

# ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向

Tokyo Institute of Technology

「ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向」



2006年7月3日  
組込み・ハイブリッドシステム(EHS)フォーラム  
東京工業大学 藤田政之

Tokyo Institute of Technology

Fujiita Laboratory

Tokyo Institute of Technology

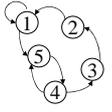
## ハイブリッドシステム研究の始まり

Hybrid Systems I ~ V 1991 ~ 1997

**計算機科学**

- T.A. Henzinger
- R. Alur
- A. Nerode
- ⋮

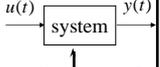
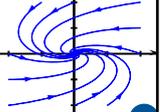
If A Then B



**制御理論**

- S. Sastry
- P. Antsaklis
- E.D. Sontag
- ⋮



論理オートマトン      ダイナミカルシステム

ハイブリッドシステム

Tokyo Institute of Technology

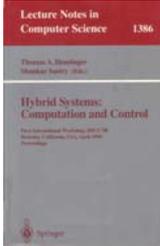
Fujiita Laboratory 2

Tokyo Institute of Technology

## Embedded Software(組込みソフトウェア)

**計算機科学**

- T.A. Henzinger
  - リアルタイムシステム
  - モデル検査
  - ハイブリッドオートマトンの検証
    - HyTech
- Embedded Software 2001 ~ (EMSOFT)
- Hybrid Systems: Computation and Control 1998 ~ 現在 (HSCC)
- P. Antsaklis
  - Proceedings of the IEEE, Special Issue 2000年7月号



Tokyo Institute of Technology

Fujiita Laboratory 3

Tokyo Institute of Technology

## ハイブリッドシステムの制御

**制御理論**

IEEE Transactions on Automatic Control  
Special Issue 1998年4月号

- P. Antsaklis
- A. Nerode




SICE 計測と制御 1999年3月号  
ミニ特集「ハイブリッドなシステムの制御」

Tokyo Institute of Technology

Fujiita Laboratory 4

Tokyo Institute of Technology

## ハイブリッドシステムの制御

- S. Sastry with J. Lygeros, C. Tomlin, G.J. Pappas ... (U.C.Berkeley)  
モデリング, シミュレーション, 解析, 検証
- M.S. Branicky and S.K. Mitter (MIT)  
安定性, 最適制御
- M. Morari with A. Bemporad, F. Borrelli, P. Grieder ... (ETH)  
モデル予測制御
- ハイブリッドシステム制御の応用例  
S. Sastry
  - Automated Highway System (AHS)
  - Air Traffic Management System (ATM)
  - Uninhabited Aerial Vehicles (UAV)
- M. Morari
  - Automotive Application
  - Process Application





California PATH project  
R. Murray, Future Directions in Control in an Information-Rich World, 2003.  
MARS project, Penn.Univ.

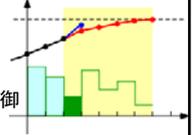
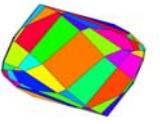
Tokyo Institute of Technology

Fujiita Laboratory 5

Tokyo Institute of Technology

## アウトライン

- ✓ 1. ハイブリッドシステム研究の始まり
- ✚ 2. ハイブリッドシステムのモデル予測制御
  - ハイブリッドシステムの表現
  - ハイブリッドシステムのモデル予測制御
  - 応用例
3. ハイブリッドシステム制御の展開

Tokyo Institute of Technology

Fujiita Laboratory 6

# ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向

## ハイブリッドシステムの表現

線形システムの表現 (状態方程式)

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) & \text{状態: } x(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) & \text{入力: } u(t) \\ & & \text{出力: } y(t) \end{aligned}$$

ハイブリッドシステムの表現

- ハイブリッドオートマトン
- ハイブリッドペトリネット
- Mixed Logical Dynamical(MLD)システム
- Piecewise Affine(PWA)システム**
- Linear Complementarity(LC)システム
- Extended Linear Complementarity(ELC)システム
- Max-Min-Puls-Scaling(MMPS)システム

## ハイブリッドシステムとは

人間が介在して、人間の勘、度胸(決断)、経験に左右されるシステム

川口忠雄, 制御理論適用の実際, システムと制御チュートリアル講座制御工学へのガイド・ライン, 日本自動制御協会編, 1985.

