



電気学会 産業応用部門 メカトロニクス制御技術委員会
精密サーボ／実世界ハプティクス／モーションコントロール
名古屋工業大学（名古屋市），2015 年 12 月 2 日

実時間最適化による非線形機械システムの モデル予測制御

京都大学大学院情報学研究科
システム科学専攻

大塚 敏之

ohtsuka@i.kyoto-u.ac.jp

1

アウトライン

2

アウトライン

- ▶ 最適制御の基礎
最適制御問題，停留条件
- ▶ 非線形モデル予測制御
モデル予測制御とは？ 特徴
- ▶ 実時間最適化
問題の性質を利用 → 時間変化する解の追跡
→ 効率的なアルゴリズム
- ▶ 応用事例
2 リンクアーム，ホバークラフト，船舶ほか
- ▶ 自動コード生成
数式処理による C プログラムの自動生成

最適制御の基礎

3

アウトライン

- ▶ 最適制御の基礎
最適制御問題，停留条件
- ▶ 非線形モデル予測制御
モデル予測制御とは？ 特徴
- ▶ 実時間最適化
問題の性質を利用 → 時間変化する解の追跡
→ 効率的なアルゴリズム
- ▶ 応用事例
2 リンクアーム，ホバークラフト，船舶ほか
- ▶ 自動コード生成
数式処理による C プログラムの自動生成

最適制御の基礎

4

最適制御問題

与えられた動的システムの数学モデルと拘束条件の下で，評価関数を 最小 にする制御入力を求めよ．

例

- ▶ ロケットを地球から小惑星へ飛ばすとき，所要時間または消費燃料を 最小 にせよ．ただし，推力の大きさには制限がある．
- ▶ 自動車がカーブを曲がるときの所要時間を 最小 にせよ．ただし，ステアリング角，駆動・制動力，タイヤ摩擦力には制限がある．
- ▶ エンジンが始動して目標回転数に達するまでの時間を 最小 にせよ．ただし，スロットル開度，燃料噴射量，排出ガス成分には制限がある．

最適制御問題

与えられた動的システムの数学モデルと拘束条件の下で、評価関数を最小にする制御入力を求めよ。

最も基本的な問題設定（終端時刻 T 固定，終端状態 $x(T)$ 自由）

状態方程式： $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$ （数学モデル）

初期状態： $x(0) = x_0$ (given)

評価関数： $J = \varphi(x(T)) + \int_0^T L(x(t), u(t)) dt$

拘束条件： $C(x(t), u(t)) = 0$

$x(t)$: 状態ベクトル, $u(t)$: 入力ベクトル

▶ 不等式拘束 $C \leq 0$ の場合： $C + v^2 = 0$ (v : ダミー入力)

▶ 評価関数 J は，関数 u の関数： **汎関数**

停留条件：オイラー・ラグランジュ方程式

$$\dot{x} = f(x, u), \quad x(0) = x_0,$$

$$\dot{\lambda} = - \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^T (x, u, \lambda, \mu), \quad \lambda(T) = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^T (x(T)),$$

$$\frac{\partial H}{\partial u}(x, u, \lambda, \mu) = 0,$$

$$C(x, u) = 0.$$

ハミルトニアン： $H(x, u, \lambda, \mu) = L(x, u) + \lambda^T f(x, u) + \mu^T C(x, u)$,

共状態（随伴変数）： λ , ラグランジュ乗数： μ

▶ 初期状態と終端共状態が与えられている **2点境界値問題**

→ 数値解法（反復法）の計算量が多い。[Animation]

アウトライン

▶ 最適制御の基礎

最適制御問題，停留条件

▶ 非線形モデル予測制御

モデル予測制御とは？ 特徴

▶ 実時間最適化

問題の性質を利用 → 時間変化する解の追跡

→ 効率的なアルゴリズム

▶ 応用事例

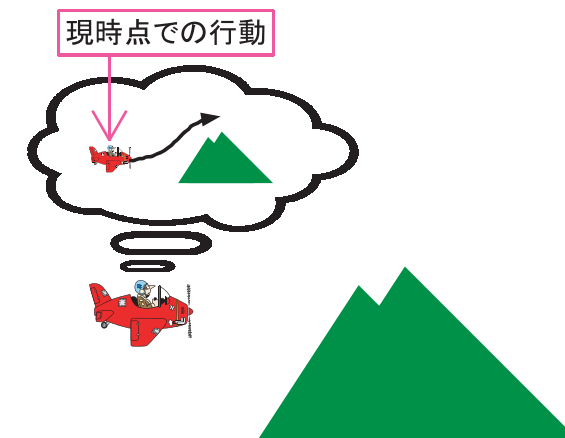
2リンクアーム，ホバークラフト，船舶ほか

▶ 自動コード生成

数式処理によるCプログラムの自動生成

モデル予測制御とは？

有限時間未来までの動きを**実時間で予測・最適化**して，現在の動かし方を決める。
Model Predictive Control (MPC)



モデル予測制御とは？

有限時間未来までの動きを**実時間で予測・最適化**して、現在の動かし方を決める。
Model Predictive Control (MPC)

