

# Auszüge aus der Denkschrift Di-1983

Denkschrift

Zur Automatisierung von Transportsystemen  
durch Rechnersehen

Ernst D. Dickmanns

<u>Gliederung</u>	<u>Seite</u>
Übersicht	1
1. Einleitung	2
2. Charakterisierung heutiger Transportsysteme	2
3. Entwicklungstrends bei Datenverarbeitungssystemen	5
4. Neue Qualität von Transportsystemen mit Rechnersehen, Sensor-Integration und künstlicher Intelligenz	6
5. Schlüsselgebiete zur Lösung dieser Aufgaben	9
5.1 Systemkonzepte	9
5.2 Mikroelektronik zur effektiven Informationsverarbeitung	12
6. Aktivitäten außerhalb Deutschlands auf diesem Gebiet	14
7. Ein Ansatz zur Untersuchung von Systemkonzepten	16
7.1 Gewählte Aufgabengebiete	17
7.2 Das Bildvorverarbeitungssystem BVV2	18
7.3 Beispiel einer Fahrzeugsteuerung	19
8. Zusammenfassung	21
Literatur	22

September 1983

## Übersicht

Nach einer der Themenstellung entsprechenden Gliederung bestehender Transportsysteme und einem kurzen Blick auf erkennbare Trends bei digitalen Rechnern, werden Prozeßrechner mit begrenzter Sehfähigkeit zur Bewegungssteuerung als ein Zukunftsprodukt der Technikentwicklung für einen weiten Anwendungsbereich identifiziert.

Für effiziente Gesamtsysteme zur Bewegungssteuerung durch Rechnersehen wird die gemeinsame Betrachtung und gezielte Abstimmung folgender Komponenten als erforderlich angesehen:

- aufgabenbezogenes Hintergrundwissen
- dynamisches Modell zur raum-/zeitlichen Integration und zum Test von Deutungshypothesen für die Bilddaten
- Spezialprozessoren für die Bildfolgeninterpretation in Echtzeit und darauf zugeschnittene Algorithmen, z.B. für die Merkmalerkennung
- flächenhafte und algorithmische Parallelverarbeitung, gestützt auf das dynamische Modell und gesteuert vom Hauptrechner.

Die Erforschung entsprechender Systemkonzepte wird als längerfristiges Vorhaben skizziert, das wahrscheinlich einen Zweig der Entwicklung höchstintegrierter Mikroelektronik beeinflussen wird. Nach einem Blick auf Aktivitäten außerhalb Deutschlands wird ein Ansatz zur Bearbeitung dieses Themenkreises an der HSBw München geschildert. Eine gezielte Diskussion zur Akzentsetzung und Abklärung der Thematik sowie zur Förderung im nationalen Rahmen hält der Autor für geboten.

## 1. Einleitung

Zwei der hervorragendsten zivilisatorischen Errungenschaften der Menschheit sind die Entwicklung der Transport- und Nachrichtensysteme, die heute beide weltweit (besser erdweit) funktionieren und in das Sonnensystem auszugreifen beginnen. Ein großer Teil der allgemeinen industriellen Entwicklung dient nur über diese Systeme dem Menschen (Zulieferindustrie); alle anderen Teilbereiche profitieren von diesen beiden Systemen und sind ohne sie kaum denkbar. Umgekehrt ist der erreichte Leistungsstand natürlich durch die technischen Errungenschaften auf den übrigen Gebieten wie Energieumwandlung, Werkstoff- und Verfahrenstechnik sowie allgemeiner Maschinenbau und Elektrotechnik möglich geworden. Jüngster Entwicklungszweig ist die Datentechnik mit der elektronischen Mikrominiaturisierung.

Die vorliegende Schrift soll die Weiterentwicklung der Transportsysteme unter Berücksichtigung der neueren Entwicklungen in der Datentechnik behandeln und hierfür "Rechnersehen" als Schlüsseltechnologie identifizieren. Nach Meinung des Autors sollte dieses Gebiet zunächst als langfristige Grundlagentechnologie erforscht und entwickelt werden, da es ein weites Anwendungspotential hat.

## 2. Charakterisierung heutiger Transportsysteme

Alle heutigen Transportsysteme zu Lande, zu Wasser und in der Luft (mit Ausnahme sehr schneller globaler Systeme, max. 2 Std. zu jedem Punkt der Erde) haben größenordnungsmäßig wohl die Grenze ihrer wirtschaftlich vertretbaren Leistungsfähigkeit erreicht, was Geschwindigkeit und Größe betrifft. Weiterentwicklungen im Detail sind sicher notwendig.