貝塚洋, 原川哲美, 山岸健太郎, 鉄鋼プロセスにおけるホロン型ハイブリッドシステム, 計測と制御, vol. 26, no. 1, 1987.

藤田, 2000年; 井村

## 命題計算(propositional calculus)

命題論理(propositional logic)

Tyler and Morari, Automatica 1999

if **A** then **B** 定性的な表現

[事実] 命題論理  $[f(x) \leq 0] \leftrightarrow [\delta = 1]$   $\delta$ : 0-1変数

$[f(x) \leq 0] \leftrightarrow [\delta = 1]$  が真  $\Leftrightarrow \begin{cases} f(x) \leq M(1-\delta) \\ f(x) \geq \varepsilon + (m-\varepsilon)\delta \end{cases}$

$M = \max_{x \in Z} f(x), m = \min_{x \in Z} f(x)$   
 $\varepsilon$ : 小さい正の数

命題論理  $\Leftrightarrow$  混合整数計画問題

## 真理値表による証明

$[f(x) \leq 0] \leftrightarrow [\delta = 1]$  が真  $\Leftrightarrow \begin{cases} f(x) \leq M(1-\delta) \\ f(x) \geq \varepsilon + (m-\varepsilon)\delta \end{cases}$

$[f(x) \leq 0]$	$[\delta = 1]$	$[f(x) \leq 0] \leftrightarrow [\delta = 1]$
偽	偽	真
偽	真	偽
真	偽	偽
真	真	真

$\Rightarrow [f(x) \leq 0] \leftrightarrow [\delta = 1]$  が真となる条件の下で  $\begin{cases} f(x) \leq M(1-\delta) \\ f(x) \geq \varepsilon + (m-\varepsilon)\delta \end{cases}$  が成立する

$\Leftarrow f(x) \leq M(1-\delta)$  が成立しているにも関わらず  $f(x) \geq \varepsilon + (m-\varepsilon)\delta$  が偽は矛盾を示す(背理法)

## 例題: ハイブリッドシステム

領域ごとにダイナミクスが切り替わるハイブリッドシステム

$$x(t+1) = \begin{cases} 0.8x(t) + u(t) & \text{if } x(t) \geq 0 \\ -0.8x(t) + u(t) & \text{if } x(t) < 0 \end{cases}$$

拘束条件  $-10 \leq x(t) \leq 10$   
 $-1 \leq u(t) \leq 1$

## 例題: MLDシステム表現

$$x(t+1) = \begin{cases} 0.8x(t) + u(t) & \text{if } x(t) \geq 0 \\ -0.8x(t) + u(t) & \text{if } x(t) < 0 \end{cases}$$

命題論理

$$x(t+1) = -0.8x(t) + u(t) + 1.6z(t)$$

$$\begin{bmatrix} 10 \\ -10 - \varepsilon \\ -10 \\ -10 \\ 10 \\ 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} z(t) \leq \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 10 \\ -\varepsilon \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 1 \end{bmatrix}$$

# ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向

## Mixed Logical Dynamical System

Tokyo Institute of Technology

(MLD)

$$x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_1u(t) + D_2\delta(t) + D_3z(t)$$

$$E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5$$

- 0-1変数:  $\delta \in \{0,1\}^r$
- 補助変数:  $z \in R^c$
- 混合整数不等式

Bemporad and Morari, Automatica 1999

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 13

## 例題: Piecewise Affine System

Tokyo Institute of Technology

入力飽和を持つシステム

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{sat}(u(t))$$

状態フィードバック

$$u(t) = -\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 2 \end{bmatrix} x(t)$$

