

373-00
November 2000

Implizite Modellierung und Simulation geschalteter kontinuierlicher Dynamik und diskreter Steuerungen

P.J. Mosterman

Vortrag
KONDISK-Kolloquium beim 3. SPP-Kolloquium

DLR Oberpfaffenhofen
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Robotik & Mechatronik
Entwurfsorientierte Regelungstechnik
D-82234 Wessling



Implizite Modellierung und Simulation geschalteter kontinuierlicher Dynamik und diskreter Steuerungen

Pieter J. Mosterman
Institut für Robotik und Mechatronik
DLR Oberpfaffenhofen



Hybride Modelle

Kontinuierlicher Teil

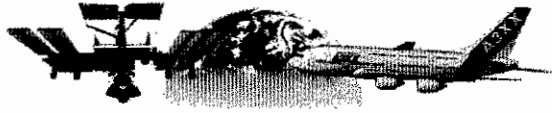
- ▶ makroskopisch physikalisches Verhalten

Diskreter Teil

- ▶ Steuerung
 - hochentwickelte Modellbildungsformalismen (z.B., höhere Petri Netze)
- ▶ Modellabstraktionen
 - komplexe Interaktion zwischen kontinuierlichen und (meist kleinen) diskreten Modellteilen

Zum Beispiel: Flugzeughöhenruderredundanzverwaltung

- ▶ kontinuierliche Dynamik der Aerodynamik, Antriebe, usw.
- ▶ diskrete Steuerung der Redundanzverwaltung



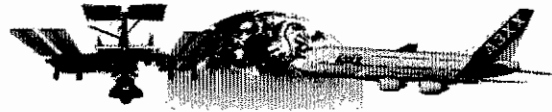
Integration

Grafische Formalismen

- ▶ Objektdiagramme für physikalische Struktur
- ▶ Statecharts, Petri Netze, usw. für Steuerungsverhalten

Rechenmodelle (Girault, Lee, and Lee, 1999)

- ▶ Differential- und algebraische Gleichungen für physikalisches Verhalten
- ▶ synchrone Gleichungen, CSP, endliche Automaten, usw. für Steuerung



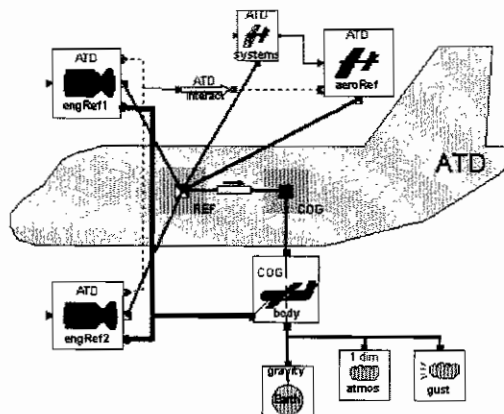
Objektdiagramme

Grundelemente

- ▶ Objekte
- ▶ Ports

Verknüpfungen

- ▶ Energiefluß
- ▶ Signalfuß





Graphische Darstellung als Objektdiagramm

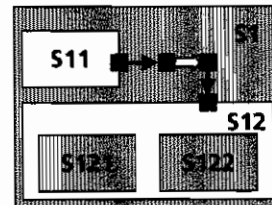
Petri Netze dargestellt als Objektdiagramm

- ▶ Platz und Übergang als Objekte
- ▶ Portbasierte Kommunikation



Statecharts dargestellt als Objektdiagramm

- ▶ Zustände als Objekte
- ▶ Übergänge als Objekte
- ▶ Anordnung impliziert Verhalten und Interaktion
 - nicht völlig portbasiert



Gleichungsbasiertes Rechenmodell

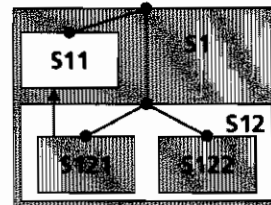
Petri Netze (Mosterman, Elmqvist und Otter, 1998)

- ▶ jede Kommunikation über zwei Variablen



Statecharts (Manuel Remelhe)

- ▶ Duplex-Kommunikation ist Grundlage
- ▶ Statechart Hierarchie als Baum aufbauen
 - direkte Übergänge
- ▶ History
 - H
 - H*





