

Graduiertenkolleg 1103
Embedded Microsystems



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

**Energieeffiziente Automatisierung in verteilten
Systemen**

Statusbericht

Peter Hilgers

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Christoph Ament
Lehrstuhl: Systemtheorie

Freiburg, im September 2008



Institut für Informatik



Institut für Mikrosystemtechnik

1 Aktueller Stand der Promotion

Die Teilnahme am Graduiertenkolleg wurde nach zwei Jahren und drei Monaten beendet. Herr Prof. Ament hat zum 01. 03. 2006 einen Ruf an die Technische Universität Ilmenau (Fachgebiet Systemanalyse am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik) angenommen. Ich habe die Möglichkeit ergriffen, dort zum 01. 12. 2007 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter zu arbeiten. Die Beendigung der Promotion wird an der TU Ilmenau bei Herrn Prof. Ament angestrebt.

2 Zusammenfassung der Dissertation

Für die Entwicklung unterschiedlicher Regler im Bereich der klassischen, zentralen Systeme sind weit entwickelte Entwurfswerkzeuge verfügbar. Für Mehrgrößen- (Multiple Input Multiple Output-) Systeme wird hauptsächlich auf zentrale Mehrgrößenregler oder entkoppelte (also dezentrale) Eingrößenregler zurückgegriffen. Für die Entwicklung von Konzepten zur verteilten Regelung (kooperativ ohne Zentrale) besteht Forschungsbedarf.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Methoden untersucht und entwickelt werden, die eine verteilte Regelung unter den oben genannten Bedingungen ermöglichen. Dabei ergeben sich diverse Aufgabenstellungen wie zum Beispiel: Eine effiziente Datenübertragung, die sowohl zeitlich als auch in der zu übertragenden Datenmenge optimiert ist; Eine sinnvolle Datenfusion aus mehreren Sensorknoten, so dass ausreichende Informationen über das System an den Reglerknoten vorliegen; Ein geeigneter Reglerentwurf zur verteilten Regelung. Grundlage hierfür ist der Einsatz von Systemmodellen, die zur Schätzung der Zustände eingesetzt werden.

2.1 Ereignisdiskrete Punkt-zu-Punkt-Kommunikation

Zu Beginn wird ein Konzept zur ereignisdiskreten Punkt-zu-Punkt-Kommunikation formuliert. Während die Messgröße z und die Stellgröße u des zu regelnden Prozesses naturgemäß in der Regel physikalische Größen mit einem kontinuierlichen Wertebereich darstellen, muss die Übertragung über ein Kommunikationsnetz digital erfolgen. Für eine Regelung, die über ein solches Netz hinweg arbeitet, ergibt sich zwangsweise die Notwendigkeit der jeweiligen Wandlung zwischen diesen beiden Domänen.

Es wird der Weg einer modellbasierten, ereignisdiskreten Übertragung gewählt (siehe Abbildung 1): Sowohl im Sensor- als auch im Aktorknoten wird ein Prädiktor ergänzt, der modellbasiert das Verhalten des ungestörten, geschlossenen Regelkreises prädiziert. Sensorseitig wird diese Zustandsprädiktion mit der aktuellen Zustandsschätzung verglichen.

Jeder Sensor besitzt als Schätzer ein Kalmanfilter. Der Einfluss des Filters auf das Streckenmodell besteht aus einer Korrektur des Zustands für jeden Zeitschritt. Diese Korrektur kann durch das Modell propagiert werden, um somit zu jedem Zeitpunkt die Werte für ein korrigiertes und unkorrigiertes Modell zu erhalten. Dieser Schätzer ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Korrektur des Filters ist ein additiver Term $\mathbf{K} (\mathbf{z}(k) - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}(k)) = \mathbf{K} \Delta \mathbf{z}(k)$, welcher zu einem Gesamtmodell

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+1) &= \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{K} (\mathbf{z}(k) - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}(k)) + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{G} \mathbf{v}(k) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1) &= \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{K} \Delta \mathbf{z}(k) + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{G} \mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

führt. Die Abweichung von einem unkorrigierten Modell stellt sich als

$$\Delta \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{K} \Delta \mathbf{z}(k) \quad (2)$$