入力制約

$$\text{sat}(u) = \begin{cases} 1 & u \geq 1 \\ u & -1 \leq u \leq 1 \\ -1 & u \leq -1 \end{cases}$$

$X_1: x(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$   
 $X_2: x(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -1/2 & -1/2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$   
 $X_3: x(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 14

## Piecewise Affine System

Tokyo Institute of Technology

(PWA) Piecewise Affine System

$$x_{t+1} = A_i x_t + B_i u_t + f_i$$

$$y_t = C_i x_t + D_i u_t + g_i$$

if  $\begin{bmatrix} x_t \\ u_t \end{bmatrix} \in P_i$

- 非線形要素の存在による動特性の変化

Sontag, T-AC 1981  
 Johansson and Rantzer, T-AC 1998  
 Rantzer and Johansson, T-AC 2000  
 Johansson, Springer-Verlag, 2003

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 15

## ハイブリッドシステム表現の等価性

Tokyo Institute of Technology

Heemels, Schutter, and Bemporad, Automatica 2001

- Mixed Logical Dynamical(MLD)システム
- Piecewise Affine(PWA)システム
- Linear Complementarity(LC)システム
- Extended Linear Complementarity(ELC)システム
- Max-Min-Puls-Scaling(MMPS)システム

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 16

## HYSDEL & hys2pwa

Tokyo Institute of Technology

ハイブリッドシステム

線形ダイナミクス, オートマトン, If-then-else 規則, 命題論理

HYbrid System DEscription Language (HYSDEL) ver.2.0.5  
<http://control.ee.ethz.ch/~hybrid/hysdel/>

Mixed Logical Dynamical (MLD) システム

$$x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t)$$

$$E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5$$

Piecewise Affine (PWA) Plugin: hys2pwa 1.1.3  
[hys2pwa http://control.ee.ethz.ch/~hybrid/hysdel/hysdel.msql](http://control.ee.ethz.ch/~hybrid/hysdel/hysdel.msql)

Piecewise Affine (PWA)システム

$$x(t+1) = A_i x(t) + B_i u(t) + f_i$$

if  $\begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \in P_i$

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 17

## 例題: HYSDEL

Tokyo Institute of Technology

5段ギヤシステム

位置  $p(t+1) = p(t) + T_s v(t)$   
 速度  $v(t+1) = f(t)$   
 ギヤに依存して離散的に変化

```

IMPLEMENTATION
SYSTEM car[
INTERFACE[
STATE[
REAL position [-1000, 1000];
REAL speed [-50*1000/3600, 220*1000/3600]
INPUT[
REAL torque [-300,300];
REAL F_brake [0,9000];
REAL slope [0, 1];
CONTINUOUS[
BOOL gear1, gear2, gear3, gear4, gear5, gearR; ]
OUTPUT[
REAL position_y, speed_y, w_y; ]
PARAMETER[
REAL mass = 1020;
REAL Ts = 0.5;
REAL g = 9.8;
REAL beta_friction = 25;
REAL Rgear1 = 3.7272;
REAL Rgear2 = 2.048; ]
}
}
    
```

コンパイル

Mixed Logical Dynamical (MLD) システム

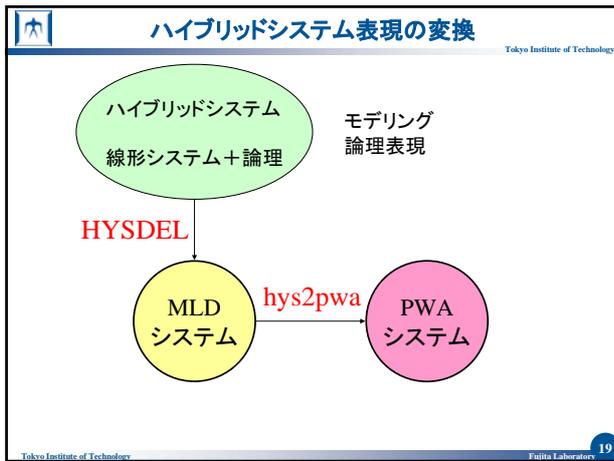
$$x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_1u(t) + D_2\delta(t) + D_3z(t)$$

