

INHALT

	<i>Seite</i>
SCHRÖDER, N. Prozeßautomatisierung 2000	1
WEINMANN, A. und KACINOGLU, M. Entwurf von Mehrgrößenregelungen anhand charakteristischer Ortskurven unter Verwendung eines Expertensystems	5
AHLBEHRENDT, N., FUCHS, H. und DIESING, H. Anwenderorientierte Programmierung von Robotern	7
SCHLACHER, K. The Benefits of Frequency Domain	26
WEINMANN, A. Convergence Evaluation of Model Least Squares Applications in High-Precision Process Identification	38
Schlaglichter des 12. IFAC Weltkongresses	57
Österreich und die EU Österreich und das 4. Rahmenprogramm der EU	67
Ein Institut stellt sich vor Institut für Elektrische Regelungstechnik der Fakultät Elektrotechnik an der TU Wien	68
Dissertationskurzfassungen	71
Buchbesprechungen	76
Ausschreibung des Fred-Margulies-Preises	79
Vorankündigungen	80
Veranstaltungskalender	82

PROZESSAUTOMATISIERUNG 2000

Analyse und Prognose des Weltmarktes für Prozeßautomatisierung bis zum Jahre 2000

Dr. Norbert Schröder
Intechno Consulting AG
Steinenbachgässlein 49
CH-4051 Basel

1 Weltmarkt für Prozeßmeß- und Prozeßautomatisierungstechnik im Überblick

Der Weltmarkt für Prozeßautomatisierung wächst mit jährlich 6,9 % von 53,8 Mrd. DM im Jahre 1992 auf voraussichtlich 91,7 Mrd. DM im Jahre 2000. Wichtigste Bestimmungsfaktoren des Weltmarktes für Meß- und Automatisierungstechniken im Prozeßbereich sind die regional unterschiedlichen Entwicklungen und Strukturen der Sach- bzw. Ausrüstungsinvestitionen sowie der Nachholbedarf an Automatisierungstechniken bestehender Anlagen in den diversen Prozeßbranchen. Meß- und Automatisierungstechniken können entweder von den Betreibern direkt oder aber indirekt über die jeweiligen Ausrüster bzw. Anlagenbauer nachgefragt werden. Je nach Region und Branche ist diese Aufteilung sehr unterschiedlich.

Unter Weltmarkt wird hier der Bedarf an Produkten, Systemen und Dienstleistungen verstanden, wie er seitens der End-Anwender, also der Betreiber von Anlagen der diversen Prozeßbranchen nachgefragt wird. Etwa 39,5 Mrd. DM der konsolidierten Gesamtnachfrage entfallen hiernach im Jahre 1992 auf Produkte und Systeme der Automatisierung und etwa 14,3 Mrd. DM auf externe Dienstleistungen des Engineerings, der Softwareentwicklung, der Montage und Inbetriebnahme der leittechnischen Gesamtanlage.

Zu höheren Marktzahlen kommt man, wenn man als Marktdefinition nicht den Bedarf des End-Anwenders zugrundelegt, sondern den Besitzerwechsel, also die diversen Zwischenstufen auf dem Weg zwischen Gerätehersteller und End-Anwender einbezieht. Bei Zugrundelegung dieser Definition beträgt der Weltmarkt für Prozeßautomatisierung etwa 64 - 65 Mrd. DM, von denen etwa 23 - 25 Mrd. DM auf die Gesamtlösungen der leittechnischen Anlagen entfallen würden. Diese leittechnischen Gesamtanlagen umfassen einen Großteil der externen Dienstleistungen sowie einen Teil der Geräte und Systeme, welche dann allerdings im Sinne des Besitzerwechsels doppelt verrechnet wären.

Nicht enthalten in obigen Zahlen sind die internen Aufwendungen seitens der Betreiber bei der Projektierung, Errichtung und Instandhaltung der leittechnischen Anlagen. Diese können grob

auf etwa 13 Mrd. DM jährlich geschätzt werden.

2 Weltmarkt für Prozeßautomatisierung nach Anwendungssektoren

Insgesamt wird der Weltmarkt für Prozeßautomatisierung in 13 prozeßrelevanten Branchen analysiert. Unter Prozeßindustrien im engeren Sinne werden im Rahmen dieser Untersuchung die Chemie- und Pharmaindustrie, die Petrochemie, die Zellstoff-, Papier- und Pappeindustrie sowie die Nahrungsmittelindustrie verstanden. Die Meß- und Automatisierungstechniken für diese Bereiche zusammengenommen wachsen von 30,3 Mrd. DM im Jahre 1992 auf 50,5 Mrd. DM im Jahre 2000. Dies entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von 6,6 %. An zweiter Stelle des Bedarfs steht der Energiebereich mit 9,5 Mrd. DM, gefolgt von den Grundstoffindustrien wie Baustoffindustrie, Metallerzeugung sowie Glas- und Keramikindustrie, welche zusammen 6,6 Mrd. DM aufweisen.

Größter Einzelsektor ist die Chemiebranche, welche ohne Berücksichtigung der Pharmaindustrie und Petrochemie ein jährliches Automatisierungsvolumen von 15,5 Mrd. DM aufweist, gefolgt von der Kraftwerksindustrie mit 9,5 Mrd. DM. Alle genannten Zahlen sind als Marktzahlen im Sinne der End-Anwenderbetrachtung zu verstehen. Größter Wachstumssektor ist der Umweltsektor, dessen Automatisierungsbedarf außerhalb der oben genannten Branchen weltweit mit 11,7 % steigt. Mit jährlichen Wachstumsraten um die 8 % ist auch in den Bereichen der Baustoffindustrie und der Pharmaindustrie zu rechnen.

3 Weltmarkt für Prozeßautomatisierung nach Regionen

In dem Bericht sind die Marktentwicklungen für die vier Globalregionen Westeuropa, Osteuropa, Nordamerika und Asien Pazifik dargestellt, wobei unter Asien Pazifik auch Japan und die Volksrepublik China einbezogen sind. Mit 9,7 % jährlichem Wachstum für Meß- und Automatisierungstechniken steht der Raum Asien Pazifik an erster Stelle der Wachstumsskala, gefolgt von Westeuropa mit einem Wachstum von 6,5 % und Nordamerika mit 5,3 %. Osteuropa hat zwar grundsätzlich einen hohen Nachholbedarf an modernen Meß- und Automatisierungstechniken; aufgrund der derzeitigen politischen Instabilität in den GUS-Staaten sowie wegen grundsätzlicher Schwierigkeiten bei der Finanzierung von Großprojekten ist dort aber erst gegen Ende dieses Jahrzehnts mit deutlichen Wachstumsschüben zu rechnen.

4 Weltmarkt für Prozeßautomatisierung nach Produkten und Systemen

Etwa 15,3 Mrd. DM des weltweiten Bedarfs an Produkten der Prozeßautomatisierung entfallen auf Sensoren, Meßgeräte, Antriebe, elektrische Stellgeräte sowie auf Waagen und Prozeßanalysegeräte, also auf die Feldebene. Zirka 17,7 Mrd. DM beträgt der weltweite Bedarf an Steuerungen, Reglern, Kommunikationsgeräten sowie Bedien- und Beobachtungsgeräten. Der Bedarf an Prozeßleitsystemen ohne Anwenderspezifizierung sowie an Automatisierungsrechnern für den Prozeßbereich beträgt etwa 6,5 Mrd. DM. Zirka 14,3 Mrd. DM entfällt auf die Anwendersoftware und auf externe Dienstleistungen der Projektierung, der Konfigurierung, der Installation und Inbetriebnahme von leittechnischen Anlagen. Das größte Wachstum weisen die Kommunikationseinrichtungen auf mit jährlich 10 %.

4 Herausforderungen, Chancen und Erfolgsfaktoren

Die zunehmende Internationalisierung des Automatisierungsgeschäfts, der durch die schnelle Entwicklung der Technik hervorgerufene Innovationsdruck sowie die zunehmende Verlagerung von der Hardware zu Anwendersoftware und Engineering werden auch weiterhin zu neuen Firmenzusammenschlüssen und strategischen Allianzen führen. Gefragt ist verstärkt der Generalanbieter bzw. Systemintegrator, welcher Komplettlösungen aus einer Hand anbietet. Neben Großbetrieben aber haben auch europäische Mittelstandsbetriebe, welche auf Nischenmärkte spezialisiert sind, hervorragende Erfolgsaussichten in einem insgesamt allerdings immer anspruchsvoller werdenden wirtschaftlichen Umfeld.

Anbieter von Prozeßautomatisierung werden in dem Maße erfolgreich sein, wie sie die internationale Marktstruktur in den für sie relevanten Prozeßbranchen kennen und ihre Marketingaktivitäten langfristig auf den Kundennutzen in diesen Branchen ausrichten. Angesichts des überproportionalen Wachstums der Dienstleistungen im Umfeld der Prozeßautomatisierung sollte aber das reine Produktedenken grundsätzlich in Richtung Dienstleistungen erweitert werden. Der gezielte und langfristig angelegte Aufbau eines umfassenden und intelligenten Dienstleistungsspektrums angefangen von der Beratung, der Projektierung, Instandhaltung, Schulung und schnellen Unterstützung im Bedarfsfall werden immer mehr zu erstklassigen Erfolgsfaktoren. Produkte, Systeme und Dienstleistungen der Prozeßautomatisierung sollten von Anfang an auf den gesamten Lebenszyklus einer Anlage sowie das genaue Anforderungsprofil der Zielbranchen ausgerichtet sein.

Der Weltmarkt für Prozeßautomatisierung wächst mit jährlich 6,9 % von 53,8 Mrd. DM im Jahre 1992 auf voraussichtlich 91,7 Mrd. DM im Jahre 2000. Unter Weltmarkt wird hier der Bedarf an Produkten, Systemen und Dienstleistungen verstanden, wie er seitens der End-Anwender, also der Betreiber von Anlagen der diversen Prozeßbranchen nachgefragt wird. Etwa 39,5 Mrd. DM der konsolidierten Gesamtnachfrage entfallen hiernach im Jahre 1992 auf Produkte und Systeme der Automatisierung und etwa 14,3 Mrd. DM auf externe Dienstleistungen des Engineerings, der Softwareentwicklung, der Montage und Inbetriebnahme der leittechnischen Gesamtanlage.

In dem Bericht sind die Marktentwicklungen für die vier Globalregionen Westeuropa, Osteuropa, Nordamerika und Asien-Pazifik dargestellt, wobei in Asien-Pazifik auch Japan und die Volksrepublik China einbezogen sind. Mit 9,7 % jährlichem Wachstum für Meß- und Automatisierungstechniken steht der Raum Asien-Pazifik an erster Stelle der Wachstumsskala, gefolgt von Westeuropa mit einem Wachstum von 6,5 % und Nordamerika mit 5,3 %. Osteuropa hat zwar grundsätzlich einen hohen Nachholbedarf an modernen Meß- und Automatisierungstechniken; aufgrund der derzeitigen politischen Instabilität in den GUS-Staaten sowie wegen grundsätzlicher Schwierigkeiten bei der Finanzierung von Großprojekten ist dort aber erst gegen Ende dieses Jahrzehnts mit deutlichen Wachstumsschüben zu rechnen.

Insgesamt wird für diese Regionen der Meß- und Automatisierungsbedarf in 13 prozeßrelevanten Branchen analysiert. Unter Prozeßindustrien im engeren Sinne werden im Rahmen dieser Untersuchung die Chemie- und Pharmaindustrie, die Petrochemie, die Zellstoff-, Papier- und Pappeindustrie sowie die Nahrungsmittelindustrie verstanden. Die Meß- und Automatisierungstechniken für diese Bereiche zusammengenommen wachsen von 30,3 Mrd.

DM im Jahre 1992 auf 50,5 Mrd. DM im Jahre 2000. Dies entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von 6,6 %. An zweiter Stelle des Bedarfs steht der Energiebereich mit 9,5 Mrd. DM, gefolgt von den Grundstoffindustrien wie Baustoffindustrie, Metallherzeugung sowie Glas- und Keramikindustrie, welche zusammen etwa 6,6 Mrd. DM aufweisen.

Diese Untersuchung soll einen allumfassenden branchenspezifischen Überblick über die Märkte der Prozeßautomatisierung für die vier Globalregionen Westeuropa, Osteuropa, Nordamerika und Asien Pazifik vermitteln. Sie hilft Ihnen, die strategische Planung Ihrer Firma im internationalen Umfeld zu fundieren.

Das Anwendungsspektrum moderner Prozeßautomatisierung reicht von verfahrenstechnisch orientierten Anwendungen bis hin zu Kraftwerken. Insofern werden die Baustoffindustrie, Metallurgie sowie Glas- und Keramikindustrie genauso dazugerechnet wie die chemische und pharmazeutische Industrie sowie die Petroindustrie, die Zellstoff-, Papier- und Pappindustrie, die Nahrungs- und Futtermittelindustrie und die Umweltindustrien, sofern sie nicht bereits durch die vorherigen Branchen abgedeckt sind. Doch auch die Automatisierung von Ölplattformen und Bergwerken wird dazugerechnet. Jede dieser Branchen stellt unterschiedliche Anforderungen an die zu automatisierenden Prozesse.

In dem Maße, wie in den hochindustrialisierten Ländern der Trend zur Produktion von Spezialgütern steigt, verlagert sich die Produktion von Massengütern zunehmend in Billiglohnländer. Entsprechend unterschiedlich fallen die Forderungen an die Automatisierungseinrichtungen in diesen Regionen aus. In den hochindustrialisierten Ländern stehen die Forderungen nach Erhöhung der Prozeßsicherheit, Anlagenverfügbarkeit, Prozeßeffektivität, Produktqualität sowie Produktionsflexibilität und Umweltverträglichkeit im Vordergrund der Automatisierungsziele. In den Schwellenländern dagegen dient der Einsatz von Automatisierungstechniken primär dazu, die Massenproduktion zu bewältigen und möglichst rationell zu gestalten, bei allerdings stetig steigendem Qualitätsniveau.

Im Vordergrund der modernen Prozeßautomatisierung steht der Einsatz von intelligenten Feldgeräten, leistungsfähigen Projektierungswerkzeugen sowie von möglichst standardisierten und teilweise intelligenten Kommunikationsnetzen. Der Trend zu dezentraler Intelligenz der Produkte wird weiter zunehmen. Neue Visualisierungstechniken, welche den Blick in das Prozeßgeschehen vom Anfang bis zum Ende erlauben, sind gefragt. Die Meß- und Automatisierungstechnik wächst zusehends mit der Informations- und Kommunikationstechnik zusammen. Die innovativsten Produkte werden genau dort entstehen, wo sich diese drei Technologiefelder überlappen.

Schrifttum: Weltreports "Prozeßautomatisierung 2000/Marktanalyse und -prognose bis zum Jahre 2000": Messe Düsseldorf, Abteilung Marktforschung und -entwicklung, Postfach 101006, D-40001 Düsseldorf 30

Entwurf von Mehrgrößenregelungen anhand charakteristischer Ortskurven unter Verwendung eines Expertensystems*

Von Alexander Weinmann und Manol Kacinoglu, TU Wien

Im gegenständlichen abgeschlossenen Forschungsprojekt wurde zum Entwurf von Mehrgrößenregelungen ein Programmpaket entwickelt, das folgende wesentliche Entwurfsziele berücksichtigt:

- Stabilität und Stabilitätsreserve des geschlossenen Mehrgrößen-Regelkreises
- Ausreichende Entkopplung
- Zufriedenstellendes Führungs- und Störungsverhalten
- Integrität
- Robustheit
- Beschaffung des erforderlichen Expertenwissens zwecks Übernahme in ein Expertensystem für den Entwurf von Mehrgrößenregelungen.

1. Methodik der Forschungsarbeiten

Im Mittelpunkt der Entwurfsstrategie stehen die charakteristischen Ortskurven einer Mehrgrößenregelung. Man erhält sie als die frequenzabhängigen Eigenwerte der Regelschleifen-Übertragungsmatrix. Sie werden zur Bewertung der Entkopplung und zur Beurteilung der Stabilität herangezogen. Die Entkopplung wird durch die geeignete Wahl eines Entkoppelreglers unter Zuhilfenahme einer Parameteroptimierungsstrategie gewährleistet, wobei zur Gewinnung der Bewertungsmaße die charakteristischen Ortskurven und Koppelfaktoren herangezogen werden.

Anhand eines um einen Entkoppelregler erweiterten Mehrgrößensystems wurde der Regler entworfen. Bei ausreichender Entkopplung kann dieser Regler in diagonaler Struktur vorgegeben werden. Die Untersuchung der Stabilitätsreserve und Robustheit erfolgt mit dem Verfahren der Singulärwerte.

Die Eigenschaften des geschlossenen Regelkreises wurden weiters noch im Zeitbereich durchleuchtet. Dazu wird das Führungs- und Störungsverhalten des Regelkreises simuliert. Dabei besteht auch noch die Möglichkeit, den Regelkreis an jeder beliebigen Schnittstelle selektiv zu unterbrechen, um die Integrität gegenüber Sensor- oder Aktorausfall darzustellen.

Die beschriebene Vorgangsweise des Entwurfs des Entkoppelreglers und des Hauptreglers muß iterativ wiederholt werden, um gewissen Nebeneffekten Rechnung zu tragen. So z.B. erscheint fallweise eine ungünstige Nullstellenverteilung zufolge Entkoppelregler, was sich im Zeitverhalten ungünstig auswirkt; dem muß durch Iteration begegnet werden.

* Zusammenfassender Bericht eines Forschungsvorhabens, das unter P6294-T vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in dankenswerter Weise gefördert wurde.

2. Programmiertechnische Realisierung

Auf die Ergonomie der Dialogmöglichkeit mit dem Computerprogramm wurde besonders hoher Wert gelegt. Realisiert wurde eine aufwendige Menüführung durch die einzelnen Entwurfsschritte; sie gestattet dem Benutzer ein flexibles und effizientes Arbeiten mit diesem Programm. Zur Veranschaulichung der numerischen Berechnungen wurden viele graphische Ausgabemöglichkeiten (Zeitverhalten, Ortskurven, Bodediagramme) vorgesehen, wie sie die ingenieurmäßige Entwurfserfahrung des Designers am besten unterstützen.

Im Hinblick auf die Fortführung der Forschungsarbeiten im Gebiet des Entwurfes von Mehrgrößenregelungen wurden sämtliche Programmteile in modularer Bauweise erstellt; somit wird eine Erweiterung des Programmpaketes möglich sein. Zur Berechnung von numerischen Standardaufgaben wurden Unterprogramme aus numerischen Programmbibliotheken herangezogen.

Im Rahmen der programmtechnischen Realisierung wurden Fortran-Module in der Größe von etwa 3000 Programmzeilen erstellt. Weiters wurden Module aus institutseigenen Programmbibliotheken in das Gesamtprojekt in vergleichbarem Umfang eingebunden. Als besonderer Vorteil muß auch der Umstand gewertet werden, daß sämtliche der genannten Untersuchungen aus einem einzigen lauffähigen Programm heraus durchgeführt werden können; Voraussetzung ist ein DEC-Rechner der VAX Familie unter VMS.

3. Ablauf der Forschungsarbeiten

Im ersten Abschnitt des Forschungsprojektes wurden - basierend auf den theoretischen Grundlagen - die programmtechnischen Werkzeuge zum rechnergestützten Entwurf von Mehrgrößenregelungen geschaffen. Dazu zählen neben der Adaption der am Institut bereits auf diesem Bereich existierenden Programm-Module an den Sachverhalt der Mehrgrößenregelungen im besonderen die Erstellung neuer Module, die durch die Berücksichtigung der charakteristischen Ortskurven im Reglerentwurf notwendig wurden. Weiters wurden Module erstellt, um die Entkopplung zu untersuchen und die Stabilitätsreserve und Robustheit unter Zuhilfenahme der Methode der Singulärwerte zu durchleuchten.

In diese Phase der Arbeiten fiel auch die Installation der im Rahmen dieses Forschungsprojektes angeschafften Massenspeichererweiterung für den Rechner der Type Micro-VAX II, an welchem das Programmpaket auch entwickelt wurde. Anschließend wurde die Software zur Erstellung eines Expertensystems (OSP V) an diesem Rechner installiert.

Im zweiten Abschnitt wurde dann das Programmpaket zum Entwurf und zur Simulation von Mehrgrößenregelungen fertiggestellt und mit Hilfe der aus der Benützung gewonnenen Erfahrungen stetig verbessert. Repräsentative Mehrgrößenstrecken wurden untersucht und geeignete Regler entworfen. Damit wurde das Basiswissen gewonnen, das für ein Expertensystem notwendig ist.

Anwenderorientierte Programmierung von Robotern "Erfahrung nutzen statt formalisieren"

Ahlbehrendt,N., Fuchs,H., Diesing,H.

Zusammenfassung: *In Alternative und Ergänzung zur rechnergestützten, wissensbasierten bis automatischen Off-line-Programmierung von Robotern ist insbesondere der Schwerpunkt auf die qualitative Weiterentwicklung der werkstattorientierten On-line- Programmierung zu legen. Dazu wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff der **interaktiven, sensorgestützten Programmierung** eingeführt und erläutert. Das wesentliche Merkmal dieser zu entwickelnden Programmierart ist die direkte Nutzung der natürlichen menschlichen manuellen wie motorischen Fertigkeiten und Erfahrungen zur weiteren automatischen Generierung von ablauffähigen Steuerungsprogrammen für den Automatikbetrieb. Anstelle einer prozeßfernen Off-line-Programmierung in einer virtuellen Rechnerwelt wird durch den Werker aktiv und in produktiver Arbeit die konkrete Aufgabenlösung vorgeführt und das ablauffähige Steuerungsprogramm für den Automatikbetrieb im Sinne des maschinellen Lernens automatisch generiert. Neben diesen Lernverfahren sind die Weiterentwicklung der Manipulatortechnologie und Kombination mit der Robotertechnik sowie, insbesondere, die Entwicklung effizienter reaktiver Steuer- und Bediengeräte erforderlich. Erste theoretische und experimentelle Vorarbeiten werden erläutert und diskutiert.*

Summary: *New and more efficient techniques of on-line-programming are required alternatively and in addition to computer aided, knowledge based and automated off-line-programming of robots. The paper introduces and explains the terminus of the interactive sensor guided programming. The main idea is to get task oriented control programs for automation by using the natural skills and experiences of the worker, directly. Instead of off-line-programming within a virtual world, the worker shows the task solution in active and productive work, only. The control program will be generated automatically in the sense of machine-learning. The development of robust techniques of machine learning is required as well, as the qualification of the manipulation and robot technology. Some first theoretical and experimental experiences and results are discussed.*

1. Einleitung

Eine wesentliche der in /1/ genannten Ursachen für die weiterhin schwache Präsenz von echten sensorgeführten Robotern stellt unverändert der derzeitige Stand der angebotenen Programmiertechnologien dar. Die Programmierung echter sensorgeführter, technologischer Roboter erfordert einen noch zu hohen Aufwand bei zu hohen Qualifikationsanforderungen, die vielfach nur von F&E-Einrichtungen zu erbringen sind. So beschränkt sich der Einsatz echter sensorgeführter, technologischer Roboter im wesentlichen auf die Großserienfertigung und Insellösungen.

Grob unterscheidet man bekanntlich (siehe z.B./2/) On-line- und Off-line- Programmierverfahren (siehe Bild 1). In der Mehrzahl der heutigen Roboteranwendungen dominiert noch die On-line- Programmierung vor Ort mit dem sogenannten Teach-In-Verfahren. Durch direkte Bewegung und Positionierung des Roboters werden Positionen, Bahndaten und technisch- technologische Parameter fixiert, die das relativ einfache Roboter- und Ablaufprogramm parametrisieren. Als wesentliche Vorteile dieser Programmierart werden in Verbindung mit verbesserten Programmiersprachen vom Werker einfache Programmierkenntnisse abverlangt; der Werker steht in unmittelbarem Kontakt mit dem Prozeß und überträgt so technologische Parameter direkt durch Vorführen "in die Maschine" (siehe Bild 1b). Wesentliche Nachteile dieses Verfahrens sind die relativ langen Teach-In-Zeiten und die damit verbundenen Ausfallzeiten des Industrieroboters in der Programmierphase. Mit heutigem Stand bleibt dieses Verfahren auf das "Teachen" von Parametern und Bahndaten bei stationären Umgebungsbedingungen beschränkt.

Wesentliche Fortschritte sind bei der Off-line-Programmierung (siehe Bild 1a) mit Hilfe von CAD-basierten und grafischen Programmier- und Simulationssystemen in Verbindung mit ausgebauten Programmiersprachen erreicht worden (siehe z.B /3-8/). Die markanten Vorteile dieses Programmierverfahrens bestehen in der produktiven Anlagenausnutzung auch in der Programmierphase, in der komfortablen und effektiven Programmierumgebung, im risikolosen Programmtest sowie in der zukünftig möglichen automatischen Handlungs- und Ablaufplanung und Programmgenerierung. Weitere Vorteile sind die optimalen Bahnplanungen unter Einbezug des dynamischen Robotermodelles und stationärer Umwelten (Kollisionsvermeidung). Problematisch jedoch ist die damit verbundene Arbeit mit der virtuellen Rechnerwelt: Grenzen dieser weiter ausgebauten Off-line-Programmierung sehen wir bei der Programmierung von echten sensorgeführten Robotern unter notwendigem Einbezug der aufgabenspezifischen Wechselwirkungs-, Technologie- und Sensormodelle. Zu nennen sind der hohe Aufwand zur exakten Modellierung insbesondere der gerätetechnischen Komponenten und der Umwelt, der technologischen Abläufe, Prozesse und Sensorinformationen sowie aber auch die ungenügende Positioniergenauigkeit. Auch zukünftig werden diese erforderlichen Detailinformationen nur vor Ort zu ermitteln sein, um die erforderliche Robustheit und Stabilität der On-line-Sensorführungen unter den konkreten, aufgaben- bis unternehmensspezifischen Bedingungen zu garantieren. Aber selbst bei genauer Kenntnis dieser Prozeß- und Umweltmodelle stellt die Programmierung technologischer, sensorgestützter Funktionen zu hohe Qualifikationsanforderungen, die von einem Werker nicht gefordert werden können. Aufgrund des großen potentiellen Aufgabenspektrums bei unterschiedlichsten Randbedingungen und Voraussetzungen beim Anwender dürfte der Ausweg durch Weiterentwicklung derartiger Systeme

zu Expertsystemen mit all den Problemen der Formalisierung von Expertwissen noch in weiter Ferne liegen.

Bild 2 zeigt eine Grobeinschätzung der On-line und Off-line-Programmierung mit den unterschiedlichen Anforderungen an den Bediener/ Programmierer, wobei technologische Aufgaben mit berücksichtigt wurden, die notwendig eine On-line Sensorführung mit prozeßadaptiven Eigenschaften erfordern. Die bei der Off-line -Programmierung unter Marke 3 aufgeführten Anforderungen können nicht von einem Werker abgefordert werden. Sie verdeutlichen, wie weit entfernt man derzeit noch von einem werkstatorientierten Programmiersystem für Roboter ist.

Gefordert sind daher neue, werkstatorientierte Programmiertechnologien, die den Programmieraufwand drastisch reduzieren und vom Werker mit Facharbeiterausbildung nur das, i.a. vor Ort vorhandene, technologische und produktbezogene Fertigungs- Know-How in effizienter Weise direkt am Prozeß (und nicht ausschließlich oder als Zielstellung mit der formalisierten Rechnerwelt) zu nutzen gestatten. Gegenüber den sich mit dieser Zielstellung im CNC-Bereich (siehe z.B./9-10/) mit Erfolg durchsetzenden Werkstattprogrammiersystemen (WOP) sind solche Systeme in der Robotertechnik trotz zunehmender Forderungen (siehe z.B./11-16/) nach einer solchen anwenderorientierten Programmierung von Industrierobotern, Förderprogrammen (z.B. in der BRD im Rahmen der Programme AuT oder CeA) und Vorarbeiten (siehe z.B./16-20/) noch weit zurück.

Als grundlegenden neuen Aspekt diskutieren wir hier als Alternative und Ergänzung zum derzeit schwerpunktmäßig verfolgten Weg der Nutzung von formalisiertem Wissen den Ansatz der direkten und produktiven Nutzung des natürlich vorhandenen Erfahrungswissen.

2. Anforderungen an Programmiersysteme

Grundsätzlich folgen wir den in /21/ formulierten Anforderungen an neue Programmiersysteme :

- Allgemeine, aber einheitliche Programmierung aller Steuerungen einer Zelle (SPS,CNC,IRS),
- Off-line Programmierung aller in einer Zelle eingesetzten Steuerungen mit selbsterklärenden und selbstdokumentierenden Programmierverfahren unter Verwendung von CAD- Daten,
- zugeschnittene Programmierverfahren für Problemklassen und zur effizienten Geometrie- und Technologiedatenaufnahme am Werkstück.

Das daraus abgeleitete Konzept enthält die drei sich ergänzenden und untereinander kombinierbaren Komponenten zur problem- und anwendungsbezogenen Programmierung:

- explizite einheitliche Programmierung (Bewegungs- und Ablaufprogrammierung / Maschinenniveau),
- produktorientierte implizite Programmierung (Aufgabenniveau, wissensbasierte Steuerungsprogrammgenerierung),
- sensorunterstützte Programmierung (Geometrie- und Technologiedatenaufnahme, sensorunterstützte Handführung).

Die "zugeschnittenen Programmierverfahren für Problemklassen " und die "sensorunterstützte Programmierung" verstehen wir aber in einem qualitativ erweiterten und im weiteren näher erläuterten Sinne als eine **interaktive Programmierung** in Alternative und in Ergänzung zur Off-line-Programmierung, um bei der Umsetzung dieses Konzeptes den unterschiedlichsten Bedingungen, Anforderungen und Voraussetzungen des breiten potentiellen Nutzerspektrums, insbesondere der kleinen und mittelständischen Unternehmen mit kleinen Lösgrößen, Rechnung zu tragen.

In den Großunternehmen beispielsweise stehen hierzu in der Regel ausgebaute CAD- Systeme und Erfahrungen sowie, zukünftig in erweiterter Form, Wissensbasen und Expertensysteme zur Verfügung. Mit all ihren Vorteilen wird hier die wissensbasierte Off-line-Programmierung im Vordergrund stehen mit den zentralen Entwicklungsschwerpunkten:

- Formalisierung von Expertwissen,
- Problemlösungstechniken,
- nutzerfreundlichere Bedieninterfaces.

Zielstellung ist hierbei das Abbild der realen Prozesse und Umwelt in die Rechnerwelt zur weitestgehend automatischen Programmerstellung und -optimierung. Die On-line-Programmierung wird dabei aber immer noch mehr oder weniger als notwendiges Übel und als Ergänzung angesehen, um rechnergestützt generierte Steuerungsprogramme an die - möglichst wenigen und im Rechner nicht erfaßten oder erfaßbaren - Vorortbedingungen und -daten zu adaptieren. Die damit verbundene Zielstellung der weitestgehenden Herauslösung des Menschen aus der prozeßnahen Ebene wird zunehmend in Frage gestellt.

Insbesondere aber in den kleinen und mittelständischen Unternehmen können solche ausgebauten CAD- und Expertensysteme im allgemeinen auch zukünftig nicht vorausgesetzt werden. Weiterhin werden solche Systeme in absehbarer Zeit auch kaum den erhöhten Anforderungen an die Produkt- und Aufgabenflexibilität dieses Bereiches genügen können. Hier steht zwingend die Forderung nach effizienten und leistungsfähigen, werkstatorientierten Programmiersystemen, um die Nutzbarmachung moderner Automatisierungstechnologien für diesen Bereich breitenwirksam zu ermöglichen. Insbesondere müssen dabei - bei erweitertem Aufgabenspektrum und verbesserter Ökonomie - die Qualifikationsanforderungen zur Bedienung und Einrichtung (einschließlich Programmierung) durch den Werker/Einrichter/Programmierer weitestgehend denen eines Facharbeiters entsprechen (Ersatz der heute noch zu hohen Qualifikationsanforderungen - Marke 3 in Bild 2 - durch die der Marken 1 und/oder 2).

Die konsequente Alternative zu bestehenden Programmiertechnologien und zum Ansatz der Formalisierung von Wissen und künstliche Problemlösungstechniken ist die **interaktive, sensorunterstützte Programmierung (ISP)**. Das Wesensmerkmal dieser alternativen Programmiertechnologie ist die

- **direkte Nutzung des Menschen als natürlichen Experten** mit seinem technologie- und produktbezogenen Wissen und mit seinen manuell-handwerklichen Fertigkeiten durch **automatische Programmgenerierung** ablauffähiger und robuster Steuerungsprogramme **aus in produktiver Arbeit vorgeführten Aufgabenlösungen.**

Die Programmierfähigkeiten werden also weitestgehend durch produktive Arbeitsverrichtungen ersetzt. Grundlegende Voraussetzungen zur Umsetzung dieser Programmier-technologie ist die Möglichkeit der

- Nutzung des Roboters sowohl als handgesteuerten Manipulator mit unterstützenden und entlastenden Automatikfunktionen als auch als automatischen Roboter.

Diese interaktive Programmierung ist unseres Erachtens die wesentliche neue Komponente bei der Entwicklung zukünftiger werkstatorientierter Programmiersysteme für aufgabenflexible und sensorgeführte Roboter. Die Effizienz der interaktiven, sensorunterstützten Programmierung wird damit durch die der Manipulator-technologie mitbestimmt, die zu automatikfähigen Manipulatoren als Komponente der interaktiven Programmierung in der Robotertechnologie zu entwickeln aber auch als eigenständiges Entwicklungs- und Anwendungsfeld (siehe z.B./17/) weiterzuentwickeln ist.

Diese Forderung zielt weiterhin auf ein einheitliches Konzept des "automatikfähigen Manipulators" oder des "manipulatorfähigen Roboters", der, den unternehmensspezifischen und auftragsbezogenen Bedingungen angemessen, flexibel vom hand- bis automatisch gesteuerten Roboter eingesetzt werden kann - bei Beibehaltung der Integrierbarkeit in Fertigungslinien. Nicht das technisch Machbare oder die Vision der Vollautomatisierung, sondern die unternehmensspezifisch sinnvoll angepaßte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine bestimmt die Flexibilität, Effizienz und Wirtschaftlichkeit von (Teil-)Automatisierungslösungen.

3. Wesen und Einordnung der interaktiven Programmierung

Wie beim herkömmlichen Teach-In oder beim (noch zu entwickelnden) sensorunterstützten Programmieren zur Vorort- Aufnahme von Daten wird bei der **interaktiven, sensorunterstützten Programmierung** der Roboter dabei zunächst als Manipulator mit dem Bediener als "Steuerungssystem" genutzt, allerdings mit der wesentlichen qualitativen Erweiterung im Sinne des **maschinellen Lernens** von gezielten Reaktionen auf aktuelle Prozeß- und Umweltzustände in Form von robusten, adaptiven Steuerungsfunktionalen (-programmen) **aus in produktiver Arbeit vom Werker vorgeführten (Teil-) Aufgabenlösungen**. Da bei dieser manuell-manipulativen Vorführphase durch den Werker produktive Arbeit geleistet werden kann und soll, wird ein wesentlicher Nachteil heutiger On-line-Programmierverfahren gleichsam beseitigt.

