

Fachberichte Messen · Steuern · Regeln

Herausgegeben von M. Syrbe und M. Thoma

20

H.-J. Wünsche

Bewegungssteuerung durch Rechnersehen

Ein Verfahren zur Erfassung und Steuerung
räumlicher Bewegungsvorgänge in Echtzeit



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo 1988

Wissenschaftlicher Beirat:

G. Eifert, D. Ernst, E. D. Gilles, E. Kollmann, B. Will

Autor:

Dr.-Ing. Hans-Joachim Wünsche, M. Sc.
Ahrain 11
8165 Fischbachau

ISBN-13:978-3-540-50140-4 e-ISBN-13:978-3-642-83562-9

DOI: 10.1007/978-3-642-83562-9

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek
Wünsche, Hans-Joachim:

Bewegungssteuerung durch Rechnersehen :

e. Verfahren zur Erfassung u. Steuerung räuml. Bewegungsvorgänge in Echtzeit / H.-J. Wünsche.

Berlin ; Heidelberg ; New York ; London ; Paris ; Tokyo : Springer, 1988

(Fachberichte Messen, Steuern, Regeln ; 20)

ISBN-13:978-3-540-50140-4

NE: GT

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Vorwort

Während nahezu alle höheren Lebewesen Sichtsysteme zur Erfassung von Bewegungsvorgängen besitzen, steckt die Entwicklung entsprechender technischer Sichtsysteme noch in den Anfängen. Moderne Roboter, oder Transportsysteme wie z.B. Land- und Luftfahrzeuge, sind noch weitgehend blind; es existieren praktisch keine Sichtsysteme, die diesen technischen "Lebewesen" erlauben würden, eine natürliche Umwelt visuell zu erfassen, und ihre Bewegungen in dieser Umwelt kontrolliert und zielgerichtet zu steuern.

Allerdings konnten auf dem Gebiet der "digitalen Bildverarbeitung" schon wesentliche Entwicklungserfolge erzielt werden, unter Verwendung von Videokameras als "Augen" und Computern als "Gehirn": es existieren heute Systeme zur Erfassung klar strukturierter industrieller Szenen, die Einzelbilder oder langsame Video-Bildfolgen im Minuten- oder gar Sekundentakt auswerten können. Aber die Erkennung von Bewegungen in Bildfolgen in einer Geschwindigkeit, die z.B. Steuerungsaufgaben wie das Führen eines Kraftfahrzeuges in einer natürlichen Umgebung erlauben würde, ist mit diesen Systemen bislang nicht möglich.

Dieser Aufgabenstellung ist das vorliegende Buch gewidmet. Es wird ein Verfahren vorgestellt, das die Erfassung von Bewegungsvorgängen in kontinuierlichen (Video-)Bildfolgen in "Echtzeit" erlaubt; unter Echtzeit werden hierbei Verarbeitungsgeschwindigkeiten im Bereich menschlicher Reaktionszeiten verstanden. Damit wird eine Weiterverarbeitung der gewonnenen Bewegungsinformation ermöglicht, z.B. zur Lösung der oben erwähnten Steuerungsaufgaben.

Im Gegensatz zu den bisher bekannten Verfahren der digitalen (Einzel-) Bildverarbeitung wird bei diesem Verfahren nicht versucht, jedes Bild einer Bildfolge auszuwerten und zu interpretieren; vielmehr werden rechnerinterne Raum/Zeit Modelle durch eine rekursive Filterung schneller Video-Bildfolgen mit der beobachteten, bewegten Szene in Einklang gebracht.

Diese Raum/Zeit Modelle bestehen im wesentlichen aus geometrischen 3D-Modellen von Objekten der Szene, wie sie aus der modernen Computergrafik bekannt sind, und dynamischen Modellen der in der 3D-Szene auftretenden Bewegungen, wie sie in der modernen Regelungstechnik Anwendung finden. Da-

mit können über die bekannte Abbildungsperspektive "Modellbilder" konstruiert werden; die eintreffenden Videobilder werden mit diesen Modellbildern verglichen, wodurch über eine Rückkopplung der Differenzen eine adaptive Korrektur der Modellvorstellungen ermöglicht wird. Hierzu genügen wenige Merkmale der Szene, deren Position von Bild zu Bild relativ genau vorher-sagbar ist. Daher reduziert sich die Aufgabe der Bildverarbeitung auf die Verfolgung weniger markanter Merkmale in kleinen Suchfenstern; ein Vor-gang, der zudem gut parallelisierbar ist.