$$E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5$$

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 18

# ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向



### アウトライン

1. ハイブリッドシステム研究の始まり
2. ハイブリッドシステムのモデル予測制御
  - ハイブリッドシステムの表現
  - ハイブリッドシステムのモデル予測制御
  - 応用例
3. ハイブリッドシステムの展開

### 線形離散時間システムのモデル予測制御

モデル予測制御

- 拘束
- 故障
- プランニング
- スケジューリング

状態

制御入力

目標値

ホライゾン

1. 時刻  $t$  において、時間区間(ホライゾン)  $N$  の最適化問題を解く
2. 最適入力の最初の要素をシステムに入力する

つぎの時刻  $t+1$  で1, 2を繰り返す

### 線形離散時間システムの最適制御

状態方程式

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

最適制御問題

$$\min_{\{u_0, \dots, u_{N-1}\}} \sum_{k=0}^{N-1} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)) + x^T(N)Px(N)$$

線形システムに対し、評価関数  $J$  を最小にする制御問題

最適レギュレータ(LQR)

$$u(t) = Kx(t)$$

$P(t)$ : リカッチ方程式の解

$$K = -(R + B^T P(t+1)B)^{-1} B^T P(t+1)A$$

### 拘束を有する線形離散時間システムの最適制御

状態方程式

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

拘束条件

$$x_{\min} \leq x(t) \leq x_{\max}$$

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$$

最適制御問題

$$\min_{\{u_0, \dots, u_{N-1}\}} \sum_{k=0}^{N-1} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)) + x^T(N)Px(N)$$

マルチパラメトリック計画問題

マルチパラメトリック計画問題の最適解は、区分的アファインな状態フィードバックで与えられる

状態  $x(t)$  をパラメータとする陽な形の(Explicit) 制御則

$$u(t) = K_i x(t) + h_i \quad \text{if } x \in X_i$$

A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, and E. Pistikopoulos (Automatica, 2002)

### Multi-Parametric Toolbox

Multi-Parametric Toolbox (MPT) ver. 2.61

スイス連邦工科大 IfA  
URL <http://control.ee.ethz.ch/~mpt/>

数理計画問題

- 線形計画問題 (Linear Programming)
- 2次計画問題 (Quadratic Programming)
- 混合整数計画問題 (Mixed Integer Programming)

→ マルチパラメトリック計画問題 (Multi-Parametric Programming)

オフライン計算で最適解が得られる

# ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向

**例題: マルチパラメトリック計画法を用いた最適制御**

線形システム

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} 0.7326 & -0.0861 \\ 0.1722 & 0.999 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0.0609 \\ 0.0064 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1.4142 \end{bmatrix} x(t)$$

拘束条件:  $-2 \leq u(t) \leq 2$

最適制御問題

$$\min_{\{u_t, u_{t+1}\}} \sum_{k=0}^1 x_{t+k}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_{t+k} + 0.01 u_{t+k}^2 + x_{t+2}^T \begin{bmatrix} 3.0485 & -2.5055 \\ -2.5055 & 12.9916 \end{bmatrix} x_{t+2}$$

**例題: マルチパラメトリック計画法を用いた最適制御**

$u(t) =$

- Region 1  $[-5.9220 \quad -6.883]x$
- Region 2,3,4  $2.0000$
- Region 5,7,8  $-2.0000$
- Region 6  $[-6.5159 \quad -4.6953]x + 0.6423$
- Region 9  $[-6.5159 \quad -4.6953]x - 0.6423$