現時点での行動



制御入力決定のための最適化

状態方程式： $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$

評価関数： $J = \varphi(x(t+T)) + \int_t^{t+T} L(x(\tau), u(\tau)) d\tau$

拘束条件： $C(x(t), u(t)) = 0$

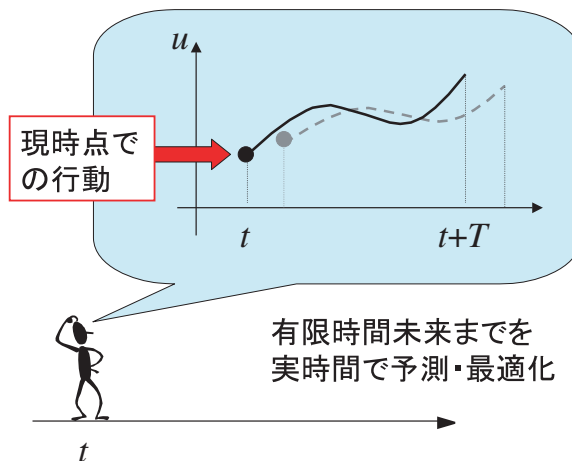
▶ 不等式拘束 $C \leq 0$ の場合： $C + v^2 = 0$ (v : ダミー入力)

▶ 各時刻において、 $x(t)$ を「初期状態」とする最適制御

$u_{opt}(\tau; t, x(t))$ ($t \leq \tau \leq t+T$) を求め、その「初期値」のみを実際の制御入力とする。

$u(t) = u_{opt}(t; t, x(t))$... 状態フィードバック制御

モデル予測制御の特徴（１）



移動する評価区間 → **Receding Horizon 制御**とも呼ばれる。

recede ... 後退する、遠ざかる

モデル予測制御の特徴（２）

▶ 評価区間が**有限**

- 評価区間を離散化した数値計算に適する。
- 閉ループ系の安定性は必ずしも保証されないが、評価関数や拘束条件によって多様な問題を扱える。

▶ 評価区間が**移動**

- 時不変な状態フィードバック制御が得られる。
- 有限で固定された評価区間だと、有限時間で制御が終了。

▶ **実時間最適化アルゴリズム**が必要

- オンラインでの最適化：勾配法のような反復法は非効率。
- オフラインでの最適化：システムが高次元だと記憶量が膨大。

アウトライン

➤ 最適制御の基礎

最適制御問題, 停留条件

➤ 非線形モデル予測制御

モデル予測制御とは? 特徴

➤ 実時間最適化

問題の性質を利用 → 時間変化する解の追跡
→ 効率的なアルゴリズム

➤ 応用事例

2リンクアーム, ホバークラフト, 船舶ほか

➤ 自動コード生成

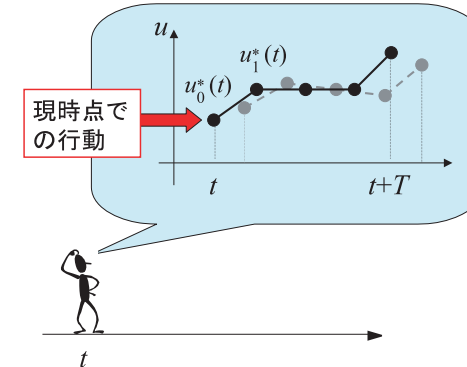
数式処理によるCプログラムの自動生成

数値解法のための離散近似

時刻 t から T だけ未来までの制御, 状態方程式, 評価関数を離散近似.

未知量 $U(t) = [u_0^{*T}(t), \mu_0^{*T}(t), u_1^{*T}(t), \mu_1^{*T}(t), \dots, u_{N-1}^{*T}(t), \mu_{N-1}^{*T}(t)]^T$.
実際の入力 $u(t) = u_0^*(t)$, 拘束条件 $C = 0$ のラグランジュ乗数 μ_i^* .

✎ 離散化の刻み $\Delta\tau \neq$ 制御周期 Δt . → 柔軟な設定



離散近似された問題

評価関数: $J(U(t), (t), t) = \varphi(x_N^*(t)) + \sum_{i=0}^{N-1} L(x_i^*(t), u_i^*(t))\Delta\tau$

停留条件:

$$x_0^*(t) = x(t)$$

$$x_{i+1}^*(t) = x_i^*(t) + f(x_i^*(t), u_i^*(t))\Delta\tau$$

$$\lambda_N^*(t) = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^T(x_N^*(t))$$

$$\lambda_i^*(t) = \lambda_{i+1}^*(t) + \left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^T(x_i^*(t), u_i^*(t), \lambda_{i+1}^*(t), \mu_i^*(t))\Delta\tau$$

$$\frac{\partial H}{\partial u}(x_i^*(t), u_i^*(t), \lambda_{i+1}^*(t), \mu_i^*(t)) = 0$$

$$C(x_i^*(t), u_i^*(t)) = 0$$

ハミルトニアン: $H(x, \lambda, u, \mu) = L + \lambda^T f + \mu^T C$

➤ 状態 $x_i^*(t)$, 共状態 $\lambda_i^*(t)$ は $U(t)$ と $x_0^*(t) = x(t)$ の関数.

入力系列の非線形代数方程式

非線形代数方程式:

$$F(U(t), x(t), t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial u}(x_0^*(t), u_0^*(t), \lambda_1^*(t), \mu_0^*(t)) \\ C(x_0^*(t), u_0^*(t)) \\ \vdots \\ \frac{\partial H}{\partial u}(x_{N-1}^*(t), u_{N-1}^*(t), \lambda_N^*(t), \mu_{N-1}^*(t)) \\ C(x_{N-1}^*(t), u_{N-1}^*(t)) \end{bmatrix} = 0$$

$$U(t) = [u_0^{*T}(t), \mu_0^{*T}(t), u_1^{*T}(t), \mu_1^{*T}(t), \dots, u_{N-1}^{*T}(t), \mu_{N-1}^{*T}(t)]^T$$

➤ ニュートン法: $F(U, x, t)$ が 0 になるよう U の修正を反復.