Einheitliches Programmiersystem- Konzept

Bei der Einordnung der interaktiven Programmierung in ein einheitliches Programmiersystem -Konzept /21/ kann die zentrale Komponente der Off-Line-Programmierung mit seinen expliziten und impliziten Programmier-technologien grundsätzlich einheitlich gestaltet werden: Wie bei der impliziten Programmierung kann der Anwender formale Makros (Teil- oder Unterprogramm-Namen) für mehr oder weniger komplexe (Teil-) Aufgaben nach seinem Bedarf definieren, wie z.B. "Füge Teil A in Teil B", "Entgrate Teil C". Die wesentliche Erweiterung besteht nun darin, daß die entsprechenden ablauffähigen Steuerprogramme (wir bezeichnen diese im folgen-

den als Roboter-"Skills") je nach Ausbaustufe des Programmiersystems wahlweise

- rechnergestützt unter **Nutzung** von **formalisiertem** Wissen und von **künstlichen** Problemlösungstechniken Off-line generiert werden

oder in der alternativen und hier diskutierten neuen "interaktiven Programmierung" vom Werker

- in produktiver Arbeit vorgeführt und so unter direkter **Nutzung** der **natürlichen** Erfahrungen und Fertigkeiten für **Problemlösungen** im Sinne des maschinellen Lernens "belehrt" werden.

Dieser Gedanke der interaktiven Programmierung bzw. des maschinellen Lernens aus direkt vorgeführten Aufgabenlösungen ist verallgemeinerungsfähig: Beispielsweise können auf diese Weise auch Datenbanken und Expertensysteme ohne den Umweg der expliziten Formalisierung von Expertwissen sinnvoll und effektiv gefüllt werden. Ein weiterer Vorteil einer solchen Programmierung besteht darin, daß sie in produktiver Arbeit erfolgt.

Bild 3 veranschaulicht die variabel gestaltbaren und kombinierbaren Komponenten eines solchen allgemeinen Programmiersystemkonzeptes, deren wesentlich neue Komponente durch die Blöcke "Automatikfähiger Manipulator" und "Skill-Generator" zur interaktiven Programmierung charakterisiert ist. Bild 4 verdeutlicht, daß im Vergleich zum Bild 2 mit der Umsetzung der interaktiven Programmierung tatsächlich nur noch Qualifikationsanforderungen gestellt werden, die von einem Werker erbracht werden. Es werden von ihm nur noch elementare Programmierkenntnisse und im weiteren seine prozeß- und aufgabenbezogenen Erfahrungen und Geschicklichkeiten bei der Lösung konkreter Aufgaben abverlangt. Bild 5 zeigt schematisiert die Stellung des Menschen/Werkers bei der interaktiven, sensorunterstützten Programmierung und das Wesen dieser qualitativ erweiterten On-line-Programmierart.

Grundprinzip der interaktiven Programmierung und Belehrung

Der allgemeine theoretische Hintergrund der Generierung von prozeß- und umweltadaptiven Steuerungs- und Regelungsfunktionalen zur Lösung spezieller Aufgaben ("Füge Teil A in Teil B", "Fahre die Kontur ab", "Entgrate Teil A",...) aus vom Menschen in produktiver Arbeit vorgeführten Aufgabenlösungen basiert auf folgenden allgemeinen Voraussetzungen:

- * Die menschlichen und steuerungsseitigen Reaktionszeiten sind vergleichbar.
- * Die menschlichen Steueraktionen $U_{\text{Mensch}}(t)$ werden in funktionaler (unbekannter) Abhängigkeit von den menschlich-motorisch (visuell, Gehör, Gefühl,..) oder sensorisch erfaßten, Prozeßzuständen $P(t)$ in adäquater und aufgabenlösender Form vorgegeben:

$$U_{\text{Mensch}}(t) = \mathcal{U}_{\text{Mensch}}\{P(\tau), \tau \leq t\}.$$

- * Die technischen Sensorinformationen $S(t)$ erfassen qualitativ die vom Menschen notwendig zur Aufgabenlösung verwendeten Prozeßinformationen.

$$S(t) = \mathcal{S}\{P(\tau), \tau \leq t\}.$$

Somit kann prinzipiell das Steuerfunktional

$$U_{\text{Automatik}} = \mathcal{U}_{\text{Automatik}} \{ S(\tau), \tau \leq t \}$$

unter Zugrundelegung eines geeigneten Anpassungskriteriums

$$Q \{ U_{\text{Mensch}}(\tau), U_{\text{Automatik}}(\tau) / S(\tau), \tau \leq T \} = \text{Infimum}$$

in Abhängigkeit von den technischen Sensorinformationen als ablauffähiges Steuerprogramm strukturell und parametrisch generiert werden.

Die Machbarkeit erfordert jedoch die Beherrschung praktischer Randbedingungen, wie z.B. kleine Belehrungszeiten T_B oder die immer bestehenden Informationsunterschiede zwischen der menschlich-sensorischen Wahrnehmung und den technisch gemessenen Sensorinformationen, unter denen die Zuverlässigkeit, Funktionssicherheit und Robustheit der so zu generierenden "Skill-Funktionale" zu garantieren sind. Aber welche Generierungskriterien und welche Funktionsklassen sind unter diesen Bedingungen geeignet? Die interaktive Programmierung stellt somit noch ein Forschungs- und Entwicklungsfeld dar.

Grundlegende gerätetechnische Voraussetzung für die Effizienz und Möglichkeit der Programmierung durch Vorführen ist die Verfügbarkeit "Automatikfähiger Manipulatoren" oder "manipulatorfähiger Roboter" mit sensorgestützten und teilautomatisierten Funktionen, um die bei der Belehrung erforderliche "beiläufige" Führung des Roboters zu ermöglichen. Der Werker darf während seiner Arbeit nicht durch die Technik behindert oder wesentlich abgelenkt werden. Ein wesentlicher Entwicklungsaspekt ist dabei die Bereitstellung reaktiver Steuergeräte, die den Werker Prozeßzustände und -reaktionen direkt und möglichst natürlich "fühlen" lassen.

Der grundlagenorientierte Teil bezieht sich auf die Realisierbarkeit des "Skill-Generators". Neben den eigentlichen Generierungs- und Adaptionsverfahren selbst sind hier systematische Untersuchungen durchzuführen, wie zur

- Systematisierung der Aufgabenklassen und -komplexität, die mit solchen Belehrungstechniken sinnvoll und effizient vorführbar und beherrschbar sind.
- Systematisierung, Definition und Entwicklung der erforderlichen Grund- und Standardfunktionen eines Steuerungssystems, um menschliche Steuerungsstrategien und -aktionen adäquat durch programmtechnisch realisierbare Steuerungsfunktionale entsprechender Robustheit abbilden zu können (Minimum an Standard- und Elementarfunktionen \Leftrightarrow Maximum der damit lösbaren Aufgabenklassen).
- Robustheit der adaptierten "Skills" bezüglich der immer bestehenden Unterschiede zwischen den vom Menschen während der Vorführung genutzten Prozeßinformationen $P(t)$ und den technisch zur Verfügung stehenden Sensorinformationen $S(t)$.

Nach diesem mehr programmatischen Teil sollen nachfolgend die erste Schritte, Teilergebnisse und Erfahrungen des Instituts für prozeßadaptive und erfahrungsgel leitete Automatisierung der Technischen Fachhochschulen Berlins (IpeA Berlin) auf dem Weg zur weiteren Entwicklung interaktiver Programmiersysteme kurz vorgestellt werden.

4. Beispiele

4.1 Kontaktlose Konturverfolgung / Prädiktion

Als ein erstes Beispiel betrachten wir das stark vereinfachte Konturverfolgungsproblem (siehe Bild 6):

Der Robotereffektor (Position und Orientierung : $X(t) = (x, y, z, F)$) soll in der y-z-Ebene mit konstanter y-Geschwindigkeit v_0 und konstanter Orientierung $F=0$ zum kartesischen Grundsystem verfahren (Bewegungsaufgabe) und dabei in z-Richtung einen konstanten Abstand d_0 zu einer unbekanntem Kontur $f(y)$ halten (Reaktionsaufgabe). Dazu stehen zum Zeitpunkt t die vergangenen Meßwerte des kontaktlosen Konturabstandes zur Verfügung, die unter realen Bedingungen immer Meßstörungen n_t enthalten: $s(t) = d(t) + n_t$. Da die Roboterstellung bekannt ist, stehen mit $f(y_t) = z_t - d(t)$ auch die Meßwerte der aktuellen Konturhöhen zur Verfügung

$$r_{t-i} = f(y_{t-i}) + n_{t-i}, \quad i \geq 0. \quad (1)$$

Für Roboter mit leistungsfähigen Bahnsteuerungen kann bei kontaktlosen Prozessen die Roboterdynamik näherungsweise durch ein einfaches Verzögerungsglied ($n \geq 2$ IPO-Takte) beschrieben werden, d.h., zum Zeitpunkt t werden vom Roboter die Position und Orientierung $X(t)$ realisiert, die zum Zeitpunkt $t-n$ als Sollzustand $X^0(t-n)$ vorgegeben wurden. Mit den a priori Bahnvorgaben wird somit die Bahn-aufgabe ($x_t=0, y_t = y_{t-1} + v_0, F_t=0$) mit der weiter nicht interessierenden Verzögerung realisiert.

Unter diesen stark vereinfachten (aber praktisch verifizierten) Annahmen stellt die verbleibende Reaktionsaufgabe $z(t+n) = z^0(t) \Rightarrow f(y_{t+n}) + d_0$ daher primär ein Problem der optimalen Vorhersage der a priori unbekanntem Kontur zum Zeitpunkt t für den zukünftigen Zeitpunkt $t+n$ aus den vergangenen Meßwerten dar

$$z_{ex}(t+n/t) = \langle [f(y_{t+n}) / r_{t-i}, 0 \leq i \leq M] \rangle, \quad (2)$$

wobei M den Beobachtungshorizont bezeichnet. Im praktischen Fall ist immer ein zusätzlicher Regleranteil $R(e_{t-i} / i \geq 0)$ bezüglich des Reaktionsfehlers

$$e_t = f(y_t) + d_0 - z_t \quad (3)$$

mit zu berücksichtigen, so daß die sensorgestützte Sollvorgabe zur Lösung der Reaktionsaufgabe folgende Struktur besitzt

$$z^0(t) = z_{ex}(t+n/t) + d_0 + R(e_{t-i} / i \geq 0) = Z\{e_{t-i}, r_{t-i}, i \geq 0\}. \quad (4)$$

Sie führt zu folgender Reaktionsfehlergleichung

$$e(t+n) + R(e_{t-i} / i \geq 0) = f(y_{t-n}) - z_{ex}(t+n/t).$$

Schon bei diesem stark vereinfachten Problem werden bei der reinen Off-line-Synthese des "Skills: Prädiktion / Konturverfolgung" umfangreiche Detailkenntnisse über das Objekt und die technologischen Bedingungen gefordert.

Erstens setzt eine optimale Synthese des Prädiktors praktisch relevante Annahmen über die qualitative Struktur der Kontur $f(y)$ voraus. Beispielsweise können hinreichend glatte Konturen in einem y-Intervall endlicher Länge $Y_t = (y_t - n v_0, y + M v_0)$ durch ein Polynom N-ter Ordnung beschrieben werden, dessen Parameter für jedes Y_t -Intervall verschieden sein können. Unter diesen Voraussetzungen erhält man einen linearen Prädiktor mit konstanten Koeffizienten und mit endlichem Beobach-

tungshorizont $M \geq N \geq 0$ (N : angenommene Ordnung der Kontur, n : Prädiktionshorizont)

$$z_{\text{ex}}(t+n/t) = \sum_i p_i(n, N, M / \{n_t\}) \quad , \quad p_i(\dots) = 0 \text{ für } i < 0 \text{ und } i > M. \quad (5)$$

Die Prädiktorkoeffizienten erfüllen dabei die Randbedingungen (Invarianz gegenüber Krümmungen bis zur N -ten Ordnung) :

$$s_k(n, N, M) = 1 - \sum_i (-i)^k p_i(n, N, M / \{n_t\}) \quad \text{für } 0 \leq k \leq N. \quad (6)$$

Zweitens ist die optimale Festlegung der Prädiktorkoeffizienten, der angenommenen Konturordnung N und des Beobachtungshorizontes M in Verbindung mit der geforderten Verfahrensgeschwindigkeit v_0 dominant vom zugrundegelegten Optimalitätskriterium, von der Reglerstruktur $R(e_{t-i} / i \geq 0)$ und insbesondere von der Statistik $\{n_t\}$ (qualitativ und quantitativ) des realen Meßrauschens n_t abhängig (Erwartungswert, Intensität bzw. Signal-Rauschverhältnis, Korreliertheit,...). Gewöhnlich wird man von der mehr mathematischen als praktischen Annahme weißer Störprozesse ausgehen.

Lassen wir also den Menschen diese Prädiktionen vorführen. Er löst diese Aufgabe ohne explizite Kenntnis solcher Detailinformationen intuitiv in vernünftiger Weise und den realen Bedingungen angepaßt.

Zur ersten Untersuchung dieser menschlichen Prädiktionen und der daraus generierten automatischen Prädiktionen wurde folgender Test durchgeführt: Auf dem Bildschirm erscheinen die letzten 40 fiktiven und wahlweise verrauschten "Meßwerte" r_{t-i} einer zufälligen aber glatten Kontur. Der Bediener hat nun per Cursor seine Prädiktion über $n=2$ Schritte (etwa 1,5 cm) vorzunehmen und zu fixieren, worauf die nächste "Messung" der Kontur erscheint und die nächste Prädiktion abgefordert wird. Gleichzeitig werden die menschlichen Prädiktionen und "Meßwerte" im Rechner aggregiert, um nach Beendigung des Belehrungsvorganges (B Belehrungen) die, den menschlichen Prädiktionen angepaßte, automatischen Prädiktoren bis zur 10-ten Ordnung mit und ohne (linearem) Regler $R(e)$ zu generieren. Dabei wurde das Least-Squares-Kriterium

$$Q(M) = \text{Inf} \sum_t [z_{\text{Mensch}}(t+2) - Z\{e_{t-i}, r_{t-i}, i \geq 0\}]^2, \quad 0 \leq t \leq B \quad (7)$$

mit und ohne der Nebenbedingung (siehe Glg.(6)) herangezogen

$$s_0(n, N, M) = 0. \quad (7a)$$

Die Bilder 8 und 9 zeigen typische Ergebnisse der mit unterschiedlichen Testpersonen durchgeführten Experimente zur Generierung von Automatikprädiktoren, die aus kurzen und längeren, "guten" und "schlechten" menschlichen Belehrungen gewonnen wurden. Erstaunlich ist die hohe Prädiktionsgüte und Robustheit gegenüber verschiedenen "Konturausschnitten" der selbst bei kurzen und "schlechten" (aber trendkonformen) menschlichen Belehrungen bestimmten automatischen Prädiktoren. Zur Simulation starker Informationsunterschiede ("exakte" menschliche und verrauschte technisch- sensorische Informationsaufnahme) wurde in der Belehrungsphase der Testperson zwar die tatsächliche "Kontur" angeboten, die Generierung des automatischen Prädiktors erfolgte jedoch unter Berücksichtigung des simulierten Meßrauschens. Auch unter diesen Bedingungen wurden aus den Belehrungen Prädiktoren hoher Güte generiert. Allerdings ist dazu ein größerer Belehrungshorizont als im quasideterministischen Fall erforderlich.

Diese Ergebnisse belegen doch an einem einfachen und überschaubaren Beispiel die prinzipielle Tragfähigkeit des hier vorgeschlagenen Konzeptes der interaktiven Programmierung.

Erreicht wurde diese robuste Generierung des "Skills Prädiktion" durch folgende Maßnahmen, die wir hier als verallgemeinerungsfähige Schlußfolgerungen formulieren:

1. Zur Generierung funktionaler "Skills" aus vorgeführten Aufgabenlösungen sind dem eigentlichen Generierungskriterium immer Robustheit garantierende Nebenbedingen zu berücksichtigen.
Im Prädiktionsbeispiel führt das "nackte" Kriterium (7) häufig zu Automatikprädiktoren, deren Güte in Größenordnungen unakzeptabel sein kann. Das um so mehr, wenn im Automatikbetrieb ein anderer "Konturausschnitt" als in der Belehrungsphase vorliegt und die Belehrungsphase klein ist. Erst die Berücksichtigung von Nebenbedingungen (im Testbeispiel die Nebenbedingung (7a)) führt zu Automatikprädiktoren der erforderlichen Robustheit, auch bei kleinem Belehrungshorizont und relativ schlechten Belehrungen.
2. Das - evtl. aufgabenspezifisch bekannte - theoretisch optimale Lösungsfunktional ist allein i.allg. nicht geeignet zur Generierung von robusten "Automatik-Skills" aus menschlichen Belehrungen. Hierzu bedarf es zusätzlicher oder abgewandelter Funktionale, um das menschliche (nicht weiter untersuchte oder gar formalisierte) Steuerungsverhalten durch entsprechende automatische "Automatik- Skills" adäquat und robust adaptieren zu können.
Im Prädiktionsbeispiel wurde dies erreicht, indem dem theoretisch optimalen Prädiktor gemäß Gleichung (5) eine Reglerstruktur zu einem robust belehrbaren Gesamtfunktional gemäß Gleichung (4) überlagert wurde. Neben dieser strukturellen Modifikation ist auch quantitativ keine reproduzierbare Korrespondenz zwischen den theoretisch optimalen und den belehrten Prädiktorkoeffizienten p_i festzustellen. Die aus den belehrten Automatifunktionen berechneten Größen $s_{k, Mensch}(n, N, M)$ lassen zwar sehr gut auf die vom Menschen zugrundegelegte Konturordnung N schließen (für $0 \leq k \leq N_{Mensch}$ sind diese betragsmäßig dominant kleiner als 1 und für $k > N_{Mensch}$ dominant größer als 1). Dennoch ist nach Analyse der Testergebnisse kein reproduzierbarer Zusammenhang zwischen den theoretisch optimalen Prädiktorkoeffizienten und den identifizierten "menschlichen Prädiktorkoeffizienten" herstellbar.
3. Zur Strukturauswahl bzw. -bestimmung des "Automatik-Skills" sind zum Adaptionkriterium zusätzliche Kriterien erforderlich.
Im Prädiktionsbeispiel bestimmt nicht das Minimum von $Q(M)$ den für die automatische Prädiktion zu wählenden Beobachtungshorizont (Ordnung des Prädiktors). $Q(M)$ fällt monoton mit wachsendem M zunächst sehr steil und ab einem M_0 dominant schwächer ab. Dieses M_0 ist als Beobachtungshorizont für den Automatikprädiktor zu wählen. (Das ist auch leicht verständlich: Bei beispielsweise B belehrten Vorhersagen gilt für die adaptierten Prädiktoren $Q(M \geq B) = 0$. Solche Prädiktoren sind jedoch völlig ungeeignet, legen sie doch durch die B belehrten Vorhersagen eine Kurve, die nur für die bei der Belehrung realisierte Kontur, nicht aber für andere Konturausschnitte sinnvoll sein kann).

4.2 Interaktiver Roboter zum kraftadaptiven Gußputzen

Ein typisches Beispiel für die Relevanz der hier angeregten interaktiven Programmierung ist das Entgraten von Gußteilen, das insbesondere in den klein- und mittelständischen Unternehmen (Gießereien) mit kleinen Losgrößen überwiegend noch in Handarbeit erfolgt.

In IpeA wurde eine Laborlösung eines "Interaktiven Roboters" auf der Basis industriell verfügbarer Robotertechnik aufgebaut, die entsprechend der dargelegten Überlegung zur interaktiven Programmierung die kombinierte oder alternative Nutzung des Roboters als Manipulator oder automatisch arbeitenden Roboters erlaubt. Der Prinzipaufbau ist in Bild 9 schematisch dargestellt. Anstelle des reaktiven Manipulatorführungsgerätes wird derzeit noch ein 6-komponentiger Teachball eingesetzt.

Zwischen Roboterhandflansch und Roboterwerkzeug (eine elektrische Schleifmaschine) sind eine mehrdimensionale Nachgiebigkeit sowie ein 6-komponentiger Kraftmomentensensor befestigt, die eine kraftadaptive Bearbeitung und Konturverfolgung von Gußteilen a priori unbekannter Konturen erlauben.

Die wesentlichen Entwicklungsziele sind die Entwicklung einer flexiblen Entgratstation mit werkzeugführendem Roboter, vorrangig für Anwender in der Klein- und Mittelserienfertigung mit der Möglichkeit der simultanen und alternativen Handsteuerung (Manipulatorbetrieb) und automatischen Steuerung sowie insbesondere die Möglichkeit der automatischen Generierung der kraftadaptiven Automatikfunktion während des produktiven Manipulatorbetriebes im Sinne der hier erläuterten interaktiven Programmierung. Die Vorteile eines solchen, bis zur Anwendungsreife durchzuentwickelnden Systems liegen in der kombinierten Nutzung der Möglichkeiten des Manipulators und des automatisch arbeitenden Roboters. Insbesondere sind die hohe Einsatzflexibilität und Ökonomie durch die unternehmens- und aufgaben- bzw. lose-spezifische Wahl des Nutzungsregimes eines solchen Systems hervorzuheben.

Demonstriert werden derzeit mit dieser ersten Laborlösung das kraftadaptive, automatische Entgraten von Gußteilen unbekannter Konturen (diese werden nicht identifiziert, gespeichert oder gar programmiert) sowie die einzelnen Betriebsarten: Manipulator-, Automatik- und simultaner Automatik- und Manipulatorbetrieb, wie beispielsweise: Manipulative Heranführung des Roboterwerkzeuges an das beliebig eingespannte Gußteil, weitere manipulative oder automatische Bearbeitung des Gußteiles. Während des automatischen Bearbeitens einschließlich der on-line-Konturverfolgung ist mit der interaktiven Steuerung jederzeit der manipulative Eingriff zu Bahnkorrekturen, Beschleunigung, Kraftverstärkung, zum Abheben und Wiederholen an einer beliebigen Konturstelle u.a. möglich. Mensch und Maschine arbeiten zusammen!

Wie im ersten, stark vereinfachten Beispiel der Prädiktion bzw. der kontaklosen Konturverfolgung setzt sich die Sensorführung wieder aus einem (Kraft-Momenten-) Regler und einem Prädiktor bzw. einer Schätzung der aktuellen Normalen- und Tangentialen des Objektes an der aktuellen Tool-Position zur Bestimmung der Richtungen zur Regler-Korrektur und des Vorschubes zusammen., allerdings in einer wesentlich komplexeren und off-line weniger beherrschbaren Form (im ersten Beispiel waren diese a priori durch die konstante z- bzw. y-Richtung vorgegeben): Hier liegt der Kontaktfall und somit eine geschlossene kinematische Kette mit notwendig zusätzlichem elastischen Glied mit dem "elastischen Zustandsvektor " q_E (siehe Bild

10) vor, dessen objekt- und werkzeugspezifische, effektive Steifigkeit direkt und sensibel die Stabilität des Sensorreglers beeinflusst. Werkzeugwechsel bedeutet somit Neuanpassung des Kraftreglers. Zwar kann der "steife" Roboter auch hier wieder näherungsweise durch ein Verzögerungsglied beschrieben werden

$$TRA(t) = TRA^0(t-n),$$

nicht aber der elastische Anteil $T_{AT}(q_E)$ (der obere Index "o" kennzeichnet die Bahnvorgabe, fehlender oberer Index die Realisierung).

Die wesentliche Schwierigkeit besteht jedoch im Entwurf des Prädiktions- bzw. Schätzfunctionals zur on-line - Bestimmung der aktuellen Objekt-Normalen und -Tangentialen aus den Kraft-Momenten-Informationen. Abgesehen von den erforderlichen Transformationen und der lose- und werkzeugspezifischen Auswahl und Kombination der Kraft-Momenten- Komponenten sind dazu konkrete Informationen bzgl. der objekt- und werkzeugspezifischen Widerstands- und Reibkräfte erforderlich, die wohl kaum off-line beherrschbar sind, insbesondere bei kleinen und wechselnden Losgrößen.

Die automatische Generierung der kraftadaptiven Steuerungs- und Schätzfunctionale wurde in einfachen Teilkomponenten realisiert und wird in einer Folgearbeit detaillierter beschrieben.

Aufgrund der fehlenden Reaktivität des Teachballes sind bei dieser Lösung jedoch ein noch zu hoher Lernaufwand und eine zu hohe Konzentration erforderlich, die eine adäquate Beherrschbarkeit der interaktiven Roboterführung bzw. Bahn- und Reaktionskorrektur allenfalls in einer (einstellbaren) Ebene ermöglichen.

4.3 Master-Roboter

Die bisherigen Erfahrungen am interaktiven Roboter weisen nachdrücklich das Erfordernis nach effektiven reaktiven Steuergeräten aus, die das natürliche Nutzen der Fertigkeiten des Bedieners/Werkers ermöglichen, was mit der unter 4.2 erwähnten (nichtreaktiven) Teachkugel nicht zu erreichen ist. Zentrales Problem ist die "beiläufige" Beherrschbarkeit der 6 Freiheitsgrade (Position und Orientierung). Eine wesentliche Forderung zur Erreichung einer hohen Nutzerakzeptanz ist die individuelle Anpaßbarkeit derartiger reaktiver Steuergeräte - ein klassisches Beispiel zur Anwendung der hier beschriebenen Belehrungsphilosophie.

Hierzu wurden am IpeA erste Vorversuche erfolgreich durchgeführt: Als "Reaktives Steuergerät" wurde ein Roboter mit einem 6 - komponentigen Kraftmomentensor und einem daran befestigten Steuergriff als Master-Roboter zur weiteren Steuerung eines Slave-Roboters verwendet. Dazu wurde ein neuartiges Belehrungsverfahren entwickelt und erfolgreich getestet /22/: In einer Belehrungsphase prägt der Bediener über den Masterhandgriff seine individuellen Führungsgrößen zur Auslösung der von ihm gewünschten Bewegungen (Positions- und Orientierungsänderungen) auf. Diese Belehrungen werden vom Kraftmomentensensor im aktuellen Sensorkoordinatensystem K_q ($q(t) = (q_1, \dots, q_6)$ bezeichnet die aktuellen Winkelachsstellungen des Masterroboters) als 6-komponentige Kraftmomenteninformationen Kräfte und Momente $S_{\text{Belehrung}}$ gemessen und automatisch in das individuell angepaßte Bahn-Steuerfunktional $U_{\text{Steuerung}}(q, S_{\text{Mensch}})$ für die Arbeitsphase umgesetzt . **Die Technik paßt sich also dem Menschen an!**

Eine Reaktivität ist hier allein schon durch die Bewegungsausführung des Masterroboters gemäß dieses Steuerfunctionals gegeben und ermöglicht die Masterführung in den 6 Freiheitsgraden ohne ablenkende Konzentrationsanstrengungen. Die zusätzliche Integration einer Kraftreflektion wird die nutzerangepaßte und "beiläufige" Führung weiter verbessern und Fehlbedienungen weiter einschränken.

Zusammenfassung:

Bei der Weiterentwicklung der Programmier Techniken ist neben der rechnergestützten bis automatischen Off-line-Programmierung insbesondere der Schwerpunkt auf die qualitative Weiterentwicklung der werkstatorientierten On-line- Programmierung zu legen.

*Im konzeptionellen Teil dieser Arbeit wird dazu in Alternative und Ergänzung zur Off-line-Programmierung der Begriff der **interaktiven, sensorgestützten Programmierung** eingeführt und erläutert. Das wesentliche Merkmal dieser zu entwickelnden Programmierart ist die direkte Nutzung der natürlichen menschlichen manuellen wie motorischen Fertigkeiten und Erfahrungen zur weiteren automatischen Generierung von ablauffähigen Steuerungsprogrammen für den Automatikbetrieb. Anstelle einer prozeßfernen Off-line - Programmierung in einer virtuellen Rechnerwelt wird durch den Werker aktiv und in produktiver Arbeit die konkrete Aufgabenlösung vorgeführt und das ablauffähige Steuerungsprogramm für den Automatikbetrieb im Sinne des maschinellen Lernens automatisch generiert. Neben diesen Lernverfahren sind die Weiterentwicklung der Manipulator Technologie und Kombination mit der Roboter-technik sowie insbesondere die Entwicklung effizienter reaktiver Steuer- und Bedien-geräte erforderlich.*

Erste theoretische und experimentelle Vorarbeiten werden am einfachen Beispiel der Belehrung von automatischen Prädiktoren (kontaktlose Verfolgung unbekannter Konturen) sowie an den Beispielen des kraftadaptiven Entgratens von Gußteilen unbekannter Konturen und der Belehrung reaktiver Steuergeräte (kraft- und momen-ten-geführter Master-Roboter) erläutert und diskutiert.

Literaturhinweise

- /1/ Schraft,R.-D.: Sensoren für Industrieroboter. elz (1988)11, S.16-20.
- /2/ Blume,Ch. , Jacob,W. : Was leisten Programmiersprachen für Industrieroboter? Elektronik 6(1982)3, S. 65-70.
- /3/ Göhner,H., Schmidt, K.-H.: Einheitliche Programmierung von Industrierobotern mit einem Struktureditor. In: Robotersysteme (1989)5, S.141-148.
- /4/ Freund,E.,Heck,H.,Kraft,K., Maure,Ch.: OSIRIS- Ein objektorientiertes System zur impliziten Roboterprogrammierung und - simulation. In: Robotersysteme (1989)6, S. 185-192.
- /5/ Bernhardt,R.,Dillmann,R.,Hormann,K.,Tierney,K.: Integration of Robots into CIM.
Chapman&Halley, London, 1992.
- /6/ Noaker,P.M.: On-Line wih Robotic Cell Design
Manufacturing Engeneering 110(1993)6, S. 33-36.
- /7/ Bernhardt,R.,Dillmann,R.,Hormann,K.,Tierney,K.: Integration of Robots into CIM. Chapman&Halley, London, 1992.
- /8/ Schneider,S.A., R.H.Cannon,jr.: Experimental Object-Level Strategic Control with Cooperating Manipulators, Robotics Research vol.12 (Aug. 1993) 4, S.338-350
- /9/ Hohweiler,E.,Metzler,U.,Weiß,V.: CAD/NC-Kopplung für WOP-Systeme, ZWF 87(1992)10, S.582-586.
- /10/ Morgenweck,H.,R.Isele: Neue Wege in der NC-Programmierung. ZWF/CIM 88(1993)3, S.124-126.
- /11/ Martin,H.,Rose,H.: Erfahrungswissen sichern statt ausschalten. Technische Rundschau (1990)2, S.34-41.
- /12/ Blume,Ch.,B.Fromherz: Programmierung sensorgeführter Montageroboter. KfK- PFT-Berichte Nr. 120, Karlsruhe.
- /13/ Fuchs,H.: Einheit von Mensch und Automatisierung.
Workshop der FFTe.V. und der TFH Berlin " Trends und Auswirkungen der menschenintegrierenden Fertigung", Berlin,12.Nov.1992, Vortragsbd. S. 7-20.
- /14/ Erbe,H.-H.: Die Qualifikation der Facharbeiter als Basis einer werkstattorientierten Produktionsunterstützung. Workshop der FFTe.V. und der TFH Berlin " Trends und Auswirkungen der menschenintegrierenden Fertigung", Berlin,12.Nov.1992, Vortragsbd.S. 49-56.
- /15/ Ch.Bartsch,E.Gundler: Automation der Fabrik 2000.
handling, März/April 1992,S.5-10.
- /16/ Autorenkollektiv: Materialband zum Workshop des BMFT-Verbundprojektes "Verbesserte, benutzerorientierte Werkstattprogrammierung von Industrierobotern". Aalen 10.03.1993.
- /17/ Thiessen,C.: Flexible Deburring of Castings per Skillfully Used Telerobot. Proc. of IFAC/IFIP/IMACS Symp. "Skill Based Automated Production", Wien, Nov. 15-17. 1989, S.TS10-1 bis 8.
- /18/ Ahlbehrendt,N.,Horch,H.-J.,Tentschew,A.: Techniques of Teaching Skills to Sensor Guided Robots. Proc. of IFAC/IFIP/IMACS Symp. "Skill Based Automated Production", Wien, Nov. 15-17. 1989, S.TS10-15 bis 20.
- /19/ Niedermayr,E.,Kempkens,K.:Neue Aspekte anwendungsorientierter Roboterprogrammierung.
Werkstatt und Betrieb 123(1990)9, S.720-724.

- /20/ Ahlbehrendt,N.: Interaktive Programmierung von Robotern. Workshop der FFTe.V. und der TFH Berlin " Trends und Auswirkungen der menschenintegrierenden Fertigung", Berlin, 12.Nov.1992, Vortragsbd. S. 59-64.
- /21/ Pritschow,G., Frager,O., Schumacher,H., Wieland,O.: Programmierung von roboterbestückten Produktionsanlagen. In: Robotersysteme (1989)5, S47-56.
- /22/ Hartert,P.:Masterroboterführung mit Kraftmomentensensorik, Diplomarbeit 1993, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin i.G., angefertigt im IpeA.

Bildunterschriften

Bild 1 : Stellung des Menschen bei der On-line und Off-line-Programmierung von Industrierobotern.

Bild 2 : Grobeinschätzung der gängigen Programmierverfahren für Industrieroboter.

Bild 3 : Systemkomponenten eines allgemeinen Roboterprogrammiersystems.

Bild 4 : Grundkonzept der Komponente "Interaktive, sensorunterstützte Programmierung und Belehrung" eines Werkstattprogrammiersystems für technologische Roboter.

Bild 5 : Illustration der Komponente "Interaktive, sensorunterstützte Programmierung und Belehrung" eines Werkstattprogrammiersystems für IR.
(IR: Industrieroboter, IRS: IR-Steuerung)

Bild 6 : Einfachstes Konturverfolgungsproblem ($x=0$; $y=const.$; $d(t)=d_0>0$).

Bild 7 : Aus nur 6 und schlechten aber trendkonformen menschlichen Prädiktionen wird unter Berücksichtigung der Nebenbedingung (7a) ein robuster Prädiktor hoher Prädiktionsgüte generiert.

Bild 8 : Beispiel einer relativ langen und guten Belehrungsphase zur interaktiven Programmierung robuster Prädiktoren.

Bild 9 : Schema der Laborrealisierung des interaktiven Roboters mit interaktiver Programmierkomponente.

Bild 10: Geometrische Grundbeziehungen für einen Roboter zum kraftadaptiven Entgraten mit automatischer Konturverfolgung. $T_{a,b}$ bezeichnet das 4x4-Frame vom Koordinatensystem K_b zum Koordinatensystem K_a .