状態フィードバック  $u(t) = Kx(t)$

区分的アフィンな状態フィードバック  $u(t) = K_i x(t) + h_i \quad \text{if } x \in X_i$

拘束条件:  $-2 \leq u(t) \leq 2$

**例題: システムの応答 (初期値  $x_0 = [1 \ 1]^T$ )**

**ハイブリッドシステムのモデル予測制御**

区分的アフィン(線形)システム  $x(t+1) = A_i x(t) + B_i u(t) + f_i \quad \text{if } \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \in D_i, i \in I$

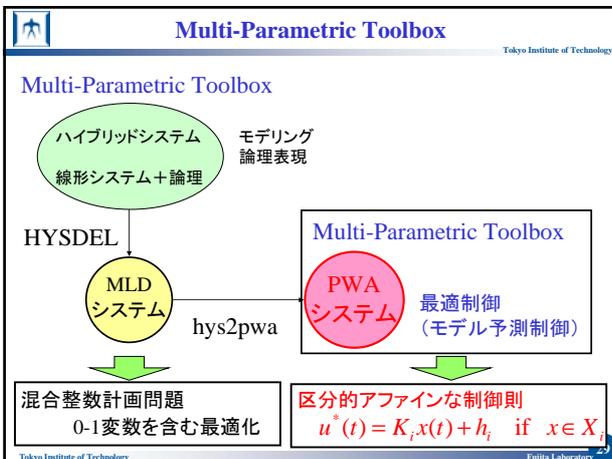
拘束条件  $\begin{cases} x(t) \in X, \quad \forall k \in \{1, \dots, N\} \\ u(t) \in U, \quad \forall k \in \{1, \dots, N-1\} \\ x(N) \in X_{set} \end{cases}$

有限時間最適制御問題 (モデル予測制御問題)

$$J_N^*(x(0)) = \min_{u_0, \dots, u_{N-1}} \sum_{k=0}^{N-1} (\|Qx(k)\|_l + \|Ru(k)\|_l) + \|Q_f x(N)\|_l$$

状態  $x(t)$  をパラメータとする陽な形の (Explicit) 制御則  $u(t) = K_i x(t) + h_i \quad \text{if } x \in X_i$

A. Bemporad, F. Borrelli and M. Morari, (CDC, 2000)  
 F. Borrelli, M. Baotic, A. Bemporad and M. Morari (ACC, 2003)  
 M. Baotic, F.J. Christophersen and M. Morari (ECC, 2003)



**ハイブリッドシステムのモデル予測制御**

MLDシステム

$$x_{t+k|t} = Ax_{t+k|t} + B_1 u_{t+k|t} + B_2 \delta_{t+k|t} + B_3 z_{t+k|t}$$

$$y_{t+k|t} = Cx_{t+k|t} + D_1 u_{t+k|t} + D_2 \delta_{t+k|t} + D_3 z_{t+k|t}$$

$$E_2 \delta_{t+k|t} + E_3 z_{t+k|t} \leq E_4 u_{t+k|t} + E_5 x_{t+k|t} + E_5$$

拘束条件  $\begin{cases} x_{t+N|t} = x_e \\ x_{\min} \leq x_{t+k|t} \leq x_{\max} \\ u_{\min} \leq u_{t+k|t} \leq u_{\max} \end{cases}$

混合整数計画問題 (Mixed Integer Programming)

$$\min_{\{u_t, \dots, u_{t+N-1}\}} J(v_0^{T-1}, x(t)) := \sum_{k=0}^{T-1} (\|Q_1(v(k) - u_e)\|_\infty + \|Q_2(\delta(k|t) - \delta_e)\|_\infty + \|Q_3(z(k|t) - z_e)\|_\infty + \|Q_4(x(k|t) - x_e)\|_\infty + \|Q_5(y(k|t) - y_e)\|_\infty)$$