Diese Systeme sind dadurch gekennzeichnet, daß sie auf menschliche Bediener zugeschnitten sind, die fast sämtliche Informationserfassungs- und Steueraktivitäten durchführen müssen, um eine Einheit von A nach B zu bringen. Dies ist häufig durch die nicht planbare Umwelt bedingt, durch die die Mission führt. Sensoren, die hinreichend Informationen über die Umwelt liefern, waren

Bei den oben angeführten Untergruppen von Transportsystemen wären z.B. folgende Ziele zu erreichen:

1. Handhabungsautomaten: Greifen aus ungeordneter Werkstückzuführung, geordnetes Stapeln, Kollisionsvermeidung, kompliziertere Montageaufgaben.
2. Krane: Entlasten des Menschen von Phasen eintöniger Routine (z.B. Schüttgutverladen).
3. Werkverkehr: Automatisierung mit aktiven Sicherheitsaspekten; flexible Reaktion auf unvorhersehbare Ereignisse bei gemischter Nutzung von Verkehrsflächen.
4. Autobahn - Autopilot: Entlastung bei langer Fahrtdauer; nahtlose Einfügung in gewohnten Verkehr ohne Zusatzinstallationen entlang der Strecke.
5. Land- und Stadtstraßen, allgemeiner Verkehr wie 4., jedoch wesentlich aufwendiger; vorerst kaum realisierbar.
6. Geländegängige Fahrzeuge, Traktoren: Entlastung von eintöniger Arbeit über Stunden und Tage (z.B. Pflügen, Grubben, Feinbearbeiten). - Planetare Erkundungsfahrzeuge.
7. Binnenschiffahrt: wie 4., wegen großer, langsamer Einheiten und stets nahezu horizontaler Fahrbahn einfacher; könnte in relativ naher Zukunft realisierbar sein. Für Nachtverkehr auch Infrarotbildsensoren und für Allwetterbetrieb Radarsensoren verwendbar.
8. Tauchfahrzeuge: flexible Erkundungsfahrzeuge, wegen Verzicht auf Lebenserhaltungssystem für Menschen kleiner; verminderte Sicherheitsvorkehrungen erforderlich. Wirtschaftlichere Nutzung von Meeresschätzen, (Übertragung auf die im Wasser manchmal besser geeignete Sonartechnik scheint möglich.)
9. Luftfahrzeuge: Vogelähnliche bordautonome Flugfähigkeit in Bodennähe z.B. zur Fruchtpflege und -überwachung, Brandüberwachung, Erkundung; autonome Landefähigkeit auf Flugplätzen ohne Blindlandeeinrichtungen.

#### 6. Aktivitäten außerhalb Deutschlands auf diesem Gebiet

Die folgende Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit; sie entstammt einer Durchsicht begrenzter Literaturquellen und z.T. persönlicher Kommunikation im Laufe von Tagungen: Die mit Abstand umfangreichsten Aktivitäten auf diesem Gebiet erfolgen in den USA, wo fast an jeder Universität von einigem Rang auf einem der Teilgebiete Forschungsvorhaben laufen. Hier seien nur einige der Hauptzentren aufgeführt:

- Stanford, Universität und Research Institute (SU, SRI)
  - Entwicklung von Vision Chips zur Bildvorverarbeitung mit Fernsehrate
  - künstliche Intelligenz beim Rechnersehen
  - sehnenbetätigte Hand mit Sicht- und Tastrückkopplung
- Massachusetts Institute of Technology, Boston (MIT)
  - künstliche Intelligenz beim Rechnersehen
  - Robotik mit Sicht- und Tastrückkopplung
- Carnegie Mellon University, Pittsburg (CMU)
  - Fahrzeug mit Sicht- und Tastrückkopplung zur Navigation
  - Robotik mit Sicht- und Tastrückkopplung
- University of Michigan, Ann Arbor: Center for Robotics and Integrated Manufacture  
Neues Forschungszentrum, getragen von Regierung, Industrie und Universität, zur Untersuchung des Zusammenspiels multimodaler Sensoren (Sehen, Hören, Fühlen) bei komplexen Steuervorgängen der Robotik; eigene VLSI-Rechnerentwicklungen.
- Jet Propulsion Laboratory, Pasadena (JPL)
  - Erkennung der Bewegung eines Satelliten durch Stereosehen, Echtzeit-Bildvorverarbeitung
  - Montage-Vorgänge (Raumfahrt-Anwendungen)
  - Fahrzeugnavigation in unbekannter Umgebung
- University of Texas, Austin
  - Bildfolge-Verarbeitung