Als Anwendungsbeispiel wird ein druckluftgetriebenes Luftkissenfahrzeug vorgestellt, das in einer technischen 3D-Welt reibungsfrei navigiert. Es verfolgt dabei das Ziel, an ein passives Objekt der Szene anzukoppeln. Die dazu notwendige Information stammt aus den Bildfolgen einer im Fahrzeug eingebauten Videokamera.

In einer Initialisierungsphase wird zunächst durch eine 3D-Objektsuche und -erkennung die richtige Modellvorstellung aus einer Modelldatenbank ausge-wählt, und eine erste Standortbestimmung durchgeführt. In der dann folgen-den Echtzeitphase werden, mittels eines Multiprozessorsystems zur Bildver-arbeitung, nur wenige Merkmale der Szenenobjekte verfolgt. Durch ein neu-artiges Merkmalselektionsverfahren wird dabei ständig die zur Erfassung der Bewegung bestgeeignete Merkmalkombination unter allen gerade nicht verdeckten Merkmalen gefunden.

Obwohl die Leistung der verwendeten Rechner relativ gering ist (fünf INTEL 8085 Prozessoren für die Bildverarbeitung und eine VAX 750 als Leitrech-ner), gelingt die Erfassung und Steuerung der Bewegung mit einer Zyklus-zeit von 0.13 Sekunden.

Mögliche Anwendungen sind nicht nur bei der optischen Objekterkennung und -verfolgung zu sehen, sondern z.B. auch in der Automatisierungstechnik bei der Entwicklung sehender, mobiler Roboterfahrzeuge und Transportsysteme.

Das Buch richtet sich einerseits an Forscher oder Entwickler, die sich mit dem Gebiet technischer Sichtsysteme beschäftigen; darüberhinaus ist der vorgestellte Ansatz aber nicht nur übertragbar auf die Verarbeitung anderer Sensorsignale, sondern könnte auch Grundstein für Aufgaben sein, mit denen man sich z.B. auf dem Gebiet der "Künstlichen Intelligenz" welt-weit beschäftigt: Mit der technischen Modellierung menschlichen Wissens sowie menschlicher Denkvorgänge und Intelligenz.

Der Aufbau des Buches kommt dieser Vielschichtigkeit des möglichen Leserkreises entgegen. Dabei wurde jedoch versucht, eine anschauliche, ingenieurhafte Darstellung zu erreichen. Zum Verständnis genügen - bis auf wenige Teilabschnitte - die Grundkenntnisse eines naturwissenschaftlichen Studiums sowie Kenntnisse der modernen Matrixalgebra. Zur Umsetzung des Verfahrens auf ähnliche Problemstellungen sind allerdings Kenntnisse der Kalman Filter Theorie von Vorteil.

Nach dem ersten Kapitel, in dem neben einer Einführung eine grobe Übersicht über den Stand der Technik gegeben wird, folgt in Kapitel 2 eine relativ allgemein gehaltene Beschreibung des Verfahrens. Dieses Kapitel gibt in anschaulicher Weise einen Überblick über das Verfahren, ohne auf Details der Realisierung einzugehen. Im dritten Kapitel, dem Hauptteil des Buches, wird das genaue Vorgehen anhand des erwähnten Anwendungsbeispiels detailliert demonstriert. Dabei werden nicht nur die Theorie des Verfahrens, sondern auch viele, für die Praxis bedeutende, numerische Besonderheiten eingehend beleuchtet. Schließlich wird im Anhang u.a. das für das Anwendungsbeispiel realisierte Programmsystem beschrieben.

Die diesem Buch zugrundeliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik der Universität der Bundeswehr München, und ist dort unter dem Titel "Erfassung und Steuerung von Bewegungen durch Rechnersehen" als Dissertation erschienen. Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. E.D. Dickmanns, der die Arbeit nicht nur angeregt, sondern auch großzügig unterstützt und gefördert hat. Wertvolle Beiträge zu dieser Arbeit leisteten die Mitarbeiter der Institutswerkstatt mit dem Aufbau der Luftkissenfahrzeug-Versuchsanlage. Herrn Prof. Dr.rer.nat. V. Graefe, meinen Kollegen sowie vielen Studenten danke ich für die Unterstützung an vielen Punkten dieser Arbeit. Herzlich danken möchte ich auch Frau Gabler sowie Frl. Klünsch, die das Skriptum mit viel Einsatz in eine leserliche Form gebracht haben.