最適解  $\{u_t, \dots, u_{t+N-1}\}$  の最初の要素を入力として適用する

Bemporad and Morari, Automatica 1999

# ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向

**Example** Tokyo Institute of Technology

区分的線形システム

$$x(t+1) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 0.2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) & \text{if } [1 \ 0]x(t) \leq 0 \\ \begin{bmatrix} 0.5 & 0.2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } [-1 \ 0]x(t) \leq 0 \end{cases}$$

$$y(t) = \begin{cases} [1 \ 0]x(t) + [0]u(t) + [0] & \text{if } [1 \ 0]x(t) \leq 0 \\ [1 \ 0]x(t) + [0]u(t) + [0] & \text{if } [-1 \ 0]x(t) \leq 0 \end{cases}$$

制御問題

$$\min_{u_0, \dots, u_4} \sum_{k=0}^5 \left\| \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_k \right\|_2 + \|u_k\|_2 \quad \text{Subject to } -10 \leq y(t) \leq 10$$

$$-1 \leq u(t) \leq 1$$

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 31

**Example** Tokyo Institute of Technology

区分的線形システム

$$x(t+1) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 0.2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) & \text{if } [1 \ 0]x(t) \leq 0 \\ \begin{bmatrix} 0.5 & 0.2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } [-1 \ 0]x(t) \leq 0 \end{cases}$$

$$-10 \leq y(t) \leq 10 \quad -1 \leq u(t) \leq 1$$

システムの記述1

```
sysStruct.A{1}=[1 0.2; 0 1];
sysStruct.B{1}=[0;1];
sysStruct.f{1}=[0;0];
sysStruct.A{2}=[0.5 0.2; 0 1];
sysStruct.B{2}=[0;1];
sysStruct.f{2}=[0.5;0];
```

システムの記述2

```
sysStruct.ymin=-10;
sysStruct.ymax=10;
sysStruct.umin=-1;
sysStruct.umax=1;
```

システムの記述3

```
sysStruct.guardX{1}=[1 0];
sysStruct.guardC{1}=[0];
```

出力に関する定義

構造体 sysStruct

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 32

**Example** Tokyo Institute of Technology

最適制御問題

$$\min_{u_0, \dots, u_4} \sum_{k=0}^5 \left\| \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_k \right\|_2 + \|u_k\|_2$$

最適制御問題の記述

```
probStruct.norm=2;
probStruct.Q=eye(2);
probStruct.R=1;
probStruct.N=5;
probStruct.xObunds=0;
probStruct.subopt_lev=1;
```

構造体 probStruct

システム 問題

```
sysStruct
probStruct
```

最適制御問題を解く

```
[ctrlStruct]=mpt_Control(sysStruct,probStruct);
```

構造体 ctrlStruct

$$U_N^*(x(0)) = F_N x(0) + G_N \quad \text{if } x(0) \in P_N = \{x \in R^n \mid H_N x \leq K_N\}$$

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 33

**Example** Tokyo Institute of Technology

領域を描く

```
mpt_plotPartition(ctrlStruct)
```

Controller partition with 243 regions.

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 34

**Example** Tokyo Institute of Technology

243の領域

Closed-Loop Trajectory for initial state [7.8975, -4.9488]

複雑度の軽減, 近似最適解の構成  
P. Grieder et al., Automatica, 2005

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 35

**Example** Tokyo Institute of Technology

応用例

ETH(Zurich)のグループ

Traction Control

Electronic throttle

Smart Damping Materials

Tokyo Institute of Technology Fujita Laboratory 36

# ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向

## アウトライン

- ✓ 1. ハイブリッドシステム研究の始まり
- ✚ 2. ハイブリッドシステムのモデル予測制御
  - ハイブリッドシステムの表現
  - ハイブリッドシステムのモデル予測制御
  - 応用例
3. ハイブリッドシステム制御の展開