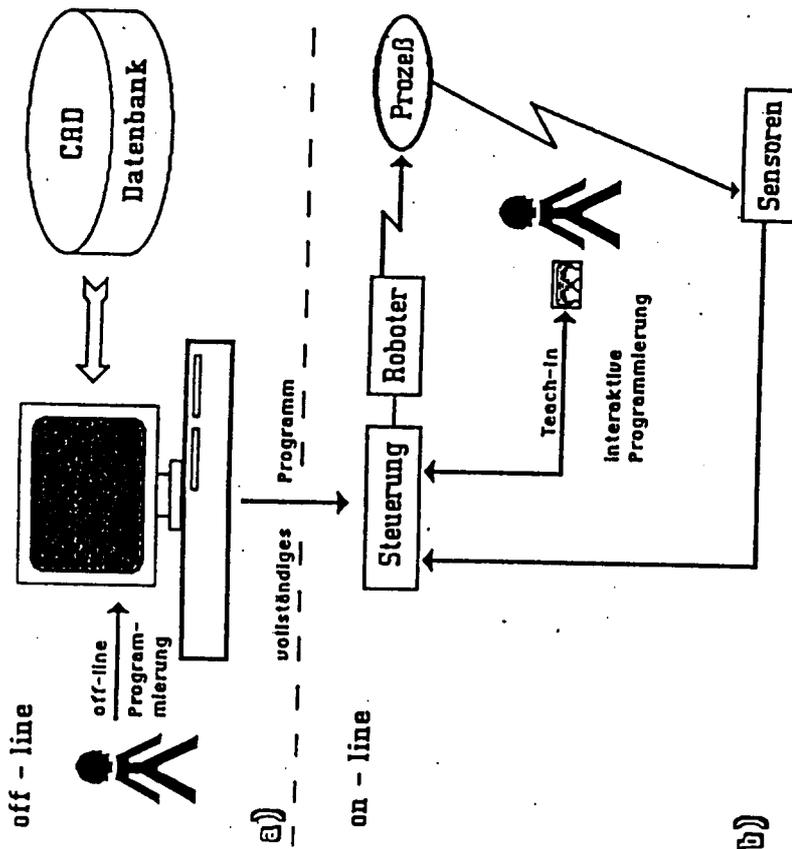


Bild 1.: Stellung des Menschen bei der On- und Off-line-Programmierung von Industrierobotern.

Art der Progr.	Anforderungen an den Werker/Programmierer			Effektivität	Rufg. Spektr.	Realisierung
	Qual.	Wissen Können	Tätigkeiten			
Teach-In (technolog.)	1	- technolog. Wissen - Teach - In - Progr. - manuelle Fertigkeiten zur defn. Bewegung des Roboters • defn. Bewegung des Roboters • Ausführung des technol. Proz.	- Ablauf - Progr. - defn. Bewegung des Roboters - Beobachten - Parameter-Eingabe	niedrig	schmal	Play - Back von Parametersequenzen • Beweg. seq. • Reaktionssequenzen
	2	- technolog. Wissen - Roboter - Progr.-Sprache	- Erstellung eines formalen Progr. - teilweise Parametrisierung	hoch	breit	
Off-Line (bis task-level)	3	- Robotersteuerungs-Software (und -Hardware) - entspr. Progr.-Sprache - Formalisierung des technolog. Wissens - Steuerungs- und Regelungs-Technik	- Programmierung von Algorithmen • Unterprogr.	unbestimmt	breit	
		Ing. bis Wirts.				

Bild 2.: Grobeinschätzung der gängigen Programmierverfahren für Industrieroboter.

Interaktives - Programmiersystem				Realisierung
Art der Progr.	Anforderungen an den Werker/Programmierer		Automatische Generierung des ablauffähigen Programms	
	Qual.	Wissen Können	Tätigkeiten	
Off-Line (task-level)	2	- Roboter - Progr. Sprache - technolog. Wissen	- Erstellung eines formalen Progr. mit formal defin. Skills - teilweise Parametrisierung	- Einbindung der generierten Skills (Programme, Unterprogr.)
	Facharbeiter			
Teach-In	1	- technolog. Wissen - (erweiterte) Teach - In - Progr. - manuelle Fertigkeiten zur • defin. Bewegung des Roboters • Ausführung des technol. Proz.	- defin. Bewegung des Roboters zur Ausführung des technolog. Arbeitsganges - teilweise Parameter-eingabe	- Skill-Generierung und -Parametrisierung (aus vorgeführten Steuerungssequenzen und gemessenen Prozesszuständen bzw. -reaktionen)
	Facharbeiter			

Bild 4: Grundkonzept der Komponente "interaktive, sensorunterstützte Programmierung und Belehrung" eines Werkstattprogrammiersystems für technologische Roboter.

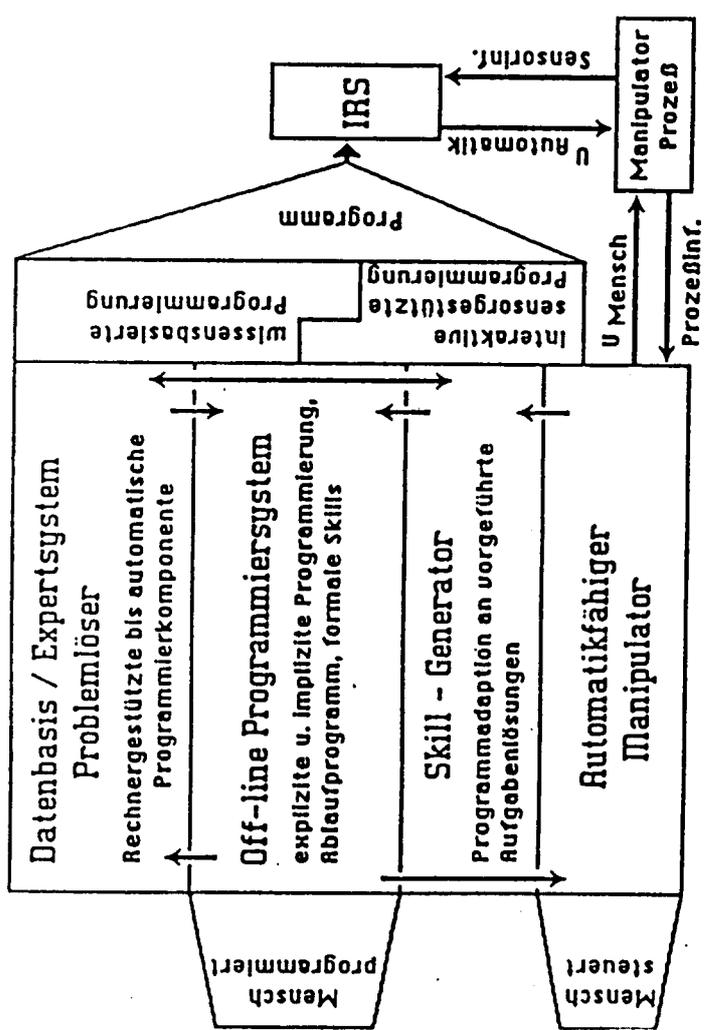


Bild 3: Systemkomponenten eines allgemeinen Roboterprogrammiersystems.

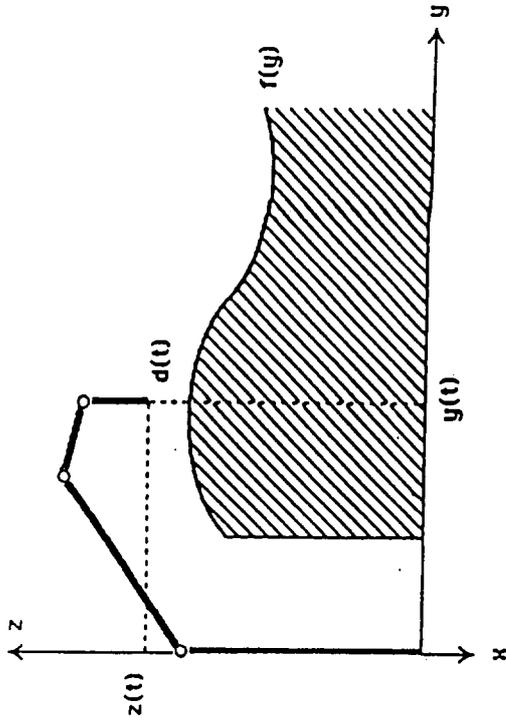


Bild 6: Einfachstes Konturverfolgungsproblem ($x=0$; $y=const$; $d(t)=d_0 > 0$).

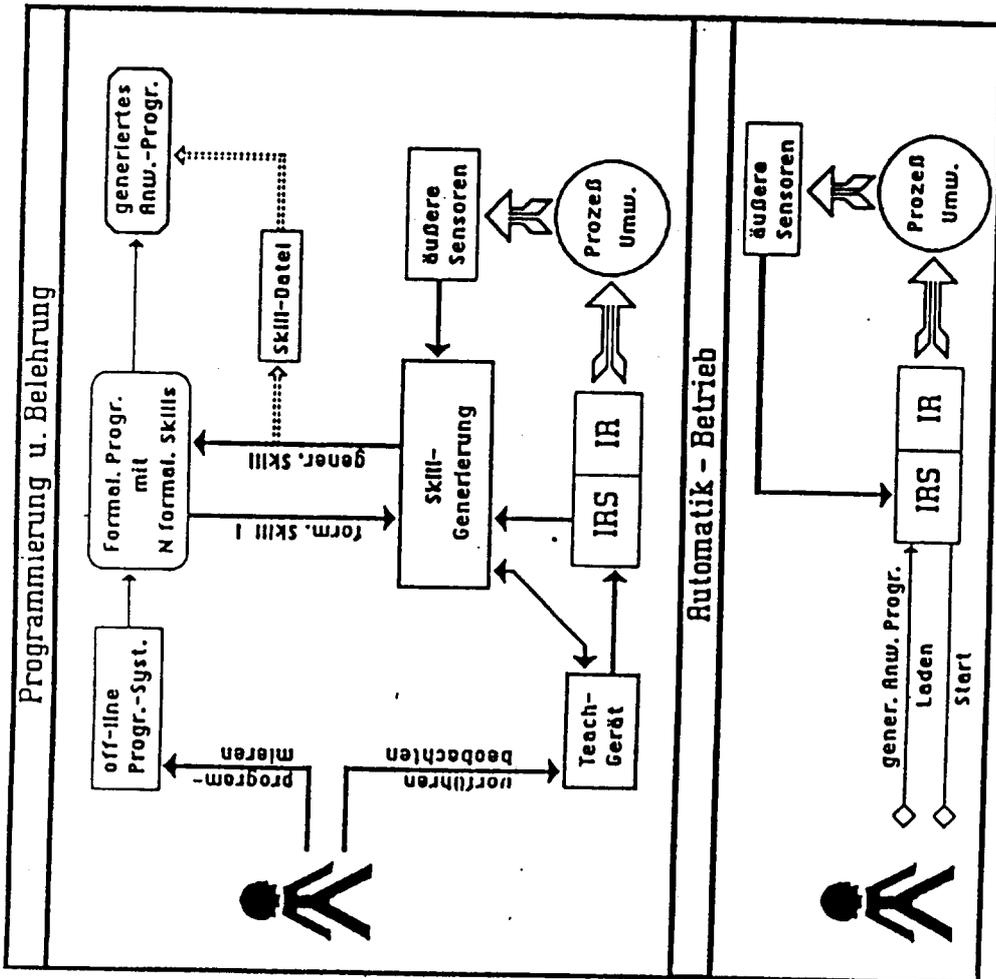


Bild 5: Illustration der Komponente "interaktive, sensorunterstützte Programmierung und Belehrung" eines Werkstattprogrammiersystems für IR. (IR: Industrieroboter, IRS: IR-Steuerung)

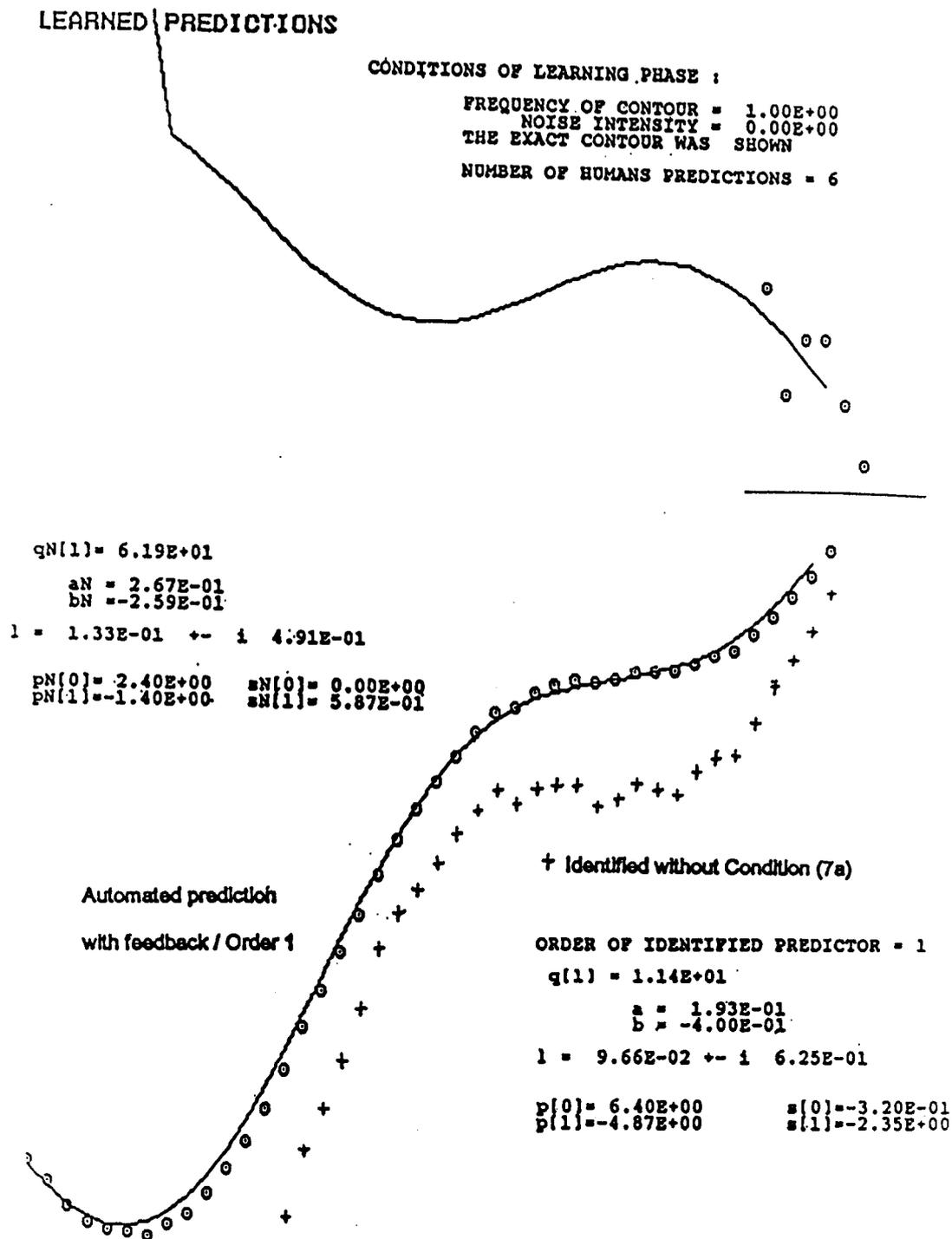


Bild 7: Aus nur 6 und schlechten aber trendkonformen menschlichen Prädiktionen wird unter Berücksichtigung der Nebenbedingung (7a) ein robuster Prädiktor hoher Prädiktionsgüte generiert.

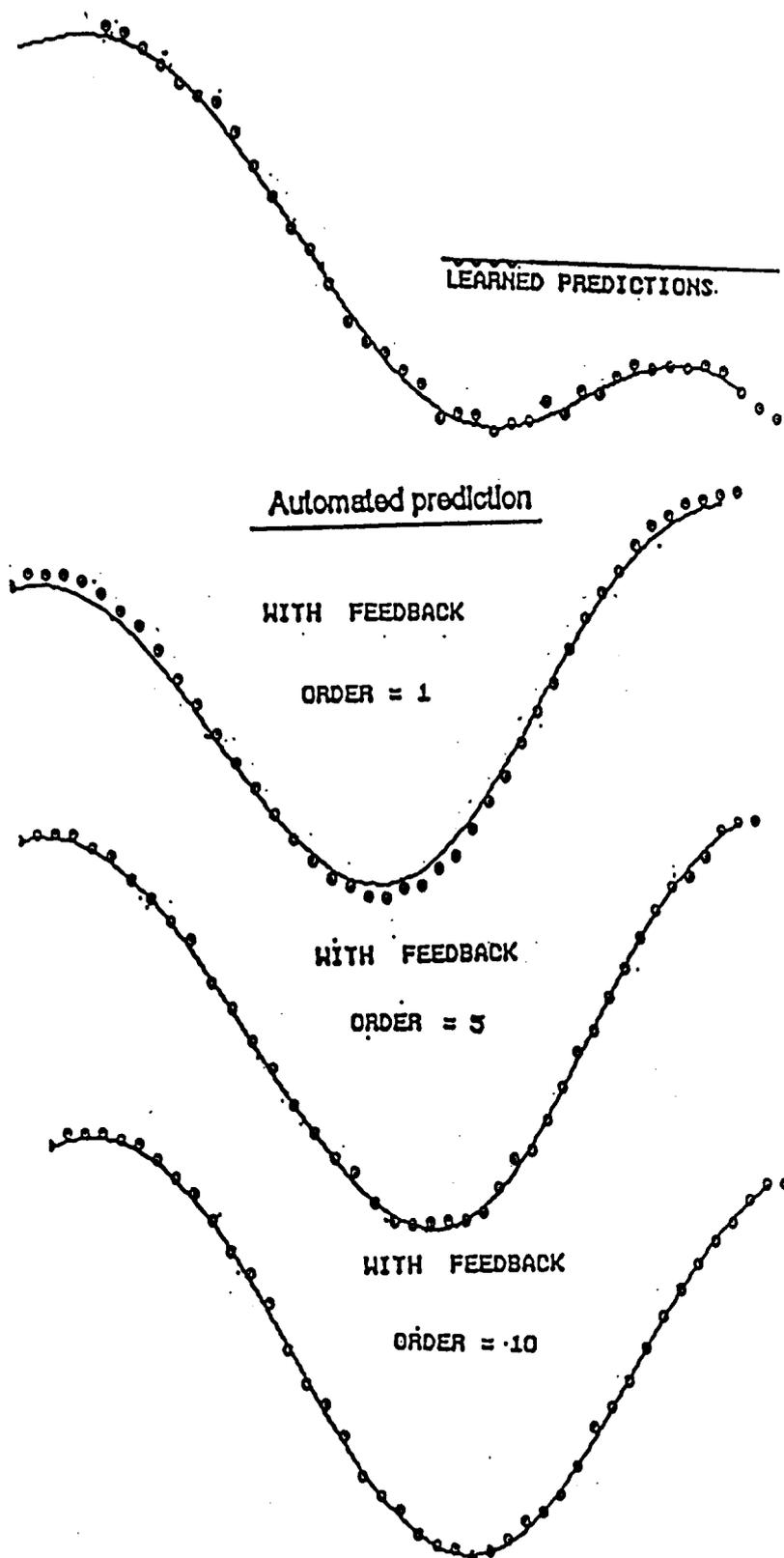


Bild 8: Beispiel einer relativ langen und guten Belehrungsphase zur interaktiven Programmierung robuster Prädiktoren.

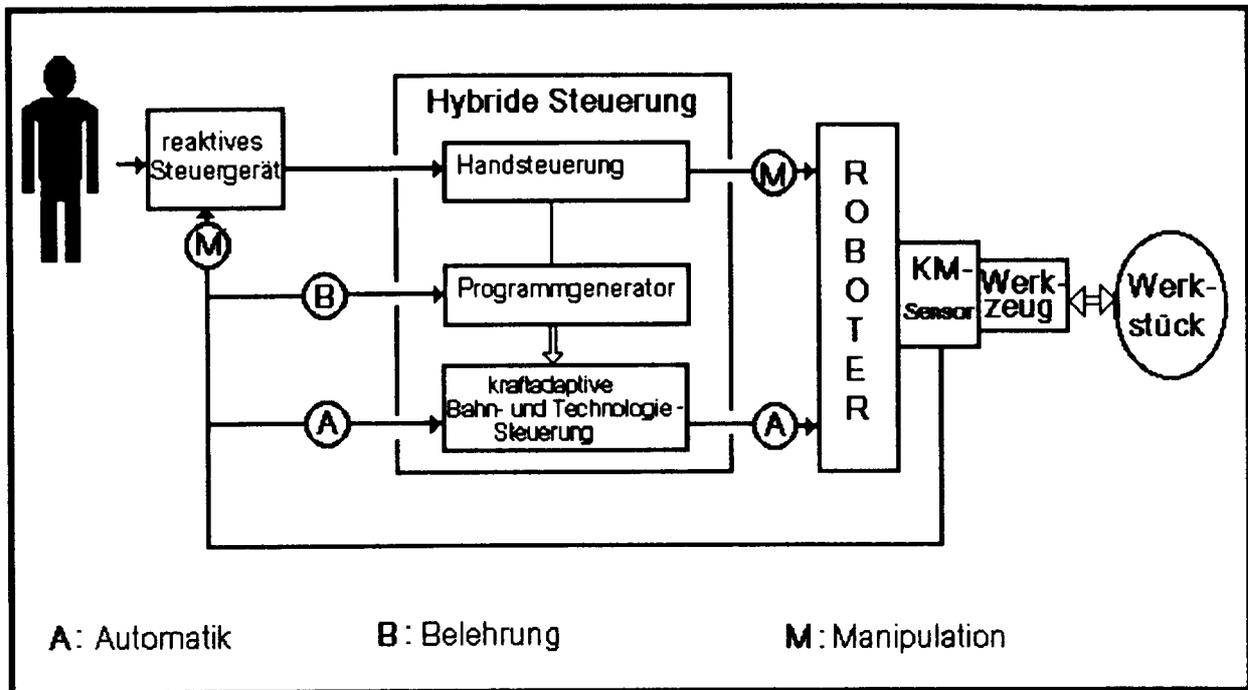


Bild 9: Schema der Laborrealisierung des interaktiven Roboters mit interaktiver Programmierkomponente.

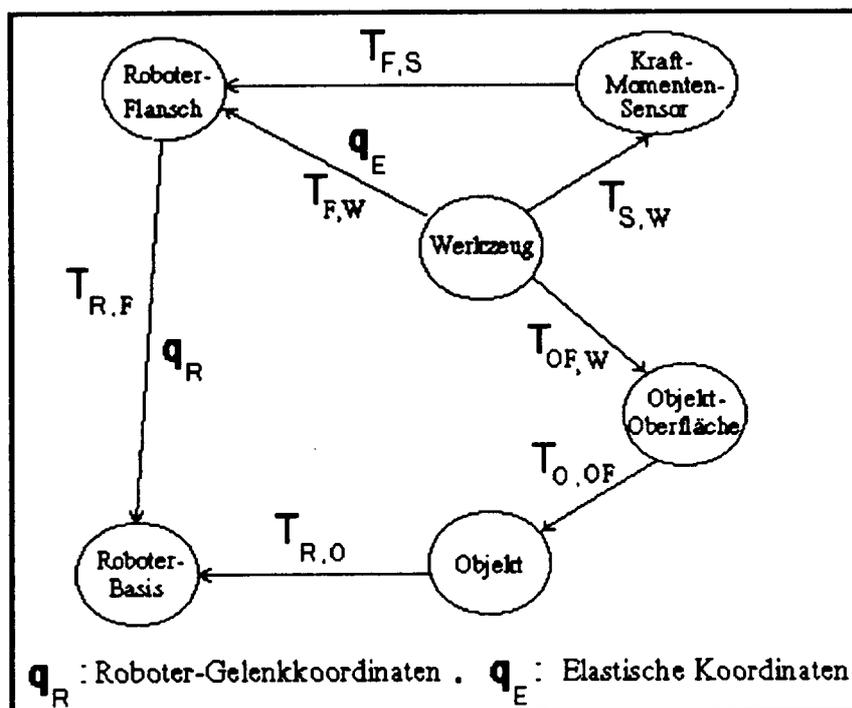


Bild 10: Geometrische Grundbeziehungen für einen Roboter zum kraftadaptiven Entgraten mit automatischer konturverfolgung. $T_{a,b}$ bezeichnet das 4X4-Transformationsframe vom Koordinatensystem K_b zum Koordinatensystem K_a .

The Benefits of Frequency Domain

KURT SCHLACHER

Institute for Automatic Control and Electrical Drives
Johannes Kepler University Linz

ANTON HOFER

Institute for Automatic Control
Technical University Graz

Abstract: Frequency response methods are a good choice for the design of linear and time invariant control systems. This kind of design contains simple, graphical considerations for SISO systems as well as optimization based methods for MIMO systems. The result may be a good choice for the parameters of a given structure of a controller or even the optimal structure itself. The conception of transfer functions offers an elegant algebraic description of the input output behavior of dynamic systems. With the help of these functions and especially with the frequency responses one has a simple graphic representation of the input output map of a dynamic system at one's disposal, which you can measure easily. Therefore a goal of research is to enlarge some of these methods and results to a broader class of dynamic systems.

1. Why Transfer Functions ?

Here we study only continuous-time systems owing to the clarity, but the considerations are also valid for discrete-time systems. The serial connection of dynamic systems is denoted by \odot and their parallel connection by \oplus . The set of dynamic systems forms a *near ring* [5] with the compositions \odot and \oplus . One can easily show, that all axioms of a ring are valid besides the distributive law

$$x \odot (y \oplus z) = x \odot y \oplus x \odot z .$$

Linear systems meet this law also, hence they form a ring. For linear and time invariant SISO systems the composition \odot is commutative, too. The restriction of this class to systems with a finite number of lumped energy stores is of crucial importance in control theory. It is a well known fact, that there exists a one to one correspondence between the elements of this class and rational functions of one complex variable. If one describes the systems with these transfer functions, the compositions \odot , \oplus become the conventional sum $+$ and product \cdot of rational functions.

Transfer functions $G(s)$ are a good choice from an algebraic point of view to describe a large class of dynamic systems. It is a fact from complex analysis, that one can reconstruct $G(s)$ from its restriction to the imaginary axis $G(j\omega)$. Just this restriction, the frequency response, is easily identified by measuring. So it is a good idea to characterize control systems with the help of transfer functions and their frequency responses.

2. A First Overview

We consider a general control system (fig. 1) with a SISO plant $P(s)$. u , y , r and d denote the plant input, the output respectively, the control reference and the disturbance.

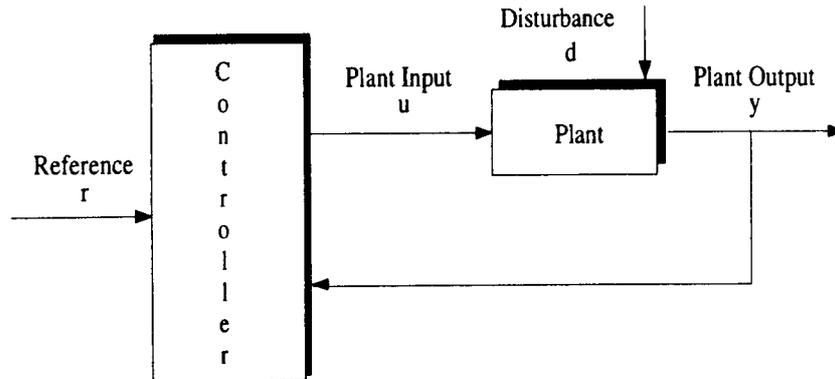


Figure 1: General Control System.

One can distinguish two ways to formulate the goals of design:

1. The response of the control system to special test functions is graded.
2. The response of the control system to a class of test functions is graded.

One can use

1. approximate methods or
2. exact methods

to solve the design problem. Approximate methods concentrate on the frequency response of the plant often using a graphic representation like Bode plots [2], [6]. Exact methods trace the design problem back to an optimization problem. The solution is based on Parseval's theorem, which guarantees the preservation of the 2-norm by the Fourier transform [3], [10].

Some design methods are presented in the following sections. During all examples we use a weakly damped mechatronic plant

$$P(s) = \frac{0.027}{s(1 + 2 \cdot 0.02 \cdot (s/4.85) + (s/4.85)^2)}. \quad (1)$$

Figure 2 shows its Bode plots.

3. Approximate Methods

Approximate methods use approximate equations for the synthesis or one is satisfied by a suboptimal solution of an optimization problem. Often the scope of these methods is restricted to special classes of plants, but the design wins clarity.

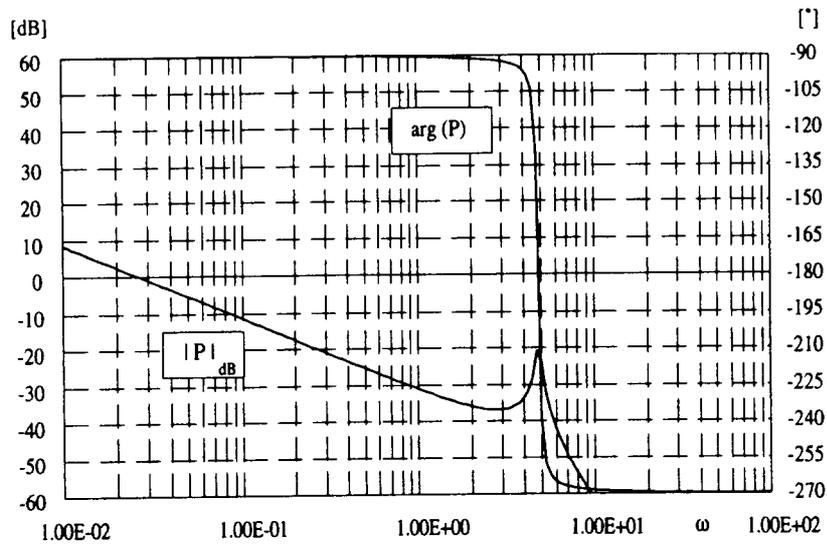


Figure 2: Bode Plots of a Mechatronic Plant.

3.1. A Simple Bode Plot Design

Consider the feedback configuration of figure 3 with a one-parameter controller. The goal

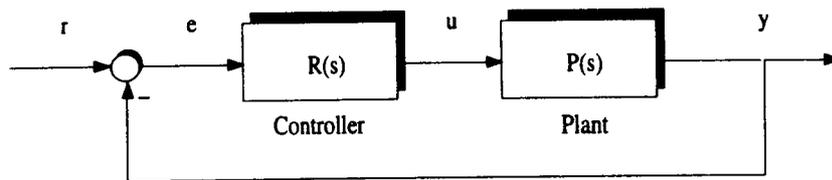


Figure 3: One-Parameter Compensation Scheme.

of the simple Bode plot design is, to give the step response of the closed loop a desired behavior. We want to determine the rise time t_r and the overshoot M_p of the step response (fig.4). With the help of the approximate equations [4]

$$\Phi + 100(M_p - 1) \approx 70 \quad \text{and} \quad \omega_C t_r \approx 1.5$$

the overshoot M_p and the rise time t_r are connected with the crossover frequency ω_C and the phase margin Φ of the frequency response of the transfer function of the open loop (fig. 5).

$$L(s) = P(s)R(s). \quad (2)$$

The scope of these approximate equations is restricted to a class of simple transfer functions. To specify the design we take $M_p \approx 1.1$ and $t_r \approx 0.75$ s. The resonance at $\omega = 4.85$ is damped by a notch filter

$$n(s) = \frac{(1 + (s/4.8)^2)}{(1 + 2 \cdot 0.5 \cdot (s/4.8) + (s/4.8)^2)}.$$

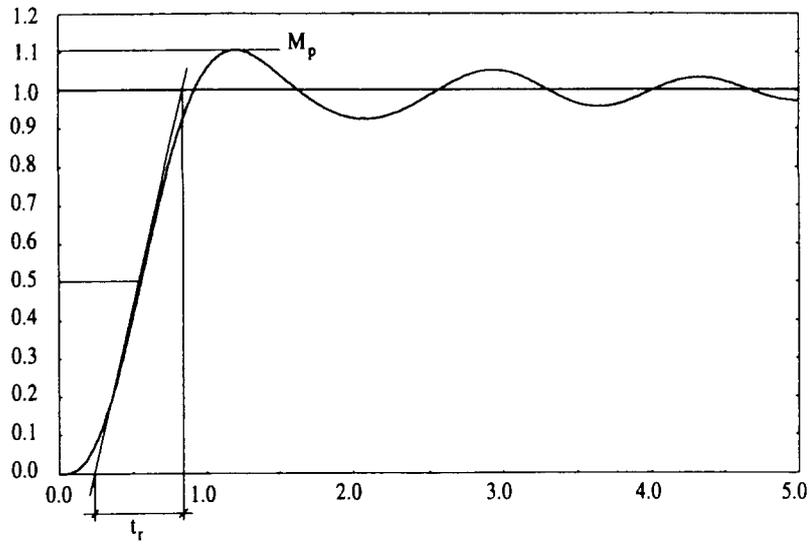


Figure 4: Rise Time and Overshoot of a Step Response.

An exact compensation is avoided with regard to variations of the plant. The controller

$$R(s) = 70n(s)$$

satisfies all demands on the open loop. Figure 5 presents the frequency response of the open loop and figure 4 the step response of the closed loop.

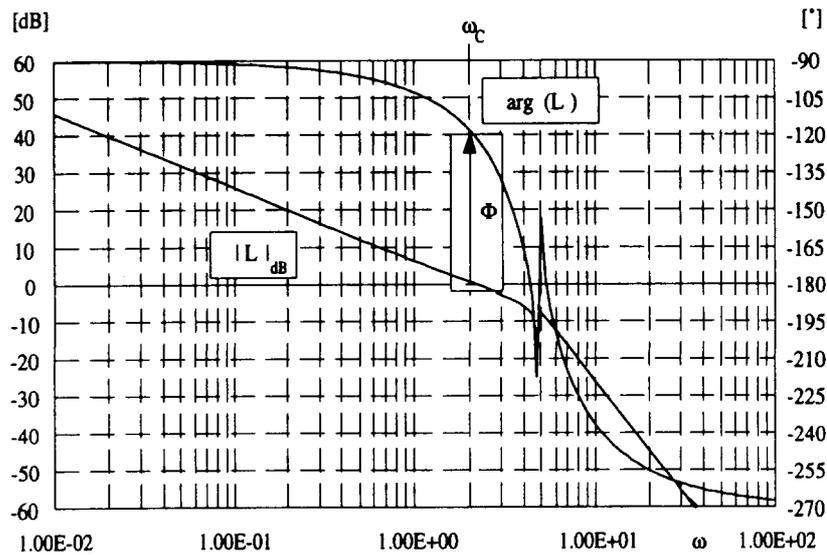


Figure 5: Crossover Frequency and Phase Margin.

3.2. Schneider's Method

Schneider's method is a special loopshaping technique [2], [6], [7]. A simple approach solves the control design problem for the one-parameter scheme of figure 3 and a class of reference signals [6]. If one denotes the Fourier-transform of a signal x with \hat{x} , this class is given by the formula

$$\hat{r} = F_r(s)\hat{r}_v \quad (3)$$

where $F_r(s)$ is a BIBO-stable transfer function and \hat{r}_v is a virtual input, which obeys given restrictions. The goal of the design is to find a controller $R(s)$ with the following properties:

1. The closed loop is stable.
2. The control error $e = r - y$ meets given requirements.
3. The plant input is limited by a given bound.