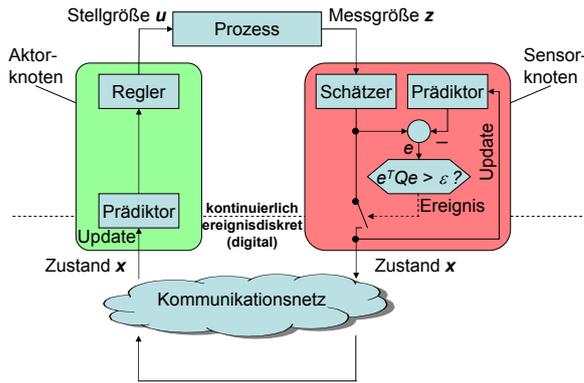


Abbildung 1: Regelungsnetz mit Prädiktoren und Mechanismus zum Auslösen von Ereignissen falls ein Schwellwert ε überschritten wird.

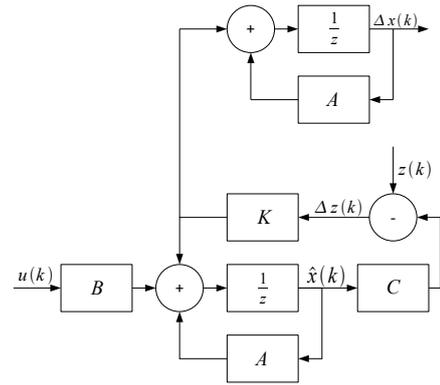


Abbildung 2: Zustandsschätzer mit Ausgang zur Berechnung des unkorrigierten Modells

dar. Δx gibt zu jedem Zeitpunkt k die Abweichung zwischen einem korrigierten Modell, wie es sich in einem Sensor befindet, und einem unkorrigierten Modell, wie es in einem Aktor ist, an. Wenn diese Größe mit einem Schwellwert verglichen wird, so kann daraus ein Ereignis generiert werden, welches die Datenübertragung startet, um die unkorrigierten Modelle mit dem korrigierten und daher optimal geschätzten Zustand zu überschreiben.

Dieser Mechanismus reduziert die Datenübertragung im Zeitbereich erheblich und erhöht auch die Robustheit bei Paketverlust, da der aktorseitige Prädiktor weiterarbeiten kann.

2.2 Datenfusion und Topologieoptimierung mit Hilfe der Gramschen Matrizen

Da unterschiedliche Knoten unterschiedliche Sichtweisen und Einwirkungen auf die Strecke haben können, muss die Information im nun folgenden Schritt sinnvoll fusioniert werden. Es zeigt sich, dass die Gramschen Matrizen als modellbasiertes Entwurfswerkzeug dazu benutzt werden können.

Die Gramsche Steuerbarkeitsmatrix \mathbf{W}_C und die Gramsche Beobachtbarkeitsmatrix \mathbf{W}_O haben folgende Eigenschaften: Der Rang der Matrizen steht für den beobachtbaren beziehungsweise steuerbaren Unterraum des Zustandsraums. Die Einträge der Matrizen hängen von der Systembeschreibung ab, das Produkt $\mathbf{W}_C \mathbf{W}_O$ ist jedoch davon unabhängig und für ein gegebenes System immer gleich. Für den Fall reduzierter Eingangs- oder Ausgangsmatrizen können die Gramschen Matrizen ebenfalls berechnet werden. Um den Einfluss eines einzelnen Aktors oder Sensors zu betrachten, wählt man die jeweilige Spalte j von \mathbf{B} (Aktor) oder Zeile i von \mathbf{C} (Sensor). Diese Gramschen Untermatrizen erfüllen folgende Beziehung, die sie mit den vollständigen in Zusammenhang bringen:

$$\mathbf{W}_O = \sum_{i=1}^p \mathbf{W}_{O,i}, \quad \mathbf{W}_C = \sum_{j=1}^m \mathbf{W}_{C,j} \quad (3)$$