- University of Massachusetts, Amherst
  - autonomes Landfahrzeug
- National Bureau of Standards, Washington D.C.
  - automatische Fabrik (Langzeitziel)
  - Roboter mit TV-Kamera auf Handgelenk
- NASA-Langley Research Center
  - Remote Orbital Servicing System (ROSS-Satellit)
  - Grundlagenforschung zu autonomen Operationen
- Texas Instruments Incorporated, Lewisville (TI)
  - Entwicklung von "Vision chips" zur Echtzeit-Bildvorverarbeitung mit 30 Hz über das gesamte Bild; 3 Typen in der Prototypenerprobung, Flugkörpereinsatz
  - Bildfolgenanalyse

Überblicke über die US-amerikanischen Militärprogramme finden sich in [12] (sicher nur die Spitzen der Eisberge!).

Auch in Japan befassen sich eine Reihe von Hochschulen und Forschungseinrichtungen mit Problemen des Rechnersehens zur Bewegungssteuerung. An der Universität von Osaka untersucht man die Möglichkeit der Gebäudeüberwachung durch mobile Roboter, und im Tsukuba-Forschungszentrum ein autonomes Fahrzeug, intelligente Roboter für Montageaufgaben mit der Fähigkeit, sich autonom fortzubewegen sowie eine Blindenhilfe beim Gehen durch sehende mobile Roboter. Industrielle Robotik-Anwendungen werden in kleinerem Rahmen an fast jeder Hochschule bearbeitet und seien hier nicht aufgezählt.

Dies gilt auch für weite Teile Europas. Umfangreichere Arbeiten in Richtung Rechnersehen zur Bewegungssteuerung laufen

in England an

- University of Edingburgh, Dept. of Artificial Intelligence (Navigation, Robotik)
- Imperial College, London (autonomes Fahrzeug)
- Queen Mary College, London, Artificial Intelligence Lab. (Navigation; Vorverarbeitung von Bildfolgen, kombinierte räumlich/zeitliche Datenfilterung)

in Frankreich am

- Institut National de Recherche d'Informatique et d'Automatique (INRIA), Rocquencourt  
(Robotik: Greifvorgänge nach Sicht, Montage)
- Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systems (LAAS),  
Toulouse (mobiler Roboter)
- Laboratoire IMAG, Grenoble (Industrial Vision)

und in Belgien an der Universität Leuven.

Umfassende Ansätze mit einer Breite und Zielsetzung der oben beschriebenen Art sind derzeit nur in den USA zu erkennen, wo die Aktivitäten explosionsartig ansteigen. Dies hängt wohl mit der dortigen Verfügbarkeit der VLSI-Technologie zusammen und belegt die Zuversicht, daß entsprechend leistungsfähige Hardware mit erschwinglichem Aufwand in der nahen Zukunft geschaffen werden kann.

#### 7. Ein Ansatz zur Untersuchung von Systemkonzepten

In den vorangehenden Abschnitten ist die Thematik der Bewegungssteuerung durch Rechnersehen allgemein besprochen worden; in diesem Abschnitt soll kurz skizziert werden, welche Voraussetzungen zur Bearbeitung von Teilbereichen dieses Themas an der HSBw München geschaffen wurden.

Um im internationalen Rahmen Schritt halten zu können, ist es sicher notwendig, ähnliche Aktivitäten an mehreren Stellen in der Bundesrepublik zu unterstützen. Ansatzpunkte sowohl bei der Bildfolgenverarbeitung als auch bei der Regelung komplexer Systeme sind vorhanden.

Im folgenden werden zunächst die an der HSBw gewählten Aufgabengebiete angesprochen (7.1), dann wird das Bildvorverarbeitungssystem BVV2 als gegenwärtiges Glied einer Entwicklungsreihe von Experimentalsystemen vorgestellt (7.2), und schließlich wird am Beispiel einer Fahrzeugsteuerung die starke Verknüpfung aller

Der letzte Punkt gestattet,

- von einem PP beliebige Bildmerkmale unabhängig und ohne Speicherkonflikte verfolgen zu lassen und
- mehrere PP auf einen Bildbereich anzusetzen, um die Daten mit verschiedenen Algorithmen auszuwerten.