Using Schneider's method these design goals are expressed by the two inequalities

$$\begin{aligned} |T_{e/r}(j\omega)F_r(j\omega)| &\leq \epsilon & \forall \omega \in \mathbf{R} \\ |T_{u/r}(j\omega)F_r(j\omega)| &\leq u_{\max} \end{aligned}$$

with

$$T_{e/r} = \frac{1}{1 + PR}, \quad T_{u/r} = \frac{R}{1 + PR}$$

and given real numbers ϵ and u_{\max} . If it is possible to find a controller $R(s)$, which satisfies these inequalities, one can interpret the result in two ways depending on the restrictions on r_v . If r_v belongs to the class of harmonic functions with bounded magnitude

$$r_v = ae^{j\omega t} \quad \text{and} \quad |a| \leq 1,$$

the above equations guarantee, that the magnitudes of e and u will never exceed the bounds ϵ and u_{\max} respectively in case of steady state. A more modern approach is given by H_∞ control. If the size of a signal x is measured by the 2-norm

$$\|x\|_2 = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)dt}, \quad (4)$$

it is a well known fact, that $\|u\|_2$ and $\|e\|_2$ never exceeds the bounds ϵ and u_{\max} for all r_v with $\|r_v\|_2 \leq 1$ [2]. With the help of the H_∞ -norm of a transfer function $G(s)$

$$\|G(s)\|_\infty = \begin{cases} \sup_{\omega} |G(j\omega)| & \text{if } G(s) \text{ is BIBO} \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

one can restate the above inequalities

$$\begin{aligned} \|T_{e/r}F_r\|_\infty &\leq \epsilon \\ \|T_{u/r}F_r\|_\infty &\leq u_{\max} \end{aligned}$$

The existence of a solution depends on the choice of ϵ and u_{\max} . To get rid of the dependency on ϵ the design is converted to

$$\inf_R \|T_{e/r} F_r\|_{\infty} \quad \text{with respect to} \quad \|T_{u/r} F_r\|_{\infty} \leq u_{\max} .$$

Schneider's method offers a graphical solution to that optimization problem. With the transfer function of the open loop (eq. 2) we can rewrite the inequalities:

$$\left| \frac{1}{1 + L(j\omega)} \right| |F_r(j\omega)| \leq \epsilon$$

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \left| \frac{F_r(j\omega)}{P(j\omega)} \right| \leq u_{\max} .$$

Now these inequalities can be simplified to

$$|L(j\omega)| \geq \frac{|F_r(j\omega)|}{\epsilon} \quad \text{if} \quad |L(j\omega)| \gg 1$$

$$|L(j\omega)| \leq \left| \frac{P(j\omega)}{F_r(j\omega)} \right| u_{\max} \quad \text{if} \quad |L(j\omega)| \ll 1 .$$

The behavior of $|L(j\omega)|$ near $\omega = \omega_C$ is determined by stability requirements. For a class of simple plants the condition $\Phi \geq 45^\circ$ is sufficient.

To specify the loopshaping we take

$$F_r(s) = 4 \frac{(1 + (s/20))}{(1 + (s/0.05))} \tag{6}$$

and $u_{\max} = 40$ for the plant equation 1. Figure 6 presents the Bode plots of $u_{\max} P/F_r$ and F_r . The regions of restriction are shaded.

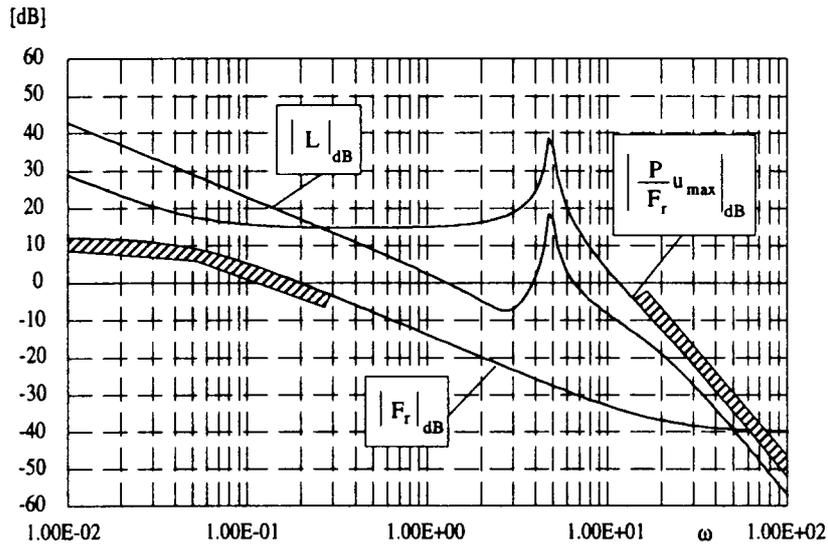


Figure 6: Loop Shaping with Schneider's Method.

With regard to variations of the plant we take $L = VP$ with an indeterminate gain V . To achieve a good performance in the range $1 \leq \omega \leq 10$ the function $L(s)$ is enlarged to

$$L(s) = VP(s) \frac{(1 + 2 \cdot 0.3 \cdot (s/3) + (s/3)^2)}{(1 + 2 \cdot 0.86 \cdot (s/20) + (s/20)^2)}.$$

Taking $V = 1.4$ leads to the controller

$$R(s) = 52 \frac{(1 + 2 \cdot 0.3 \cdot (s/3) + (s/3)^2)}{(1 + 2 \cdot 0.86 \cdot (s/20) + (s/20)^2)},$$

and to a stable system. Figure 6 presents this result, too, figure 7 shows the frequency responses of $T_{e/r}F_r$ and $T_{u/r}F_r$.

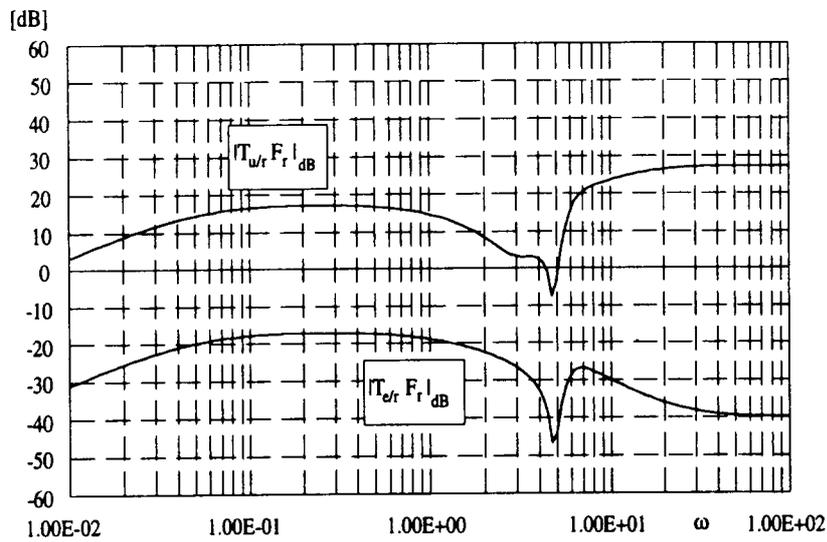


Figure 7: Bode Plots of $T_{e/r}F_r$ and $T_{u/r}F_r$.

4. Exact Methods

Most of the modern frequency response methods are based on the so called factorization approach [9]. In control theory there are many algebraic structures of interest like the near ring of general dynamic systems, the ring of linear systems or the commutative ring of linear and time invariant SISO systems with finite state and so on. The set of proper and BIBO-stable rational functions \mathbf{S} is also a commutative ring with the compositions sum $+$ and product \cdot [8]. It is a well known fact that a rational function $P(s)$ can be written as

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad \text{where} \quad N(s), D(s) \in \mathbf{S}. \quad (7)$$

The two rational functions are said to be *coprime*, if a solution of the Bezout-identity

$$N(s)X(s) + D(s)Y(s) = 1 \quad \text{with} \quad X(s), Y(s) \in \mathbf{S} \quad (8)$$

exists. It is a famous result of the factorization approach that the most general linear and time invariant control system (fig. 1) has the form

$$\hat{u} = \begin{bmatrix} V(s) & -R(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{r} \\ \hat{y} \end{bmatrix}$$

with one dynamic system $\begin{bmatrix} V(s) & -R(s) \end{bmatrix}$ (see fig. 8). Furthermore each controller,

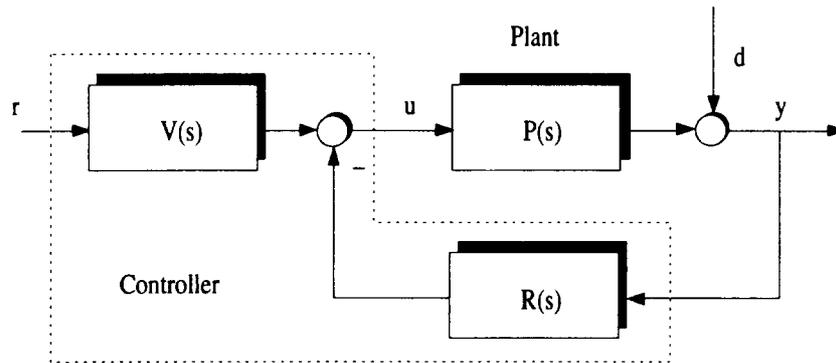


Figure 8: Two-Parameter Compensation Scheme.

which stabilizes the control system of figure 8 internally [2], [8], is given by

$$V = \frac{Q}{Y - NK} \quad \text{and} \quad R = \frac{X + DK}{Y - NK} \quad \text{where} \quad Q, K \in \mathbf{S} .$$

Beyond a theoretical point of view the importance of these formulas follows from the calculation of the tracking error $e = r - y$ and the plant input u

$$\begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DQ & -D(X + KD) \\ 1 - NQ & -1 + N(X + KD) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{r} \\ \hat{d} \end{bmatrix} . \quad (9)$$

If the new parameters Q and K are used we win twice:

1. The equations are affine in Q and K now.
2. The tracking and the disturbance problem are decoupled.

Sometimes a region of stability $\text{Re } s < 0$ is not sufficient. If \mathbf{S}_α denotes the set of all rational functions, which are BIBO-stable and have no poles for $\text{Re } s \geq \alpha$, $\alpha < 0$, it is easily to prove, that \mathbf{S}_α is a commutative ring, too. If one takes $N, D, X, Y, Q, K \in \mathbf{S}_\alpha$, the closed loop is not only stable but also all transfer functions of equation 9 belong to \mathbf{S}_α and there is no pole zero cancellation in $\text{Re } s \geq \alpha$ when the product $P(s)R(s)$ is formed [8].

Thanks to the factorization approach one can use methods from the linear functional analysis to solve optimization problems. Hence we will introduce the H_2 and the H_∞ design for instance. Both methods are distinct from simple parameter optimization methods, because the structure of the optimal control law is a result of this kind of optimization, too.

4.1. H_2 -Methods

The basic idea of the H_2 -approach is to take special input signals and grade the corresponding output signal of the control system. Here we demonstrate a simple version for the tracking problem, which can be considered as a generalization of the simple Bode plot design. For this reason we take the unit step as reference, i.e. $r(t) = \sigma(t)$. For this special input the plant input $u = u_r$ and the control error $e = e_r$ is measured by the performance index

$$\int_0^{\infty} (e_r^2(t)q^2 + u_r^2(t))dt$$

with a real number $q > 0$. This choice implies a pole at $s = 0$ of the plant. The solution of the design problem requires two steps [8]:

1. The problem is transformed from the time domain to the frequency domain by Parseval's theorem.
2. The optimization is simplified by the new unknown functions Q and K of equation 9.

Although this way seems to be complicated, one gets simple design formulas. Without derivation the result for the above tracking problem is presented:

1. The plant $P(s)$ is expressed as a quotient of two coprime functions N, D

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad \text{where } N(s), D(s) \in \mathbf{S}.$$

2. One looks for the unambiguous $A(s)$ where $A(s), \frac{1}{A(s)} \in \mathbf{S}$, which solves the equation

$$N(-s)N(s)q^2 + D(-s)D(s) = A(-s)A(s).$$

3. The optimal Q is given by

$$Q(s) = \frac{N(0)}{A(0)} \frac{q^2}{A(s)}.$$

To achieve robustness the performance index can be extended to

$$\int_0^{\infty} (e_r^2(t)q^2 + u_r^2(t))e^{-2\alpha t}dt \quad \text{where } \alpha \leq 0,$$

and Q and K are restricted to \mathbf{S}_α . The design parameters for the mechatronic plant are

$$r(t) = \sigma(t), \quad q = 500 \quad \text{and} \quad \alpha = 0.12.$$

If one takes the one-parameter scheme of figure 3 the controller is

$$R(s) = 132 \frac{(1 + 2 \cdot 0.022 \cdot (s/4.8) + (s/4.8)^2)}{(1 + 2 \cdot 0.62 \cdot (s/9.6) + (s/9.6)^2)}.$$

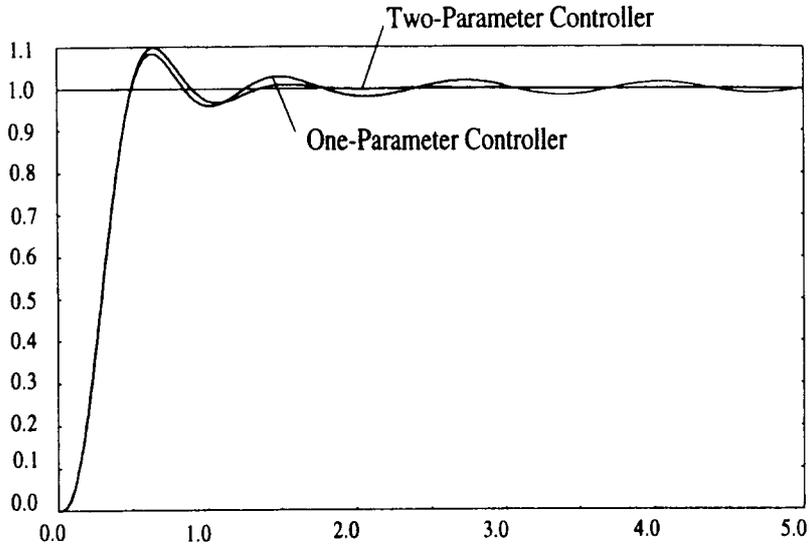


Figure 9: Optimal Closed Loop Step Responses.

Figure 9 shows the step response of the closed loop. One can get a better result for the given data, if the two-parameter scheme of figure 8 is used. Because we do not treat the disturbance problem, the controller is ambiguous. One possibility is

$$V(s) = 132 \frac{(1 + 2 \cdot 0.029 \cdot (s/4.85) + (s/4.85)^2)}{(1 + 2 \cdot 0.62 \cdot (s/9.6) + (s/9.6)^2)}$$

and the above $R(s)$. This step response is presented by figure 9, too.

The disturbance problem is not more difficult than the tracking problem, one has to calculate a little bit more. To treat MIMO systems some technical knowledge is required, but there are no obstacles in principle [1]. In general and in our example the two-parameter scheme leads to a better performance. One should take account of that, although some software does not.

4.2. H_∞ -Methods

H_∞ methods minimize the H_∞ -norm (eq. 5) of transfer functions. At best the model matching problem

$$\inf_{Q \in \mathbf{S}} \|T_1 - T_2 Q\|_\infty, \quad \text{where } T_1, T_2 \in \mathbf{S}$$

only must be handled [2], [3], [8]. The H_∞ -norm can be extended to transfer matrices, too. It is also possible to show, that the H_∞ -norm of a vector $\mathbf{G}(s) = [G_1(s) \ G_2(s)]^T$, $G_1(s), G_2(s) \in \mathbf{S}$ [3], is given by

$$\|\mathbf{G}(s)\|_\infty^2 = \sup_{\omega} (|G_1(j\omega)|^2 + |G_2(j\omega)|^2) .$$

For the tracking problem we solve the minimization problem

$$\inf_{Q \in \mathcal{S}} \left\| \begin{array}{c} (1 - NQ)q \\ DQ \end{array} \right\|_{\infty}$$

with a given number $q > 0$. Now the resulting formulas are more complicated than in the H_2 case, but one has good algorithms to overcome this problem.

We choose the design parameter $q = 300$, a stability region¹ $\text{Re } s \leq -\alpha = -0.15$ and the weighting function F_r of equation 6. If one takes the one-parameter scheme (fig. 3) the controller is

$$R(s) = 208 \frac{(1 + 2 \cdot 0.027 \cdot (s/4.8) + (s/4.8)^2) (1 + (s/0.30))}{(1 + 2 \cdot 0.96 \cdot (s/15) + (s/15)^2) (1 + (s/0.23))}$$

The frequency responses $T_{e/r}F_r$ and $T_{u/r}F_r$ are presented by figure 10. If the two-

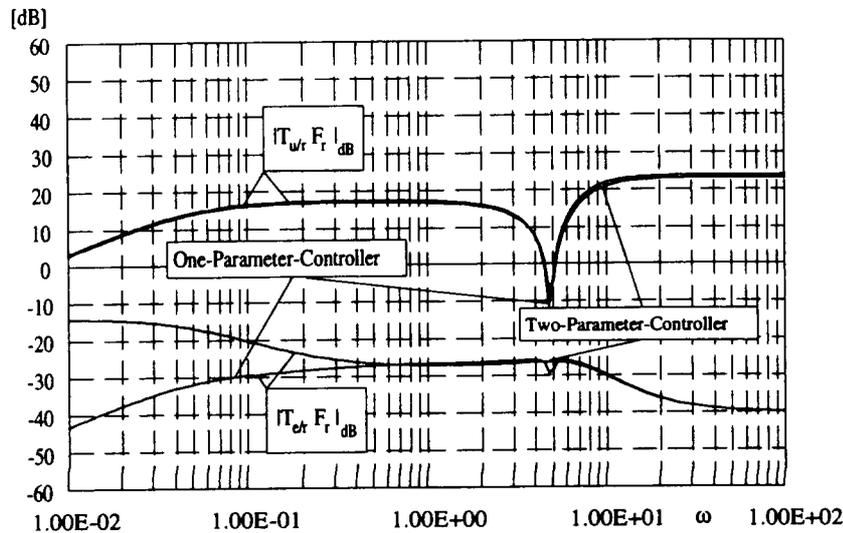


Figure 10: Bode Plots of Optimal $T_{e/r}F_r$ and $T_{u/r}F_r$.

parameter scheme (fig. 8) is used the result is ambiguous because the disturbance problem is not specified. One possibility is

$$V(s) = 198 \frac{(1 + 2 \cdot 0.042 \cdot (s/4.9) + (s/4.9)^2) (1 + (s/0.30))}{(1 + 2 \cdot 0.96 \cdot (s/15) + (s/15)^2) (1 + (s/0.23))}$$

and the above $R(s)$. Figure 10 shows the frequency responses, too. Although this figure gives the impression, that the one- and two-parameter scheme lead to the same result, the evaluation of the performance index proves the superiority of the two-parameter scheme. The comments on the disturbance problem and on MIMO systems as stated for the H_2 design are valid for the H_{∞} case, too.

¹In that case only causal input functions are permitted.

5. Conclusions

We have intended to review frequency response methods of different levels of difficulty. Today tested software exists for the exact methods. Hence it is a straightforward task to design control systems using H_2 or H_∞ algorithms. But one should not forget the approximate approach, where one can take restrictions into account, which are not easily formulated by a performance index.

Acknowledgment

The authors would like to thank A. Kugi, who has done the calculations. This article is dedicated to G. Schneider. The authors are grateful to their teacher, who introduced them to the beauty and elegance of the frequency domain.

References

- [1] *Doyle J.C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B.A.:* State-Space Solution to Standard H_2 and H_∞ Control Problems, IEEE Trans on Automatic Control, Vol. 34, pp 831–847, 1989.
- [2] *Doyle J.C., Francis B., Tannenbaum A.R.:* Feedback Control Theory, MacMillan Publishing Company, 1992.
- [3] *Francis B.:* A Course in H_∞ Control Theory, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Verlag, 1987.
- [4] *Landgraf Chr., Schneider G.:* Elemente der Regelungstechnik, Springer Verlag, 1970.
- [5] *Pilz G.:* Near-Rings and Non-Linear Dynamical Systems, Elsevier Science Publishers B.V., North Holland, 1987.
- [6] *Schneider G.:* A Simple Method for the Design of Control Systems with Constraints, IFAC Congress 24–28.8.1981 Kyoto, VIII, 131–139.
- [7] *Schneider G., Dourdoumas N.:* Reglersynthese für Systeme mit Beschränkungen, Regelungstechnik 25, 1977, A1–A12.
- [8] *Vidyasagar M.:* Control System Synthesis: A Factorization Approach, MIT Press, 1985.
- [9] *Youla D.C., Bongiorno J.J, Jabr. H.A.:* Modern Wiener Hopf Design of Optimal Controllers, Part I: The Single-Input Case, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 21, pp 3–14, 1976.
- [10] *Weinmann A.:* Uncertain Models and Robust Control, Springer Verlag, 1991.

Convergence Evaluation of Model Least Squares Applications in High-Precision Process Identification

Alexander Weinmann, ÖVE, Senior Member IEEE

Submitted on November 11, 1993

Summary: The model least squares method is embedded in a unifying consideration including ordinary and total least squares. The problem is solved in the augmented case of equality conditions for the set of optimal parameters. In comparison to the ordinary and total least squares case, the integrated accuracy and convergence facilities of model least squares are remarkably better, both in the unconstrained case and in the case of additional equality conditions. The convergence characteristics are stated and demonstrated on numerical examples.

1 Introduction

It is well known in process identification that the algebraic and differential (difference) equations of the process model can be rewritten to $\mathbf{M}\mathbf{p} = \mathbf{y}$ where $\mathbf{M} \in \mathcal{R}^{n_m \times n_p}$, $\mathbf{p} \in \mathcal{R}^{n_p}$ and $\mathbf{y} \in \mathcal{R}^{n_m}$.

Assume the process model specified by the difference equation of n th order without measurement errors

$$y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_ny(k-n) = b_1u(k-1) + \dots + b_nu(k-n) \quad (1)$$

and define the parameter vector $\mathbf{p} \triangleq (a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_n)^T$. Eq.(1) states the relation at sampling instant k . Let n_m measurements be available from sampling instant $k - n_m - 1$ through k . If this equation is rewritten for n_m sampling instants, applying the definitions $\mathbf{M}(k)$ and $\mathbf{y}(k)$ as given below, Eq.(1) turns out as

$$\mathbf{y}(k) - \mathbf{M}(k)\mathbf{p} = \mathbf{0} , \quad (2)$$

$$\mathbf{M}(k) = \begin{pmatrix} -y(k-n_m) & -y(k-n_m-1) \dots & -y(k-n_m-n+1) & u(k-n_m) \dots & u(k-n_m-n+1) \\ -y(k-n_m+1) & -y(k-n_m) \dots & & & \\ -y(k-n_m+2) & \vdots & & & \\ \vdots & & & & \\ -y(k-1) & \dots & \dots & u(k-1) & u(k-n) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$n_p = 2n, \quad \mathbf{y}(k) = \begin{pmatrix} y(k - n_m + 1) \\ \vdots \\ y(k) \end{pmatrix} \in \mathcal{R}^{n_m}, \quad \mathbf{M}(k) \in \mathcal{R}^{n_m \times 2n}. \quad (4)$$

If the number of measurements n_m exceeds the number n_p of parameters in \mathbf{p} , the system of equations is overdetermined and an approximation process has to be applied.

The simplest method is the ordinary least squares method (OLS), assigning an error vector $\boldsymbol{\epsilon}$ to \mathbf{y} , i.e., creating the model equation $\mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{M}(k)\mathbf{p} = \mathbf{0}$. Demanding a minimum of the Frobenius norm $\|\boldsymbol{\epsilon}\|_F = \sqrt{\boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\epsilon}}$ leads to the well-known optimum parameter $\hat{\mathbf{p}} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{y}$. The optimum parameter is denoted by an overhead hat.

Total Least Squares (TLS) was suggested in *Golub, G.H., and Van Loan, C.F., 1980*. The aim is to fit out each entry of \mathbf{M} and \mathbf{y} with measurement error \mathbf{E} and $\boldsymbol{\epsilon}$, respectively, i.e., to use the model equation $\mathbf{y} - \boldsymbol{\epsilon} - (\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} = \mathbf{0}$. Eventually, the solution is obtained by minimizing the combined norm of \mathbf{E} and $\boldsymbol{\epsilon}$.

The Model Least Squares (MLS) method was presented in *Weinmann, A., 1994*; iterative and recursive MLS algorithms were developed. The idea is given by realizing the approximation \mathbf{E} only, i.e., by imposing the tolerances only on the model matrix \mathbf{M} (or by intentionally omitting $\boldsymbol{\epsilon}$). Hence, the model equation is $\mathbf{y} - (\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} = \mathbf{0}$.

At the expense of higher computation efforts, the accuracy can be reasonably increased by TLS and MLS in comparison to OLS. According to the fact that excellent computational facilities are available even in the case of real time processes, higher efforts in calculating can be tolerated. Results of higher accuracy provide better process identification even in the case of noisy data. This seems to be important especially in the case where small changes in the process parameters have to be detected, either for high-accuracy identification purposes or for high-performance protection or control.

The approximation is also executed under the restriction of a predetermined structure or under initial or final or intermediate conditions, as well. Conditions like these are collected in so-called collocation rows.

The paper also presents an alternative unified and extended derivation of the results given in *Weinmann, A., 1994*. Variations on the basis of weighting matrices and collocation rows are presented; several numerical examples demonstrate the convergence facilities.

2 Total Least Squares Via Lagrange Multiplier

Minimizing the (unweighted) Frobenius norm $\|\cdot\|_F$ of \mathbf{E} and $\boldsymbol{\epsilon}$ subject to the condition $(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} + \boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{y}$ leads to the formulation using a vector Lagrange multiplier

$$\|\mathbf{E} : \boldsymbol{\epsilon}\|_F + \boldsymbol{\lambda}^T [(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\epsilon}] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\epsilon}, \mathbf{p}} \quad (5)$$

$$\text{tr}\{\mathbf{E}^T \mathbf{E}\} + \boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\epsilon} + \boldsymbol{\lambda}^T [(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\epsilon}] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\epsilon}, \mathbf{p}}. \quad (6)$$

By $\partial/\partial\boldsymbol{\epsilon}$

$$2\boldsymbol{\epsilon} + \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\lambda} = -2\boldsymbol{\epsilon} , \quad (7)$$

by $\partial/\partial\mathbf{E}$

$$2\mathbf{E} + \boldsymbol{\lambda}\mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \mathbf{E} = -0.5\boldsymbol{\lambda}\mathbf{p}^T = \boldsymbol{\epsilon}\mathbf{p}^T . \quad (8)$$

The resulting error matrix \mathbf{E} is of dyadic product type. Postmultiplying $\boldsymbol{\epsilon}$ by \mathbf{p}^T ,

$$\boldsymbol{\epsilon} = -\mathbf{M}\mathbf{p} - \mathbf{E}\mathbf{p} + \mathbf{y} \quad | \times \mathbf{p}^T \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\epsilon}\mathbf{p}^T = \mathbf{E} = -\mathbf{M}\mathbf{p}\mathbf{p}^T - \mathbf{E}\mathbf{p}\mathbf{p}^T + \mathbf{y}\mathbf{p}^T \quad (10)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{I} + \mathbf{p}\mathbf{p}^T) = (\mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{p})\mathbf{p}^T \quad \rightsquigarrow \quad \hat{\mathbf{E}} = (\mathbf{y} - \mathbf{M}\hat{\mathbf{p}})\hat{\mathbf{p}}^T(\mathbf{I} + \hat{\mathbf{p}}\hat{\mathbf{p}}^T)^{-1} . \quad (11)$$

Eq.(11) can be replaced by the equivalent expression

$$\hat{\mathbf{E}} = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{M}\hat{\mathbf{p}})\hat{\mathbf{p}}^T}{1 + \hat{\mathbf{p}}^T\hat{\mathbf{p}}} , \quad (12)$$

see Eqs.(32) and (33).

By $\partial/\partial\mathbf{p}$ the result is $(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}$. Referring to Eq.(7),

$$(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T(-2\boldsymbol{\epsilon}) = (\mathbf{M} + \mathbf{E})^T[2\mathbf{M}\mathbf{p} + 2\mathbf{E}\mathbf{p} - 2\mathbf{y}] = \mathbf{0} \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = [(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})]^{-1}(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T\mathbf{y} . \quad (14)$$

3 Model Least Squares Via Lagrange Multiplier

The problem of optimally approximating measurement data $\mathbf{M}\mathbf{p} = \mathbf{y}$ by using the tolerance matrix \mathbf{E} , only, leads to the model least squares (MLS) result (*Weinmann, A., 1994*)

$$\hat{\mathbf{E}} = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{M}\hat{\mathbf{p}})\hat{\mathbf{p}}^T}{\hat{\mathbf{p}}^T\hat{\mathbf{p}}} \quad (15)$$

$$\text{and } \hat{\mathbf{p}} = [(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T\mathbf{M}]^{-1}(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T\mathbf{y} . \quad (16)$$

Notice the similarities to Eqs.(12) and (14).

4 Unifying Total Least Squares, Model Least Squares and Ordinary Least Squares

4.1 Total Least Squares (TLS) based on $\boldsymbol{\epsilon}$

$$\text{tr} \{ \mathbf{E}^T\mathbf{E} \} + \boldsymbol{\epsilon}^T\boldsymbol{\epsilon} + \boldsymbol{\lambda}^T[(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\epsilon}] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\epsilon}, \mathbf{p}} \quad (17)$$

$$\text{Eqs.(7) and (8)....} \quad \mathbf{E} = \boldsymbol{\epsilon}\mathbf{p}^T \quad (18)$$

$$(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} + \boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{y} = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\epsilon} = -\mathbf{M}\mathbf{p} - \boldsymbol{\epsilon}\mathbf{p}^T\mathbf{p} + \mathbf{y} \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(1 + \mathbf{p}^T \mathbf{p}) = \mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{p} \quad \rightsquigarrow \quad \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{\mathbf{y} - \mathbf{M}\hat{\mathbf{p}}}{1 + \hat{\mathbf{p}}^T \hat{\mathbf{p}}} . \quad (20)$$

Eq.(7) and $(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}$ result in

$$-2(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \boldsymbol{\varepsilon} \quad \rightsquigarrow \quad (\mathbf{M}^T + \mathbf{p}\boldsymbol{\varepsilon}^T)\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \hat{\mathbf{p}} = -\frac{1}{\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}} \mathbf{M}^T \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} . \quad (21)$$

4.2 Model Least Squares (MLS) based on $\boldsymbol{\lambda}$

Modifying the setting of $\boldsymbol{\lambda}$ slightly,

$$\text{tr}\{\mathbf{E}^T \mathbf{E}\} - 2\boldsymbol{\lambda}^T [(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} - \mathbf{y}] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{p}} \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{E}} \dots\dots 2\mathbf{E} - 2\boldsymbol{\lambda}\mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \mathbf{E} = \boldsymbol{\lambda}\mathbf{p}^T \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \dots\dots 2(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad (\mathbf{M} + \boldsymbol{\lambda}\mathbf{p}^T)^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \hat{\mathbf{p}} = -\frac{1}{\hat{\boldsymbol{\lambda}}^T \hat{\boldsymbol{\lambda}}} \mathbf{M}^T \hat{\boldsymbol{\lambda}} , \quad (24)$$

$$(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} = \mathbf{y} \quad \rightsquigarrow \quad \mathbf{M}\mathbf{p} + \boldsymbol{\lambda}\mathbf{p}^T \mathbf{p} = \mathbf{y} \quad \rightsquigarrow \quad \hat{\boldsymbol{\lambda}} = \frac{\mathbf{y} - \mathbf{M}\hat{\mathbf{p}}}{\hat{\mathbf{p}}^T \hat{\mathbf{p}}} . \quad (25)$$

4.3 Ordinary Least Squares (OLS) based on $\boldsymbol{\varepsilon}$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\lambda}^T [\mathbf{M}\mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\varepsilon}] \rightarrow \min_{\mathbf{p}, \boldsymbol{\varepsilon}} \quad (26)$$

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \dots\dots 2\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\lambda} = -2\boldsymbol{\varepsilon} \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \dots\dots \mathbf{M}^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \mathbf{M}^T \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{M}^T (\mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \hat{\mathbf{p}} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{y} \quad (28)$$

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{\mathbf{y} - \mathbf{M}\hat{\mathbf{p}}}{1} . \quad (29)$$

4.4 Iteration Well-Defined or not?

The proof whether the MLS iteration procedure by alternately solving the equations for the results of $\hat{\mathbf{p}}$ and $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ (or $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$) converges can be evaluated as follows. For an initial choice of \mathbf{p}_o , utilize Eqs.(24) and (25) and solve

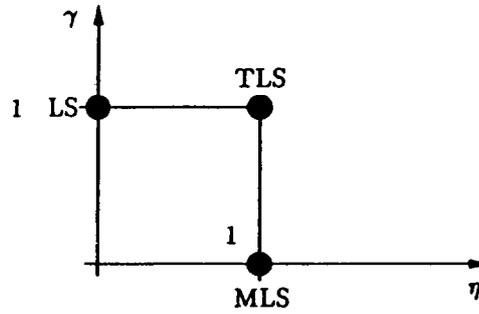
$$\boldsymbol{\lambda}_o = \frac{\mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{p}_o}{\mathbf{p}_o^T \mathbf{p}_o} \quad \rightsquigarrow \quad \mathbf{p}_1 = -\frac{\mathbf{M}^T \boldsymbol{\lambda}_o}{\boldsymbol{\lambda}_o^T \boldsymbol{\lambda}_o} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\lambda}_1 = \frac{\mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{p}_1}{\mathbf{p}_1^T \mathbf{p}_1} . \quad (30)$$

Then, calculate

$$\mathbf{E}_o = \boldsymbol{\lambda}_o \mathbf{p}_o^T \quad \text{and} \quad \mathbf{E}_1 = \boldsymbol{\lambda}_1 \mathbf{p}_1^T . \quad (31)$$

If $\text{tr}\{\mathbf{E}_1^T \mathbf{E}_1\} < \text{tr}\{\mathbf{E}_o^T \mathbf{E}_o\}$ is true, the iteration procedure is well-defined.

γ	η	error compensation by	type
1	0	ϵ only	OLS
0	1	\mathbf{E} only	MLS
1	1	ϵ and \mathbf{E}	TLS

Table 1: Permitted numbers for γ and η versus type of least squareFigure 1: TLS, MLS and OLS in the γ - η -space

4.5 Unifying Formulae

Due to the dyadic structure of \mathbf{E} as given by Eq.(8), postmultiplying \mathbf{E} either by the scalar $\mathbf{p}^T \mathbf{p}$ or by the dyadic product $\mathbf{p} \mathbf{p}^T$ yields the same result. In detail,

$$\mathbf{E} \mathbf{p}^T \mathbf{p} = \epsilon \mathbf{p}^T \mathbf{p}^T \mathbf{p} \quad (32)$$

$$\mathbf{E} \mathbf{p} \mathbf{p}^T = \epsilon \mathbf{p}^T \mathbf{p} \mathbf{p}^T = \epsilon (\mathbf{p}^T \mathbf{p}) \mathbf{p}^T = \epsilon \mathbf{p}^T (\mathbf{p}^T \mathbf{p}) = \mathbf{E} \mathbf{p}^T \mathbf{p} . \quad (33)$$

Restricting γ and η to those numbers given in Table 1, the general and unified representation of OLS, MLS and TLS is given by

$$\hat{\mathbf{E}} = \eta \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{M} \hat{\mathbf{p}}) \hat{\mathbf{p}}^T}{\gamma + \hat{\mathbf{p}}^T \hat{\mathbf{p}}} \quad (34)$$

$$\text{and } \hat{\mathbf{p}} = [(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T (\mathbf{M} + \gamma \hat{\mathbf{E}})]^{-1} (\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T \mathbf{y} . \quad (35)$$

This representation of the iteration procedure is well-defined.