Als Folge ist auch das Produkt der Summe aller Untermatrizen gleich dem Produkt der vollständigen Matrizen:

$$\mathbf{W}_C \mathbf{W}_O = \sum_{j=1}^m \mathbf{W}_{C,j} \sum_{i=1}^p \mathbf{W}_{O,i} \quad (4)$$

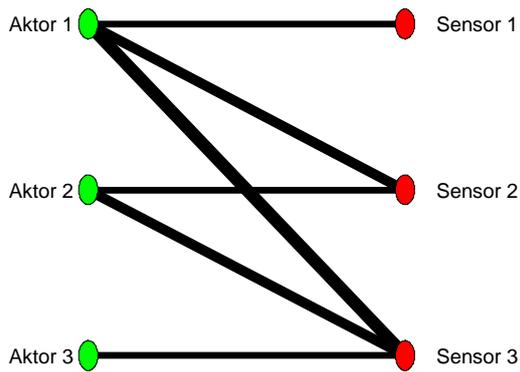


Abbildung 3: Darstellung von Paarungen zwischen Eingängen und Ausgängen. Die Dicke der Linie zeigt die Größe des Eintrags ϕ_{ij} der Matrix Φ .

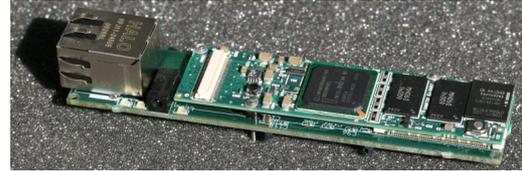


Abbildung 4: Gumstix mit Ethernet-Board.

2.2.1 Datenfusion

Die Gramschen Matrizen werden nun zur Datenfusion eingesetzt. Indem jeder Sensor seine Daten mit den Diagonalelementen seiner Beobachtbarkeitsmatrix vormultipliziert, wird eine Gewichtung vorgenommen, die der jeweiligen Sichtweise des Sensors auf das Gesamtsystem entspricht. Da dies in allen Sensoren geschieht und die Summe der Untermatrizen gleich der vollständigen Matrix ist, können so die Daten von verschiedenen Sensoren aufaddiert und anschließend mit der entsprechenden Inversen vormultipliziert werden, um so die Werte wieder auf die richtigen Größen zu skalieren. Diese Datenfusion findet in allen Aktorknoten statt. Um das asynchrone Eintreffen von Daten zu ermöglichen, werden bei der Fusion fehlende Sensordaten durch den aktuellen Modellwert ersetzt.

2.2.2 Topologieoptimierung

Zur Topologieoptimierung werden andere Eigenschaften benutzt. Die Quadratwurzeln der Eigenwerte von $\mathbf{W}_C \mathbf{W}_O$ werden *Hankel Singulärwerte* genannt. Je größer ein solcher Singulärwert ist, desto größer ist der Einfluss des zugehörigen Zustandes auf die Dynamik des Gesamtsystems. Dominante Eigenwerte können mit Hilfe der Matrix Φ berechnet werden, die die Einträge

$$\phi_{ij} = \frac{\text{trace}(\mathbf{W}_{C,j} \mathbf{W}_{O,i})}{\text{trace}(\mathbf{W}_C \mathbf{W}_O)} \quad (5)$$

besitzt. Je näher die normalisierten Werte bei Eins liegen, desto stärker ist die Verbindung zwischen einem Eingang und einem Ausgang. Je näher der Wert bei Null liegt, desto schwächer ist sie. Ein Wert identisch Null zeigt, dass es keine wirksame Verbindung zwischen einem Eingang und einem Ausgang gibt.

Die graphische Darstellung einer numerischen Simulation ist in Abbildung 3 zu sehen. Das System ist so modelliert, dass es keine Rückwirkung von höher indizierten auf niedriger indizierte Zustände gibt. Aus diesem Grund sind keine Verbindungen zwischen einem Sensor und einem höher indizierten Aktor vorhanden, da eine Beeinflussung durch diesen Aktor an einem solchen Sensor nicht sichtbar wird. Gleichzeitig ist die stärkste Verbindung die zwischen Sensor 3 und Aktor 1, da auf Grund der Eigenschaften des Systems am dritten Zustand die Beobachtbarkeit aller Zustände am stärksten ist und der Einfluss des ersten Aktors sich auf alle Zustände auswirkt.