計算量が多く, 計算時間が反復回数に依存する.

反復法は実時間でフィードバック制御に適さない.

実時間最適化へのアプローチ

モデル予測制御の特徴：

問題が時刻や状態とともに滑らかに変化していく。

時間依存の非線形方程式 $F(U(t), x(t), t) = 0$

そこで：

問題の変化に応じた最適解の変化を正確に追跡できれば、反復解法は不要では？



連続変形法（ホモトピー法）

連続変形法を実時間で使うのがポイント。

連続変形法とは？

時刻 t に依存する未知量 $U(t)$ の方程式：
$$F(U(t), x(t), t) = 0$$

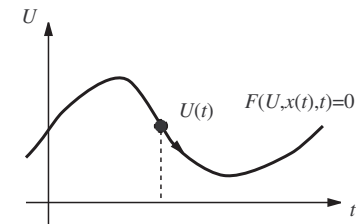
$$\Leftrightarrow \frac{d}{dt}F(U(t), x(t), t) = 0, \quad F(U(0), x(0), 0) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{d}{dt}F(U(t), x(t), t) = -\zeta F(U(t), x(t), t), \quad F(U(0), x(0), 0) = 0$$

▶ $\zeta > 0$ によって誤差 ($F \neq 0$) が減衰 ($F = 0$ の安定化)

$$\Leftrightarrow \dot{U} = \left(\frac{\partial F}{\partial U}\right)^{-1} \left(-\zeta F - \frac{\partial F}{\partial x} \dot{x} - \frac{\partial F}{\partial t}\right), \quad F(U(0), x(0), 0) = 0$$

▶ 反復計算なしに $\dot{U}(t)$ を数値積分して $U(t)$ が求められる。



Continuation/GMRES アルゴリズム

▶ 各時刻で状態 $x(t)$ を測定。

▶ $\dot{U}$ に関する連立 1 次方程式：
$$\frac{\partial F}{\partial U} \dot{U} = -\zeta F - \frac{\partial F}{\partial x} \dot{x} - \frac{\partial F}{\partial t}$$
 を解き、

$\dot{U}(t)$ を数値積分して $U(t)$ を更新：
$$U(t + \Delta t) = U(t) + \dot{U}(t) \Delta t$$

各時刻では、連立 1 次方程式を 1 回解くのみ、反復なし



連立 1 次方程式の効率的な解法である GMRES を適用

📌 評価区間の長さ T は 0 から一定値へ滑らかに増やす ($U(0)$ が簡単に求められる)。

実時間最適化の要点

(1) 解くべき問題：

最適化問題 → 入力系列に関する非線形方程式

(2) 連続変形法：

解の追跡 → 解の時間微分に関する連立 1 次方程式

(3) GMRES：

大規模連立 1 次方程式を効率良く解く

アウトライン

➤ 最適制御の基礎

最適制御問題, 停留条件

➤ 非線形モデル予測制御

モデル予測制御とは? 特徴

➤ 実時間最適化

問題の性質を利用 → 時間変化する解の追跡

→ 効率的なアルゴリズム

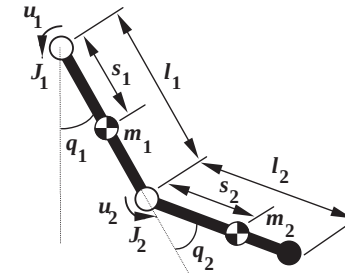
➤ 応用事例

2 リンクアーム, ホバークラフト, 船舶ほか

➤ 自動コード生成

数式処理による C プログラムの自動生成

応用 (1): 2 リンク・アームの振り上げ



状態ベクトル:

$$x = [q_1 \ q_2 \ \dot{q}_1 \ \dot{q}_2]^T$$

制御トルクのベクトル:

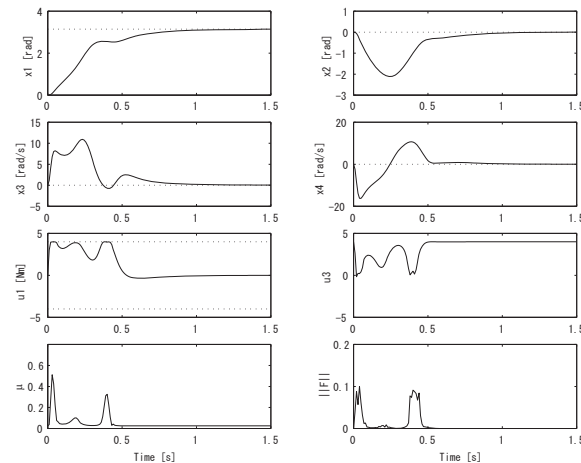
$$u = [u_1 \ u_2]^T$$

評価関数:

$$J = \frac{1}{2}(x(t+T) - x_f)^T S_f (x(t+T) - x_f) + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} ((x - x_f)^T Q (x - x_f) + u^T R u) d\tau$$

(大塚 '02; O. '04)