Example 1. Unconstrained MLS iteration: For numerical data

$$\mathbf{y}^T = (21 \ 18 \ 15 \ 4 \ 11 \ 24 \ 13 \ 5 \ 50.9), \quad \mathbf{M}^T = \begin{pmatrix} 3 & 8 & 7 & 2 & 3 & 12 & -3 & 1 & 10 \\ 9 & 5 & 4 & 1 & 4 & 6 & 8 & 2 & 20 \end{pmatrix} \quad (36)$$

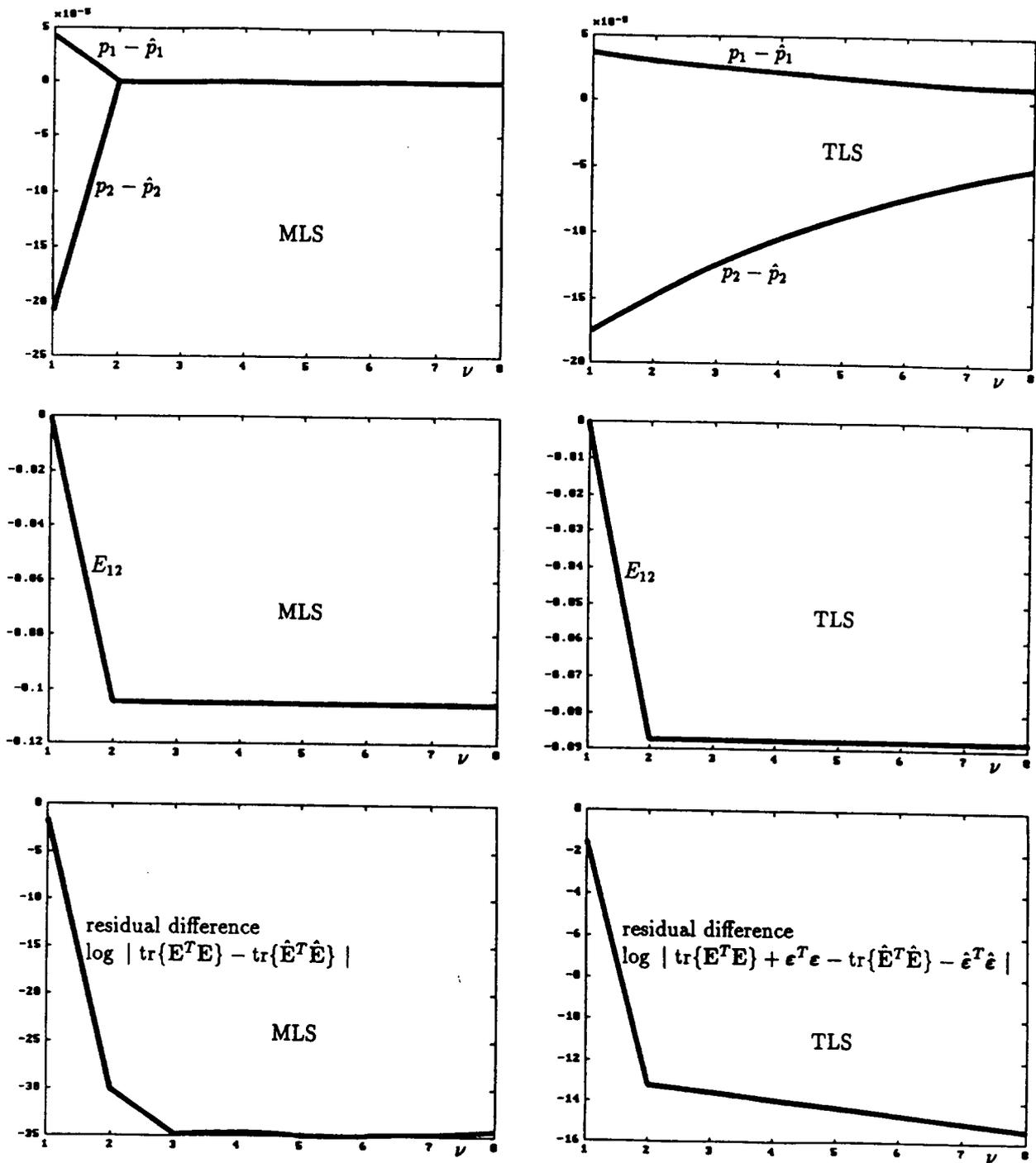


Figure 2: Comparison of convergence for MLS and TLS

Table 2: Error matrices $\hat{\mathbf{E}}$, optimum parameter $\hat{\mathbf{p}}$ and residues for OLS, MLS and TLS

OLS	MLS	TLS	
$\hat{\boldsymbol{\epsilon}}$	$\hat{\mathbf{E}}$	$\hat{\mathbf{E}}$	$\hat{\boldsymbol{\epsilon}}$
$\begin{pmatrix} -0.263217 \\ -0.110973 \\ -0.085438 \\ -0.019968 \\ -0.107707 \\ -0.119806 \\ -0.265518 \\ -0.056637 \\ 0.333631 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.051512 & -0.105228 \\ -0.021710 & -0.044348 \\ -0.016713 & -0.034142 \\ -0.003906 & -0.007978 \\ -0.021076 & -0.043054 \\ -0.023434 & -0.047870 \\ -0.051970 & -0.106162 \\ -0.011084 & -0.022641 \\ 0.064129 & 0.131000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.043043 & -0.087925 \\ -0.018142 & -0.037058 \\ -0.013966 & -0.028530 \\ -0.003264 & -0.006667 \\ -0.017611 & -0.035975 \\ -0.019583 & -0.040002 \\ -0.043424 & -0.088703 \\ -0.009261 & -0.018918 \\ 0.053743 & 0.109782 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.043285 \\ -0.018244 \\ -0.014045 \\ -0.003282 \\ -0.017711 \\ -0.019693 \\ -0.043669 \\ -0.009314 \\ 0.054046 \end{pmatrix}$
$\hat{\mathbf{p}} = \begin{pmatrix} 0.994433 \\ 2.031102 \end{pmatrix}$	$\hat{\mathbf{p}} = \begin{pmatrix} 0.994389 \\ 2.031312 \end{pmatrix}$	$\hat{\mathbf{p}} = \begin{pmatrix} 0.994396 \\ 2.031278 \end{pmatrix}$	
$\hat{\boldsymbol{\epsilon}}^T \boldsymbol{\epsilon} = 0.300268$	$\text{residual } \text{tr}\{\hat{\mathbf{E}}^T \mathbf{E}\} = 0.058707$	$\text{residual } \text{tr}\{\hat{\mathbf{E}}^T \mathbf{E} + \hat{\boldsymbol{\epsilon}}^T \hat{\boldsymbol{\epsilon}}\} = 0.049107$	
$\rho = 0.30$	$\rho = 0.15$	$\rho = 0.26$	

the OLS, MLS and TLS results from Eqs.(34) and (35) are presented in Table 2. For the purpose of comparing the convergence facilities versus iteration steps ν , Fig. 2 presents MLS and TLS results; left column MLS, right column TLS; row 1 parameter \mathbf{p} , row 2 entry E_{12} of \mathbf{E} and row 3 the residual differences. The 'steady-state' result of Fig. 2 corresponds with Table 2. MLS converges much quicker than TLS, but MLS is not as accurate as TLS. It can be stated by this example that TLS arrives at the MLS accuracy only after having passed much more iteration steps. The OLS result is incorporated at abscissa $\nu = 1$ and operates as the initial condition for the MLS and TLS iteration process. The result of the first iteration step of MLS and TLS is depicted at abscissa $\nu = 2$ and so on.

For comparison purposes, the accuracy and the 'dynamics' of OLS, MLS and TLS can be valuated by the factor ρ as follows.

It should be emphasized, that the aim of an identification process is to minimize both the residual (or error) and 'time constant' of the convergence ('decaying') process. The error is given in Table 2 in the last but one row. The time constant of the decaying process can be estimated by means of the area between the curves Fig. 2c and the abscissa. The results are roughly given by 1, 2.5 and 5.5 units for OLS, MLS and TLS, respectively.

The product ρ , time constant times residual, valuates both dynamics and accuracy. A rough estimate for ρ is outlined in the last row of Table 2. From this point of view, MLS offers the best overall properties.

Even though the time constant in absolute time units depends on the computation facilities, and the importance of the time constant is stated by the very requirements of the process identification, the factor ρ provides good rating. \square

Example 2. Region of attraction: In Fig. 3 a great many of initial conditions is used showing the wide range of attraction. Moreover, the algorithm converges even for extremely large or small initial values of \mathbf{p} . \square

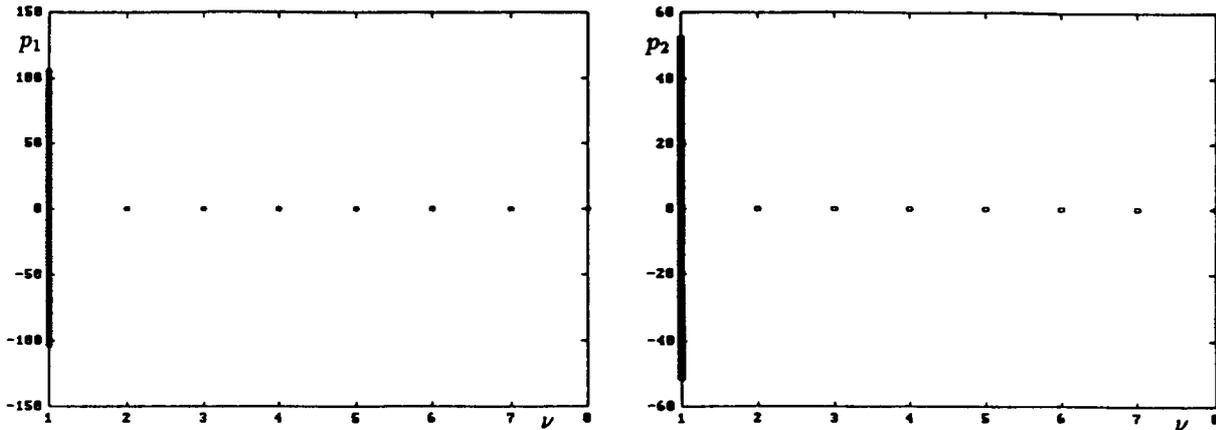


Figure 3: Convergence for widely spread initial conditions

5 Solving Model Least Squares Directly

From Eqs.(24) and (25),

$$\lambda = \frac{y + MM^T \lambda \frac{1}{\lambda^T \lambda}}{\frac{\lambda^T MM^T \lambda}{\lambda^T \lambda}} \quad (37)$$

which leads to

$$\lambda \lambda^T MM^T \lambda = y(\lambda^T \lambda)^2 + MM^T \lambda \lambda^T \lambda . \quad (38)$$

Hence, the problem is stated by n_m equations of third degree in the entries of λ .

6 Increments $\Delta\lambda$ of MLS Versus Increments of y and MM^T

From Eq.(38) and using $Q \triangleq MM^T$,

$$\begin{aligned} (\lambda + \Delta\lambda)(\lambda + \Delta\lambda)^T(Q + \Delta Q)(\lambda + \Delta\lambda) &= (y + \Delta y)[(\lambda + \Delta\lambda)^T(\lambda + \Delta\lambda)]^2 + \\ &+ (Q + \Delta Q)(\lambda + \Delta\lambda)(\lambda + \Delta\lambda)^T(\lambda + \Delta\lambda) . \end{aligned} \quad (39)$$

Separating and neglecting terms of higher order yields¹ the incremental result

$$\Delta\lambda = [\lambda^T Q \lambda + 2\lambda \lambda^T Q - \lambda^T \lambda (4y \lambda^T + Q) - 2Q \lambda \lambda^T]^{-1} = -\lambda \lambda^T \Delta Q \lambda + (\lambda^T \lambda)^2 \Delta y + (\lambda^T \lambda) \Delta Q \lambda . \quad (40)$$

¹For the sake of overview, the inner product is put into parentheses.

7 Weighted Total Least Square Subject to Equality Conditions in \mathbf{p}

Minimizing the performance of the TLS problem subject to equality conditions $\mathbf{B}\mathbf{p} = \mathbf{a}$ reads as

$$\text{tr}\{\mathbf{E}^T \mathbf{V}^T \mathbf{V} \mathbf{E}\} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\lambda}^T [(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\varepsilon}] + \boldsymbol{\mu}^T [\mathbf{B}\mathbf{p} - \mathbf{a}] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{p}} \quad (41)$$

and is evaluated as follows. The differentiation $\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}}$ yields

$$(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{B}^T \boldsymbol{\mu} . \quad (42)$$

Supposing \mathbf{V} and \mathbf{W} symmetrical, by $\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}$

$$2 \mathbf{W}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\lambda} = 2 \mathbf{W}^2 \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\lambda} = -2 \mathbf{W}^2 \boldsymbol{\varepsilon} = -2 \mathbf{W}^2 [\mathbf{y} - (\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p}] . \quad (43)$$

Combining Eqs.(42) and (43),

$$-2 (\mathbf{M} + \mathbf{E})^T [\mathbf{W}^2 \mathbf{y} - \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p}] = -\mathbf{B}^T \boldsymbol{\mu} . \quad (44)$$

$$\mathbf{p} = [(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \mathbf{E})]^{-1} [(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \mathbf{W}^2 \mathbf{y} - \frac{\mathbf{B}^T \boldsymbol{\mu}}{2}] . \quad (45)$$

Combining with $\mathbf{B}\mathbf{p} = \mathbf{a}$ yields

$$\mathbf{B} [(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \mathbf{E})]^{-1} (\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \mathbf{W}^2 \mathbf{y} - \mathbf{B} [(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \mathbf{E})]^{-1} \mathbf{B}^T \frac{\boldsymbol{\mu}}{2} = \mathbf{a} \quad (46)$$

and

$$\boldsymbol{\mu} = 2 \{ \mathbf{B} [(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \mathbf{E})]^{-1} \mathbf{B}^T \}^{-1} \{ -\mathbf{a} + \mathbf{B} [(\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \mathbf{E})]^{-1} (\mathbf{M} + \mathbf{E})^T \mathbf{W}^2 \mathbf{y} \} . \quad (47)$$

Finally,

$$\hat{\mathbf{p}} = [(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})]^{-1} (\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T \mathbf{W}^2 \mathbf{y} + \mathbf{p}_a(\hat{\mathbf{E}}) \quad (48)$$

where

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_a(\hat{\mathbf{E}}) &= [(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})]^{-1} \mathbf{B}^T \{ \mathbf{B} [(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})]^{-1} \mathbf{B}^T \}^{-1} \times \\ &\times \{ \mathbf{a} - \mathbf{B} [(\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})]^{-1} (\mathbf{M} + \hat{\mathbf{E}})^T \mathbf{W}^2 \mathbf{y} \} . \end{aligned} \quad (49)$$

In addition, $\frac{\partial}{\partial \mathbf{E}}$ yields

$$2 \mathbf{V}^2 \mathbf{E} + \boldsymbol{\lambda} \mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad (50)$$

$$\text{Eq.(43)..... } 2 \mathbf{V}^2 \mathbf{E} - 2 \mathbf{W}^2 [\mathbf{y} - (\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p}] \mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad (51)$$

$$\mathbf{V}^2 \mathbf{E} + \mathbf{W}^2 \mathbf{E} \mathbf{p} \mathbf{p}^T = \mathbf{W}^2 (\mathbf{y} - \mathbf{M} \mathbf{p}) \mathbf{p}^T \quad (52)$$

$$\mathbf{W}^{-2} \mathbf{V}^2 \mathbf{E} + \mathbf{E} \mathbf{p} \mathbf{p}^T = (\mathbf{y} - \mathbf{M} \mathbf{p}) \mathbf{p}^T . \quad (53)$$

According to the dyadic structure² of \mathbf{E}

$$\mathbf{W}^{-2} \mathbf{V}^2 \mathbf{E} + \mathbf{p}^T \mathbf{p} \mathbf{E} = (\mathbf{y} - \mathbf{M} \mathbf{p}) \mathbf{p}^T \quad (55)$$

$$\hat{\mathbf{E}} = [\mathbf{W}^{-2} \mathbf{V}^2 + \hat{\mathbf{p}}^T \hat{\mathbf{p}} \mathbf{I}]^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{M} \hat{\mathbf{p}}) \hat{\mathbf{p}}^T . \quad (56)$$

The entire solution follows from evaluating Eqs.(48), (49) and (56) by iteration.

²The dyadic structure by Eq.(50) entails $2 \mathbf{V}^2 \mathbf{E} + \boldsymbol{\lambda} \mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \mathbf{E} = -0.5 \mathbf{V}^{-2} \boldsymbol{\lambda} \mathbf{p}^T$. Therefore,

$$\{ \mathbf{E} \mathbf{p} \mathbf{p}^T = -0.5 \mathbf{V}^{-2} \boldsymbol{\lambda} \mathbf{p}^T \mathbf{p} \mathbf{p}^T \} \equiv \{ \mathbf{E} \mathbf{p}^T \mathbf{p} = -0.5 \mathbf{V}^{-2} \boldsymbol{\lambda} \mathbf{p}^T \mathbf{p}^T \mathbf{p} \} \rightsquigarrow \mathbf{E} \mathbf{p} \mathbf{p}^T \equiv \mathbf{E} \mathbf{p}^T \mathbf{p} \equiv \mathbf{p}^T \mathbf{p} \mathbf{E} . \quad (54)$$

8 Total Least Squares Subject to Collocation Rows

Suppose that the elements of \mathbf{M} and \mathbf{y} are arbitrarily exchanged in their position within the matrix and vector, respectively. Then, the approximation problem is not altered by a position exchange, as can be seen analyzing the results, e.g. the residues. Therefore, if the approximation is subject to conditions given by the fact that certain measurements have to be considered free of error, these rows can be positioned at the first rows in \mathbf{M} , without altering the least squares problem.

The optimization problem subject to the condition $\mathbf{M}_1\mathbf{p} = \mathbf{y}_1$ is studied if the solution of the TLS or MLS problem has to obey a predetermined structure.

8.1 Total Least Squares Subject to Collocation Rows

From the equality condition $\mathbf{M}_1\mathbf{p} - \mathbf{y}_1 = \mathbf{0}$ and from $(\mathbf{M} + \mathbf{E}_1)\mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{y}_1$ it results $\mathbf{E}_1\mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{0}$ where $\mathbf{M}_1 \in \mathcal{R}^{n_c \times n_p}$, $\mathbf{y}_1 \in \mathcal{R}^{n_c}$, $\mathbf{M}_2 \in \mathcal{R}^{n_m \times n_p}$, $\mathbf{y}_2 \in \mathcal{R}^{n_m}$. Hence,

$$\|\mathbf{E} : \boldsymbol{\varepsilon}\|_F + \boldsymbol{\lambda}^T[(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\varepsilon}] + \boldsymbol{\mu}^T[\mathbf{E}_1\mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}} \quad (57)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \end{pmatrix} \in \mathcal{R}^{(n_c+n_m) \times n_p} \quad (58)$$

$$\text{tr} \left\{ (\mathbf{E}_1^T : \mathbf{E}_2^T) \begin{pmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{pmatrix} \right\} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\lambda}^T \left[\begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2 \end{pmatrix} \mathbf{p} - \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \end{pmatrix} \right] + \boldsymbol{\mu}^T[\mathbf{E}_1\mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} & \text{tr} \{ \mathbf{E}_1^T \mathbf{E}_1 \} + \text{tr} \{ \mathbf{E}_2^T \mathbf{E}_2 \} + \boldsymbol{\varepsilon}_1^T \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2^T \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \boldsymbol{\lambda}_1^T (\mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1)\mathbf{p} + \boldsymbol{\lambda}_2^T (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)\mathbf{p} - \\ & - \boldsymbol{\lambda}_1^T \mathbf{y}_1 - \boldsymbol{\lambda}_2^T \mathbf{y}_2 + \boldsymbol{\lambda}_1^T \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\lambda}_2^T \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{E}_1 \mathbf{p} + \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\varepsilon}_1 \rightarrow \min_{\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\lambda}_2, \boldsymbol{\mu}} \quad (60) \end{aligned}$$

Differentiating the left-hand side of (60) with respect to $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ and $\boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2$ yields

$$2\mathbf{E}_1 + \boldsymbol{\lambda}_1\mathbf{p}^T + \boldsymbol{\mu}\mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad (61)$$

$$2\mathbf{E}_2 + \boldsymbol{\lambda}_2\mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad (62)$$

$$\text{and} \quad 2\boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\lambda}_1 + \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} \quad (63)$$

$$2\boldsymbol{\varepsilon}_2 + \boldsymbol{\lambda}_2 = \mathbf{0}, \quad (64)$$

respectively. By simplifying,

$$\mathbf{E}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}_1\mathbf{p}^T \quad \text{and} \quad \mathbf{E}_2 = \boldsymbol{\varepsilon}_2\mathbf{p}^T. \quad (65)$$

Considering the condition $\mathbf{E}_1\mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{M}_1\mathbf{p} - \mathbf{y}_1 = \mathbf{0}$, then

$$\mathbf{E}_1\mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}_1\mathbf{p}^T\mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{0}, \quad \mathbf{E}_1 = \mathbf{0}. \quad (66)$$

Differentiating the left hand side of Eq.(60) with respect to \mathbf{p} yields

$$(\mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1)^T \boldsymbol{\lambda}_1 + (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T \boldsymbol{\lambda}_2 + \mathbf{E}_1^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} . \quad (67)$$

Using Eq.(63), (64) and (66)

$$\mathbf{M}_1^T (-\boldsymbol{\mu}) + (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T (-2\boldsymbol{\epsilon}_2) = \mathbf{0} . \quad (68)$$

From Eq.(65)

$$\mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} + (\mathbf{M}_2 + \boldsymbol{\epsilon}_2 \mathbf{p}^T)^T \times 2 \boldsymbol{\epsilon}_2 = \mathbf{0} \quad (69)$$

$$\mathbf{p} = -(\mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} + 2 \mathbf{M}_2^T \boldsymbol{\epsilon}_2) / (2 \boldsymbol{\epsilon}_2^T \boldsymbol{\epsilon}_2) . \quad (70)$$

Combining with $\mathbf{M}_1 \mathbf{p} = \mathbf{y}_1$ and supposing that $(\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_1^T)^{-1}$ exists,

$$-\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} - 2 \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2^T \boldsymbol{\epsilon}_2 = 2 \mathbf{y}_1 \boldsymbol{\epsilon}_2^T \boldsymbol{\epsilon}_2 \quad (71)$$

$$\boldsymbol{\mu} = -2(\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_1^T)^{-1} (\mathbf{y}_1 \boldsymbol{\epsilon}_2^T \boldsymbol{\epsilon}_2 + \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2^T \boldsymbol{\epsilon}_2) \quad (72)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{M}_1 (\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_1^T)^{-1} \mathbf{y}_1 + \frac{1}{\hat{\boldsymbol{\epsilon}}_2^T \hat{\boldsymbol{\epsilon}}_2} [\mathbf{M}_1^T (\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_1^T)^{-1} \mathbf{M}_1 - \mathbf{I}] \mathbf{M}_2^T \hat{\boldsymbol{\epsilon}}_2 . \quad (73)$$

In the case of $n_c = 1$ the matrix \mathbf{M}_1 is a row $\in \mathcal{R}^{1 \times n_p}$. From the second equality condition (or from deriving Eq.(60) with respect to $\boldsymbol{\lambda}_2$)

$$(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2) \mathbf{p} - \mathbf{y}_2 + \boldsymbol{\epsilon}_2 = \mathbf{0} \quad (74)$$

$$(\mathbf{M}_2 + \boldsymbol{\epsilon}_2 \mathbf{p}^T) \mathbf{p} - \mathbf{y}_2 + \boldsymbol{\epsilon}_2 = \mathbf{0} \quad (75)$$

$$\hat{\boldsymbol{\epsilon}}_2 = \frac{\mathbf{y}_2 - \mathbf{M}_2 \hat{\mathbf{p}}}{1 + (\hat{\mathbf{p}}^T \hat{\mathbf{p}})} . \quad (76)$$

The solution is achieved by Eqs.(73) and (76) and eventually by $\hat{\mathbf{E}}_2 = \hat{\boldsymbol{\epsilon}}_2 \hat{\mathbf{p}}^T$. In the case of $\mathbf{y}_1 = \mathbf{0}$ and $\mathbf{M}_1 = \mathbf{0}$, the result corresponds to Eqs.(20) and (21).

8.2 Weighted Total Least Squares Subject to Collocation Rows

Consider the case of diagonal $\mathbf{V} \triangleq \text{diag}\{V_i\}$ and $\mathbf{R} \triangleq \text{diag}\{R_i\}$. Forgetting factors are taken into consideration by \mathbf{V} because premultiplication of the matrix \mathbf{M} by \mathbf{V} provides each row i being multiplied by V_i , row by row. Weighting the errors of various difference quotients, the elements of diagonal \mathbf{R} can be used since postmultiplying \mathbf{M} by \mathbf{R} entails columnwise multiplication with R_i . If \mathbf{R} and \mathbf{V} are not diagonal, they are assumed symmetric. Based on $\boldsymbol{\lambda}$ and \mathbf{p} , one has the following derivation

$$\|\mathbf{V} \mathbf{E} \boldsymbol{\epsilon}\|_F + \boldsymbol{\lambda}^T [(\mathbf{M} + \mathbf{E}) \mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\epsilon}] + \boldsymbol{\mu}^T [\mathbf{E}_1 \mathbf{p} + \boldsymbol{\epsilon}_1] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\epsilon}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}} \quad (77)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\epsilon} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\epsilon}_1 \\ \boldsymbol{\epsilon}_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \end{pmatrix}, \quad (78)$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{V}_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \end{pmatrix} \quad (79)$$

$$\begin{aligned} & \text{tr} \{ \mathbf{R} \mathbf{E}^T \mathbf{V}^2 \mathbf{E} \mathbf{R} \} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{W}^2 \boldsymbol{\varepsilon} + \\ & + \boldsymbol{\lambda}^T \times \left[\begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2 \end{pmatrix} \mathbf{p} - \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \end{pmatrix} \right] + \boldsymbol{\mu}^T \times [\mathbf{E}_1 \mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1] \rightarrow \min_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}} \end{aligned} \quad (80)$$

$$\begin{aligned} & \text{tr} \{ \mathbf{R}_1 \mathbf{E}_1^T \mathbf{V}_1^2 \mathbf{E}_1 \mathbf{R}_1 \} + \text{tr} \{ \mathbf{R}_2 \mathbf{E}_2^T \mathbf{V}_2^2 \mathbf{E}_2 \mathbf{R}_2 \} + \boldsymbol{\varepsilon}_1^T \mathbf{W}_1^2 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2^T \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \boldsymbol{\lambda}_1^T (\mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1) \mathbf{p} + \boldsymbol{\lambda}_2^T (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2) \mathbf{p} - \\ & - \boldsymbol{\lambda}_1^T \mathbf{y}_1 - \boldsymbol{\lambda}_2^T \mathbf{y}_2 + \boldsymbol{\lambda}_1^T \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\lambda}_2^T \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{E}_1 \mathbf{p} + \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\varepsilon}_1 \rightarrow \min_{\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\lambda}_2, \boldsymbol{\mu}} \end{aligned} \quad (81)$$

Differentiating the left-hand side of (81) with respect to $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ and $\boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2$, respectively, and using

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{E}} \text{tr} \{ \mathbf{E}^T \mathbf{A} \mathbf{E} \mathbf{B} \} = \mathbf{A}^T \mathbf{E} \mathbf{B}^T + \mathbf{A} \mathbf{E} \mathbf{B} \quad (82)$$

yields

$$2 \mathbf{V}_1^2 \mathbf{E}_1 \mathbf{R}_1^2 + \boldsymbol{\lambda}_1 \mathbf{p}^T + \boldsymbol{\mu} \mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad (83)$$

$$2 \mathbf{V}_2^2 \mathbf{E}_2 \mathbf{R}_2^2 + \boldsymbol{\lambda}_2 \mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad (84)$$

$$\text{and} \quad 2 \mathbf{W}_1^2 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\lambda}_1 + \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} \quad (85)$$

$$2 \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \boldsymbol{\lambda}_2 = \mathbf{0}, \quad (86)$$

respectively. By simplifying,

$$\mathbf{V}_1^2 \mathbf{E}_1 \mathbf{R}_1^2 = \mathbf{W}_1^2 \boldsymbol{\varepsilon}_1 \mathbf{p}^T \quad \text{and} \quad \mathbf{V}_2^2 \mathbf{E}_2 \mathbf{R}_2^2 = \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 \mathbf{p}^T. \quad (87)$$

Consider the condition $\mathbf{E}_1 \mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{M}_1 \mathbf{p} - \mathbf{y}_1 = \mathbf{0}$, then

$$\mathbf{E}_1 \mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}_1 \mathbf{p}^T \mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{0} \rightsquigarrow \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{0}, \quad \mathbf{E}_1 = \mathbf{0}. \quad (88)$$

Differentiating the left-hand side of (77) with respect to \mathbf{p} yields

$$(\mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1)^T \boldsymbol{\lambda}_1 + (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T \boldsymbol{\lambda}_2 + \mathbf{E}_1^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}. \quad (89)$$

Using Eqs.(85), (86) and (88),

$$\mathbf{M}_1^T (-\boldsymbol{\mu}) + (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T (-2 \mathbf{W}_2^T \mathbf{W}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_2) = \mathbf{0}. \quad (90)$$

From Eq.(87)

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{V}_2^{-2} \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 \mathbf{p}^T \mathbf{R}_2^{-2} \quad (91)$$

$$(\mathbf{M}_2 + \mathbf{V}_2^{-2} \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 \mathbf{p}^T \mathbf{R}_2^{-2})^T (-2 \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2) = \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} \quad (92)$$

$$\mathbf{R}_2^{-2} \mathbf{p} \boldsymbol{\varepsilon}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{V}_2^{-2} \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 = -0.5 \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} \quad (93)$$

$$\mathbf{p} = -\frac{1}{(\boldsymbol{\varepsilon}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{V}_2^{-2} \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2)} \mathbf{R}_2^2 (\mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + 0.5 \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu}). \quad (94)$$

Combining with $\mathbf{M}_1 \mathbf{p} = \mathbf{y}_1$,

$$-\frac{1}{(\boldsymbol{\varepsilon}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{V}_2^{-2} \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2)} \mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 (\mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + 0.5 \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu}) = \mathbf{y}_1 \quad (95)$$

$$\boldsymbol{\mu} = -2 (\mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T)^{-1} [\mathbf{y}_1 (\boldsymbol{\varepsilon}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{V}_2^{-2} \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2) + \mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2] \quad (96)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{M}_1^T (\mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T)^{-1} + \frac{1}{(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{V}_2^{-2} \mathbf{W}_2^2 \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_2)} [\mathbf{M}_1^T (\mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T)^{-1} \mathbf{M}_1 - \mathbf{I}] \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_2. \quad (97)$$

From the second equality condition (or from deriving Eq.(60) with respect to λ_2)

$$(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)\mathbf{p} - \mathbf{y}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 = \mathbf{0} \quad (98)$$

$$\text{Eq.(87).... } \mathbf{M}_2\mathbf{p} + \mathbf{V}_2^{-2}\mathbf{W}_2^2\boldsymbol{\varepsilon}_2\mathbf{p}^T\mathbf{R}_2^{-2}\mathbf{p} - \mathbf{y}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 = \mathbf{0} \quad (99)$$

$$\mathbf{M}_2\mathbf{p} + (\mathbf{p}^T\mathbf{R}_2^{-2}\mathbf{p}\mathbf{V}_2^{-2}\mathbf{W}_2^2 + \mathbf{I})\boldsymbol{\varepsilon}_2 = \mathbf{y}_2 \quad (100)$$

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = [\mathbf{I} + (\hat{\mathbf{p}}^T\mathbf{R}_2^{-2}\hat{\mathbf{p}})\mathbf{V}_2^{-2}\mathbf{W}_2^2]^{-1}(\mathbf{y}_2 - \mathbf{M}_2\hat{\mathbf{p}}) . \quad (101)$$

The solution $\hat{\mathbf{p}}$, $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_2$ is achieved from Eqs.(97) and (101), and from Eq.(87) by

$$\hat{\mathbf{E}}_2 = \mathbf{V}_2^{-2}\mathbf{W}_2^2\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_2\hat{\mathbf{p}}^T\mathbf{R}_2^{-2} . \quad (102)$$

In order to obtain a stable iteration between Eqs.(97) and (101), additional consideration are necessary. For the corresponding derivation based on \mathbf{E} and \mathbf{p} , see Eqs.(48), (49) and (56).