Die PP sollen Bildmerkmale erkennen und deren Position und evtl. Geschwindigkeit an den Hauptrechner geben. Dieser soll dann aufgrund seines Hintergrundwissens mit dem dynamischen Modell hieraus den Systemzustand schätzen, die Blickrichtung und evtl. die Fensterposition der PP über den Systemprozessor kommandieren und die Steuerkommandos für das Fahrzeug ermitteln und ausgeben. Das hierzu eingesetzte Künstliche-Intelligenz-Programm muß den Aufgabenüberblick bewahren, Leistungsdaten während der Prozeßsteuerung sammeln, notfalls Sicherheitsmaßnahmen einleiten und kann ggf. weitere PP ins Spiel bringen bzw. aktiven PP andere Aufgaben zuweisen; letzteres geschieht durch Umladen von Programmen aus einem Hintergrundspeicher über den Systemprozessor.

### 7.3 Beispiel einer Fahrzeugsteuerung

Bild 2 zeigt das inzwischen weitgehend realisierte Simulationskonzept zur Fahrzeugsteuerung durch Rechnersehen: Die Fahrzeugdynamik wird auf dem links dargestellten 32-bit Prozeßrechner simuliert (2 MB Hauptspeicher). Der Fahrzeugort und die Blickrichtung der Kamera werden (obere Bildzeile) an den Prozeßrechner VAX 11/750 (von DEC) weitergegeben, der hieraus zusammen mit dem hochdynamischen Graphiksystem Picture System 2 (von Evans & Sutherland) das Bild der Außenwelt berechnet und auf einer Kathodenstrahlröhre darstellt. Dieses Bild wird von einer Fernsehkamera abgegriffen und von einem Projektor im Simulationsraum auf eine zylindrische Leinwand projiziert. Die berechneten Winkellagen des Fahrzeugs werden über einen Dreiachsen-Bewegungssimulator in physikalische Winkel einer Montageplattform umgesetzt (untere Bildzeile), die damit die rotatorische Fahrzeugbewegung durchführt. Auf diese Plattform werden die Inertialsensoren und die Fernsehkameras für das Rechnersehen montiert,

so daß diese wesentlichen Sensoren als Echtbauteile im Simulationskreis vorhanden sind. Da die Kamera Merkmalverfolgungen in der Szene durchführen soll, sitzt sie auf einer mikroprozessor-gesteuerten (My) Zweiachsen-Plattform (ZP), die Augenbewegungen in Azimut und Elevation realisieren kann. Mit der Kamera verbunden ist ein Zweiachsenwendekreis (WK), der die Kameradrehgeschwindigkeit erfaßt und dem Auswertesystem mitteilt. Dieses Signal kann zur Bildstabilisierung herangezogen werden. Um einen genügend großen, koordinierten Simulationsbereich für das kombinierte inertial/optische System zu haben, ist der Projektor um die Hochachse drehbar gelagert. Der durch Schraffur zusammengefaßte zentrale Teil von Bild 2 umfaßt das zu testende System fürs Rechnersehen.

Im Bild 1 oben rechts sind 5 Fensterbereiche markiert, die für eine Straßenfahrzeugsteuerung wesentlich sind. Die beiden Fenster FA 1 und 2 erfassen den Straßenrand im Fahrzeugnahbereich und sind unter Verwendung eines dynamischen Modells hinreichend zur Kurssteuerung bei langsamer Fahrt und freier Fahrbahn [17]. Die Fenster FA 3 (etwa im Innenscheitel der Kurve) und 4 (gegenüber) lassen die Straßenkrümmung erkennen und können zur Geschwindigkeitssteuerung herangezogen werden. Alle vier zusammen liefern mit der Zeit redundante Informationen über den Straßenverlauf; dies gestattet, über kurze Zeit den Ausfall einzelner Fensterdaten zu verkraften und das entsprechende Fenster neu zu positionieren. Diese vier Fenster seien im Blickfeld der Kamera A (Normalobjektiv oder leichtes Weitwinkel) festgelegt. Um die Hindernisfreiheit zu prüfen, wird das fünfte Fenster FB in einer Kamera B mit einem Teleobjektiv definiert, das weiter voraus noch eine genügend gute Auflösung liefert. Es wird so gewählt, daß es nahe dem Horizont die ganze Straße und ihre nähere Umgebung umfaßt und verfolgt. In ihm sollen auftauchende Hindernisse oder Verkehrszeichen entdeckt werden; wegen der durchzuführenden komplexen Operationen dürfte es zweckmäßig sein, hier mehrere Prozessoren parallel anzusetzen. Tauchen Ereignisse auf, die verfolgt werden müssen, wird ihnen ein eigenes Fenster mit Prozessor zugewiesen.