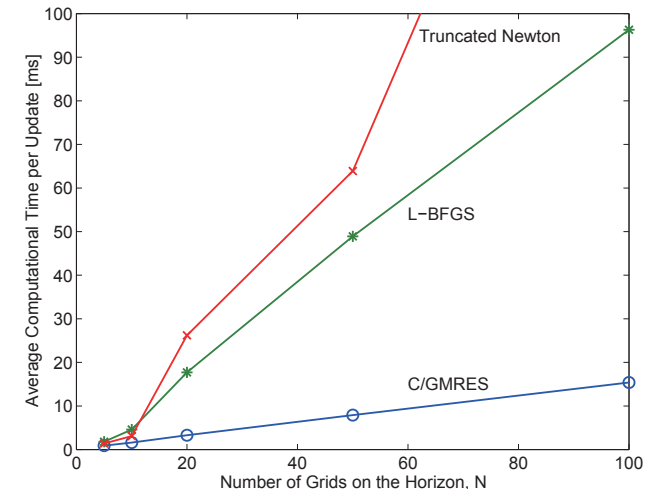
シミュレーション結果の例



拘束された肩関節トルク u_1 のみによる 2 リンク・アームの振り上げ: $|u_1| \leq u_{1max}$

[Animation 1: $|u_1| \leq 5$] [Animation 2: $|u_1| \leq 2.5$]

計算時間の比較



評価区間の分割数 N に対する制御入力更新の平均計算時間 [ms]

L-BFGS, Truncated Newton ... 汎用の反復解法

CPU: PentiumII 300 MHz, 評価区間 $T_f = 0.2$ [s], GMRES の反復 $k = 2$

応用（２）：ホバークラフトの位置制御



ホバークラフト模型：全長 356 [mm], 全幅 212 [mm], 全高 142 [mm], 質量 0.894 [kg]

(Seguchi, O. '03)

ホバークラフトのモデル予測制御

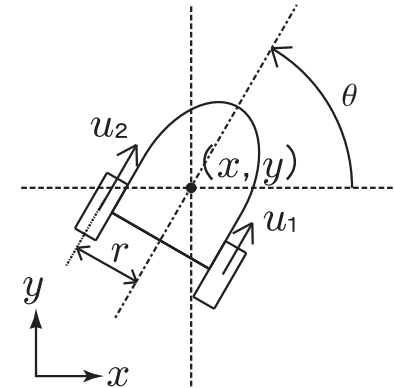
状態ベクトル：

$$\mathbf{x} = [x \ y \ \theta \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T \in \mathbf{R}^6$$

推力のベクトル：

$$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T \in \{u_{min}, 0, u_{max}\}^2$$

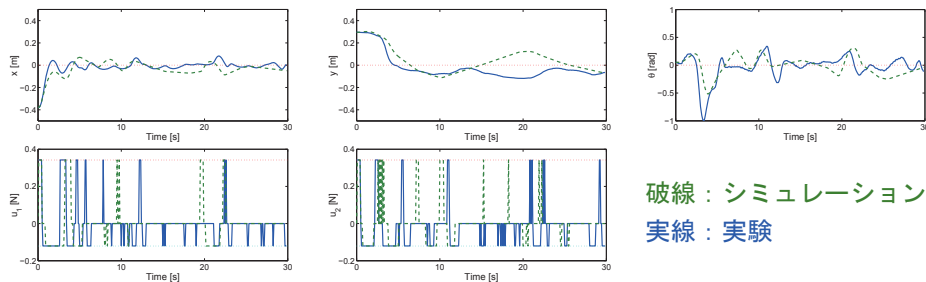
非ホロノミック + 離散値入力



評価関数：

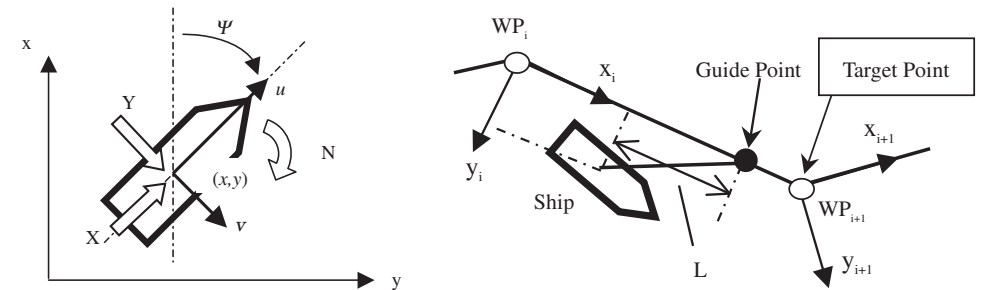
$$J = \frac{1}{2}(\mathbf{x}(t+T) - \mathbf{x}_f)^T S_f (\mathbf{x}(t+T) - \mathbf{x}_f) + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} ((\mathbf{x} - \mathbf{x}_f)^T Q (\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) + \mathbf{u}^T R \mathbf{u}) d\tau$$

シミュレーションと実験の結果



- 入力不等式拘束+小さい入力重み
→ 近似的にバンバン制御を計算 → 離散値入力を決定
 - CPU: Athlon 900 MHz, 評価区間 $T_f = 1$ [s],
サンプリング周期 1/120 [s] (位置計測用 CCD カメラの制約)
- [Movie 1: $\theta(0) = -\pi$] [Movie 2: $\theta(0) = \pi/2$] [Movie 3: disturbance]