9 Weighted Model Least Squares Subject to Collocation Rows

9.1 Based on λ

Solve

$$\begin{aligned} \text{tr} \{ \mathbf{R}_1\mathbf{E}_1^T\mathbf{V}_1^T\mathbf{V}_1\mathbf{E}_1\mathbf{R}_1 \} + \text{tr} \{ \mathbf{R}_2\mathbf{E}_2^T\mathbf{V}_2^T\mathbf{V}_2\mathbf{E}_2\mathbf{R}_2 \} + \lambda_1^T(\mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1)\mathbf{p} + \lambda_2^T(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)\mathbf{p} - \\ - \lambda_1^T\mathbf{y}_1 - \lambda_2^T\mathbf{y}_2 + \boldsymbol{\mu}^T(\mathbf{M}_1\mathbf{p} - \mathbf{y}_1) \rightarrow \min_{\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{p}, \lambda_1, \lambda_2, \boldsymbol{\mu}} . \end{aligned} \quad (103)$$

$$\text{By } \frac{\partial}{\partial \mathbf{E}} \dots\dots 2\mathbf{V}_1^2\mathbf{E}_1\mathbf{R}_1^2 + \lambda_1\mathbf{p}^T = \mathbf{0} \quad (104)$$

$$2\mathbf{V}_2^2\mathbf{E}_2\mathbf{R}_2^2 + \lambda_2\mathbf{p}^T = \mathbf{0} , \quad (105)$$

$$\text{by } \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \dots\dots (\mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1)^T\lambda_1 + (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T\lambda_2 + \mathbf{M}_1^T\boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} . \quad (106)$$

$$\text{by } \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}} \dots\dots \mathbf{M}_1\mathbf{p} - \mathbf{y}_1 = \mathbf{0} \quad (107)$$

$$\text{and by } \frac{\partial}{\partial \lambda_i} \dots\dots (\mathbf{M}_1 + \mathbf{E}_1)\mathbf{p} = \mathbf{y}_1 \rightsquigarrow \mathbf{E}_1 = \mathbf{0} \rightsquigarrow \lambda_1 = \mathbf{0} \quad (108)$$

$$(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)\mathbf{p} = \mathbf{y}_2 . \quad (109)$$

Combining Eqs.(107) and (108) yields $\mathbf{E}_1 = \mathbf{0}$. From Eq.(104) it follows $\lambda_1 = \mathbf{0}$, from Eq.(105)

$$\mathbf{E}_2 = -0.5\mathbf{V}_2^{-2}\lambda_2\mathbf{p}^T\mathbf{R}_2^{-2} . \quad (110)$$

Using Eq.(110) in Eq.(106), one has

$$\mathbf{M}_2^T\lambda_2 - 0.5\mathbf{R}_2^{-2}\mathbf{p}(\lambda_2^T\mathbf{V}_2^{-2}\lambda_2) + \mathbf{M}_1^T\boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} \quad (111)$$

$$\mathbf{p} = 2\mathbf{R}_2^2\frac{\mathbf{M}_1^T\boldsymbol{\mu} + \mathbf{M}_2^T\lambda_2}{(\lambda_2^T\mathbf{V}_2^{-2}\lambda_2)} \quad (112)$$

$$\mathbf{M}_1 \mathbf{p} = \mathbf{y}_1 \quad \rightsquigarrow \quad 2 \mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 (\mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{M}_2^T \boldsymbol{\lambda}_2) = \mathbf{y}_1 (\boldsymbol{\lambda}_2^T \mathbf{V}_2^{-2} \boldsymbol{\lambda}_2) \quad (113)$$

$$\boldsymbol{\mu} = 0.5 (\mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T)^{-1} [\mathbf{y}_1 (\boldsymbol{\lambda}_2^T \mathbf{V}_2^{-2} \boldsymbol{\lambda}_2) - 2 \mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_2^T \boldsymbol{\lambda}_2] \quad (114)$$

$$\mathbf{p} = \frac{2 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu}}{(\boldsymbol{\lambda}_2^T \mathbf{V}_2^{-2} \boldsymbol{\lambda}_2)} + 2 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_2^T \boldsymbol{\lambda}_2 \frac{1}{(\boldsymbol{\lambda}_2^T \mathbf{V}_2^{-2} \boldsymbol{\lambda}_2)} \quad (115)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T (\mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T)^{-1} \mathbf{y}_1 - \frac{2}{(\hat{\boldsymbol{\lambda}}_2^T \mathbf{V}_2^{-2} \hat{\boldsymbol{\lambda}}_2)} [\mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T (\mathbf{M}_1 \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_1^T)^{-1} \mathbf{M}_1 - \mathbf{I}] \mathbf{R}_2^2 \mathbf{M}_2^T \hat{\boldsymbol{\lambda}}_2. \quad (116)$$

$$(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2) \mathbf{p} - \mathbf{y}_2 = \mathbf{0} \quad (117)$$

$$\mathbf{M}_2 \mathbf{p} - 0.5 \mathbf{V}_2^{-2} \boldsymbol{\lambda}_2 \mathbf{p}^T \mathbf{R}_2^{-2} \mathbf{p} = \mathbf{y}_2 \quad \rightsquigarrow \quad \hat{\boldsymbol{\lambda}}_2 = -\frac{2 \mathbf{V}_2^2 (\mathbf{y}_2 - \mathbf{M}_2 \hat{\mathbf{p}})}{\hat{\mathbf{p}}^T \mathbf{R}_2^{-2} \hat{\mathbf{p}}} \quad (118)$$

$$\hat{\mathbf{E}}_2 = -0.5 \mathbf{V}_2^{-2} \hat{\boldsymbol{\lambda}}_2 \hat{\mathbf{p}}^T \mathbf{R}_2^{-2}. \quad (119)$$

The iteration is given by solving both Eqs.(116) and (118), and by Eq.(119). For iterative solution, additional setups are essential. Considering $\mathbf{V}_2 = \mathbf{R}_2 = \mathbf{I}$, $\mathbf{y}_1 = \mathbf{0}$, $\mathbf{M}_1 = \mathbf{0}$, see Eqs.(24) and (25) for comparison.

9.2 Based on E

An alternative calculation as given below shows good convergence facilities. From Eq.(104), multiplied by \mathbf{p}

$$\boldsymbol{\lambda}_2 = -\frac{2 \mathbf{V}_2^2 \mathbf{E}_2 \mathbf{p}}{(\mathbf{p}^T \mathbf{R}_2^2 \mathbf{p})}. \quad (120)$$

Substituting into Eq.(105) yields

$$(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T \boldsymbol{\lambda}_2 + \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} = -(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T \frac{2 \mathbf{V}_2^2 \mathbf{E}_2 \mathbf{p}}{(\mathbf{p}^T \mathbf{R}_2^2 \mathbf{p})} + \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}. \quad (121)$$

By $\mathbf{E}_2 \mathbf{p} = \mathbf{y}_2 - \mathbf{M}_2 \mathbf{p}$ and Eq.(109),

$$\mathbf{p} = [(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T \mathbf{V}_2^2 \mathbf{M}_2]^{-1} (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T \mathbf{V}_2^2 \mathbf{y}_2 - 0.5 [(\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T \mathbf{V}_2^2 \mathbf{M}_2]^{-1} \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} (\mathbf{p}^T \mathbf{R}_2^2 \mathbf{p}). \quad (122)$$

$$\mathbf{M}_1 \mathbf{p} = \mathbf{y}_1 \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\mu} = 2 (\mathbf{M}_1 \mathbf{N}_2^{-1} \mathbf{M}_1^T)^{-1} [\mathbf{M}_1 \mathbf{N}_2^{-1} (\mathbf{M}_2 + \mathbf{E}_2)^T \mathbf{V}_2^2 \mathbf{y}_2 - \mathbf{y}_1] \frac{1}{(\mathbf{p}^T \mathbf{R}_2^2 \mathbf{p})} \quad (123)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{N}_2^{-1} [\mathbf{I} - \mathbf{N}_3 \mathbf{M}_1 \mathbf{N}_2^{-1}] (\mathbf{M}_2 + \hat{\mathbf{E}}_2)^T \mathbf{V}_2^2 \mathbf{y}_2 + \mathbf{N}_2^{-1} \mathbf{N}_3 \mathbf{y}_1 \quad (124)$$

where

$$\mathbf{N}_2 \triangleq (\mathbf{M}_2 + \hat{\mathbf{E}}_2)^T \mathbf{V}_2^2 \mathbf{M}_2 \in \mathcal{R}^{n_p \times n_p}, \quad \mathbf{N}_3 \triangleq \mathbf{M}_1^T (\mathbf{M}_1 \mathbf{N}_2^{-1} \mathbf{M}_1^T)^{-1} \in \mathcal{R}^{n_p \times n_c}. \quad (125)$$

From Eqs.(118) and (119)

$$\hat{\mathbf{E}}_2 = \frac{(\mathbf{y}_2 - \mathbf{M}_2 \hat{\mathbf{p}}) \hat{\mathbf{p}}^T \mathbf{R}_2^{-2}}{(\hat{\mathbf{p}}^T \mathbf{R}_2^{-2} \hat{\mathbf{p}})}. \quad (126)$$

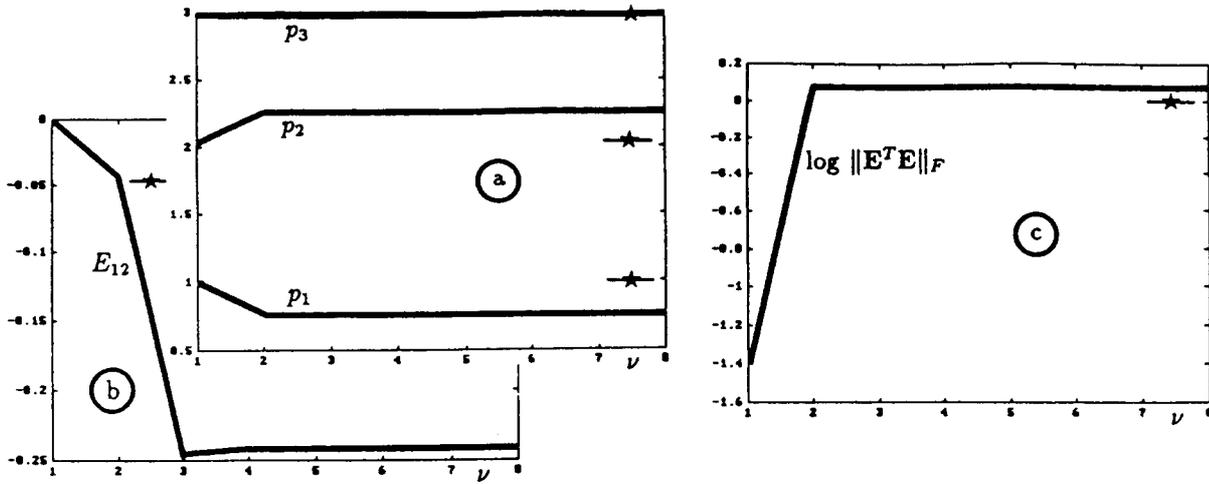


Figure 4: Iteration process for MLS, subject to two collocation rows. Parameters p_1 , p_2 and p_3 (a), one entry E_{12} of the error matrix \mathbf{E} (b) and performance (c)

Calculating the difference

$$\Delta C = \text{tr} \{ \mathbf{R}_2 \hat{\mathbf{E}}_2 \mathbf{V}_2^2 \hat{\mathbf{E}}_2 \mathbf{R}_2 \} - \text{tr} \{ \mathbf{R}_2 \hat{\mathbf{E}}_2 \mathbf{V}_2^2 \hat{\mathbf{E}}_2 \mathbf{R}_2 \} \Big|_{\mathbf{y}_1=0, \mathbf{M}_1=0} \quad (127)$$

yields the loss of performance which has to be sacrificed to the restriction of equality conditions.

Example 3. MLS subject to collocation rows: For the setup

$$\mathbf{y}_1^T = (6 \quad 21)^T \quad \mathbf{y}_2^T = (27 \quad 36 \quad 30 \quad 31 \quad 14 \quad 30 \quad 40 \quad 26 \quad 65.9) \quad (128)$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 5 & 3 \end{pmatrix} \quad \mathbf{M}_2^T = \begin{pmatrix} 3 & 8 & 7 & 2 & 3 & 12 & -3 & 1 & 10 \\ 9 & 5 & 4 & 1 & 4 & 6 & 8 & 2 & 20 \\ 2 & 6 & 5 & 9 & 1 & 2 & 9 & 7 & 5 \end{pmatrix}, \quad (129)$$

Fig. 4 depicts the convergence properties for the parameters p_1 , p_2 , p_3 , the error matrix element E_{12} and the residual $\log \|\mathbf{E}^T \mathbf{E}\|_F$ versus iteration steps ν . The iteration process starts from the OLS optimum and converges to that values which minimize the performance on the one hand and are permitted by the equality condition on the other hand. The equality condition is intentionally chosen with exceptional high deviation to the unconstrained values. For comparison purposes, the star points \star stand for the unconstrained values.

□

10 Ordinary Weighted Least Squares Subject to Collocation Rows

Under the condition

$$\mathbf{M}\mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \end{pmatrix} \mathbf{p} - \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \end{pmatrix} = \mathbf{0}, \quad (130)$$

minimize

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{W}^2 \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\lambda}^T [\mathbf{M}\mathbf{p} - \mathbf{y} + \boldsymbol{\varepsilon}] + \boldsymbol{\mu} [\mathbf{M}_1 \mathbf{p} - \mathbf{y}_1] \quad \text{or} \quad (131)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1^T \mathbf{W}_1^2 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2^T \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + (\boldsymbol{\lambda}_1^T : \boldsymbol{\lambda}_2^T) \left[\begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \end{pmatrix} \mathbf{p} - \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \end{pmatrix} \right] + \boldsymbol{\mu} [\mathbf{M}_1 \mathbf{p} - \mathbf{y}_1]. \quad (132)$$

By differentiating

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_1} \dots 2 \mathbf{W}_1^2 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\lambda}_1 = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{0}, \quad \boldsymbol{\lambda}_1 = \mathbf{0}, \quad (133)$$

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_2} \dots 2 \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \boldsymbol{\lambda}_2 = \mathbf{0} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\lambda}_2 = -2 \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 \quad (134)$$

$$\text{and } \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \dots \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\lambda}_1 + \mathbf{M}_2^T \boldsymbol{\lambda}_2 + \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}. \quad (135)$$

Combining with Eq.(134),

$$\mathbf{M}_2^T (-2 \mathbf{W}_2^2 \boldsymbol{\varepsilon}_2) + \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}. \quad (136)$$

Using $\mathbf{M}_2 \mathbf{p} - \mathbf{y}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 = \mathbf{0}$ and Eq.(136),

$$-2 \mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 (\mathbf{M}_2 \mathbf{p} - \mathbf{y}_2) - \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}. \quad (137)$$

Defining

$$\mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{M}_2 \triangleq \mathbf{U} \quad \text{and} \quad \mathbf{M}_1^T [\mathbf{M}_1 \mathbf{U}^{-1} \mathbf{M}_1^T]^{-1} \triangleq \mathbf{K}_1, \quad (138)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{U}^{-1} [-0.5 \mathbf{M}_1^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{y}_2] \quad (139)$$

$$\mathbf{M}_1 \mathbf{p} = \mathbf{y}_1 \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\mu} = 2 (\mathbf{M}_1 \mathbf{U}^{-1} \mathbf{M}_1^T)^{-1} [\mathbf{M}_1 \mathbf{U}^{-1} \mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{y}_2 - \mathbf{y}_1] \quad (140)$$

and the one-shot result is

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{U}^{-1} \left\{ [\mathbf{I} - \mathbf{K}_1 \mathbf{M}_1 \mathbf{U}^{-1}] \mathbf{M}_2^T \mathbf{W}_2^2 \mathbf{y}_2 + \mathbf{K}_1 \mathbf{y}_1 \right\}. \quad (141)$$

11 Extrapolation from MLS to TLS

11.1 Extrapolating $\boldsymbol{\varepsilon}$

Using the indices M and T for MLS and TLS, respectively,

$$\mathbf{M}\mathbf{p}_T + \boldsymbol{\varepsilon}_T \mathbf{P}_T^T \mathbf{P}_T = \mathbf{y} - \boldsymbol{\varepsilon}_T \quad (142)$$

$$\mathbf{M}\mathbf{p}_M + \boldsymbol{\varepsilon}_M \mathbf{P}_M^T \mathbf{P}_M = \mathbf{y}. \quad (143)$$

Now, an assertion is made: Replacing \mathbf{p}_T by \mathbf{p}_M in the first equation above, and subtracting the second equation from the first, one is asserted to provide an approximation $\boldsymbol{\varepsilon}_{T_a}$ for $\boldsymbol{\varepsilon}_T$. Hence,

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{T_a} \mathbf{P}_M^T \mathbf{P}_M - \boldsymbol{\varepsilon}_M \mathbf{P}_M^T \mathbf{P}_M = -\boldsymbol{\varepsilon}_{T_a} \quad \rightsquigarrow \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{T_a} = \boldsymbol{\varepsilon}_M \frac{\mathbf{P}_M^T \mathbf{P}_M}{1 + \mathbf{P}_M^T \mathbf{P}_M}. \quad (144)$$

11.2 Extrapolating p

Consider

$$\mathbf{p}_T = \mathbf{p}_M + \mathbf{p}_1 \quad \boldsymbol{\varepsilon}_T = \boldsymbol{\varepsilon}_M + \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (145)$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{p}_M + \mathbf{p}_1) + \boldsymbol{\varepsilon}_T(\mathbf{p}_M + \mathbf{p}_1)^T(\mathbf{p}_M + \mathbf{p}_1) = \mathbf{y} - \boldsymbol{\varepsilon}_M - \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (146)$$

$$\mathbf{M}\mathbf{p}_M + \boldsymbol{\varepsilon}_M\mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M = \mathbf{y} . \quad (147)$$

Subtracting yields

$$\mathbf{M}\mathbf{p}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_T(2\mathbf{p}_1^T\mathbf{p}_M) + \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}_T\mathbf{p}_1^T\mathbf{p}_1}_{\approx 0} = -\boldsymbol{\varepsilon}_M - \boldsymbol{\varepsilon}_1 . \quad (148)$$

Using Eq.(144), i.e., replacing $\boldsymbol{\varepsilon}_T$ by $\boldsymbol{\varepsilon}_{T\alpha}$, and taking the pseudo inverse (!)

$$\mathbf{M}\mathbf{p}_1 + 2\boldsymbol{\varepsilon}_{T\alpha}\mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}_M - \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (149)$$

$$(\mathbf{M} + 2\boldsymbol{\varepsilon}_M\mathbf{p}_M^T \frac{\mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M}{1 + \mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M})\mathbf{p}_1 = -\boldsymbol{\varepsilon}_M \frac{\mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M}{1 + \mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M} \quad (150)$$

$$\leadsto \mathbf{p}_1 = -(\mathbf{M} + 2\boldsymbol{\varepsilon}_M\mathbf{p}_M^T \frac{\mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M}{1 + \mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M})^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}_M \frac{\mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M}{1 + \mathbf{p}_M^T\mathbf{p}_M} \quad \text{and} \quad \mathbf{p}_{T\alpha} = \mathbf{p}_M + \mathbf{p}_1 . \quad (151)$$

12 Conclusion

In comparison to the total least squares and the ordinary least squares method, the model least squares method yields a remarkably better result under the assessment of both accuracy and convergence facilities. MLS also seems to be an adequate setup, sufficing the errors only to the retarded measurement values.

The presented computation algorithms are characterized by an adequate region of attraction.

Collocation rows as given by a predetermined structure are treated as a special kind of conditions the problem is subject to.

Unifying presentations of OLS, MLS and TLS provide a better insight into the structure of the computation algorithm.

References

- Golub, G.H., and Van Loan, C.F., 1980* , An analysis of the total least squares problem, *SIAM J. Numer. Anal.* **17**, pp. 883-893
- Kessaci, A., 1988*, Estimation en ligne et gestion des capacités pour la commande du trafic urbain, *Dissertation, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse*
- Papageorgiou, M., 1991*, Optimierung (Oldenbourg, München Wien)
- Weinmann, A., 1994*, Solving total and model least squares iteratively and recursively for robust identification , *1. MATHMOD VIENNA*, February 1994.

LEBENSÄUFE DER AUTOREN

Prof.Dr.Sc.nat. Norbert AHLENBRENDT

Prof.Dr.sc.nat Norbert Ahlenbrendt ist am Institut für prozeßadaptive und erfahrungsgeleitete Automatisierung - IpeA GmbH i.G. - der Technischen Fachhochschule Berlin tätig. Ausgebildet als Diplom-Physiker führte sein Entwicklungsweg von der Quantenstatistik über die Systemtheorie stochastischer Systeme und ihre Anwendung auf technische Systeme zur Automatisierung mit dem Schwerpunkt der Entwicklung und des Einsatzes sensorgeführter Roboter. Seine derzeitigen Arbeiten sind dem Gebiet der Teilautomatisierung zuzuordnen, die bewußt und zielgerichtet die anwendungs- und unternehmensspezifisch optimale Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine in den Vordergrund stellt.

Dr.sc.techn. Harald DIESING

Dr.sc.techn. Harald Diesing ist am Institut für prozeßadaptive und erfahrungsgeleitete Automatisierung - IpeA GmbH i.G. - der Technischen Fachhochschule Berlin tätig. Ausgebildet als Diplom-Ingenieur (Angewandte Mechanik) waren seine Hauptarbeitsgebiete die theoretische und experimentelle Dynamik- und Schwingungsanalysen unterschiedlicher Systeme einschließlich von Robotern mit der weiteren Spezialisierung auf die Entwicklung von nichtvisuellen, "intelligenten" Sensoren, insbesondere für den Einsatz von sensorgeführten Robotern. Sein derzeitiger Arbeitsschwerpunkt sind die Entwicklung und der Einsatz von Automatisierungskomponenten, insbesondere zur nutzergerechten Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion in (Teil-)Automatisierungslösungen.

Prof.Dr.sc.techn. Hans FUCHS

Prof.Dr.sc.techn. Hans Fuchs ist am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik Berlin, Außenstelle für Robotersystemtechnik und Bildverarbeitung, tätig. Seine derzeitigen Arbeitsgebiete sind Systementwurf und die Stellung des Menschen in der Automatisierungstechnik.

Dipl.-Ing. Manol KACINOGLU

Dipl.-Ing. Manol Kacinoglu, 1959 geboren, 1985 Abschluß Studienrichtung Elektrotechnik, 1986 - 1989 Vertragsassistent Institut für Elektrische Regelungstechnik, Mitarbeit an zwei vom österreichischen Forschungsförderungsfond finanzierten Forschungsvorhaben, Mitwirkung am Aufbau eines institutsweiten Rechnernetzwerkes, Firma PDTS Prozeßdatentechnik und Systeme, Mitarbeit an verschiedenen Softwareprojekten, Vortragender am WIFI-Wien, Fachgebiet Teleprocessing (Computernetzwerke).

Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter KOPACEK

Ordentlicher Universitätsprofessor der Technischen Universität Wien, A-1040 Wien, Floragasse 7a.

Geboren 1939 in Wien, 1971 Dr. techn. mit Auszeichnung, 1976 Habilitation, 1986 O. Univ. Prof. für "Systemtechnik und Automatisierung", Abt. Systemwissenschaften der Johannes Kepler Universität Linz, seit Okt. 1988 Wissenschaftlicher Leiter der Wissenschaftl. Landesakademie für NÖ in Krems, März 1990 O. Univ. Prof. für "Handhabungsgeräte und Robotertechnik" und Vorstand des gleichnamigen Instituts an der Technischen Universität Wien.

Autor oder Herausgeber mehrerer Bücher, über 100 wissenschaftliche Veröffentlichungen, ca. 90 Vorträge; IPC Vorsitzender und Organisator mehrerer IFAC-Symposien.

Dipl.-Ing.Dr.techn. Kurt SCHLACHER

Dipl.-Ing.Dr.techn. Kurt Schlacher ist ordentlicher Universitätsprofessor an der Johannes Kepler Universität Linz und Vorstand des dortigen Institutes für Regelungstechnik und elektrische Antriebe, Member IEEE, Universitätsdozent für Regelungstechnik und Prozeßautomatisierung an der Technischen Universität Graz. Geboren 1955 in Graz, Studium der Elektronik von 1973 bis 1979, 1984 Dr.techn. und 1990 Habilitation an der TU Graz. Berufung als o.Univ.Prof. für Automatisierungstechnik, Regelungstechnik an die Johannes Kepler Universität Linz.

Mitautor des Buches "Digitale Regelkreise" im Oldenbourgverlag, Autor von ca. 25 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und 30 Vorträgen.

Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander WEINMANN

Ordentlicher Universitätsprofessor der Technischen Universität Wien, A-1040 Wien, Gußhausstraße 27.

Senior Member IEEE, Mitglied ÖVE, Mitglied ÖMG. Geboren 1937 in Wien, 1962 Dr. techn., 1966 Habilitation, 1968 O.Univ.Prof. für "Elektrische Regelungs- und Steuerungstechnik" und Vorstand des gleichnamigen Instituts, 1976-79 und 1991-1995 Dekan der Fakultät Elektrotechnik.

50 wissenschaftliche Veröffentlichungen in verschiedenen Fachzeitschriften, Autor mehrerer Bücher insbesondere "Regelungen, Analyse und technischer Entwurf" in mehreren Bänden und Auflagen sowie "Uncertain Models and Robust Control" im Springer Verlag, Wien New York, 35 Fachvorträge, 18 Patente, Konsulent der Elin Energieanwendungen Ges.m.b.H. seit 1962, wissenschaftliche Leitung der Elin-Zeitschrift seit 1972, Zivilingenieur für Elektrotechnik seit 1974, Vorstand im EDV-Zentrum der Technischen Universität Wien 1974 - 1990.

Schlaglichter des 12. IFAC Weltkongresses

19.-23. Juli 1993

Sydney, Australien

zusammengestellt aus Beiträgen von I. Caushi, A. Frotschnig, R. Genser, V. Haase, E. Kny,
P. Kopacek, R. Kratschmann, G. Kronreif und R. Probst

von

P. Kopacek

Nach einem Kurzbeitrag in der letzten Nummer des IJAA ist dies eine Zusammenfassung von redaktionell überarbeiteten Berichten obgenannter Autoren. Diese Beiträge geben die fachliche und persönliche Meinung der Verfasser wieder. Vom IFAC Beirat wurden 12 österreichische Teilnehmer finanziell unterstützt.

Fährt ein Wissenschaftler mit Hilfe von öffentlichen Geldern um die halbe Welt, um dort andere Wissenschaftler zu treffen, die auch mit (ihren) öffentlichen Geldern um die halbe Welt gefahren sind, ist die Frage zulässig, ob dies sinnvoll ist. Sinnvoll aus Sicht der zu-Hause-Geblienen, die versuchen, mit ihrer Arbeitskraft (und mit Hilfe von Technologie!) das Geld zu verdienen, das die oben genannten ausgeben. Als einer der Nutznießer dieses Systems will ich versuchen, darauf eine Antwort zu geben.

Österreich wird zu den Industriestaaten gezählt, seine Bürger gehören zu den reichsten der Welt. Beides hängt zusammen: Uns geht es gut, weil wir die Möglichkeit haben, unseren Wohlstand durch Einsatz von Technik zu erhalten und zu mehren.

Wissenschaft, (Automatisierungs-)Technik sind außerdem sowohl international wie teilbar: Das heißt: Man kann davon etwas an andere abgeben, ohne zu verlieren: Beide Seiten haben Nutzen davon. Man ist beides: Quelle und Senke wissenschaftlich-technischer Information. Und: Man wird zu einem low-tech-Land, wenn man nicht zuhört.

Der Besuch internationaler Kongresse ist ein Baustein zur Erhaltung des technologischen Standards eines Landes. Wichtig ist dabei nur, daß die gewonnene Information "zu Hause" weitergegeben und umgesetzt wird. Dies - bezogen auf den IFAC Weltkongreß 93 - soll hier versucht werden (zusätzlich zu dem, was meine Studenten erfahren). Zunächst ganz generell: Für mich gab es die Bestätigung von Bekanntem, eine Gesamtaussage und eine Gesamterkenntnis.

Die Bestätigung: Internationale Treffen bringen Menschen und Völker näher, helfen Kriege zu vermeiden, vielleicht auch Wirtschaftskriege. Wer einen Kollegen aus dem Lande X gut kennt, wird weniger geneigt sein, ihm die Einreise zu verweigern oder auf Produkte seines Landes Sonderzölle zu verhängen.

Die Aussage: Wissenschaft dient den Menschen, der Gesellschaft. Oder konkret formuliert in einem Hauptvortrag: Mathematiker und Regelungstechniker denken seit Jahrzehnten über komplizierte selbstgestellte Probleme nach und lösen sie exzellent. Die Leute, die Maschinen bauen, die Umwelt kontrollieren, das Zusammenleben technisch und wirtschaftlich gewährleisten, werden mit ihren Fragen allein gelassen (die sind wohl nicht so interessant ? !).

Dies führt zur Herausforderung an die Wissenschaft, jene Fragen anzugehen, die die "Praxis" stellt (und nicht jene, die schöne Dissertationen abwerfen).

Die Erkenntnis: Es ist gut, daß es eine IFAC gibt, daß diese Treffen veranstaltet, und daß Österreich so etwas wie eine besondere Beziehung dazu hat. Dies hilft in unserem Lande, diese Fragen bewußt zu machen, den Dialog zwischen Forschung und Praxis zu fördern, und Geld für die richtigen (= für die Menschen wichtigen) Dinge auszugeben.

Eine lebendige Stadt wie Sydney, vollkommen multikulturell und offen für alles Neue, ermöglicht einen ähnlich offenen Stil für den letztjährigen Weltkongreß der IFAC. Ein großer Kongreß erfordert neben einem sehr hohen Aufwand an Menschen und Material, ein sehr professionelles Kongreßmanagement und einen geeigneten Vortragsbereich. Das neue Convention Centre in Darling Harbour von Sydney konnte mit seinen vielen Vortragsräumen verschiedener Größe voll überzeugen. Die Unterstützung der Autoren durch verschiedene Präsentationsverfahren (Video, Dia, Overhead) war sehr weitreichend, wurde aber von den meisten Vortragenden nur einseitig genutzt (meistens Folien auf Overheadprojektor). Die erstmalige Eingliederung von Postersessions war sehr geeignet, um die Hemmschwelle bei Fragen zu senken, und das persönliche Gespräch zwischen den Fachleuten zu stärken. Zusätzlich erlaubte ein reichhaltiges Vortrags- und Besuchsprogramm in und um Sydney, auch technisch weniger interessierte Begleiter der Vortragenden bei Laune zu halten. 1400 Teilnehmer aus 50 Staaten, 1200 Präsentationen in 12 Parallel-Sitzungen über fünf volle Tage.

Was macht diese Regelungstechnik so attraktiv für so viele Teilnehmer aus aller Welt? Als relativer Neuling und Nichtfachmann stellt man sich z.B. diese Frage und nimmt sich vor, zumindest eine Teilantwort darauf in dieser Woche zu finden. In zahllosen brillanten theoretischen Vorträgen werden (für diesen) schwer verdauliche mathematische Formalismen gezeigt und erklärt. Die akademische Welt dominierte diesen Kongreß (ca. 80% Teilnehmer aus akademischen Kreisen). Der Kongreß als Plattform für globalen akademischen Gedankenaustausch ist sicherlich eine Komponente der Antwort, zumal der Kongreß ja nur alle drei Jahre stattfindet. Eine andere Komponente der Antwort erschließt sich aus den zahlenmäßig wenigen aber oft kritischen Präsentationen der Industrie. Hier offenbart sich aber auch das extreme Spannungsfeld unter dem diese Disziplin steht:

Regelungstechnik(en) sind für die ökonomische Produktion im derzeitigen globalen Konkurrenzkampf wichtige Werkzeuge zur Optimierung industrieller Prozesse. Die Anwendung schon bekannter fortgeschrittener Techniken birgt ein großes Kostenreduktionspotential. Schätzungen verschiedener Autoren reichen von 2 bis 15% der jährlichen Produktionskosten (M.L. Brisk, ICI-Australia) z.B. in den Prozeßindustrien.

Trotzdem macht die Industrie nur sehr zögernd Gebrauch von modernen Techniken und bedient sich meist nur (unvollkommener) empirischer Ansätze. In einigen brillanten Plenarvorträgen wird dieses Problem sehr klar adressiert: Die akademische Welt, meist beschäftigt mit praxisfernen Theorien ("dreaming theorists", Prof. Araki, Kyoto University) ist von der Industrie, die mit zum Teil unzureichenden Mitteln um Kostenreduktion und ums Überleben kämpft, durch Welten getrennt ("What is there about process control, which tends to divide teachers, researchers, practitioners and end users into different camps, wherein they speak different languages and from which they only occasionally emerge to exchange ideas, not infrequently on a mutually distrustful basis?")

Scheinbar in nur wenigen Industrien wird von der modernen Regelungstechnik weitgehender Gebrauch gemacht: in der Ölindustrie, getrieben von der weltweiten Konkurrenz und in der Autoindustrie aus ähnlichen Motiven. In einem exzellenten Plenarvortrag berichtete W. Powers (Ford Motor Company), daß Ford gut vorbereitet sei, bei den zu erwartenden steigenden An-

forderungen an Umweltschonung und Sicherheit, moderne Techniken, wie z.B. Fuzzy Logic-Regelung einzusetzen (Emissionskontrolle, Verkehrsleitsysteme). Es wird erwartet, daß die Anzahl der Sensoren (1990: 10), Actuatoren (1990: 20), Funktionen (1990: 30) im Automobil auf 20, 30, 50 bis zum Jahr 2000 anwachsen wird. Das wird den Einsatz und die Notwendigkeit moderner Regelungstechniken erleichtern und erzwingen. So wird z.B. die "Fuzzy-Logic"-Steuerung derzeit schon in einigen Industrieprodukten erfolgreich eingesetzt und es zeichnen sich eine Reihe neuer erfolgversprechender Anwendungen ab:

Anwendungen von Fuzzy Control

heute:*)	morgen:
Waschmaschine	Prozeßkontrolle Chemie *)
Staubsauger	Emissionskontrolle Automobil *)
Klimaanlage	Optimierung Wasserkraftwerke **)
Roboter-Steuerung	Verkehrsleitsystem *)
	Automatische Kraftübertragung ***)
	Fahrgestell (Suspension System) ****)
	Fahrgestell *****)
Marktwert 1992: mehrere Millionen US \$	

- *) Präsentation R. Palm et al., Siemens
 **) Präsentation H. Tamura et al., Osaka University
 ***) Präsentation H. Takahashi, Nissan
 ****) Präsentation J. L. Yester, Ford
 *****) Präsentation S. Roukieh, Siemens

In obigen Beispielen zeigt sich aber auch eine Lösung für dieses anachronistisch anmutende Problem der extremen Spaltung zwischen Theorie und Praxis. Bewußtseinsänderung, ausgelöst durch ökonomischen und anderen Druck (auf Seiten der Industrie und der Wissenschaft) wird die getrennten Welten näher bringen können. Die Erkenntnis des Problems wurde durch IFAC-Veranstaltungen schon aufbereitet, ökonomischer Druck erfolgt derzeit durch eine globale Rezession. Viele Regierungen haben schon durch steuernde Maßnahmen begonnen, diese Barrieren niederzureißen (z.B. in der EG, aber auch in Österreich) durch vorrangige Förderung praxisorientierter Forschung. Institutionen, die sich Technologietransfer als Ziel vorgenommen haben, werden hier wertvolle Arbeiten leisten können (und haben diese schon geleistet). Die Potentiale sind vorhanden, es gilt sie nun zu nützen!

Am Gebiet der Fertigungs- und Montageautomatisierung spiegelt der Überblick über die einzelnen Forschungsbereiche auch die derzeitige wirtschaftliche Situation wieder. So hat sich der überwiegende Teil der Arbeiten mit neuen Erkenntnissen zur Fertigungslogistik, wie z.B. optimierte Auftragseinlastung (Job Scheduling) - meist unter Verwendung neuronaler Netze - befaßt. Gerade aus diesem Grund ist es doch verwunderlich, daß eine der Schlüsseltechnologien auf diesem Gebiet, die Simulation von Fertigungsanlagen, nicht ausreichend und hauptsächlich in Form theoretischer Vorträge vertreten war. Es scheint, als würde sich die Simulationstechnik zur Zeit in einer Sackgasse befinden. Es gibt zwar immer wieder neue Ansätze (so "boomt" derzeit die Verwendung von Petri-Netzen) - die Umsetzung in anwenderfreundlichen Softwarepaketen (wobei letztlich als Anwender nicht Universitätsinstitute sondern vielmehr programmiertechnisch ungeübte aber fertigungstechnisch versierte Planer zu verstehen sind) wird jedoch nicht ausreichend verfolgt.

Gerade die Vorträge aus den beiden angeführten Aufgabengebiete - Robotik und Fertigungsautomatisierung - waren außerordentlich theoretisch gehalten. Leider waren verhältnismäßig wenige Anwendungsberichte vertreten.

Auf dem Gebiet der Robotik ist eine starke Tendenz zu flexiblen, preiswerten off-line Programmierschnittstellen zu verzeichnen. So wurde zum Beispiel eine interessante Arbeit über eine CAD-Roboter Schnittstelle mit integriertem Expertensystem zum Lichtbogenschweißen (Bahnschweißen) vorgestellt. Das Konzept bedient sich der AutoCAD Schnittstelle (sowie Auto)Lisp - einer Programmiersprache, welche sich ausgezeichnet zur Realisierung eines Expertensystems eignet. Ziel dieser Anwendung ist es, die Roboterprogrammierung direkt aus den CAD-Daten durchzuführen (natürlich mit einer Simulation der Bahnbewegungen). Das Expertensystem dient in weiterer Folge dazu, die optimalen Schweißparameter aus der Wissensbasis zu ermitteln.