Fischbachau, im März 1988

H.-J. Wünsche

Inhaltsverzeichnis

<u>Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen</u>	XI
--	----

1. Einleitung

1.1 Einführung	1
1.2 Ansätze zur Erfassung und Steuerung von Bewegungen durch sehende Rechner: Stand der Technik	4
1.2.1 Erfassung von Bewegungen durch Verarbeitung weniger Einzelbilder: differenzierende Verfahren	5
1.2.2 Rekursive Schätzung der Bewegung aus Bildfolgen unbegrenzter Dauer: integrierende Verfahren	7
1.2.3 Steuerung von Bewegungen mobiler Roboter und von Fahrzeugen durch visuelle Information	9
1.3 Aufbau der Arbeit	12

2. Der systemdynamische Ansatz zur Erfassung und Steuerung von Bewegungen durch Rechnersehen

2.1 Übersicht: Orientierungsphase und Echtzeitphase	15
2.1.1 Die Orientierungsphase	15
2.1.2 Die Echtzeitphase	17
2.2 Das Bildverarbeitungssystem zur Merkmalextraktion	20
2.3 Das dynamische Modell	22
2.4 Das geometrische Abbildungsmodell	26
2.5 Korrektur der Modellvorstellungen durch rekursive Bilddatenfilterung	28
2.6 Erkennung von Störungen und Verdeckungen	30
2.7 Merkmalselektion	32
2.8 Bewegungssteuerung durch Rechnersehen	34

<u>3. Automatische Steuerung eines Luftkissenfahrzeugs in drei Bewegungsfreiheitsgraden durch Auswertung visueller Information</u>	35
3.1 Die Aufgabenstellung	38
3.2 Die Luftkissenfahrzeug-Versuchsanlage	40
3.2.1 Das Luftkissenfahrzeug	41
3.2.2 Die Antennenanlagen zur Positionsbestimmung	42
3.2.3 Das dynamische Modell der Fahrzeugbewegung in geodätischen Koordinaten	44
3.2.4 Das Laufkatzensystem	49
3.3 Missionsablauf	52
3.4 Merkmalextraktion	54
3.4.1 Verfolgung vertikaler Stäbe	55
3.4.2 Verfolgung von Ecken	55
3.4.3 Bestimmung maximal zulässiger Relativgeschwindigkeiten	57
3.5 Echtzeitphase: Erfassung und Steuerung der Luftkissenfahrzeugbewegung durch Rechnersehen	59
3.5.1 Das dynamische Modell zur Bewegungsprädiktion	60
3.5.2 Das geometrische Abbildungsmodell	65
3.5.2.1 Das geometrische Modell der Szene	66
3.5.2.2 Die perspektivischen Abbildungsgesetze	67
3.5.2.3 Vereinfachte Abbildungsgleichungen und Fehlerabschätzung	70
3.5.3 Korrektur der Modellvorstellungen durch visuelle Information	73
3.5.3.1 Der erweiterte vollständige Beobachter	75
3.5.3.2 Kalman Filter Rekursion	76
3.5.3.3 Gauß-Markov-Schätzung mit quasi-stationärer Nachfilterung	78
3.5.3.4 Kalman Filter mit sequentieller Innovation	83
3.5.3.5 Kalman Filter mit UDU^T -faktorisierter Kovarianzmatrix	84

3.5.4	Situationsgerechte Reaktion auf optische Störungen ..	88
3.5.4.1	Erste Datenfilterung und Störungserkennung durch Faktenwissen	89
3.5.4.2	Störungserkennung anhand von vertrauens- behafteten Bewegungsanalysen	90
3.5.4.3	Die untere Entscheidungsebene: erfahrungs- basierte Reaktionen auf optische Störungen	92
3.5.4.4	Die obere Entscheidungsebene	94
3.5.5	Merkmalselektion	95
3.5.5.1	Sichtbarkeitsanalyse	96
3.5.5.2	Erkennbarkeitsanalyse	97
3.5.5.3	Vollständige Merkmalselektion	98
3.5.5.4	Sequentielle Merkmalselektion	102
3.5.5.5	Merkmalselektion während einer typischen Mission	105
3.5.5.6	Wahl und Skalierung der Zustandsgrößen	111
3.5.6	Zeitlicher Programmablauf, Rechen- und Totzeiten	113
3.5.7	Dreipunktregler zur Bewegungssteuerung	116
3.5.7.1	Dreipunktregler zur sicheren Bahnregelung	119
3.5.7.2	Störgrößenadaptiver Dreipunktregler mit Berücksichtigung von Totzeiten	121
3.6	Orientierungs- und Initialisierungsphase	125
3.6.1	Kamerakalibrierung	125
3.6.2	3D-Objekterkennung	128
3.6.2.1	Suche nach Merkmalen und Objekthypothesen	130
3.6.2.2	Erste Relativlageschätzung und Nachitera- tion	133
3.6.2.3	Verifikation der Objekterkennung	135
3.6.2.4	Diskussion	137
3.7	Resultate und Diskussion	138
3.7.1	Verlauf der Bewegungszustandsgrößen für eine typische Mission	140
3.7.2	Größere optische Störungen	143
4.	Zusammenfassung	147