Ein Flugzeugmodell

Verwendete Formalismen

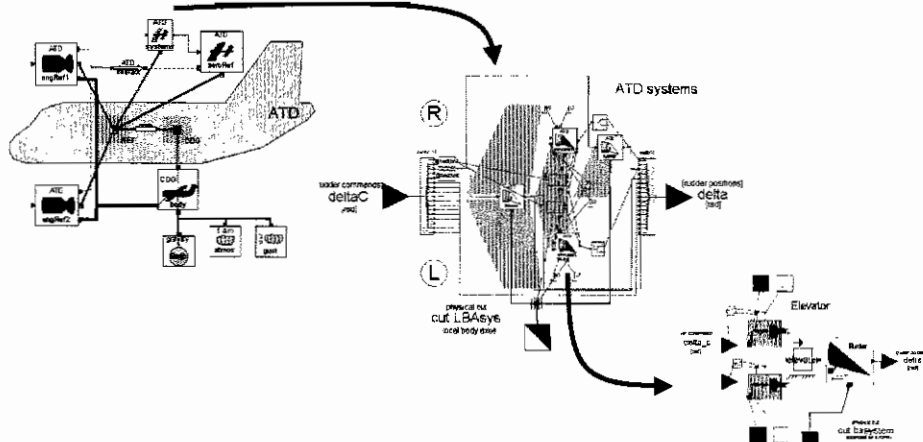
- ▶ physikalischer Teil mit Objektdiagrammen basierend auf DLR-Flugdynamikbibliothek (Dieter Moormann)
- ▶ diskrete Steuerung mit objektdiagrammbasierten Statecharts

Dimensionen

- ▶ 13725 Gleichungen und Unbekannte, 9316 zeitabhängige Variable
- ▶ 18 kontinuierliche Zustände
- ▶ mehr als 1679616 (6⁸ in Redundanzverwaltung) diskrete Zustände
- ▶ gesamter C-Code über 2.2 MB, 37.605 Zeilen



Kontinuierliches Modell

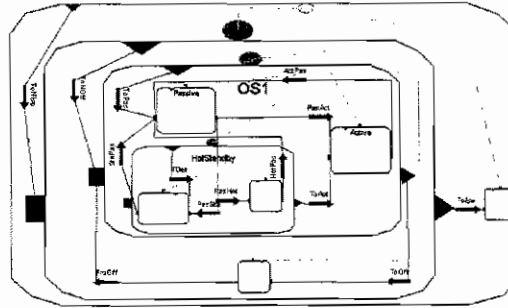




Diskretes Modell

Statechart als Objektdiagramm

- ▶ Acht Instanzen
- ▶ PFCU1, PFCU2
 - LIO
 - RIO
 - LDL, direkter Link
 - RDL, direkter Link



Verknüpfungen

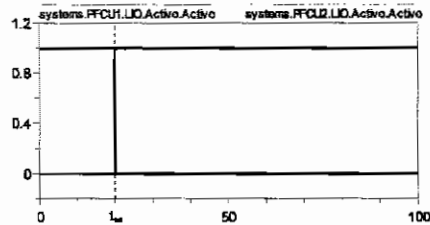
- ▶ $PFCU2.LIO.PasAct.TransCond = \text{not } PFCU1.LIO.HotStandby \text{ and not } PFCU1.LIO.Active$
and not $PFCU2.LDL.HotStandby$ and not $PFCU2.LDL.Active$ and not
 $PFCU1.LDL.HotStandby$ and not $PFCU1.LDL.Active$ or $PFCU2.RIO.Active$;



Systemverifikation bei vernachlässigter Aktuatordynamik

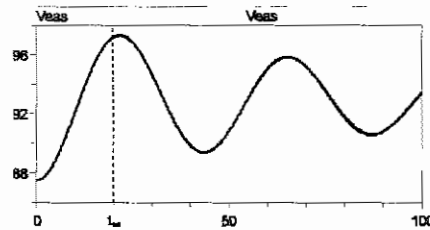
Öldruck zu niedrig

- ▶ Aktuatorschaltvorgang
- ▶ gewünschter Aktuator wird aktiv geschaltet



kein wesentlicher Einfluß auf die Dynamik

- ▶ mehr Modelldetails benötigt

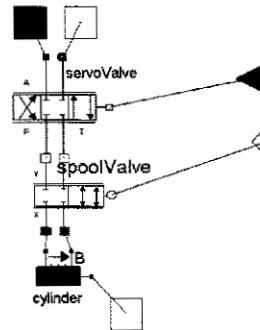




Ausführliches Modell

Aktuatordynamik modellieren

- Masse des Höhenruders
- Servo- und Schaltventile
 - Leckströme
- Hydraulik
 - Dynamik (z.B., 'orifices')
 - Viskosität und Kompressibilität des Öles



Führt auf schnelle Zeitkonstanten und ein steifes System

Entfernen schneller Dynamikanteile führt auf ein hybrides System

- vernachlässigte Parameter können großen Effekt auf Verhalten haben (Mosterman und Biswas, 1998)



Hybrides Modell

Vernachlässigung schneller Dynamik (z.B., 'singular perturbation')

- Viskosität
- Kompressibilität

Führt auf Sprünge in den Zustandsvariablen

- explizite Neuinitialisierung erfordert eine Vielzahl aufwändiger Berechnungen
- bei impliziter Neuinitialisierung werden die Sprünge automatisch berechnet
 - einfach die Viskosität und Kompressibilität weglassen
 - möglichst zusätzliche Bedingungen einführen (vgl., Newton's Stoßgesetz, $\Delta v = -\varepsilon \Delta v$)
 - erfordert ein System mit höherem Index