応用（３）：自動操船システム



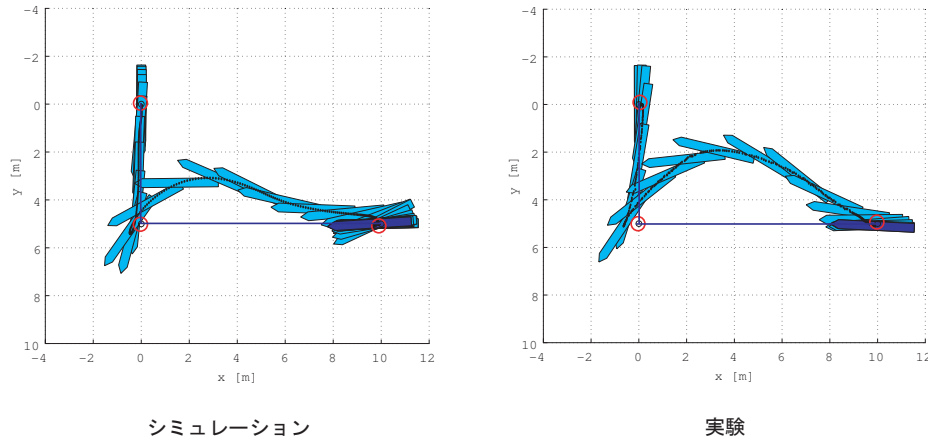
状態ベクトル： $\mathbf{x} = [x, u, y, v, \psi, r, X, Y, N]^T$

制御入力： $\mathbf{u} = [X_r, Y_r, N_r]^T$ (アクチュエータ指令値)

評価関数： $J = \frac{1}{2}(\mathbf{x}(t+T) - \mathbf{x}_{ref})^T S_f (\mathbf{x}(t+T) - \mathbf{x}_{ref}) + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} ((\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ref})^T Q (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ref}) + \mathbf{u}^T R \mathbf{u}) d\tau$

(河野ら '02, '08)

模型船試験結果



模型船：船長 3.5 [m], 船幅 0.59 [m], 質量 200 [kg] ; 制御周期 : 0.1 [sec], 評価区間 : 30 [sec]

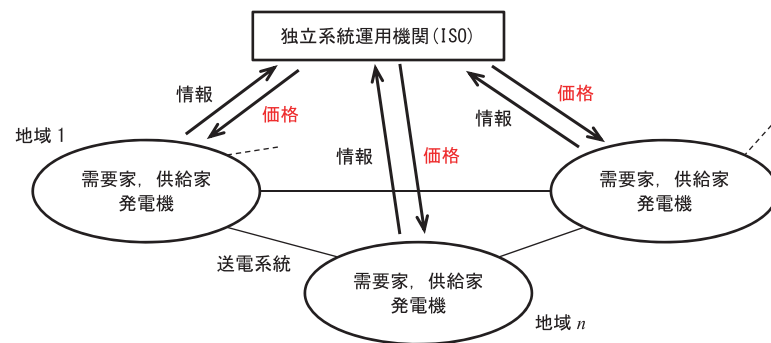
海洋工事作業船で実用化



電力ケーブル布設船 (90 × 30m, 喫水 3m) (河野ら '05, '08) [More]

応用 (4) : 電力需給の実時間価格制による制御

独立系統運用機関 (Independent System Operator; ISO) からの価格信号で電力の需要・供給を制御 ⇒ 負荷周波数を制御



➤ 需要家・供給家の経済行動と発電機・送電の物理現象が混在

(亀本ら '14)

n 地域電力系統モデル

➤ 需要家・供給家

- 自身の利益を最大化するように消費量 d , 供給量 s を決定
- 需要家の効用関数 $v(d)$, 供給家の費用関数 $c(s)$
- HEMS (Home Energy Management System) の高速な応答を想定

➤ 発電機

- 他地域と接続された非線形動揺方程式 (地域の平均モデル)

➤ 独立系統運用機関 (ISO)

- 各地域の電力価格 λ を決定
- 負荷周波数変動を整定, 需給を一致
- 需要家・供給家の総利益を最大化

ISO の評価関数

制御目的

- ▶ 発電機の相差角・相差角速度を 0 にする.
- ▶ 需給差を 0 にする.
- ▶ 社会の総利益を最大化する.

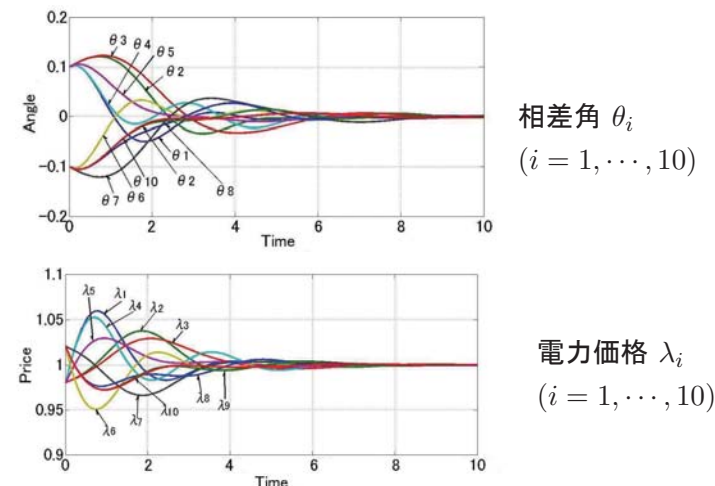
評価関数

$$J = \underbrace{x^T(t+T)Q_1x(t+T)}_{\text{発電機}} + \int_t^{t+T} \left(\underbrace{x^T(\tau)Q_2x(\tau)}_{\text{発電機}} + \sum_{i=1}^n \Phi_i(\lambda_i) \right) d\tau$$