<u>5. Literatur</u>	151
<u>Anhang</u>	161
A.1 Beschleunigungskräfte und -momente	161
A.2 Berechnung des diskreten Zustandsraummodells	162
A.2a Diskretes Modell der Fahrzeugbewegung in geodätischen Koordinaten	163
A.2b Diskretes Modell der Laufkatzenbewegung	164
A.2c Diskretes Modell der Fahrzeugbewegung in andock- partnerfesten Polarkoordinaten	164
A.3 Die Abbildungsgleichungen und deren Jacobische Matrix	167
A.4 Algorithmen zur vektoriiellen und sequentiellen Innovation ...	171
A.5 Kovarianzen der Schätzfehler des Gauß-Markov Schätzwertes ...	172
A.6 Parameter der Dreipunktregler	173
A.7 Bewertungszahl für die Objekterkennung	174
A.8 Zur Relativlageverifikation	175
A.9 Struktur des Echtzeit-Programmsystems, ausgewählte Quellcodes	177
<u>Sachverzeichnis</u>	197

Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Skalare

a	Motorkonstante der Laufkatze
a_α, a_x, a_y	Beschleunigungen im körperfesten Koordinatensystem
b	Breite einer rechteckigen Fläche (Objekterkennung)
d	Tiefenstaffelung von Objektmerkmalen
D_i	Auf die Sichtachse projizierte Entfernung zwischen P_i und F
f	Brennweite
f_ψ, \dots, f_{vt}	Filterfaktoren
F	Brennpunkt
h	Höhe einer rechteckigen Fläche (Objekterkennung)
J	Güteindex zur Merkmalselektion
K_y, K_z	Skalierungsfaktoren (Pixel/mm auf der Bildebene der Kamera)
$m(k), m_k$	Zahl der zum Zeitpunkt t_k gültigen Meßwerte (Gl.(3.75))
n	Zahl der Bewegungszustandsgrößen
p	Zahl der zu verfolgenden Merkmale
q	Anzahl der zu überprüfenden Merkmalkombinationen
r	Schrägabstand (siehe Bild 3.12)
s	Zahl der erkennbaren Merkmale
s_α, s_x, s_y	Störbeschleunigungen
$s_{1,2}, s_{1,2}^*$	Wert der Schaltfunktion
$S_{1,2}, S_{1,2}^*$	Schaltkurven
t	Zeit
T	Abtastzeit (in dieser Arbeit 0.133 Sekunden); bei Vektoren hochgestellt: transponierter Vektor
u_α, u_x, u_y	durch Dreipunktregler berechnete Steuergrößen
v	Kantenverhältnis eines Rechtecks bei der Objekterkennung
v_r, v_t	radiale bzw. tangentielle Geschwindigkeit
v_x, v_y	Geschwindigkeiten im kartesischen Koordinatensystem in Richtung von X_g bzw. Y_g
x_F, z_F	Koordinaten des Kamerabrennpunktes bzgl. der Nickachse

x_K, z_K	Koor. des Kameranickpunktes bzgl. des Fahrzeugschwerpunktes
y_i	i-tes Element des Meßvektors y
y_{co}, z_{co}	Koordinaten der Bildmitte
y_{ci}, z_{ci}	Bildkoordinaten des Szenenmerkmals P_i
$z_\alpha, z_r, z_t, z_x, z_y, z_\theta$	Störgrößen

Vektoren

c_i	i-te Zeile der Jacobimatrix C
f	Vektor von Funktionen, z.B. bei Differentialgleichungssystemen
g	Vektor von Funktionen, z.B. bei Abbildungsgleichungen
k_c	Vektor der Kamerakoordinaten
k_ψ, k_r, k_v	(Kalman) Filter Vektoren
p	Vektor von Parametern
p_i	Koordinaten des Merkmals P_i
u	Vektor der Steuergrößen
v	Vektor der "Systemstörungen" (Modellierungsfehler, tatsächliche Störungen auf das Fahrzeug)
w	Vektor der Meßfehler
x	Vektor der Bewegungszustandsgrößen
x_R	reduzierter Zustandsvektor (ohne Geschwindigkeiten und Beschleunigungen)
z	Vektor der Störgrößen

