschaftlichen Ansatzes. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Erforschung modellgestützter Visualisierungsmethoden geleistet.

Christopher M. Schlick

1	EINLEITUNG	1
1.1	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.2	VORGEHENSWEISE.....	3
1.3	NOMENKLATUR	5
2	GRUNDLAGEN	7
2.1	VISUELL-RÄUMLICHE KOGNITION.....	7
2.1.1	<i>Visuelle Wahrnehmung – visuelle Vorstellung</i>	7
2.1.2	<i>Referenzsysteme</i>	9
2.1.3	<i>Varianzen bei der Kodierung räumlicher Informationen</i>	10
2.2	ARCHITEKTUREN MENSCHLICHER KOGNITION	13
2.2.1	<i>Soar</i>	15
2.2.2	<i>EPIC</i>	17
2.2.3	<i>ACT-R</i>	18
2.3	ACT-R IM DETAIL.....	19
2.3.1	<i>Allgemeine Architektur</i>	19
2.3.2	<i>Symbolische Ebene</i>	21
2.3.3	<i>Subsymbolische Ebene</i>	23
2.3.3.1	<i>Gedächtnis für Fakten</i>	23
2.3.3.2	<i>Auswahl der Erzeugungsregeln</i>	27
2.3.4	<i>Visuelle Wahrnehmung und Kognition</i>	28
2.3.5	<i>Gedächtnis für räumliche Stimuli in ACT-R</i>	30
3	METHODIK ZUR ANALYSE KOGNITIVER PROZESSE.....	35
3.1	MENSCH-MASCHINE-INTERAKTION ALS EREIGNISDISKRETER PROZESS	36
3.1.1	<i>Stochastische Prozesse</i>	37
3.1.2	<i>Diskrete Stochastische Prozesse</i>	37
3.1.3	<i>Gesamtsystem Mensch-Maschine</i>	39
3.1.4	<i>Zustandswechsel in ACT-R</i>	41
3.1.5	<i>Endliche Menge von Aktionen und Zuständen</i>	44
3.1.6	<i>Fazit</i>	45
3.2	STOCHASTISCHE AUTOMATEN.....	46
3.2.1	<i>Stochastic Finite Automaton (SFA)</i>	47
3.2.2	<i>Probabilistic Finite Automaton (PFA)</i>	48
3.2.3	<i>Probabilistic Suffix Automaton (PSA)</i>	49
3.2.4	<i>PFA versus L-PSA</i>	50
3.2.5	<i>PFA versus SFA</i>	53
3.2.6	<i>Abschließender Vergleich</i>	58
3.3	PARAMETRISIERUNG STOCHASTISCHER AUTOMATEN.....	59

3.3.1	<i>Bewertung von Schätzalgorithmen</i>	59
3.3.2	<i>SFA: EM-Algorithmus</i>	61
3.3.3	<i>PSA: Markovketten Variabler Länge (MKVL)</i>	64
3.3.3.1	Prediction Suffix Tree (PST).....	64
3.3.3.2	Schätzalgorithmus.....	66
3.3.3.3	Eigenschaften des Schätzalgorithmus von RON et al.....	69
3.3.3.4	Eigenschaften des Schätzalgorithmus von BÜHLMANN & WYNER.....	70
3.3.3.5	Eigenschaften der Schätzalgorithmen in Bezug auf die Vorhersagegüte.....	70
3.3.3.6	Überführung PST in PSA.....	73
3.3.4	<i>PSA: Statistische Markovketten Variabler Länge (SMKVL)</i>	73
3.3.4.1	Algorithmus zur Parametrisierung.....	74
3.3.4.2	Vergleich MKVL und SMKVL.....	76
3.4	ANALYSE DISKRETER ZEITREIHEN MITTELS MARKOVKETTEN VARIABLER LÄNGE.....	82
3.4.1	<i>Verfahren zur Validierung semantischer Regeln</i>	83
3.4.2	<i>Direkte Interpretation mittels SMKVL</i>	87
3.4.3	<i>Diskussion</i>	89
4	EMPIRISCHE UNTERSUCHUNGEN	91
4.1	ZIELE UND METHODIK.....	92
4.1.1	<i>Versuchspersonen und Apparatur für Experiment 1 und 2</i>	94
4.2	EXPERIMENT 1.....	94
4.2.1	<i>Stimuli</i>	94
4.2.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	95
4.2.3	<i>Ergebnisse</i>	96
4.2.3.1	Fehleranzahl.....	96
4.2.3.2	Abhängigkeit von der Position.....	97
4.2.3.3	Abhängigkeit von der Versuchswiederholung.....	100
4.2.4	<i>Diskussion</i>	102
4.3	EXPERIMENT 2.....	102
4.3.1	<i>Stimuli</i>	103
4.3.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	105
4.3.3	<i>Ergebnisse</i>	106
4.3.3.1	Anzahl der korrekt wiedergegebenen Sequenzen.....	106
4.3.3.2	Fehler in Abhängigkeit der Position.....	107
4.3.4	<i>Diskussion</i>	109
4.4	DETAILANALYSE DES BENUTZERVERHALTENS.....	110
4.4.1	<i>Ergebnisse Experiment 1</i>	111
4.4.2	<i>Ergebnisse Trainingsdurchläufe</i>	112
4.4.3	<i>Klassifizierung des Fehlverhaltens</i>	113