Ein ähnliches Problem wurde ebenfalls in einer Arbeit aus Südafrika präsentiert. Hier wird der Versuch beschrieben, konventionelle, roboterspezifische Steuerungen mit all ihren Problemen bei einer Anlagenerweiterung durch eine standardisierte (also vom Industrieroboter weitestgehend unabhängige) PC-basierte Steuerung mittels PC-Erweiterungskarte zu ersetzen. Die Steuerungssoftware umfaßt dabei auch eine Simulation der Roboterprogramme, so daß eine preiswerte, integrierte off-line Programmierumgebung mit der entsprechenden Robotersteuerung über PC ermöglicht wird.

Ein Schwerpunkt auf dem Gebiet der Robotik war auch im Bereich Bahnsteuerungen und Bahnplanung gegeben. Bei vielen Robotik-Applikationen mit Bahnsteuerung (z.B. Lichtbogenschweißen, Kleben, Laser-Schneiden) wird die Arbeitsgeschwindigkeit nicht durch den eigentlichen Prozeß, sondern durch die Roboter-Verfahrgeschwindigkeit bestimmt. Der Versuch, unter Berücksichtigung der begrenzten Antriebsmomente die Verfahrgeschwindigkeit bei Bahnsteuerung bei exakter Einhaltung der programmierten Bewegungsbahn, die Performance des Roboters zu erhöhen, war Thema einiger Arbeiten.

Acht reguläre Sessions über Roboterregelung, ein Minisymposium über Roboter, eine "target area" über Regelung flexibler (elastischer) Roboter und eine Poster Session über Kinematik und Regelung elastischer Roboter waren ausschließlich der Roboterregelung gewidmet. Die vorgestellten Entwicklungen über Roboterregelung sind zur Lösung von praktischen Problemen geeignet. Jedoch beruht ein großer Teil der theoretischen aber auch der experimentellen Arbeiten auf mehreren Vereinfachungen und Annahmen, sodaß bis zu ihrer tatsächlichen industriellen Anwendung ein weiter Weg liegt.

Neben den Verbesserungen bzw. neuen Formen für robuste und adaptive Roboterregelungen unter verschiedenen Randbedingungen, wie z.B. ohne Kenntnis des mathematischen Modells und der Parameterwerte der Roboterdynamik (R. Colbaugh et al.), ohne Messung der Winkelgeschwindigkeiten (Liu Hsu und F. Lizarralde), bei Wirkung veränderlicher Zwangskräfte am Endeffektor (Y. Stepanenko und Chun-Yi Su, B. Bona und M. Indri, O. Dahl) oder Nutzlast (Shir-Kuan Lin)) usw., wurden auch neue Verfahren, wie die Anwendung der neuronaler Netzwerke (M.M. Gupta et al.) und der Fuzzy Logik (E. Badreddin und M. Mansour) in der Roboterregelung, vorgestellt.

Das Thema Steuerung und Regelung von Robotern mit redundanten Freiheitsgraden gewinnt immer mehr an Bedeutung. Y. Mori und S. Nyudo teilen die Gesamtbewegung eines redundanten Roboters in einen groben und einen feinen Anteil und regeln die Bewegung durch einen Dual-Mode PI-Regler. Zur Lösung der Redundanz präsentierten M. Tarakh und D.D. Zuck eine Methode, welche die Jacobi-Pseudoinverse und vergrößerte Jacobi-Matrix -Methode verallgemeinert. Der Regelalgorithmus verwendet eine Rückkoppelung mit einen adaptiven

Regler zur Generierung der Gelenkwinkel für eine gewünschte Bewegung des Endeffektors. Z.C. Lin und R.V. Patel präsentierten ein dynamisches Modell für redundante Roboter mit festen/elastischen Gelenken unter Anwendung der Pseudoinversen. Für dieses Modell wurde ein Regelalgorithmus im kartesischen Raum getestet, bei dem die Redundanz zur Kompensation der Wirkung der elastischen Gelenke gelöst wird.

Zum Thema mobile Roboter wurde eine nicht-rekursive Methode zur Schätzung der Position und der Parameterwerte, illustriert durch Experimente, vorgestellt. Das kinematische Modell mobiler Roboter ist von S. Patarinski et. al. durch die Wahl verallgemeinerter Koordinaten unabhängig von der Konstruktion, Struktur und Übersetzung. Dazu wurden drei Methoden zur kinematischen Steuerung und Regelung vorgeschlagen: (i) Transformation des Modells in ein bewegtes Koordinatensystem und Linearisierung mit Taylorreihen, (ii) Reduktion der Modellordnung, und (iii) direkte Lyapunov-Synthese.

Der zukünftige Einsatz mobiler Roboter in der Landwirtschaft erfordert neuartige Steuerungen und Regelungen. Roboter in der Landwirtschaft müssen in umstrukturierter Umgebung fahren und intelligente Aufgaben durchführen.

Die Steuerung und Regelung elastischer Leichtbaurobter wurde in mehreren Arbeiten behandelt. D.K. Anand et al. entwickelten ein Modell für die Regelung eines elastischen Manipulators. Der adaptive Regler dient für die gewünschte Drehbewegung, während zwei PID-Regler für die unerwünschten linearen Bewegungen zufolge der von der Nutzlast verursachten Durchbiegungen kompensieren. Es finden Lagrangesche Gleichungen und angenommene Ansatzfunktionen zur Erstellung des dynamischen Modells sowie ein quadratischer rekursiver Algorithmus zur Identifikation der Parameter Verwendung. A. de Luca und S. Panziera präsentierten ein iteratives Lernschema zur Kompensation der Gravitation in elastischen Roboterarmen. E.M. Nebot et al. wandten neuronale Netze zur Erstellung des Modells eines elastischen Manipulators an.

Der Konnektionismus oder auch die Forschung der neuronalen Netze beschäftigt sich mit der, zumindest teilweisen, Nachbildung des menschlichen Gehirns in Form von Netzwerken, in denen eine Aufgabenstellung auf viele parallele Basisprozessoren verteilt wird. Diese Verarbeitungselemente, sie werden auch künstliche Neuronen genannt, kommunizieren mit den anderen Neuronen nur über Signale, arbeiten aber lokal, jedes für sich alleine. Dieser Forschungsbereich ist unter Informatikern, Psychologen, Biologen oder Kognitionsforschern weit mehr als nur ein Schlagwort. Neuronale Netze stellen eine immer populärer werdende neue Forschungsrichtung der Künstlichen Intelligenz dar.

Das Anwendungsspektrum neuronaler Netze ist groß, da sie auch bei unscharfer Informationsverarbeitung - die als nichtlineare Abbildung beschreibbar ist - einsetzbar sind. Nichtlineare Abbildungen existieren z.B. in den Bereichen von Technik und Wirtschaft. Entsprechend universell sind die Anwendungsbereiche Neuronaler Netze: die Regelungstechnik sowie die Robotik sind einige wichtige Beispiele. Konventionelle Techniken werden in der Folge durch neuronale Techniken ersetzt werden.

Auf diesem IFAC-Weltkongreß war diesem Forschungs- und Anwendungsbereich schwerpunktmäßig zwei Sessions gewidmet. Eine Session beschäftigte sich mit neuronalen Technologien für Produktionssysteme, eine weitere mit neuronalen Netzen zur Prozeßsteuerung und -regelung. Darüber hinaus befaßten sich einzelne Vorträge in diversen Sessions mit theoretischen Konzeptionen neuronaler Netze. Bezogen auf die Gesamtanzahl der Vorträge und Sessions auf diesem Kongreß war das Gebiet der neuronalen Netze jedoch unterrepräsentiert.

In Session neuronale Technologien für Produktionssysteme wurde z.B. ein neuronaler Regler und ein neues neuronales Netz mit deterministischer Topologie vorgestellt. Ein solches Netz kann in einem System zur Qualitätssicherung zum Einsatz kommen, um Regeln zur Diagnose zu erlernen und erwerben. Weiters wurde ein neuronales Netz zur Lösung von Problemen in der Auftragsfertigungsplanung (Allokationen der Ressourcen) vorgestellt. Dieses Netz erlaubt die schnelle Berechnung einer Lösung eines NP-vollständigen (nondeterministic-polynomial) Problems: das sind alle Probleme, für die zwar kein polynomieller Algorithmus bekannt ist, für die aber eine vorgegebene Lösung in polynomieller Zeit überprüft werden kann.

Ein anderes neuronales Netz dient als Entscheidungsträger in einem Robot-Vision-System. Die benötigten Informationen werden von einer Kamera, die auf dem Ende des Roboterarmes befestigt ist, gewonnen. Auf theoretischer Seite wurden Probleme diskutiert, die unmittelbar mit dem Einsatz Neuronaler Netze, wie die Wahl der Anfangswerte für die Gewichte, die Anzahl der versteckten Neuronen oder die Fehlerfunktionen, zusammenhängen.

In der Session, die neuronale Netze zur Prozeßsteuerung und -regelung zum Thema hatte, wurde z.B. eine Methode zur Systemidentifikation von polynomialen Systemen erläutert, wobei mehrschichtige neuronale Netze verwendet werden. Weiters wurde der Einsatz eines neuronalen Netzes als IMC-Regler (internal model controller) demonstriert, wobei die nichtlineare Rückführung mittels eines Perzeptron-Modells approximiert wird. Weitere Arbeiten befaßten sich mit theoretischen Untersuchungen, wie künstliche Neuronale Netze beim Entwurf konventioneller Industrieregler eingesetzt werden können.

Einzelne Vorträge anderer Sessions, die nicht explizit neuronalen Netzen gewidmet waren, hatten Anwendungen neuronaler Netze in speziellen Gebieten zum Inhalt. Beispielsweise neuronale Netze, die zur Identifikation und Regelung einer nichtlinearen Radaufhängung dienen. Dabei kann gezeigt werden, daß neuronale Netze trainiert werden können, um das dynamische Verhalten einer Aufhängung zu identifizieren, so daß das zukünftige Verhalten des Fahrzeuges vorhergesagt werden kann.

Weitere theoretisch orientierte Vorträge behandelten Ansätze zur inversen Kinematik in der Robotersteuerung, um mit neuronalen Netzen Koordinatentransformationen zu erlernen. Damit können zum Unterschied zu den herkömmlichen Algorithmen der inversen Kinematik zeitraubende Berechnungen vermieden werden.

Vereinzelt gab es auch Ansätze, Expertensysteme oder Wissensbasierte Systeme mit neuronalen Netzen zu verknüpfen, zum Beispiel in Entscheidungssituationen zur Interpretation von Daten, oder für Techniken der Modellreduktion. Auch einige wenige nichttechnische Anwendungen aus den Bereichen der Biomedizin und Landwirtschaft wurden behandelt.

In Anbetracht der Tatsache, daß die Regelungstechnik und die Robotik eine der wichtigsten Anwendungsgebiete der Neuroinformatik darstellen, und gleichzeitig auch zentrale thematische Bestandteile der IFAC sind, waren enttäuschend wenige Vorträge zu gerade diesen Themen vertreten.

Im Bereich der Fahrzeugdynamik und Steuerung gab es einige interessante Beiträge zu den Themen `Aktive Radaufhängung`, und `Vierradlenkung bei Allradantrieb` wobei sich folgende Schwerpunkte ergaben:

- Bestimmung der Haftreibung in jeder Bewegungsphase (Bremsen, Beschleunigen, Kurvenfahrten)
- Behandlung der Nichtlinearitäten
- Einsatz von Fuzzy-Logic-Methoden (Safty \Leftrightarrow Comfort)

Im Bereich des Software-Engineerings und der Real-Time-Control geht der Trend eindeutig in Richtung Einsatz von Low-Cost-Systemen und Vernetzung von z.B. Transputern und DSP's. Für Spezialanwendungen (z.B. Robotersteuerungen) ist eine Aufteilung von Funktionen in HW oder SW möglich, wobei der Aspekt der Sicherheit und Fehlertoleranz zu berücksichtigen ist. Diese Forderungen werden allgemein durch redundante Programmierung (verschiedene Algorithmen für dieselben Funktionen), oder Aufteilung auf verschiedene Systeme ermöglicht.

Wie nicht anders zu erwarten, gab es einige Vorträge und Posters, die sich mit dem Einsatz von Fuzzy-Logic-Methoden beschäftigen, so z.B.:

- Aufteilung von Safety/Comfort bei der Radaufhängung von KFZ
- Einsatz bei Verkehrsleitsystemen
- Optimierung des Wasserhaushaltes bei Speicherkaskaden von Wasserkraftwerken
- Einsatz in Robotersteuerungen.

Auch bei diesem IFAC-Weltkongreß konnte man wieder die Kluft zwischen Theorie und Industrie beobachten. Nur wenige Präsentationen beschäftigten sich mit konkreten Projekten. Bei den sogenannten Application-Sessions waren leider auch ca 50% eher theoretisch orientiert. Die meisten praxisbezogenen Untersuchungen gab es auf dem Gebiet des Robotereinsatzes:

- Aktives Entgraten unter Einsatz von Kraftsensoren
- Navigation in Gebäuden
- Opal-Schleifen
- Eine neue Strategie für autonome Greifvorgänge.

Bemerkenswert war auch der in allen Themengebieten feststellbare Trend des Einsatzes von C++, einer objektorientierte Programmiersprache, zur Lösung oder Simulation der jeweiligen Aufgabe. Vererbung, Kapselung, virtuelle Funktionen und Objekte sowie der Erstellung von Templates ermöglichen eine effektive und rasche Umsetzung der theoretischen Lösung in ein Programm.

Ein großer Anteil von Beiträgen behandelte Automatisierungstechnik im Transportbereich. Der Kongreß wurde mit einem Plenarvortrag von W. Powers von Ford USA über das Kraftfahrzeug des 21. Jahrhunderts eröffnet. Bei elf einschlägigen Sitzungen gab es darüber hinaus noch Präsentationen. Es gab zwar weniger Beiträge aus dem Eisenbahnbereich, dafür war aber durch die derzeit weltweiten Aktivitäten der Straßenverkehr sehr aktuell. Auch Luftfahrt und Weltraumtechnik waren diesmal stark vertreten. Vielleicht auch bedingt durch das EURET-Projekt der EG wurde ein Technisches Komitee für "Air Traffic Control Automation" eingerichtet.

Wie schon beim Entwurf des Österreichischen Gesamtverkehrskonzepts hingewiesen wurde, wird der Elektroantrieb im Straßenverkehr neben den Leit- und Informationssystemen als Schwerpunkt angesehen. Leider wurde dies von einigen österreichischen Unternehmen bisher nicht aufgenommen. Aus der Sicht von Powers wird der Ansatz, die Emissionsgrenzwerte zu garantieren, von Überwachungssystemen abgelöst werden. Dies bedingt aber Straßensysteme mit intelligenten Fahrzeugen. Die Schwächen des Katalysators sollen mit Hilfe des Hybridantriebes beseitigt werden. Als Zukunftsmarkt gelten Sensoren und Stellglieder. Entwicklungsschwerpunkte sind Mikroprozessoren, Datenspeicher und Leistungselektronik.

Neuronale Netze, Fuzzy-Logik und Expertensysteme werden selbstverständlich auch im Verkehrsbereich verwendet.

Simulation, Gültigkeitsprüfung, computerunterstützter Entwurf von Leittechniksystemen (CSCAD) und Diagnoseverfahren werden als notwendiger Lösungsansatz auch beim Straßenverkehr angesehen. Neben den Themen Fahrzeugdynamik und Verbrennungsmotor waren überraschend viele Beiträge über die Steuerung der Radaufhängung. Manchem theoretisch interessanten Beitrag wird aber aufgrund der organisatorischen Komplexität des Straßenverkehrs eine Verwirklichung verwehrt sein.

Unternehmensforschung (OR) und Entscheidungsunterstützung wurden zum Teil in eigenen Sitzungen abgehandelt. Wie aber schon beim 11. IFAC-Weltkongreß in Tallinn festgestellt, war das Interesse für diese Themenkreise schwach. Außerdem wurden einige Beiträge nicht vorgetragen. Im Überblicksvortrag von H. Nakayama über "Application of interactive multiobjective programming methods" wurde das Problem der Zielgewichtung praxisbezogen aufgezeigt und Anwendungen in der Praxis dargelegt. Obwohl nur fünf Zuhörer teilnahmen, wäre dies ein Pflichtvortrag für Systemtechniker und Planer umfassender Systeme, wie im Umwelt- oder Verkehrsbereich, gewesen.

Künstliche Wissensverarbeitung (AI), wie Expertensysteme und neuronale Netze, waren nicht neu, aber es fanden sich neue Anwendungsbereiche. Auffallend ist, daß bei lernfähigen Mustererkennungsverfahren fast nur neuronale Netze eingesetzt werden, obwohl das neuronale Modell nicht immer die beste Lösung ermöglicht. Der Mensch konnte auch erst dann fliegen, als er nicht mehr versuchte, den Flug der Vögel nachzuahmen. Auch bei unscharfen Informationen werden überwiegend Fuzzy-Sets als Lösungsansatz vorgeschlagen, wodurch die erforderliche Rückkopplung zur Informationsverbesserung verlorengeht.

Neben den klassischen Anwendungsbereichen der Stahlerzeugung, Zementindustrie, usw. war diesmal die Auftragsablaufplanung sehr stark vertreten. Der Vortrag von T. Fukuda über "Immune networks using genetic algorithm for adaptive production scheduling" fiel durch den interessanten praxisbezogenen Lösungsansatz auf. Verstärkt werden die Bereiche Abwasserbehandlung, biologische Prozesse und Landwirtschaft berücksichtigt.

Sustainable Development (im deutschen Sprachraum wird noch diskutiert, ob dies eine nachhaltige oder eine zukunftssichere Entwicklung sei) war kein Themenschwerpunkt bei diesem IFAC-Kongreß. Für den nächsten IFAC-Weltkongreß in San Francisco wird ein Hervorheben dieses Themas zumindest von den amerikanischen Kongreßorganisatoren als wichtig angesehen.

Das Gebiet der Raum- und Luftfahrt ist ein regulärer Arbeitsbereich der IFAC. Insgesamt wurden sieben reguläre Sessions aus diesem Arbeitsbereich abgehalten:

- Regelung von Flugzeugen (2x),
- Regelung von Raumfahrzeugen (2x),
- Regelung von Robotern (des Arbeitsgebietes Aerospace),
- Systemtechnik,
- Führung und Verfolgung.

Im Bereich der Luftfahrttechnik wurde ein sehr interessantes Paper über die Monte Carlo-Simulation von neuen und gebrauchten Triebwerken präsentiert. Die so erhaltenen Ergebnisbereiche müssen von einer geeigneten Regelung fehlerfrei behandelt werden können. Ein (noch sehr theoretisches) Routenauswahlssystem für Piloten und mehrere Regelungen von Tragflächen und ebenen Platten (3 Freiheitsgrade: Tragflächenwinkel, Tragflächenlage und Klappenwinkel) vervollständigten den Luftfahrtbereich.

Im Raumfahrtbereich waren hauptsächlich Wiedereintrittskörper, autonome Fahrzeuge, Lageregelungen und verschiedenartige Roboteranwendungen zusammen mit einigen Arbeiten aus dem μg -Bereich vertreten. Eine zukünftige Lageregelung eines Raumfahrzeuges wird demzufolge robust, fehlertolerant und autonom zu sein haben und gemeinsam mit einem wissensbasierenden System wesentlich flexibler auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren können. Die Schlagwörter "KI" und "Expertensystem" fallen ebenso häufig wie in allen anderen Bereichen der Regelungstechnik.

Interessante Themen sind die Simulation einer Echtzeitsteuerung eines bewegten Fahrzeuges gegenüber mehreren sich bewegenden Hindernissen (auch unter zufälligen Bewegungen). Extrem wichtig für zukünftige autonome Missionen zum Mars oder Mond sind auch optische Systeme zu Hinderniserkennung. Vorgestellte Systeme sind im Moment jedoch nur unter Laborbedingungen einsetzbar. Nachteil aller dieser Systeme ist vor allem die Notwendigkeit eines hohen Kontrastes zwischen Weg und Hindernis. Eine Menge zukünftiger Arbeit wird daher erforderlich sein, um die diffusen Lichtverhältnisse des Mars, oder die scharfen Schatten des Mond in Griff zu bekommen.

Dem Einsatz wiederverwendbarer Transportfahrzeuge (OTV) zur Positionierung von Satelliten wurde mit der Vorstellung eines intelligenten Zeitmanagers Rechnung getragen. Die Verwendung eines neuronalen Netzwerkes ermöglicht ein dynamisches Zeitmanagement, das bei der heutigen Dichte an notwendigen Transportaufgaben jedoch als reine Zukunftsmusik angesehen werden muß.

Ebenso interessant für Raumfahrtanwendungen sind flexible Roboter, die durch eine gezielte Reduktion der erforderlichen Strukturmasse erreichbar sind. Hierbei ist zwischen Systemen flexibler Struktur und mit flexiblen Gelenken zu unterscheiden. Beide Systeme wurden mit geeigneten Steuerungen vorgestellt. Diese sind jedoch nur bei speziell einfachen Laborsystemen, meist mit nur zwei Freiheitsgraden, zum Einsatz gekommen.

Zusätzlich zu den regulären Sessions wurde die Postersession "Kinematik und Regelung flexibler Roboter" mit Poster der Brasilianischen Weltraumagentur, und aus dem μg -Bereich kräftig aufgefüllt.

Schwach besuchte Sessions (20 bis 30 Zuhörer, davon jeweils mindestens sechs Vortragende) im größten Vortragsraum des Convention Centres zeigten eindeutig, daß vor allem die Raumfahrt im Moment in einer großen Krise steckt. Die brasilianische Weltraumagentur konnte ihre bisher weitgehend unbekannteren Projekte durch mehrere Vorträge und Poster einer breiten Öffentlichkeit näherbringen.

Spezielle (persönliche) Beobachtungen eines österreichischen Teilnehmers:

a) Die Gurus: Ohne sie kommt kein Spitzenkongreß aus. Was auffiel war aber, daß die (bekannteren) Theorie-Gurus auf (vielleicht weniger bekannte) Praxis-Gurus trafen. Sie zeigten, daß man auch auf dieser Ebene einander zuhören kann. Daß Existenzbeweise von Kolmogorow-Funktionen gar nicht so weit weg von Optimierungen der Kosten eines Automatisierungsprozesses unter instabilen Umweltbedingungen sind und ähnliches mehr.

b) Harte und weiche Logik: Mathematik ist nicht mehr das einzige Werkzeug: Biologische/humane Denkverfahren werden immer stärker in die Regelungs/Automationstechnik eingebaut. Fuzzy Logik und Neuronale Netze sind zwei Vertreter dieser Integration menschlicher Denkformen in die Technik.

c) Software: Im Jahre 2000 sind 50 % der Kosten eines Autos Computerkosten, 80 % der Computerkosten sind Softwarekosten. Automation heißt also, Programme entwickeln. Und da gibt es noch weltweit viele Mängel: Nicht technisch, aber organisatorisch und methodisch. Höheres Qualitätsbewußtsein ist angesagt.

d) Publikationen: Die IFAC-Zeitschriften werden interessanter und besser lesbar. Vielleicht wird es in einigen Jahren sogar weltweit kommen, daß ein technischer Werksleiter den Artikel eines Professors lesen kann (und daß er selbst seine Probleme aufschreibt, so daß der Professor weiß, welche Lösungen er braucht).

Technische Erkenntnisse

a) Die Anwender artikulieren immer stärker ihre Forderungen an die Forschung. Das ist übrigens nicht als Tod der Grundlagenforschung gemeint: Grundlagen werden nach wie vor zu erforschen sein, aber solche, auf denen auch nutzbare "Gebäude" errichtet werden können. Gefragt sind Lösungen (für die Gesellschaft) wichtiger Probleme - vom Anfang bis zum Ende!

b) Software wird der Kostenfaktor der Automation, Senkung dieser Kosten geht kaum über "technische" Tricks (Z.B. neue Programmiersprachen u.dgl.). Verbesserte Arbeitsorganisation und Arbeitsweisen sind der Schlüssel, z.B. Motivation, Disziplin, Teamarbeit, Weiterbildung, etc.

c) Methodisch wird Automatisierungstechnik die Integration verschiedener Ansätze aus Regelungstechnik, Statistik, Informatik u.a.: Insbesondere muß die Schnittstelle zum Menschen wichtiger genommen werden, da die Komplexität die Systeme sonst nicht mehr beherrschbar macht. Sprachschnittstellen, Visualisierung, Entscheidungsunterstützung, Fuzzy Logic sind nur einige Begriffe aus diesem Bereich - wichtig als Teile von Produkten (etwa in Verkehrsmitteln) und als Teile von Prozessen (etwa in einer umweltgerechten Produktion).

Der 12. IFAC-Weltkongreß in Sydney war ein exzellent organisiertes Ereignis im sehenswerten und überraschend angenehmen Australien. Das Problem der Themensuche durch Fehlen eines Indexverzeichnisses und ohne einer Inhaltsangabe bei den einzelnen Bänden der Vorabdrucke, aber auch deren Masse (12 kg), soll beim 13. IFAC-Weltkongreß in San Francisco durch Nutzung der Computertechnik der Vergangenheit angehören.

Österreich war diesmal mit einer Invited Session über "Low-cost CIM für Klein- und Mittelbetriebe" mit 4 Papers sowie insgesamt 10 technischen Papers vertreten. Die österreichische Delegation bestand aus 17 Teilnehmern.

ÖSTERREICH UND DAS 4. RAHMENPROGRAMM DER EU (1994 - 1998)

Am 9. Februar 1994 hat das Europäische Parlament in zweiter Lesung seine Stellungnahme zum gemeinsamen Standpunkt des Rates über das 4. Forschungsrahmenprogramm vom 14.1.1994 verabschiedet. Die Änderungsvorschläge des Parlaments gegenüber der Position des Rates können als ziemlich gemäßigt angesehen werden und sollten eine Zustimmung des Forschungsministerrates und damit eine endgültige Verabschiedung des 4. Rahmenprogrammes am 4.3.1994 ermöglichen. Demgemäß beträgt das Gesamtbudget 12,4 Milliarden ECU. Teilnehmen können Unternehmen als auch Forscher von Universitäten und Forschungszentren. Seit 1.1.1994 - mit dem Inkrafttreten des EWR kann Österreich an den Forschungsprogrammen der EU voll teilnehmen.

- Fördermittel kommen nun direkt von der EU (für Firmen 50% der Vollkosten eines Projektes, für Universitäten 100% der Zusatzkosten).
- Minimalerfordernis für einen Projektantrag ist nur mehr ein Partner (bisher zwei) aus einem EU-Mitgliedsland (reine EFTA-Kooperationen sind jedoch nicht möglich).
- Österreichische Partner können nun auch die Federführung eines Projektes übernehmen.
- Hinsichtlich der Verwertungsrechte der Projektergebnisse sind österreichische Partner denen aus den EU-Mitgliedsstaaten völlig gleichgestellt.

Für die Automatisierungstechnik dürfte das der Programmteil Industrielle Technologien sein.

Das Hauptziel besteht darin, technologische Bereiche zu fördern, sodaß sich deren Anwendung auf möglichst viele verschiedene Industriebereiche positiv auswirkt. Es werden zudem auch Personal- und Organisationsprobleme aus der Produktion bearbeitet werden.

Als Instrumente zur Durchführung sollen durch bereichsübergreifende Zusammenarbeit von Entwicklung, Fertigung und Anwendung, Technologien entwickelt werden, die alle Phasen des Produkt-Lebenszyklus von Produkten und Werkstoffen maßgeblich verbessern. Ziel ist die "Fabrik der Zukunft".

Nähere Auskünfte bei: Büro für internationale Technologiekoooperationen (BIT)
Mag. A. Gottwald
Wiedner Hauptstraße 73
Tel.: 581 16 16
Fax.: 581 16 16 16

Ein Institut stellt sich vor :

Institut für Elektrische Regelungstechnik der Fakultät Elektrotechnik an der TU Wien

A. Weinmann

Das Institut für Elektrische Regelungstechnik ist 1968 an der Fakultät Elektrotechnik gegründet worden. Der Personalstand setzt sich derzeit aus 1 ordentlichen Universitätsprofessor, 1 Universitätsdozenten, 6 Universitätsassistenten, 3 Vertragsassistenten, 1 Fachlehrer, 4 allgemeinen Bediensteten sowie 3 Lehrbeauftragten zusammen.

In der Lehre betreut das Institut alle Studienzweige der Elektrotechnik mit Pflicht- und Wahlvorlesungen, Rechenübungen, Laborübungen, Seminaren, Diplomarbeiten und Dissertationen. Neben einer fundierten Grundausbildung wird den Studierenden durch Sondervorlesungen auch ein Zugang zu hochaktuellen und anspruchsvollen Forschungsgebieten geboten. Als Beispiele seien Mehrgrößenregelungen, Robust Control, Digitale Regelungen, CAE dynamischer Systeme und Prozeßidentifikation genannt. Die starke Interdisziplinarität zeigt sich auch in Lehrveranstaltungen für die Studienrichtungen Maschinenbau und Informatik. Im Studienjahr werden ca. 700 Hörer betreut, die Gesamtzahl der ausgestellten Zeugnisse über Vorlesungen, Übungen, Labors usw. beträgt etwa 1500 Stück.

Das Institut versteht sich anwendungs- und industrienah, widmet sich aber auch verschiedenen ressourcenschonenden Verfahren. Die Umsetzung erprobter und neuer Methoden der Modellbildung, Identifikation, des Reglerentwurfs und Anlagenbetriebs ist eine der zentralen Zielsetzungen. Dazu sind theoretische Untersuchungen, mathematische Analyse sowie Rechnersimulation als unabdingbare Voraussetzungen zu nennen, die in der Institutstätigkeit breiten Raum einnehmen.

Die Forschungsaktivitäten lassen sich grob in folgende Bereiche untergliedern:

Rechnergestützter Reglerentwurf:

Der Entwicklungsingenieur kann mit Softwareunterstützung durch entsprechende CAE-Pakete auch sehr komplexe und im Detail unverstandene Entwurfsverfahren für Regeleinrichtungen anwenden. Im Rahmen dieses Arbeitsschwerpunktes werden aufwendige, aber sehr gut einsetzbare Entwurfsprinzipien untersucht und durch die Erstellung von Softwarewerkzeugen künftigen Anwendern erschlossen. Im Rahmen dieses Arbeitsschwerpunktes wird auf den Entwurf und die Analyse von Fuzzy-Regelungen eingegangen. Weiters wird die Anwendbarkeit von Neuronalen Netzen als Regler erforscht. Verschiedene Möglichkeiten zur Beurteilung der Stabilität werden im Hinblick auf derartige Regelungen untersucht und adaptiert, um bisher

bekannt gewordene Fuzzy-Entwurfsverfahren zu unterstützen. Obwohl Fuzzy-Regler bereits so weit gediehen sind, daß sie sich in der industriellen Praxis.

Simulation dynamischer Systeme:

Zur Umsetzung komplexer Anlagen in simulierbare Modelle benötigt man ausdrucksstarke CSSL-Systeme, die auch diskrete Teilmodelle und Unstetigkeiten verarbeiten können. Neben der Untersuchung bekannter Standardwerkzeuge werden laufend Spezialwerkzeuge entwickelt. Im Hinblick auf die Wiederverwendbarkeit von Teilmodellen scheint ein objektorientierter Ansatz besonders wirkungsvoll.

Identifikationsmethoden für dynamische Prozesse (Regelstrecken):

Auf der Basis zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter Modelle werden Verfahren höherer Genauigkeit und Schnelligkeit entworfen und getestet, ferner auch Modelle höherer Komplexität (z.B. mit quadratischer Parameterabhängigkeit, unter Begrenzungen der Modellparameter).

Robuste und Adaptive Regelungen:

Signalprozessoren und Microcontroller sind dank ihres Preisverfalles für breite industrielle Anwendung geeignet. Dadurch können Algorithmen, die bisher aufgrund mangelnder Rechenleistung oder zu großer Komplexität verworfen wurden, an praktischen Anwendungen auch in Echtzeit umgesetzt werden. Um die praktische Anwendbarkeit adaptiver Systeme zu beurteilen, werden Detailuntersuchungen an bekannten adaptiven Systemstrukturen durchgeführt. Anfangswertprobleme, Konvergenz und Qualität adaptiver Systeme werden analysiert.

Einsatz von Fuzzy-Logik und Neuronalen Netzen in der Regelungstechnik:

bewähren, existieren bis heute noch kaum anwendbare Stabilitätskriterien zur Unterstützung eines Reglerentwurfes. Es werden verschiedene Ansätze zur Stabilitätsanalyse (L_2 -Stabilität, Lyapunov) untersucht, wobei zusätzlich Aussagen zur Beurteilung der Stabilitätsgüte (Robustheit) ermöglicht werden sollen.

Entwurf von digitalen Kontrollbeobachtern:

Untersucht wird der Zusammenhang zwischen der Polvorgabe und der Stabilitätsreserve sowie der Einfluß von Meßrauschen. Weiters wird ein auf Parameteroptimierung basierendes Verfahren entwickelt, bei dem Nebenbedingungen hinsichtlich Stabilitätsreserve und Meßrauschen berücksichtigt werden können. Der erfolgreiche Einsatz von Kontrollbeobachtern für Positionsregelungen von elastischen Antrieben unter Reibungseinfluß wurde an Versuchsaufbauten demonstriert.

Komplexe Regelungen bei elektrischen Antrieben:

Moderne Antriebskonzepte erfordern eine Abstimmung des Regelungsverfahrens auf den konkreten Antriebsmotor samt Stellglied.

In der Forschung wurden und werden außerdem folgende Gebiete behandelt: Regleroptimierung als Variationsproblem, Regelungen unter stochastischen Einwirkungen, Verbesserung von Hochleistungs- Identifikationsmethoden mit Rechnerunterstützung.

Um die Ausstattung des Institutes richtig einschätzen zu können, werden folgende Rahmenangaben vorgelegt: 1550 Bücher, 72 Meßgeräte, 55 Personal Computer, 5 Workstations, Institutsrechnernetz, 14 Labormeiß- und -übungsplätze, ca. 16 Diplomanden-Arbeitsplätze. Räumlich ist das Institut im 4. Stock des neuen Elektrotechnischen Institutsgebäudes in der Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, im West- und einem Teil des Südtrakts untergebracht. Die Institutsfläche beträgt rund 850m².

Von den Industriekooperationen seien herausgegriffen: Verschiedene Regelungsprobleme von umrichter gespeisten Drehstromantrieben, Regelungen von Verbrennungsmotoren, Klimatisierungsregelungen.

Die Zeitschriftenveröffentlichungen, Vorträge, Konferenzbeiträge sind den Institutsberichten und separaten Literaturzusammenstellungen zu entnehmen. Von größer und langfristig angelegten Buchveröffentlichungen und Herausgeberaktivitäten des Berichterstatters seien 4 Bücher (3 davon bereits in mehrfach überarbeiteten Neuauflagen) und die Herausgeber- bzw. Mitherausgeberschaft von 3 Zeitschriften erwähnt.

Studienaufenthalte des Autors an amerikanischen und deutschen Universitäten, die Teilnahme an verschiedenen Kongressen und Symposien bieten internationalen wissenschaftlichen Austausch mit Vergleichs- und Hintergrundinformation.

Der Erfolg der Institutsarbeit wird nicht zuletzt durch die Ergebnisse einer im Jahr 1993 durchgeführten Evaluierung an der Fakultät Elektrotechnik bestätigt.