Matrizen

B	Eingangsmatrix des diskreten dynamischen Modells
C	Meßmatrix = Jacobische Matrix = Ableitung der Meßgleichungen nach den Zustandsgrößen
C_j	die zu y_{cj} und z_{cj} gehörenden zwei Zeilen der Jacobischen Matrix
D	Diagonalmatrix der UDU^T Kovarianzmatrixzerlegung
F	Systemmatrix des kontinuierlichen dynamischen Modells

G	Eingangsmatrix des kontinuierlichen dynamischen Modells
I	Einheitsmatrix
K	(Kalman) Filter Gewichtungsmatrix
L	Schätzfehlerdynamikmatrix
P	Kovarianzmatrix der Schätzfehler (bei UDU^T -Formulierung auch der Extrapolationsfehler)
P^*	Kovarianzmatrix der Extrapolationsfehler
Φ	Transitionsmatrix = Übergangsmatrix = Systemmatrix des diskreten dynamischen Modells
Q	Kovarianzmatrix der Systemstörungen v
R	Kovarianzmatrix der Meßfehler w
S	Skalierungsmatrix
U	Obere Einheits-Dreiecksmatrix (Diagonale = I)

Griechische Buchstaben

α	Gierwinkel in einem ruhenden kartesischen Koordinatensystem; Faktor zur Merkmalselektion
β	Öffnungswinkel der Projektion von Ecken
∂	z.B. in: $\frac{\partial y}{\partial x}$ partielle Ableitung von y nach x
δ	kleine Abweichung wie z.B. $\delta y = y - y^*$
Δ	größere Differenzen
ϵ	Schranke zur Störungserkennung; Toleranzzone der Dreipunktregler
σ	Standardabweichung
σ^2	Varianz
κ	Motorverstärkung der Laufkatze
λ	Wellenlänge; Eigenwerte einer Matrix
ν	Aspektwinkel (siehe Bild 3.12)
ψ	Gierwinkel (siehe Bild 3.12)
ω	zeitliche Ableitung von α
ω_r	zeitliche Ableitung von ν
τ	Integrationsvariable; Motorzeitkonstante der Laufkatze
θ	Kameranickwinkel

Indizes

$\hat{\cdot}$	z.B. $\hat{\mathbf{x}}(k)$: Bestmöglicher Schätzwert zum Zeitpunkt t_k
\cdot^*	z.B. $\mathbf{x}^*(k)$: Zum Zeitpunkt t_{k-1} für t_k vorhergesagter Schätzwert
\cdot	Ableitung eines Skalars oder eines Vektors nach der Zeit
$\cdot\cdot$	doppelte Ableitung eines Skalars nach der Zeit
\cdot^T	hochgestelltes T bei Vektoren, z.B. \mathbf{k}^T : Transponierter Vektor
k	z.B. $\mathbf{x}(k)$: Zeitindex (Wert von \mathbf{x} zum Zeitpunkt $t_k = kT$)
\cdot_k	z.B. \mathbf{x}_k ; t_k : Zeitindex
\cdot_g	z.B. X_g, Y_g, Z_g : Bezug auf geodätisches Koordinatensystem
\cdot_m	z.B. y_m : Gelegentlich verwendet zur Kennzeichnung von verrauschten Meß- oder Pseudomeßgrößen im Unterschied zu echten Größen
\cdot_L	z.B. \mathbf{x}_L : Bezug auf Laufkatze (Position der Laufkatze)
\cdot_s	z.B. \mathbf{x}_s : Bezug auf Luftkissenfahrzeug (Position des Luftkissenfahrzeugs im geodätischen System)
\cdot_R	z.B. \mathbf{x}_R : Bezug zu reduziertem Zustandsvektor (ohne Geschwindigkeit und Beschleunigungen)
\cdot_N	z.B. \mathbf{x}_N : Normalisiert, d.h. mit \mathbf{S} skaliert und mit \sqrt{R} gewichtet
\cdot_B	z.B. X_B, Y_B, Z_B : Bezug auf fahrzeugfestes Koordinatensystem

Abkürzungen

A/D	Analog/Digital Wandler
BVV	Bildverarbeitungssystem (BVV1: 8-bit Prozessoren, BVV2: 16-bit Prozessoren)
D/A	Digital/Analog Wandler
Pixel	Engl.: <u>picture elements</u> : Bildelemente des digitalisierten Videobildes
PP	Parallelprozessor des BVV
SP	Systemprozessor des BVV
VAX	32-bit Prozeßrechner der Fa. Digital Equipment Corp.