$$\Phi_i = -r_1 \left(\underbrace{\lambda_i s_i - c_i(s_i)}_{\text{供給家の利益}} + \underbrace{v_i(d_i) - \lambda_i d_i}_{\text{需要家の利益}} \right) + r_2 \left(\underbrace{s_i - d_i}_{\text{需給の差}} \right)^2$$

$$v_i(d_i) = 2\sqrt{d_i}, \quad c_i(s_i) = s_i^2/2$$

10 地域のシミュレーション



制御入力更新の計算時間： 0.33 ms $\Rightarrow$ 実時間計算が可能

他の応用

- ▶ テザー衛星, ロボット, ヘリコプターの編隊飛行など
- ▶ 飛行機のオンライン飛行経路生成 (領域回避誘導則の飛行実証)



テザー衛星
(Okazaki, O. '06)



実験用航空機
MuPAL-α
(永塚ら '05, '06, '09)

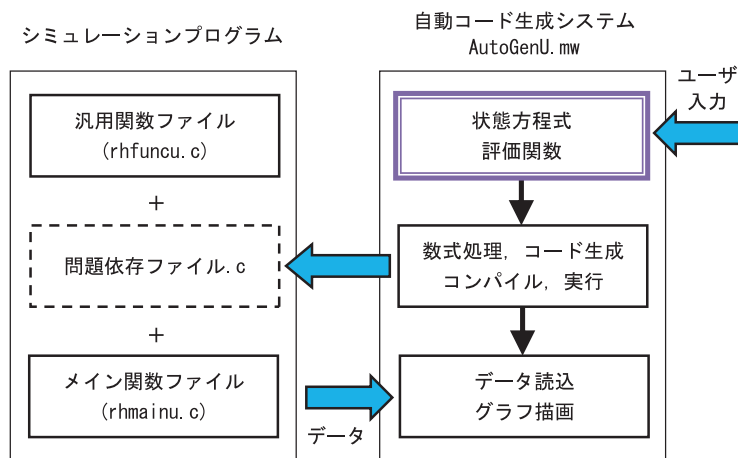
- ▶ 鋼板の冷間圧延における板厚・張力制御 (尾崎ら '10)
- ▶ 粒子加速器 (LHC) 超伝導磁石の温度制御 (Noga et al. '10, '11)
- ▶ 偏微分方程式で記述されるシステムの制御 (Hashimoto et al. '10, '12)
- ▶ 非線形 Moving Horizon 推定, Receding Horizon 微分ゲームなど

アウトライン

- ▶ 最適制御の基礎
最適制御問題, 停留条件
- ▶ 非線形モデル予測制御
モデル予測制御とは? 特徴
- ▶ 実時間最適化
問題の性質を利用 $\rightarrow$ 時間変化する解の追跡
 $\rightarrow$ 効率的なアルゴリズム
- ▶ 応用事例
2 リンクアーム, ホバークラフト, 船舶ほか
- ▶ 自動コード生成
数式処理による C プログラムの自動生成

数式処理による自動コード生成

- Maple の書式で与えた状態方程式や評価関数から、C 言語のシミュレーション・プログラムを自動生成（Mathematica 版もあり）



ワークシートへの入力

- 問題設定やシミュレーション条件をテキストボックスへ入力

状態方程式	<code>fxu</code>	<code><x[2], a * x[1] + b * x[2] * u[1]></code>
評価関数（被積分関数）	<code>L</code>	<code>(xv^%T.Q.xv)/2 + r[1]*u[1]^2/2 - r[2]*u[2]</code>
評価関数（終端コスト）	<code>phi</code>	<code>(xv^%T.Sf.xv)/2</code>

入力（状態方程式と評価関数の部分）

自動生成されたCソースファイル

```
void hufunc(double t, double x[], double lmd[], double u[], double hui[])
{
    double o[20];
    o[0] = u[1];
    o[1] = pow(o[0], 0.2e1);
    o[2] = 0.2e1 * o[1];
    .
    .
    .
    o[17] = lmd[1] * b * x[1];
    o[18] = -0.4e1 * o[6] - o[11] + 0.4e1 * o[15];
    o[19] = 0.1e1 / (o[1] * o[10] + (-o[18] + 0.4e1 * o[1]) * o[3]);
    hui[0] = ((o[5] * o[9] + o[17]) * o[2] + o[16] * o[14]
    + (o[6] * o[8] + (-o[1] - 3 * o[6]) * umax + o[12] * o[5]) * o[3]) * o[19];
    hui[1] = (o[18] * o[13] + ((o[4] + o[10]) * o[1] + o[9] * o[7] + (o[6] - o[15])
    * o[4] + (-4 * o[5] + 2 * umax) * o[17]) * o[0]) * o[19] / 2;
    hui[2] = -(o[9] * o[14] + (2 * o[14] + (-o[1] - o[6]) * o[9] - o[16] * o[17]
    + (o[7] + 2 * o[15] - o[12]) * o[3]) * o[3]) * o[19];
}
```

自動的に定義
された中間変数

Maple で生成されたコード

出力ファイル ($\partial H / \partial u$ に関する部分)