Radial Basis Function Networks for Process Identification and Control

Martin Pottmann

Begutachter: Univ.Prof. Dr. H.P. Jörgl und Univ.Prof. Dr. P. Kopacek

In dieser Arbeit werden Netzwerke radialer Basisfunktionen zur Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme eingesetzt. Die Identifikation nichtlinearer zeitdiskreter Systeme wird als Funktionalapproximationsproblem betrachtet, das mit Hilfe von radialen Basisfunktionen (RBF) gelöst wird. Es wird eine Identifikationsmethode entwickelt, die ein aus radialen Basisfunktionen bestehendes Prozeßmodell ausschließlich unter Verwendung von linearen Regressions- und Parameterschätzverfahren bestimmt. Die Identifikationsmethode zeichnet sich deshalb durch einen wesentlich geringeren rechnerischen Aufwand als "Künstliche Neuronale Netzwerk"-Methoden, die sich auf den sogenannten backpropagation Algorithmus stützen, aus. Empirische Prozeßmodelle liefern im allgemeinen unzuverlässige Vorhersagen über Prozeßzustände, die während des Identifikationsvorganges nicht aufgetreten sind. Um die Zuverlässigkeit von RBF-Modellen zu verbessern, werden Methoden vorgeschlagen, verschiedene Arten von a priori Wissen in die Prozeßmodelle einzubeziehen.

Die ermittelten RBF-Modelle werden in der Folge im Rahmen von modellgestützten Regelsystemen eingesetzt. Ein "Internal Model Control" (IMC) - Konzept wird vorgeschlagen, das im Gegensatz zu bisherigen IMC Ansätzen eine explizite Gewichtung des Stellaufwandes beinhaltet. Werden RBF-Modelle verwendet, die linear in der zu berechnenden Stellgröße sind, ergibt sich ein Regelgesetz mit einer analytischen Darstellung. In Simulationen konnte gezeigt werden, daß dieses Regelkonzept auch auf Nicht-Phasenminimumsysteme angewendet werden kann. Weiters wird ein nichtlinearer prädiktiver Regler vorgestellt, bei dem das identifizierte RBF-Prozeßmodell dazu verwendet wird, einen ebenfalls als RBF-Netzwerk implementierten Prädiktivregler zu trainieren. Diese Strategie hat den Vorteil, daß die sonst bei nichtlinearen Prädiktivreglern erforderliche on-line Optimierung zur Berechnung der Stellsignalfolge durch ein fixes RBF-Netzwerk ersetzt wird, wodurch sich dieser Regler besonders für Echtzeitanwendungen eignet. Beide Regelungskonzepte wurden in Simulationen an mehreren Prozeßmodellen sowie experimentell an einem pH Neutralisationsprozeß erprobt und zeigen im Vergleich zur konventionellen PI-Regelung ein deutlich verbessertes Regelverhalten.

Automatisierungskonzepte für die Fertigteilproduktion von Mauerwerkselementen aus Ziegeln

Christian Hanser

Begutachter: Univ.Prof. Dr. H.P. Jörgl und Univ.Prof. Dr. P. Kopacek

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Erstellung eines Anlagen- und Automatisierungskonzeptes für die vollautomatische Produktion von geschoßhohen Mauerwerksfertigteilen nach DIN 1053, Teil 4. Ausgehend vom Produkt Mauerwerkselement werden die Rahmenbedingungen für eine Automatisierung festgelegt. Dabei werden unterschiedliche Bauvorhaben aller möglichen Zielgruppen (Einfamilienhaus, Reihenhaushaus, mehrgeschoßiger Wohnbau, Objektbau) untersucht und Kenngrößen abgeleitet. Mit dem Ziel eine Produktionsleistung von 300 m² pro Schicht zu erreichen, werden alle nötigen Arbeitsschritte des Prozesses von der Steinevereinzelnung aus einem Lieferpaket bis zum Abtransport der fertigen Mauer in parallele Subprozesse zerlegt, die dann konstruktiv in Anlagenmodule umsetzbar sind. Der Durchsatz durch alle Module wird optimiert und aufeinander abgestimmt und der Entwurf schließlich durch Simulation überprüft.

Der zweite Aspekt der Arbeit zielt auf die automatische Programmgenerierung für Steuerungsalgorithmen aus Petri-Netz-Modellen ab. Dazu wird die Klasse der Netze für die Steuerungsmodellbildung (SMB-Netze) als Erweiterung gewöhnlicher Stellen/Transitionen-Netze definiert, die speziell auf Steuerungsanwendungen in der flexiblen Fertigung zugeschnitten ist. Ein Netzinterpretierer wird vorgestellt, der aufgrund der Netztopologie die Synchronisierung und Serialisierung von Steuerungsaufgaben automatisch durchführt und eine im Steuerungssystem vorhandene SPS mit einbezieht. Der Softwareentwurf wird damit auf eine dem Applikationsingenieur vertraute Abstraktionsebene verlagert. Ausgereifte Analysemethoden und Simulationswerkzeuge gestatten eine off-line-Validierung der erstellten Modelle. Die Programmierschnittstelle fördert modulare Umsetzung von Steuerungsalgorithmen und trägt daher wesentlich zur Wartbarkeit und in Verbindung mit der Analyse zur Qualitätssicherung von Steuerungssoftware bei.

Neue Reglerstruktur auf Basis der neuronalen Netzwerktechnologie

Manfred Thalhammer

Begutachter: Univ.Prof. Dr. H.P. Jörgl und Univ.Prof. Dr. P. Kopacek

In dieser Arbeit wird eine neue Reglerstruktur vorgeschlagen, die mit Hilfe neuronaler Netze aufgebaut wurde. Das Training der neuronalen Netze wird dabei mit Hilfe des backpropagation Algorithmus durchgeführt. Die Netzwerkstruktur setzt sich dabei aus dreischichtigen Netzen zusammen. Die Reglerstruktur wurde durch das Verknüpfen von mehreren neuronalen Netzen aufgebaut, über die ein sogenanntes "Kompensationsverfahren" gelegt wird. Jedes einzelne Netz stellt dabei einen feedforward controller dar. Die verwendeten Einzelnetze bilden je eine Regelgröße der Anlage ab, wodurch die Regelung der gesamten Anlage ermöglicht wird. Vergleiche mit herkömmlichen, auf neuronalen Netzen basierenden Methoden zeigen, daß mit dieser neuen Struktur genauere Aussagen über den Prozeß möglich sind. Diese Tatsache wird anhand einiger Beispiele aus der verfahrenstechnischen Industrie untermauert. Es zeigt sich dabei auch, daß mit dieser Struktur Anlagenteile abgebildet werden können, die mit herkömmlichen Methoden nicht zu erfassen waren.

Mit der vorgestellten Struktur lassen sich nicht nur regelungstechnische Probleme lösen, sondern es können damit auch Simulationen, Optimierungen und Diagnosen einer Anlage durchgeführt werden. Weitere Anwendungen der Methodik sind das Einfrieren von aktuellen Prozeßzuständen und deren Idealzuständen, wodurch Vergleiche des laufenden Betriebsverhaltens mit dem optimalen Betriebsverhalten gemacht werden können; Kontinuierliches Training der Netze, womit laufend gewährleistet wird, daß in den Netzen immer der aktuelle Betriebszustand abgebildet wird und weiter zurückliegende Daten (Informationen) an Bedeutung verlieren.

Zur Erstellung von Postprozessoren in der rechnergestützten Produktionsmeßtechnik

T.T. Nguyen

Begutachter: Univ.Prof. Dr. P. H. Osanna und Univ. Prof. Dr. P. Kopacek

Die Verwendung von Computern in der industriellen Fertigung und Entwicklung ist weit verbreitet. Selbst mittelständische Unternehmen verwenden CAD-Systeme in der Konstruktion, und Mikroprozessoren steuern einen Großteil der heute verkauften Werkzeugmaschinen. Probleme bestehen allerdings noch in der Kopplung der verschiedenen Computeranwendungen. Einmal erarbeitete und in rechnerlesbarer Form vorhandene Daten und Informationen sollten allen Abteilungen innerhalb eines Betriebes, unter Umständen auch seinen Zulieferern, zugänglich gemacht werden können. Ein naheliegender Ansatz ist, die in einer CAD-Zeichnung enthaltenen Informationen für die Erstellung des Steuerungsprogrammes einer NC-Werkzeugmaschine weiterzuverwenden. Meist wird diese Verbindung als CAD/CAM-Kopplung bezeichnet.

Die Dissertation beschreibt ein Verfahren zur Erstellung eines Postprozessors für die rechnergestützte Produktionsmeßtechnik. Dieser Postprozessor hat die Aufgabe, die das Werkstückprogramm in den Steuerungscode der Maschine (in dem Fall Koordinatenmeßgerät) zu übersetzen.

Die Anwendung des Postprozessors in der rechnergeführten Produktionsmeßtechnik bringt im Vergleich zu direkt geschriebenen NC-Programmen für Koordinatenmeßgeräte wesentliche Vereinfachungen.

Die zu messenden Flächen können in zwei Hauptgruppen erfaßt werden. Eine Gruppe enthält die Standardgeometrie wie Ebene, Gerade, Zylinder, Kegel, Kugel usw. Die zweite Gruppe enthält die Freiformflächen, die mit den Elementen aus der ersten Gruppe nicht erfaßt werden können. Das Programm gliedert sich in programmtechnische Anweisungen sowie Geometriedefinitionen, Meß-, Bewegung- und Auswertungsanweisungen. Aus den Meßanweisungen und mit Hilfe der Geometriedefinitionen werden die Meßpunkte ermittelt. Der Postprozessor wandelt diese Informationen in Steuerungsbefehle für das Meßgerät um.

Das vorgestellte Verfahren ist auf einem Personal-Computer installiert.

Angepaßte Anwendung internationaler Qualitätsmanagementsysteme - Vom Qualitäts- zum Umweltmanagement

C.P.Heiss

Begutachter: Univ.Prof. Dr. P. H. Osanna und Univ. Prof. Dr. P. Kopacek

Ökologisches Denken muß mit einem internationalen - wenn nicht sogar mit einem globalen - Ansatz beginnen und darf nicht in ein modisches Querdenken entarten, sondern muß ein tiefgehendes Durchdenken des Einzelnen und der Gesamtheit, sowie der Verflechtungen sein.

Internationales Qualitätsmanagement (ISO 9000) ist ein möglicher Ansatz, der den Unternehmen die Chance gibt, bereits Erprobtes in einer abgewandelten Form zur Bewältigung ihrer Probleme mit der Ökologie zu verwenden. Zusätzlich bietet dieser Ansatz die Möglichkeit eine breite Front für den Umweltschutz zu bilden, die nationale Grenzen sprengt und global wirksam werden kann.

Unternehmen stehen heute einem immer größer werdenden Druck - von Seiten der Gesetzgebung, der Konsumenten und verschiedener Umweltorganisationen - in Richtung Verbesserung ihrer Umweltbeziehungen gegenüber. Ein adequates Umweltmanagement wird dadurch in immer mehr Ländern unentbehrlich, zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsposition eines Unternehmens.

Das Qualitätsmanagementsystem auf der Basis der ISO 9000 ist heute eines der am weitest entwickelten und effizientesten Managementsysteme weltweit. Die Erfahrungen und das Wissen des Qualitätswesens reichen Jahrzehnte zurück und wurden kontinuierlich weiterentwickelt, sodaß heute ein derart gestaltetes Qualitätsmanagementsystem eine absolute Notwendigkeit für das wirtschaftliche Bestehen von Unternehmen darstellt.

Dieses Managementsystem ist nicht nur zu Beherrschung der Qualität hervorragend geeignet, sondern auch für die Beziehung Unternehmen Umwelt.

Die Vorteile, die ein auf dem Qualitätsmanagement aufsetzendes Umweltmanagement bietet, sind nicht nur ein bereits wohlerprobtes und ausgereiftes System, sondern auch viele wirkungsvolle Werkzeuge und Hilfsmittel, die ergänzend zu dem System bereit stehen und nicht wie bei einem gänzlich neu geschaffenen System erst entwickelt werden müssen.

In relativ einfacher Weise kann, aufbauend auf den Richtlinien für internationale Qualitätsmanagementsysteme, ein Rahmenmanagementsystem für Umweltangelegenheiten in einem Unternehmen implementiert werden, dessen einzelne Bausteine je nach Anforderungen direkt vom Qualitätsmanagement abgeleitet oder, bei bereits bestehenden Lösungsmodulen, in den Rahmen integriert werden können.

Diese Arbeit zeigt die Gemeinsamkeiten der Qualitäts- und Umweltgedanken auf. Daraus abgeleitet werden verschiedene Ansätze und Methoden zur Lösung von Teilaufgaben im System diskutiert - sowohl aus dem Umwelt- als auch dem Qualitätswesen - und Eingliederungsmöglichkeiten im System aufgezeigt. Ferner wird das Managementsystem mit allen Systemteilen sowie einige wichtige Werkzeuge und Hilfsmittel behandelt.

Repetitorium Regelungstechnik, Band 1

Hanns Peter Jörgl

155 Seiten, 6 Tabellen, 240 Abbildungen
Verlag R. Oldenbourg, Wien 1993

Das Buch stellt eine kurz gefaßte Darstellung des Stoffes der Vorlesung Grundlagen der Regelungstechnik des Autors für Studenten des Maschinenbaus an der Technischen Universität Wien dar. Der Schwerpunkt liegt dabei auf durchgerechneten Prüfungsbeispielen sowie auf Übungsaufgaben. Behandelt werden in erster Linie die Grundlagen der konventionellen Regelung von Eingrößensystemen. Dieser Band soll keineswegs als Lehrbuch dienen, vielmehr wird vorausgesetzt, daß der Leser mit dem Stoff vertraut ist. Ist dies nicht der Fall, so sollte unbedingt ein zitiertes Lehrbuch der Regelungstechnik bzw. das Skriptum des Autors herangezogen werden. Die Beispiele stammen überwiegend aus dem Fachgebiet Maschinenbau, zu welchen unter Umständen Vorkenntnisse aus dem Gebiet der Mechanik, der Wärme- und der Strömungslehre erforderlich sind. Behandelt werden außer den Grundbegriffen der Regelungstechnik die Modellierung dynamischer Systeme, die Linearisierung sowohl anhand der Kennlinien als auch anhand nichtlinearer Differentialgleichungen, Laplace-Transformation, Übertragungsfunktionen und Frequenzgang, konventionelle Regler, Stabilität, Reglerentwurf im Zeitbereich und in den Frequenzkennlinien.

Dieses Repetitorium bietet in didaktisch ausgezeichnete Weise für Studenten und Praktiker eine Vielzahl von Aufgaben und Lösungen zu den Grundlagen der Regelungstechnik aus maschinenbaulicher Sicht. Die straffe Darstellung des Wesentlichen führt dazu, daß eine Konzentration auf den Kernstoff erfolgen kann. Die Merksätze sowie durchgerechnete Beispiele machen es nicht nur unentbehrlich für die Prüfungsvorbereitung, sondern dieses Büchlein bildet auch ein ideales Nachschlagewerk für den in der Praxis stehenden Techniker.

P. Kopacek

Mechanical Sensors

Herausgeber: M. M. Ban, N.F. de Rooij, B. Kloeck

674 Seiten mit 394 Figuren und 26 Tafeln
VCH Verlagsgesellschaft mbH 1994.

Dieses Buch über mechanische Sensoren ist der 7. Band einer achtbändigen Reihe. In den bisher erschienen Bänden beschäftigen sich die Herausgeber mit Grundlagen wie physikalischen Grundprinzipien, Basistechnologien und Anwendungen. 2 Bände sind den chemischen und biochemischen Sensoren gewidmet, während sich Band 4 mit thermischen Sensoren beschäftigt. Band 5 behandelt schließlich magnetische Sensoren und Band 6 optische Sensoren. Die Serie soll mit Band 8 Entwicklungen in der Sensortechnologie und der Markt an Sensoren abgeschlossen werden.

Wer in diesem Band 7 ein klassisches Werk über Meßwertaufnehmer erwartet, wird sicher enttäuscht sein. Das Hauptaugenmerk liegt auf Sensoren, die am Rechner weiterverarbeitbare Ausgangssignale liefern. Diese Serie soll einen Überblick über den letzten Stand der Sensortechnologie geben und zukünftige Entwicklung in Forschung und Anwendung aufzeigen. Jeder Band der Serie ist gleich strukturiert und besteht aus drei Teilen - Physikalische und technologische Grundlagen für relevante Meßparameter, Typen von Sensoren und ihre Technologie sowie die wichtigsten Anwendungen und Anwendungstrends.

Mechanische Sensoren bilden die Meßwertaufnehmer weltweit. In den letzten beiden Jahrzehnten trat auch hier eine stürmische Entwicklung ein, die sich darin äußerte, daß neue Typen von Sensoren mit neuen Eigenschaften am Markt erschienen. Gesteigerte Nachfrage hinsichtlich Genauigkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit sowie "Lean Production" führte zu einer verstärkten Nachfrage an hochpräzisen, wartungsarmen und billigen Sensoren. Dazu kam noch die revolutionäre Entwicklung der Mikroelektronik.

Wie bereits ausgeführt, werden im ersten Teil die physikalischen und technologischen Arbeitsprinzipien mechanischer Sensoren dargestellt. Im zweiten Hauptteil werden Sensoren für spezielle mechanische Meßgrößen, wie Beschleunigung, Dichte und Viskosität, Masseströme, Kraft, Momente, Druck und Dehnungen diskutiert.

Das vorliegende Buch stellt weltweit die erste Sammlung von mechanischen Sensoren unter Verwendung von Mikrosystemen dar. Es kann daher sowohl den Studenten höherer Semester als auch den in der Praxis tätigen Ingenieuren wärmstens empfohlen werden.

P. Kopacek

Einführung in die Automatisierungstechnik. Messen, Steuern, Regeln

P. Kopacek

316 Seiten mit 257 Abbildungen
R. Oldenburg Verlag, Wien 1993.

Vorliegendes Buch widmet sich einer breiten Übersicht über anwendungsrelevante Gebiete des Messen, Steuerns und Regelns.

Kombinatorische Steuerungen, ihre Analyse und ihr Entwurf vermitteln den einfachsten Zugang, bietet doch die logische Diskretisierung eine hervorragende Basis in didaktischer Hinsicht.

Es folgen Elemente dynamischer Übertragungsglieder, der Differentialgleichungen und Regelkreise; ferner die Bewältigung in Führung und bei Störung bis zu ausgewählten Bode-Diagrammen und bis zur Stabilität.

Das Buch schließt mit einer Präsentation verschiedenster Meßgeräte und -verfahren, abgestimmt auf elektrische Größen, pneumatische usw.

Das Buch ist auch approbiertes Schulbuch an höheren und gewerblichen Lehranstalten. Es betont die phänomenologischen Aussagen, wirkt nachhaltig durch seine leicht faßlichen Erklärungen sowie vielen Bilder, Tabellen und Übungsaufgaben.

A. Weinmann

**Ausschreibung
des
Fred - Margulies - Preises
für Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der
Automatisierungstechnik
mit besonderer Berücksichtigung der sozialen Aspekte**

Anlässlich des zehnjährigen Bestehens des IFAC - Beirates Österreich verleiht dieser jährlich zusammen mit der Gewerkschaft der Privatangestellten den Fred - Margulies - Preis. Der Preis wird für hervorragende österreichische Arbeiten auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik mit besonderer Berücksichtigung der sozialen Aspekte bei ihrer Einführung in Betrieben verliehen. Kriterien für die Bewertung sind im wesentlichen Innovationsgehalt, Wissenschaftlichkeit, wirtschaftliche Bedeutung sowie Interdisziplinarität des Ansatzes und insbesondere soziale Relevanz. Der Preis in der Höhe von

ATS 60.000,-- pro Jahr

wird je zur Hälfte von den beiden Stiftern geleistet und wird von einer Jury vergeben, welcher neben Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Wirtschaft auch Vertreter der Gewerkschaft angehören. Der Fred - Margulies - Preis wird vom Leiter der Forschungssektion des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung im Rahmen des "Österreichischen Automatisierungstages" verliehen.

Eingereicht können Studien werden, welche innerhalb der letzten 5 Jahre in Österreich abgeschlossen wurden. Diese Arbeiten sind bis spätestens 30. Juni jeden Jahres in Form einer Studie in dreifacher Ausfertigung sowie einer Kurzfassung (max. 10 Seiten) in 5facher Ausfertigung beim

**Generalsekretariat des IFAC - Beirates, c/o Institut für Handhabungsgeräte- und
Robotertechnik der Technischen Universität Wien, Floragasse 7a, A - 1040 Wien**

einzureichen.

Für weitere Anfragen steht das Sekretariat des IFAC - Beirates unter obiger Adresse zur Verfügung.

10. Österreichischer Automatisierungstag

20. Oktober 1994, TU-Wien

Als im Jahre 1985 im Kontaktraum der TU-Wien der erste österreichische Automatisierungstag - damals noch von der Arbeitsgemeinschaft "Automatisierungstechnik in Österreich" - veranstaltet wurde, ahnten nur wenige die Zukunft der Automatisierungstechnik und der Arbeitsgemeinschaft voraus. Die Automatisierungstechnik hat sich zwischenzeitlich unter dem Einfluß der Mikroelektronik weiterentwickelt - die Arbeitsgemeinschaft zum IFAC-Beirat Österreich.

Zum nunmehr zehnten Mal soll auch auf diesem Automatisierungstag versucht werden, in Kurzreferaten aktuelle Teilgebiete der Automatisierungstechnik unter dem Blickwinkel der Relevanz für österreichische Klein- und Mittelbetriebe darzustellen.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Symbiose zwischen Prozeß- und Fertigungsautomatisierung.

Als Veranstaltungsort wurde für diesen Jubiläumsautomatisierungstag der Festsaal der Technischen Universität Wien gewählt. Er wird wie üblich durch eine Produktpräsentation von Herstellern ergänzt. Darüber hinaus soll zum ersten Mal der "Fred Margules" Preis für herausragende Leistungen auf dem Gebiet der Sozialen Aspekte der Automatisierungstechnik verliehen werden.

Der im Zuge des 9. Automatisierungstages begonnene Trend, verstärkt Kollegen aus den ehemals osteuropäischen Ländern anzusprechen, soll diesmal weiter fortgesetzt werden.

2. IFAC Konferenz

"Intelligent Manufacturing Systems - IMS'94"

13. - 15. Juni 1994, TU-Wien

Die Automatisierungstechnik wird im regelmäßigen Abstand von ungefähr zwei Jahren durch neue "Headlines" dominiert. Beispiele dafür sind Robotik, intelligente Geräte, rechnergestützte Produktion, Fuzzy Methoden, Neuronale Netze. Die rechnergestützte Produktion (CIM) begann in den mittleren 80er Jahren zu einer solchen Headline zu werden und erlebt nun unter ICIM (intelligent CIM") eine neue Blüte.

Nach Dearborn (USA), 1992, findet nun die zweite Konferenz im Rahmen der IFAC an der TU-Wien statt. Einer der Gründe dafür liegt darin, daß für die österreichische Industrie und hier insbesondere für Klein- und Mittelbetriebe CIM in nächster Zukunft von eminenter Bedeutung sein wird. Im Zeitalter der EU liegt eine der Hauptmarktchancen in der Flexibilität, welche durch IMS in größerem Maße als durch CIM sichergestellt ist.

Vor ungefähr 5 Jahren begann auf Betreiben Japans eine weltweite IMS Initiative mit Teilnehmern aus Japan, USA, Canada, Australien und Europa. Um die Kooperationsmöglichkeiten innerhalb einer so großen und komplexen internationalen Forschungsgemeinschaft zu testen, wurden 6 Testcases definiert und Ende 1993 abgeschlossen. Da sehr viele in diese Initiative involvierten Wissenschaftler auch in der IFAC tätig sind wurde bereits vor 3 Jahren begonnen hier eine Verbindung herzustellen. Als logische Konsequenz wird bei IMS'94 eine spezielle Session diesen Testcases gewidmet sein.

In diesem Zusammenhang soll am 16. Juli 1994 eine nationale Veranstaltung den Österreichischen Klein- und Mittelbetrieben den Einstieg dieser lebensnotwendigen Technologie erleichtern. In den Testcases sollen jene Segmente festgestellt werden, welche für österreichische Klein- und Mittelbetriebe relevant sind. Diese werden diskutiert und weitere Schritte zu deren Einführung besprochen.

<i>Zeitpunkt</i>	<i>Veranstaltung</i>	<i>Ort</i>	<i>Weiter Informationen erhältlich bei</i>
10.3.11.3.	Life Long Learning: The European Success Strategy	Wien	UETP Danube, BIT, Außeninstitut der TU-Wien, Gußhausstr. 28, 1040 Wien Tel: 0222/58801-5271
21.3.-24.3.	AIAA/NASA Conference on Intelligent Robots in Field, Factory, Service and Space	Houston, TX/ USA	J.D. Erickson, NASA, Lyndon B. Johnson Space Center, Mail Code ER, Houston, TX 77058, USA FAX: +1/713/483 7580
27.3.-30.3.	Modeling and Control in Biomedical Systems IFAC/IMEKO	Galveston, TX/ USA	U.T. Medical Branch, POBox 55176 Galveston, TX 77555-5176, USA FAX: 001 602/770-6825
28.3.-31.3.	EDBT 94 - Extending Database Technology	Cambridge/GB	BCS, POBox 1454, Station Road, Swindon SN1 1TG, UK Tel.: +44 793/480269
5.4.-8.4.	12 European Meeting on Cybernetics and Systems Research (EMCSR)	Wien	Prof.R. Trappl, Inst. f. med. Kybernetik u. Artificial Intelligence, Univ. Wien, Freyung 6/2, 1010 Wien Tel.: 0222/53532810
6.4.-8.4.	ECML 94: European Meeting on Machine Learning	Catania/I	ECML 94, Dept. Of Computing Science, Katholieke Universiteit, Leuven, Celestijnelaan 200A, B-3001 Heverlee, Belgien
7.4.-8.4.	Fuzzy Duisburg'94	Duisburg	Prof. P.M. Frank, Universität-GH-Duisburg, Bismarkstr. 81 BB, D-47048 Duisburg FAX: +49/203/379 29 28
10.4.-13.4.	Management of Collaborative European Programmes and Projects in Research, Education and Training	Oxford/GB	DI M. Horvat (BIT), Wiedner Hauptstr. 76, 1040 Wien Tel.: 0222/581 16 16
20.-22.4.	IFIP/IFAC International Working Conference on Knowledge Based Hybrid Systems	Budapest	Mag.Eva Soos, Computer and Automation Institute, HAS, POBox 63, H-1518 Budapest FAX: +36/1/1869378

3.5.-6.5.	Mobile Robots for Subsea Environments (IARP)	Monterey,CA/ USA	IARP Workshop, Monterey Bay Aquarium Research Institute, 160 Central Avenue, Pacific Grove, CA 93950 USA FAX: +1/408/647-3700
4.5.-6.5.	7. Int. Conf.: Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation	Wien	Universität Wien, Lenaugasse 2, 1080 Wien
25.4.-27.4.	ISIR'94: Int. Symp. on Industrial Robots	Hannover	DI A. Wolf, ISIR Secretariat, FHG-IPA, Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart FAX: +49/711/970 1005
23.5.-27.5.	10. Int. Information Security Conference -IFIP SEC'94	Aruba/NL- Antillen	IFIP SEC'94, POBox 1555, NL-6201 BN, Maastricht Tel.: +31 4361/8989
25.5.-27.5.	Advanced Control of Chemical Processes IFAC/ADCHEM 94	Kyoto/Japan	Dr. Shinji Hasebe, Dept. of Chemical Eng., Kyoto University, Kyoto 606-01, Japan FAX: +81/75-752-9639
6.6.-9.6.	Multimedia/Hypermedia in Open Distributed Environments	Graz	FZ Seibersdorf, A-2444 Seibersdorf Tel.: 02254/80/3850
8.6.-10.6.	IFAC Workshop on Computing in Economics and Finance	Amsterdam/NL	Dept. of Macroeconomics, Rm E1-911, Univ. of Amsterdam, Roeterstraat 11, NL-1018 WB Amsterdam FAX: +31/1/525528
8.6.-10.6.	IFAC/IMEKO Symposium Intelligent Components and Instr. for Control Application - SICICA 94	Budapest	SICICA'94 Secretariat, Computer and Automation Institute, HAS, POBox 63, H-1518 Budapest FAX: +36/1/1869378
12.6.-16.6.	MIE 94 European Federation for Medical Informatics	Lissabon/P	EFMI, Av. Columbano Bordalo Pinheiro, 87-4, 1000 Lissabon, Portugal Tel.: 351 1 7269695
13.6.-15.6.	IFAC/IFIP/IFORS Workshop: Intelligent Manufacturing Systems IMS 94	Wien	ÖPWZ, Rockhgasse 6, 1014 Wien FAX: 0222/533 863673

13.6.-16.6.	The EUREKA Technology Conferences, Vision EUREKA Lillehammer'94	Lillehammer/N	DI M. Horvat (BIT), Wiedner Hauptstr. 76, 1040 Wien Tel.: 0222/581 16 16
13.6.-16.6.	IFAC Symposium: Fault Detection, Supervision and Safety for Industrial Processes	Espoo/SF	Finnish Society of Automation, Asemapäällikönkatu 12C, SF-00520 Helsinki, Finland FAX: +358/0/146 1450
20.6.-23.6.	AID'93: Int. Conf. on Artificial Intelligence in Design	Lausanne/CH	Key Centre of Design Computing, University of Sydney, NSW 2006, Australien FAX: +61/2/692 3031
22.6.-24.6.	IFAC/IFIP Workshop: Real Time Program-ming	Insel Reichenau/D	Pro. W. Halang, Fern-Universität Hagen, D-58084 Hagen, Deutschland FAX: +49/2331/987-375
27.6.-28.6.	IFAC Workshop: Integration of Process Design and Control	Baltimore/USA	Dr. T. McAvoy, Chem. Eng. Dept., University of Maryland, College Park, MD 20742-2111, USA FAX: +1/301/405-9126
28.6.-1.7.	CADE-12: International Conference on Automated Deduction	Nancy/F	Claude Kirchner, INRI Lorraine & CIRN, Campus Scientifique, 615 rue du Jardin Botanique, BP 101 54602 Villers-les-Nancy, Frankreich FAX: +33/83 27 8319
29.6.-1.7.	1994 American Control Conference	Baltimore/USA	Prof. H. Khalil, Electrical Eng. Dept., Michigan State Univ., East Lansing, MI 48824-1226, USA FAX: +1/517/353-1980
5.7.-9.7.	2. European Feminist Research Conference - Feminist Perspectives on Technology Work, Work & Ecology	Graz	Dr. Christine Wächter, Tel.: 0316/813 909 FAX: 0316/810 274
7.7.-9.7.	Robotics in Alpe Adria RAA'94	Bled/SLO	RAA'94 Workshop, Jozef Stefan Institute, Jamova 39, POBox 100, Ljubljana, Slovenia FAX: +386 61 219 385

4.7.-6.7.	IFAC/IFARS Symp.: Identification & System Parameter Estimation SYSID 94	Kopenhagen/ DK	SYSID 94 Secretariat, Danish Automation Society, Symbion Fruebjergvej 3, DK-2100 Copenhagen, Denmark FAX: +45/3120 5521
4.7.-8.7.	IARP: Robotics in Space	Montreal/CDN	Space Station Program, Canadian Space Agency, 6767 route de l'Aéroport, Saint-Hubert, Quebec, Canada, J3Y 8Y9 FAX: +1/514/926-4576
26.7.-28.7.	SQM'94 - Software Quality Mangament	Edinburgh/ Schottland	BCS, SQM94, Ashurst Losge, Ashurst Southamton, SO4 2AA, UK Tel.: +44 703/293223
27.6.-30.7.	Asian Control Conference	Kyoto	Prof. Y. Mori, Dept. of MEch. Eng., National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, 239 Yokosuka, Japan FAX: +81/4/8642-6480
1.8.-2.8.	IFAC Symp.: Advances in Control Education	Tokyo/Japan	Prof. K. Furuta, Tokyo Inst. of Technology, Dept. of Control Eng., 2- 12-1 Oh-Okayama Beguroku, Tokyo 152, Japan FAX: +81/3/3720-5269
10.8.-12.8.	IFAC Workshop: Computer Software Structures Integrating AI/KBS	Lund/S	Svenska IFAC kommittén, POBox 27, S-75103 Uppsala, Sweden FAX: +46/18/503611
15.8.-17.8.	ISRAM'94: Int. Symp. on Robotics and Manufacturing	Maui,HI/USA	ISRAM'94, POBox 14155, Albuquerque, NM 87191-4155 USA FAX: +1/505/291-0013
21.8.-24.8.	ISPE/IFAC Int. Conf.: CAD/CAM: Robotics and Factories of the Future	Ottawa/CDN	Prof. M.B. Zaremba, Ottawa Carleton Research Inst., Kanata, Ont., CDN, K2K 2E4, Canada FAX: +1/819/773 1638
22.8.-26.8.	11 Int. Symposium on Computational Statistics COMPSTAT 94	Wien	OCG, TU Wien, Uni Wien Tel.: 0222/512 02 35
28.8.-2.9.	13 World Computer Congress	Hamburg	IFIP, Kongreß-Zentrum Hamburg, POBox 30 24 80, 20808 Hamburg 36 Tel.: +49 40/35 69 - 22 42

5.9.-8.9.	IEE/IFAC/TUHH: Intelligent Systems Engineering	Hamburg	Ms. Jane Chopping, ISE 94 Secretariat, Institution of El. Engineers, Savoy Place, London WC2R OBL, UK FAX: +44/71 497 3633
12.9.-16.9.	EG'94 Euro Graphics	Oslo/Norwegen	EG'94, POBox 124 Blinden, N-0314 Oslo Tel.: +47 22 06/7654
13.9.-16.9.	EUFIT'94: European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies	Aachen/D	EUFIT'94, ELITE Foundation, Promenade 9, D-52076 Aachen FAX: +49 2408 94582
19.9.-21.9.	IFAC Symp.: Robot Control SYROCO'94	Capri/I	Prof. S. Nicosia, SYROCO 92 Sci.Secr., Universita degli Studi di Roma, Via della Ricerca Scientifica, I- 00133 Rom, Italien FAX: +39/6/2020519
27.9.-29.9.	IFAC Conference: Integrated Systems Engineering	Baden-Baden	H. Wiefels, VDI/VDE GMA, POBox 10 11 39, D-40002 Düsseldorf FAX: +49 211 6214161
27.9.-30.9.	IWK TU-Illmenau: Internationales Wissenschaftliches Kolloquium	Illmenau	Techn. Univ. Illmenau, Kongreßorganisation 39.Int.Wiss.Koll., PF 327, D-98684 Illmenau FAX: +49/3677/691701
11.10.-13.10.	ASIM 94: Symposium Simulationstechnik	Stuttgart	Martin Kraus, FHTE, Flandernstr. 101, D-73732 Esslingen FAX: +49/0711-397-3763
20.10.	Österreichischer Automatisierungstag	Wien	Institut für Handhabungsgeräte und Robotertechnik, Floragasse 7a, 1040 Wien Tel.: 0222/5041838
2.11.4.11.	4. Int. Symposium f. Informationswissensch. ISI 94	Graz	Universität Graz, Schießstattg. 4a, 8010 Graz