Die Erfordernisse des Fensters FB bestimmen weitgehend die Blickrichtungssteuerung durch den Hauptrechner und den Mikroprozessor My. Der Szenenausschnitt FB soll unabhängig von Fahrzeugdrehbewegungen durch Kurssteuerung und Fahrbahnstörungen erfaßt werden; deshalb werden ähnlich dem vestibulären Augenreflex bei Lebewesen Inertialdaten zur Kamerasteuerung gegenüber dem Fahrzeug und ähnlich der optokinetischen Rückkopplung Bilddaten zur genauen Verankerung der Blickrichtung in der Szene herangezogen. Der Mikroprozessor My arbeitet dabei als unterlagter Regelkreis mit gleichzeitiger Verarbeitung von Bild- und Inertialdaten. Sein Arbeitsmodus wird vom Hauptrechner über den Systemprozessor des BVV festgelegt. Um Totzeiten zu minimieren und gute Regelleistungen zu erhalten, läuft die Blickrichtungssteuerung mit einer höheren Taktfrequenz als der Gesamtsteuerungsvorgang.

An diesem Beispiel wird klar, daß die regelsystemtechnischen und die bildinformationsverarbeitenden Schritte gemeinsam untersucht werden müssen, um zu einer abgestimmten Lösung zu gelangen. Das dynamische Modell des Gesamtvorgangs ist der Schlüssel für eine effektive Lösung und steht deshalb im Mittelpunkt der Untersuchungen. Seine vorteilhafte Verwendbarkeit wurde am Beispiel des Stab/Wagen-Systems (Abschn. 7.1) im Rahmen des BMFT-Forschungsauftrags inzwischen nachgewiesen [11,18,19].

## 8. Zusammenfassung

Regelungs- und Datenverarbeitungstechnik haben einen Stand erreicht, daß Bewegungssteuerung durch Rechnersehen als weites Feld zukünftiger Technikentwicklung erkennbar wird. Einfache Systeme sind bereits in der Erprobung; leistungsfähige Systeme für technische Anwendungen erfordern die gemeinsame Behandlung der systemdynamisch/regelungstechnischen und der Bildfolgeverarbeitungs-Aufgaben. Diese Thematik wird weniger als eine Ausdehnung der Verarbeitung statischer Bilder auf Rechnern gesehen, sondern als eigenständiger Aufgabenzweig, der von vorne herein nach dynamischen Modellen zur effektiven Behandlung bei multi-

modalen Sensordaten ruft. Neuere Ergebnisse der psychologischen und neurophysiologischen Forschung [4,9,10] zeigen, daß bei Organismen bildhaftes (statisches) Sehen eher der Sonderfall des allgemeineren dynamischen Sehens und Interpretierens ist.

Es wurden mögliche Anwendungsbereiche und ein Weg zur Untersuchung der erfolgversprechenden Systemkonzepte aufgezeigt. Längerfristig erscheint eine eigene VLSI-Rechnerentwicklung zur Echtzeitbildverarbeitung erforderlich. Hierin wird die natürliche Weiterentwicklung der Prozeßrechner-technik gesehen, an der eine Industrienation ersten Ranges vitales Interesse haben muß. Einige internationale Aktivitäten auf diesem Gebiet wurden angedeutet. Die bisherigen eigenen Bemühungen und Vorbereitungen zur Bearbeitung von Themen aus diesem Gebiet wurden skizziert.

Eine gezielte Diskussion zur Akzentsetzung und Abklärung der Thematik sowie zur Förderung im nationalen Rahmen hält der Autor für geboten.

#### Literatur

- [1] Harland, W.L.; Eversole, W.L.: Affordable implementations of image processing algorithms. Proceedings SPIE, Vol. 360, Aug. 1982, San Diego, pp. 151-162.
- [2] Lowry, M.R.; Miller, A.: Analysis of low-level computer vision algorithms for implementation on a VLSI processor array. Proceedings SPIE, Vol. 360, Aug. 1982, San Diego, pp. 143-150.
- [3] Hecht-Nielsen, R.: Neural analog processing. Proceedings SPIE, Vol. 360, Aug. 1982, San Diego, pp. 180-189.
- [4] NATO Advanced Study Institute on "Brain Mechanisms and Spatial Vision", Lyon, Juni 1983.
- [5] Yachida, M.; Ichinose, T.; Tsuji, S.: Model-guided Monitoring of a building Environment by a Mobile Robot. Proceedings of the 8<sup>th</sup> IJCAI, Aug. 1983, Karlsruhe.
- [6] Levine, M.D.; Noble, P.B.; Youssef, Y.M.: A Rule-Based System for Characterizing Blood Cell Motion. In "Image Sequence Processing and Dynamic Scene Analysis", T.S. Huang (Ed.), Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1983.