2.3 Aufbau einer Werkzeugkette zum Rapid Control Prototyping

Der Real-Time-Workshop von Matlab/Simulink erzeugt aus beliebigen Simulink-Modellen compilierbaren C-Code. Als Zielhardware sind Gumstix (siehe Abbildung 4) vorgesehen. Sie basieren auf einem ARM7-Kern und sind modular erweiterbar. Für diese Controller ist jedoch kein Target unter Matlab verfügbar, so dass die Entwicklungsumgebungen des Real-Time-Workshop und der Gumstix zu einer durchgehenden Werkzeugkette verbunden werden müssen. Dazu ist es nötig, auf einem Entwicklungsrechner die entsprechenden Bibliotheken zur Verfügung zu stellen, C-Datei-Vorlagen zu erstellen und ein Makefile zu adaptieren. Da für Gumstix eine Cross-Compilierung von PC- auf ARM7-Hardware nötig ist, müssen auch hier die Vorgaben aus der Entwicklungsumgebung beachtet werden. Die fertige Werkzeugkette ermöglicht es nun, eine enge Verbindung zwischen der Simulationsumgebung unter Matlab/Simulink und der Testhardware herzustellen. Änderungen und Optimierungen, die am PC vorgenommen werden, können so innerhalb weniger Minuten auf den Gumstix getestet werden. Da auch einzelne Simulink-Blöcke getrennt in Code umgewandelt werden können, ist es so auch möglich, ein Gesamtsystem zu simulieren und anschließend daraus die Software für die jeweiligen Knoten zu generieren. Zusätzlich werden für erste Versuche Schnittstellen definiert, um eine Kommunikation über Ethernet zu ermöglichen.

2.4 Ausblick

Die bisherigen Arbeiten werden zu einem Gesamtkonzept einer verteilten Regelung zusammengefaßt. Ausgehend von einer zentralen Beschreibung des Systems und des darauf basierenden Reglerentwurfs wird der Zustandsraum mit Hilfe von Transformationsmatrizen in Unterräume abgebildet. Diese Matrizen enthält man durch eine Analyse aus der Systembeschreibung. Analog dazu kann nun das Systemmodell und der Regler ebenfalls in die jeweiligen Unterräume transformiert werden. Die Konzepte der ereignisdiskreten Kommunikation und der Optimierung mit Hilfe der Gramschen Matrizen werden dabei übernommen.

Der so verteilte Regelkreis bietet Skalierbarkeit, Robustheit und eine einfache Möglichkeit Redundanzen aufzubauen. Diese Eigenschaften sollen mit Hilfe von Demonstratoren (Wassermodelle, verteilte und koordinierte Bewegung, intelligente Aktorik) belegt werden.

2.5 Zusammenarbeit

Herr Rottmann hat mit Hilfe der Methode des Reinforcement Learnings eine Höhenregelung des Blimps entworfen. Als Vergleich habe ich einen Regler klassisch auf Basis von Modellierung, Systemanalyse und entsprechenden Entwurfsverfahren dimensioniert. Die Nichtlinearität in der Aktorik des Systems hat sich dabei auf die Erzeugung der Stellgrößen ausgewirkt.

Die Modellierung erfolgte zunächst physikalisch als Blockschaltbild in Matlab/Simulink. Die Analyse und der Entwurf der Regelung wurden dort simuliert und anschließend mit guter Übereinstimmung am System getestet. Das so geregelte System diente dann als Vergleich zum Reinforcement Learning in [1].

Literatur

- [1] A. Rottmann, C. Plagemann, P. Hilgers, and W. Burgard. "Autonomous blimp control using model-free reinforcement learning in a continuous state and action space". In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. San Diego, CA, USA, 2007, pp. 1895–1900.