- コンパイルと実行、シミュレーション結果のグラフ描画もすべてワークシートから実行可能

自動コード生成システムの特長

- アルゴリズムを詳しく知らなくても使用できる。
→ 専門家でなくても**利用が容易**
- アルゴリズム中の煩雑な偏微分計算等を自動化できる。
→ プログラム開発**労力の大幅な低減**
- 繰り返し現れる計算式を自動的に中間変数で置き換える。
→ **効率的なコード**を生成
- 数式処理による状態方程式導出の結果を利用できる。
→ **複雑なシステムの扱いも容易**
- ハードウェア実装用プログラムへ容易に改造できる。
- ソースコードを**無料配布**。

まとめ

- モデル予測制御：各時刻で有限時間未来までの最適制御問題を解くフィードバック制御
- 時間とともに変化する解の追跡（連続変形法）によって，非線形モデル予測制御のための高速な実時間最適化が可能
- 推定や微分ゲームを含め実時間最適化の応用範囲は広い。
- 数式処理を用いた自動コード生成によって，複雑な問題でも容易にシミュレーションが行える。



http://www.symbal.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/index_j.htm

参考文献

43

- Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 21, No. 1, pp. 174–176 (1998)
- [13] T. Ohtsuka, “Quasi-Newton-Type Continuation Method for Nonlinear Receding Horizon Control,” *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 4, pp. 685–692 (2002)
- [14] T. Ohtsuka, “A Continuation/GMRES Method for Fast Computation of Nonlinear Receding Horizon Control,” *Automatica*, Vol. 40, No. 4, pp. 563–574 (2004)
- [15] Y. Shimizu, T. Ohtsuka, and M. Diehl, “A Real-Time Algorithm for Nonlinear Receding Horizon Control Using Multiple Shooting and Continuation/Krylov Method,” *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 19, No. 8, pp. 919–936 (2009)
- [16] 赤山慶太, 大塚敏之, “オフラインでの特異値分解に基づく拘束条件付き非線形 Receding Horizon 制御の実時間アルゴリズム,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 5, pp. 126–133 (2012)
- 応用：ホバークラフト, 船舶
- [17] H. Seguchi, and T. Ohtsuka, “Nonlinear Receding Horizon Control of an Underactuated Hovercraft,” *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 13, Nos. 3–4, pp. 381–398 (2003)
- [18] 浜松正典, 加賀谷博昭, 河野行伸, “非線形 Receding Horizon 制御の自動操船システムへの適用,” 計測自動制御学会論文誌, Vol. 44, No. 8, pp. 685–691 (2008)
- 応用：自動車
- [19] T. Kawabe, H. Nishira, and T. Ohtsuka, “An Optimal Path Generator Using a Receding Horizon Control Scheme for Intelligent Automobiles,” *Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Control Applications*, pp. 1597–1602 (2004)
- [20] 西羅光, 高木良貴, 出口欣高, “障害物回避システムの回避経路実時間最適化演算の設計,” 第 11 回 計測自動制御学会制御部門大会 CD-ROM, 講演番号 163-3-2 (2011)
- [21] M. Nanao, and T. Ohtsuka, “Vehicls Dynamics Control for Collision Avoidance Considering Physical Limitations,” *Proc. of SICE Annual Conf. 2011*, pp. 688–693 (2011)
- [22] M. A. S. Kamal, M. Mukai, J. Murata, and T. Kawabe, “Model Predictive Control of Vehicles on Urban Roads for Improved Fuel Economy,” *IEEE Trans. on Control Systems*

参考文献

最適制御全般

- [1] A. E. Bryson, Jr. and Y.-C. Ho, *Applied Optimal Control*, Hemisphere (1975)
- [2] J. T. Betts, *Practical Methods for Optimal Control Using Nonlinear Programming*, 2nd Ed., SIAM (2010)
- [3] 大塚敏之, 非線形最適制御入門, コロナ社 (2011)

モデル予測制御全般

- [4] J. M. Maciejowski 著, 足立修一, 管野政明 訳, モデル予測制御, 東京電機大学出版局 (2005)
- [5] L. Magni, D. M. Raimondo, and F. Allgöwer (Eds.), *Nonlinear Model Predictive Control: Towards New Challenging Applications*, Springer (2009)
- [6] J. B. Rawlings, and D. Q. Mayne, *Model Predictive Control: Theory and Design*, Nob Hill Publishing (2009)
- [7] 大塚敏之 編著, 実時間最適化による制御の実応用, コロナ社 (2015)

連続変形法と GMRES

- [8] S. L. Richter and R. A. DeCarlo, “Continuation Methods: Theory and Applications,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. AC-28, No. 6, pp. 660–665 (1983)
- [9] C. T. Kelley, *Iterative Methods for Linear and Nonlinear Equations*, SIAM (1995)
- [10] H. A. van der Vorst, *Iterative Krylov Methods for Large Linear Systems*, Cambridge University Press (2003)

実時間アルゴリズム

- [11] T. Ohtsuka, and H. A. Fujii, “Real-Time Optimization Algorithm for Nonlinear Receding-Horizon Control”, *Automatica*, Vol. 33, No. 6, pp. 1147–1154 (1997)
- [12] T. Ohtsuka, “Time-Variant Receding-Horizon Control of Nonlinear Systems”, *J. of*