4.5	ANALYSE DER BLICKBEWEGUNGEN.....	114
4.5.1	<i>Anzahl der Fixationen</i>	115
4.5.1.1	Ergebnisse.....	115
4.5.1.2	Diskussion.....	116
4.5.2	<i>Mittlere Sakkadenweite</i>	117
4.5.2.1	Ergebnisse.....	117
4.5.2.2	Diskussion.....	118
4.5.3	<i>Blickbewegung als diskrete Zeitreihe</i>	119
4.5.3.1	Datenaufbereitung.....	119
4.5.3.2	Ergebnisse und Diskussion.....	120
4.6	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DAS SIMULATIONSMODELL.....	124
5	THEORIEENTWICKLUNG	127
5.1	REFERENZSYSTEME.....	127
5.2	VARIANZEN IN DEN ATTRIBUTEN RÄUMLICHER GEDÄCHTNISEINHEITEN.....	129
5.2.1	<i>Repräsentation räumlicher Positionen</i>	130
5.2.2	<i>Rauschen beim Rekonstruieren von Objektpositionen</i>	132
5.2.3	<i>Rauschen bei der Erzeugung räumlicher Gedächtniseinheiten</i>	134
5.2.4	<i>Auswirkung skalarer Attribute auf das zentrale Erzeugungssystem</i>	135
5.2.4.1	Festlegen der Ähnlichkeitsparameter.....	136
5.2.4.2	Ähnlichkeiten in den Assoziationen.....	137
5.2.4.3	Ähnlichkeiten in der Basisaktivierung.....	138
5.3	INDIZIERTE ORTE IM SICHTFELD.....	140
5.4	BEVORZUGTE GEGENÜBER ZUFÄLLIGE SUCHRICHTUNG.....	142
5.5	ERWEITERTE SCHNITTSTELLE DES VISUELLEN MODULS.....	144
5.6	COMPETITIVE CHUNKING.....	146
5.6.1	<i>Überblick</i>	146
5.6.2	<i>Subsymbolische Integration</i>	148
5.6.2.1	Grundidee.....	148
5.6.2.2	Schätzen der subsymbolischen Parameter.....	150
5.7	DISKUSSION.....	154
5.7.1	<i>Bewertung der realisierten Konzepte</i>	154
5.7.2	<i>Weitere relevante Aspekte</i>	156
5.7.2.1	Symmetrie.....	156
5.7.2.2	Fixation und Aufmerksamkeit.....	157
5.7.3	<i>Schlussfolgerungen</i>	157
6	SIMULATION	161
6.1	SIMULATIONSMODELL FÜR DIE EXPERIMENTE.....	161

6.1.1	<i>Erzeugungsregeln</i>	161
6.1.2	<i>Vergleich Simulation – Experiment</i>	169
6.1.2.1	Anzahl korrekt wiedergegebener Sequenzen.....	169
6.1.2.2	Abhängigkeit von der Position in der Sequenz.....	174
6.1.2.3	Abhängigkeit von der Versuchswiederholung.....	179
6.1.3	<i>Schlussfolgerungen</i>	180
6.2	SIMULATIONSMODELL FÜR EINE RÄUMLICHE ZUORDNUNGSAUFGABE	182
6.2.1	<i>Motivation</i>	182
6.2.2	<i>Aufgabe und Stimuli</i>	184
6.2.3	<i>Erzeugungsregeln</i>	185
6.2.4	<i>Ergebnisse</i>	188
6.2.5	<i>Schlussfolgerungen</i>	192
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	195
8	LITERATUR	205
9	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	215
10	ANHANG	217
10.1	BAYES INFERENZSTATISTIK	217
10.2	KORRELATIONSKOEFFIZIENT FÜR DIE MODELLBEWERTUNG	223
10.3	EXAKTER FISCHERTEST FÜR MULTINOMINALVERTEILUNG.....	224
10.4	GRAFISCHER EDITOR FÜR ERZEUGUNGSREGELN	225
10.5	ERZEUGUNGSREGELN FÜR DAS SIMULATIONSMODELL DER EXPERIMENTE.....	227
10.6	ERZEUGUNGSREGELN FÜR DAS SIMULATIONSMODELL DER ZUORDNUNGSAUFGABE	229