Tokyo Institute of Technology  
Fujiita Laboratory 37

## 応用例

### 車のTraction Control

車のモデル

$$\dot{\omega}_e = \frac{1}{J_e} \left( \tau_c - b_e \omega_e - \frac{\tau_f}{g_r} \right)$$

$$\dot{v}_v = \frac{\tau_t}{m, \gamma_t}$$

$\omega_e$ : エンジンスピード     $v_v$ : 車のスピード  
 $b_e$ : エンジンの弾性係数     $\tau_f$ : 摩擦力  
 $J_e$ : 慣性モーメント     $g_r$ :  
 $\tau_c$ : 燃焼トルク     $\gamma_t$ : タイヤの半径  
 $\tau_d$ : 燃焼トルク目標値     $m_v$ : 車の質量

サンプリング時間  $T_s = 20ms$  で離散化

F. Borrelli, A. Bemporad, M. Fodor and D. Hrovat, "An MPC/Hybrid System Approach to Traction Control", IEEE Trans. On Cont. Sys. Tech., Vol. 14, No. 3, pp. 341-352, May, 2006

Tokyo Institute of Technology  
Fujiita Laboratory 38

## 応用例

### 車のTraction Control

時間遅れ

$$\tau_c = \tau_d(t - \tau_f)$$

スリップ

$$\Delta\omega = \frac{v_v - \omega_e}{\gamma_t g_r}$$

$\tau_f$ : 燃料供給にかかる時間

$\Delta\omega$ : Wheel slip

摩擦力のモデル

$$\tau_t(\Delta\omega, \mu) = \begin{cases} 67.53\Delta\omega + 102.26\mu - 31.59 & \text{if } 0.21\Delta\omega - 5.37\mu \leq -0.61 \\ -1.85\Delta\omega + 1858.3\mu - 232.51 & \text{if } 0.21\Delta\omega - 5.37\mu > -0.61 \end{cases}$$

拘束

$$\tau_c \leq 176 Nm \quad \Delta\omega \geq 0$$

$$\tau_c \geq -20 Nm \quad \dot{\tau}_c \approx \frac{\tau(k+1) - \tau(k)}{T} \leq 2000 Nm/s$$

F. Borrelli, A. Bemporad, M. Fodor and D. Hrovat, "An MPC/Hybrid System Approach to Traction Control", IEEE Trans. On Cont. Sys. Tech., Vol. 14, No. 3, pp. 341-352, May, 2006

Tokyo Institute of Technology  
Fujiita Laboratory 39

## 応用例

### HYSDEL (一部)

```

SYSTEM FordCar {
    INTERFACE {
        /* Description of variables and constants */
        STATE {
            REAL taotold;
            REAL we;
            REAL vv;
        }
        INPUT {
            REAL deltataot;
        }
        OUTPUT {
            REAL deltawe;
        }
    }
    PARAMETER {
        /* Region of the PWA linearization */
        /* ar * mu + br * deltaw <= cr */
        REAL ar = -5.3781;
        REAL br = 53.127 / 250;
        REAL cr = -0.61532;
        /* other parameters */
        REAL deltawmax = 400;
        REAL deltawmin = -400;
        REAL zwemax = 1000;
        REAL zwemin = -100;
        REAL zvmax = 80;
        REAL zvmin = -100;
        REAL gr = 13.89;
        REAL rt = 0.298;
        REAL mu = 0.2;
        REAL e = 1e-6;
    }
}
    
```