参考文献

44

- Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 831–841 (2013)
- 応用：ロボット
- [23] J. Lee, and M. Yamakita, “Nonlinear Model Predictive Control for Constrained Mechanical Systems with State Jump,” *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Control Applications*, pp. 585–590 (2006)
- [24] T. Murao, H. Kawai, and M. Fujita, “Visual Motion Observer-based Stabilizing Receding Horizon Control via Image Space Navigation Function,” *Proc. of the 19th IEEE Int. Conf. on Control Applications*, pp. 1648–1653 (2010)
- 応用：航空宇宙
- [25] M. Okazaki, and T. Ohtsuka, “Switching Control for Guaranteeing the Safety of a Tethered Satellite,” *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 29, No. 4, pp. 822–830 (2006)
- [26] 永塚満, 穴戸紀彦, 増井和也, 富田博史, “耐故障飛行制御システム — 緊急領域回避制御,” 日本航空宇宙学会誌, Vol. 57, No. 669, pp. 285–287 (2009)
- [27] M. Saffarian, and F. Fahimi, “Non-Iterative Nonlinear Model Predictive Approach Applied to the Control of Helicopters’ Group Formation,” *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 57, pp. 749–757 (2009)
- 応用：鉄鋼, プロセス
- [28] 尾崎昂平, 大塚敏之, 藤本健治, 北村章, 中山万希志 “板厚可変な冷間圧延機における板厚と張力の非線形 Receding Horizon 制御,” 鉄と鋼, Vol. 96, No. 7, pp. 459–467 (2010)
- [29] M. Takekawa, J. Aoki, M. Nakaya, T. Ohtani, and T. Ohtsuka, “An Application of Nonlinear Model Predictive Control Using C/GMRES Method to a pH Neutralization Process,” *Proc. of SICE Annual Conf. 2010*, pp. 1494–1496 (2010)
- [30] R. Noga, T. Ohtsuka, C. de Prada, E. Blanco, and J. Casas, “Simulation Study on Application of Nonlinear Model Predictive Control to the Superfluid Helium Cryogenic Circuit,” *Reprints of the 18th IFAC World Congress*, pp. 3647–3652 (2011)

[31] T. Hashimoto, Y. Yoshioka, and T. Ohtsuka, “Receding Horizon Control for Hot Strip Mill Cooling Systems,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 18, No. 3, pp. 998–1005 (2013)

[32] 大角洗平, 大塚敏之, 平田光男, 塩谷政典, “粒子モデル予測制御による鋼板温度のばらつき制御,” 鉄と鋼, Vol. 99, No. 4, pp. 275–282 (2013)

他の問題設定

[33] 大塚敏之, 石谷雅宏, “非線形四輪車両モデルの Receding-Horizon 微分ゲーム,” 日本機械学会論文集 (C 編) , Vol. 66, No. 652, pp. 3962-3969 (2000)

[34] Y. Azuma, and T. Ohtsuka, “Receding Horizon Nash Game Approach for Distributed Nonlinear Control,” *Proc. of SICE Annual Conf. 2011*, pp. 380–384 (2011)

[35] T. Ohtsuka, and H. A. Fujii, “Nonlinear Receding-Horizon State Estimation by Real-Time Optimization Technique,” *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 4, pp. 863–870 (1996)

[36] T. Ohtsuka, “Nonlinear Receding-Horizon State Estimation with Unknown Disturbances,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 35, No. 10, pp. 1253–1260 (1999)

[37] T. Ohtsuka, and K. Ohata, “Hardware Experiment of Nonlinear Receding Horizon Adaptive Control,” *Proc. of the 38th IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 1232-1233 (1999)

[38] Y. Soneda, and T. Ohtsuka, “Nonlinear Moving Horizon State Estimation with Continuation/Generalized Minimum Residual Method,” *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 28, No. 5, pp. 878–884 (2005)

[39] K. Ohsumi, and T. Ohtsuka, “Particle Model Predictive Control for Probability Density Functions,” *Reprints of the 18th IFAC World Congress*, pp. 7993–7998 (2011)

[40] 櫻井優太, 大塚敏之, “外乱推定による連続時間モデル予測制御のオフセット補償,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 7, pp. 172–180 (2012)

[41] N. Fujii, and T. Ohtsuka, “Nonlinear Adaptive Model Predictive Control via Immersion and Invariance Stabilizability,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 10, pp. 281–288 (2012)

[42] T. Hashimoto, Y. Yoshioka, and T. Ohtsuka, “Receding Horizon Control with Numerical Solution for Nonlinear Parabolic Partial Differential Equations,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 58, No. 3, pp. 725–730 (2013)

[43] J. Marutani, and T. Ohtsuka, “A Real-Time Algorithm for Nonlinear Infinite Horizon Optimal Control by Time Axis Transformation Method,” *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 23, No. 17, 2013, pp. 1955–1971 (2013)

[44] F. Tahir, and T. Ohtsuka, “Tuning of Performance Index in Nonlinear Model Predictive Control by the Inverse Linear Quadratic Regulator Design Method,” *SICE J. of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 6, pp. 387–395 (2013)

自動コード生成

[45] T. Ohtsuka, and A. Kodama, “Automatic Code Generation System for Nonlinear Receding Horizon Control,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No. 7, pp. 617–623 (2002)

[46] T. Ohtsuka, AutoGenU, <http://www.symbal.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/code/index.j.htm>, (2000)

[47] 松永奈美, 石塚真一, 大塚敏之, “数式処理ツールによる非線形モデル予測制御の設計・シミュレーション環境の構築,” 第 56 回自動制御連合講演会, No. 908 (2013)

[48] <http://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=153555>