Generell

Systeme mit höherem Index umfassen Sprünge (Verghese, Levy und Kailath, 1981)

Das Gleichungssystem wird numerisch auf eine Pseudo- (Weierstraß-) Normalform geführt

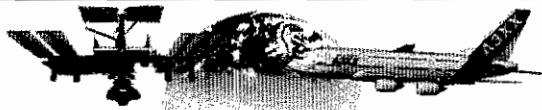
$$\begin{bmatrix} E_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_{22,12} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_{i,1} \\ \dot{x}_{i,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12,1} & A_{12,2} \\ 0 & A_{22,11} & A_{22,12} \\ 0 & 0 & A_{22,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ x_{i,1} \\ x_{i,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_{2,1} \\ B_{2,2} \end{bmatrix} u = 0$$

nach Integration über ein infinitesimales Intervall

$$x_f = x_f^- - E_{11}^{-1} A_{12,1} A_{22,11}^{-1} E_{22,12} (x_{i,2} - x_{i,2}^-)$$

$$x_{i,1} = A_{22,11}^{-1} (-B_{2,1} u + E_{22,12} \dot{x}_{i,2}) - A_{22,12} x_{i,2}$$

$$x_{i,2} = -A_{22,22}^{-1} B_{2,2} u$$

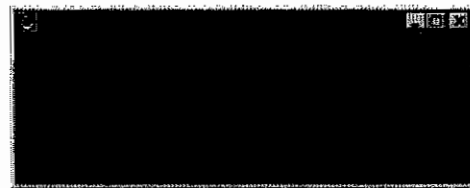
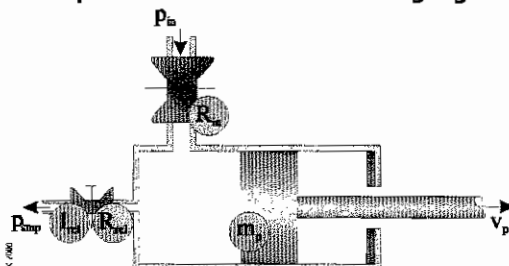


Implementierung

Implementiert in einem neuen Simulator

- ▶ mit Hilfe von Lapack und 8LAS Routinen (Dekompositionroutine von Andras Varga)
- ▶ verwendet die neue DSblock 4.0 Schnittstelle (Martin Otter)

Beispiel: Simulation der Schaltvorgänge in einem Hydraulikzylinder





DLR



Zusammenfassung und Ausblick

Objektdiagramme

- physikalische Strukturmodelle
- diskrete Verhaltensmodelle, Petri Netze und Statecharts
- portbasierte Kommunikation erfordert eine explizite Baumstruktur

Diskrete Abläufe können mit simultanen Gleichungen implementiert werden

- erlaubt Integration mit differential/algebraischen Gleichungssystemen
- Einschränkungen (z.B. History schwer zu implementieren)

Mehr Flexibilität möglich wenn ein Metamodellbildungsansatz verwendet wird

Das Rechenmodell der 'Algorithmen' in Modelica™ ist besser geeignet für die Implementierung von Statecharts (Remelhe, Otter, Engell, Mosterman, 2000)

KOMEN 2001

Institut für Robotik und Mechatronik

15



DLR



Zusammenfassung

Objektdiagramme

- physikalische Strukturmodelle
- diskrete Verhaltensmodelle, Petri Netze und Statecharts
- portbasierte Kommunikation erfordert eine explizite Baumstruktur

Diskrete Abläufe können mit simultanen Gleichungen implementiert werden

- erlaubt Integration mit differential/algebraischen Gleichungssystemen
- Einschränkungen (z.B., History schwer zu implementieren)

Schnelle Dynamikanteile führen auf ein steifes System

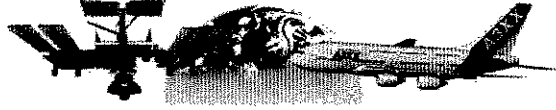
Entfernen hat ein hybrides System zur Folge

- Sprünge in Zustandsvariablen
- Konzept für Neuinitialisierung der Zustandsvariablen

KOMEN 2001

Institut für Robotik und Mechatronik

16



Ausblick

Mehr Flexibilität möglich wenn ein Metamodellbildungsansatz verwendet wird

Das Rechenmodell der 'Algorithmen' in Modelica™ ist besser geeignet für die Implementierung von Statecharts (Remelhe, Otter, Engell, Mosterman, 2000)

Der neue Simulator verwendet DSblock 4.0 Schnittstelle

- **Modelica Modelle werden nach DSblock 3.3 übersetzt**
- **Schnittstelle erforderlich**