Tokyo Institute of Technology  
Fujiita Laboratory 40

## 応用例

### HYSDEL (一部)

摩擦力

$$\tau_t(\Delta\omega, \mu) = \begin{cases} 67.53\Delta\omega + 102.26\mu - 31.59 & \text{if } 0.21\Delta\omega - 5.37\mu \leq -0.61 \\ -1.85\Delta\omega + 1858.3\mu - 232.51 & \text{if } 0.21\Delta\omega - 5.37\mu > -0.61 \end{cases}$$

```

IMPLEMENTATION {
    AUX {
        REAL zwe, zvv;
        BOOL region;
    }
    AD {
        /* PWA Domain */
        region = ar * ((we / gr) - (vv / rt)) + br * mu - cr <= 0
        /* region = ((we/gr) - (vv/rt)) - 1.6 <= 0 */
        [deltawmin, deltawmax, e];
    }
    DA {
        zwe = {
            IF region THEN a11a * we + a12a * vv + b12a * mu + f1a [zwemin, zwemax, e]
            ELSE a11b * we + a12b * vv + b12b * mu + f1b [zwemin, zwemax, e];
        }
        zvv = {
            IF region THEN a21a * we + a22a * vv + b22a * mu + f2a [zvmin, zvmax, e]
            ELSE a21b * we + a22b * vv + b22b * mu + f2b [zvmin, zvmax, e];
        }
    }
}
    
```

Tokyo Institute of Technology  
Fujiita Laboratory 41

## 応用例

### HYSDEL (一部)

#### モデルの記述

```

CONTINUOUS {
    taotold = deltataot;
    we = zwe + b11a * taotold + b11a * deltataot;
    vv = zvv + b21a * taotold + b21a * deltataot;
}
OUTPUT {
    deltawe = (we/gr) - (vv/rt);
}
    
```

#### 拘束の記述

```

MUST {
    deltataot <= 2000;
    taotold <= 176;
    -taotold <= 20;
    ((we/gr) - (vv/rt)) >= 0;
}
    
```

Tokyo Institute of Technology  
Fujiita Laboratory 42

# ハイブリッドシステム制御に関連した最近の動向

### 応用例

Tokyo Institute of Technology

車のTraction Control  
 コントローラの生成 (むだ時間は考慮しない)

評価関数  

$$\min_V \sum_{k=0}^{T-1} (|Q(\Delta\omega_k - \Delta\omega_d(t))| + |R\Delta\tau_c|)$$

$$V := [\Delta\tau_{c,0}, \dots, \Delta\tau_{c,T-1}]^T$$

$$\Delta\tau_{c,k} = \tau_{c,k} - \tau_{c,k-1}$$

$T = 4$   
 $Q = 50$   
 $R = 1$

入力の差を生成  
 積分器を陽に組み込み、  
 定常偏差を0へ

F. Borrelli, A. Bemporad, M. Fodor and D. Hrovat, "An MPC/Hybrid System Approach to Traction Control" IEEE Trans. On Cont. Sys. Tech., Vol. 14, No. 3, pp. 341-352, May, 2006

43 Fujita Laboratory

### アウトライン

Tokyo Institute of Technology

1. ハイブリッドシステム研究の始まり
2. ハイブリッドシステムのモデル予測制御
  - ハイブリッドシステムの表現
  - ハイブリッドシステムのモデル予測制御
  - 応用例
3. ハイブリッドシステム制御の展開

44 Fujita Laboratory

### ハイブリッドシステム制御の新展開

Tokyo Institute of Technology

ハイブリッドシステム制御の新展開

HSCC 2006 Invited talk

- P. R. Kumar  
制御・計算・通信の融合
- F. Bullo  
ロボットネットワークの協調制御

ACC 2006 Plenary Lecture

- S. Sastry  
Control of **Networked Embedded Systems**  
: Sensor Webs and Beyond

Design Wave Magazine July, 2006 CQ出版社

<http://www.path.berkeley.edu/PATH/Publications/Videos/>

45 Fujita Laboratory

### ハイブリッドシステム制御の新展開

Tokyo Institute of Technology

ハイブリッドシステム制御の新展開

- P. Antsaklis
  - **Networked Embedded Sensing and Control** 2005
  - Proceedings of the IEEE  
Special Issue 2006年12月号 (出版予定)

<http://decision.csl.uiuc.edu/~testbed/>

46 Fujita Laboratory

### ハイブリッドシステム制御の新展開

Tokyo Institute of Technology

ハイブリッドシステム制御の新展開

**Networked Embedded Hybrid Sensing & Control**

S&T E

47 Fujita Laboratory