

動作モードを考慮した予測型アシスト制御の検討

A Design Method of Assist Control Law for Two Link Manipulator

○堀田 博司

(首都大学東京 システムデザイン研究科)

H. Hotta

(Tokyo Metropolitan Univ.)

Abstract

本稿は、上肢支援を目的としたロボットマニピュレータの制御法について提案する。人間機械協調系におけるロボット制御については、人間を制御の主体としている点、操作者が常にロボットと接触している点で産業用途とは異なる。そこで、これらの特徴を考慮し、操作者の動作モードに応じて制御則を切り替える予測制御系を構成する。

Key Word

モデル予測制御 (Model Predictive Control), 安全システム (Safety System), 人間機械協調系 (Human-machine Cooperative System)

1. はじめに

- 65歳以上高齢者の全人口に占める割合は増加していき、**2060年には40%に達する見込み**となっている。^[1]こうした少子高齢化社会においては特に**介護・福祉問題**が懸念され、健康な生活を送るために**ロボット技術を用いることによる介護支援**が期待されている。

少子高齢化社会が引き起こす諸問題

労働人口の減少

介護問題

✓ GDPの低下

✓ 介護施設、介助者の不足

✓ 市場委縮

✓ 一人暮らし高齢者の増加

人間協調型
ロボットによる
支援

- 上肢の運動障害は高齢者の発症が多い身体障害の一つである。従って本稿では、**上肢支援を想定したリハビリテーションロボット**を扱う。

そのため、ロボットの仕様については、水平方向に掛かる力に対して剛性の高い機構が望ましい。そこで、**平行リンク機構を有するロボットマニピュレータ** (Fig. 1) を制御対象として検討する。

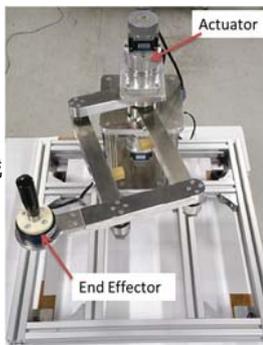


Fig. 1 平行リンクマニピュレータ

- リハビリテーションロボットなどの人間機械協調系におけるロボット制御は、以下の二点・人間を制御の中心に据える点・操作者が常にロボットと接触している点について産業用途とは異なる。^[2]そこで本稿では、これらの特徴を考慮し、**操作者の動作モードに応じて制御則を切り替える予測制御系**を構成することで、人間協調型メカトロニクスの安全システムを提案する。

2. 制御対象

【制御対象: 平行リンク2自由度マニピュレータ】

システムの状態 $x = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ 入力 $u = [\tau_0 \ \tau_1]^T$

状態空間モデル
 $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$,
 $y(t) = x(t)$

$A = T_1^{-1}T_2, B = T_1^{-1}T_3$

$T_1 = \begin{bmatrix} B_0 & I_0 & 0 & C_r \cos_0(k) \\ 0 & C_r \cos_0(k) & B_1 & I_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$T_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

$(\cos_0(k) = \cos(q_0 - q_1))$

parameter	Value
I_0 [kgm ²]	0.22
I_1 [kgm ²]	0.14
C_r [kgm ²]	-0.18
B_0 [Nms]	2.94
B_1 [Nms]	1.63
E_0 [Nm]	1.68
E_1 [Nm]	1.46

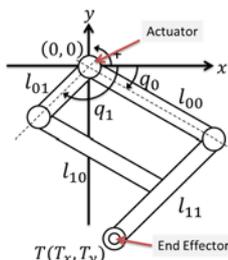


Fig. 2.1 制御対象

各動作点で離散化し、線形近似モデルを作成

離散モデル

$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k)$
 $y(k) = x(k)$

➢ 関節角度に関する制約 ➢ 制御入力に関する制約

$-3.2 \leq q_0 \leq 0.8$ [rad]
 $-3.7 \leq q_1 \leq 0.3$ [rad]
 $0.6 \leq q_0 - q_1 \leq 1.5$ [rad]

$|\tau_0| \leq 9.8$ [Nm]
 $|\tau_1| \leq 9.8$ [Nm]
 $|\delta\tau_0| \leq 0.15$ [Nm]
 $|\delta\tau_1| \leq 0.15$ [Nm]

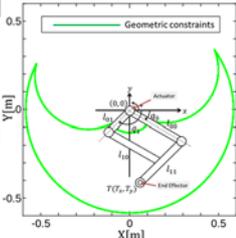


Fig. 2.2 可動域

操作者はEnd Effectorを握ることで、その操作力を力覚センサで測定しながらリハビリテーションを行うこととする。その際、次に示す予測制御系を用いて、ロボットは諸制約を満たしながら安全な軌道を生成する。

3. 制御系の構成

- 制御の目的
動作モードを考慮した制御則により、**警戒領域付近での挙動を切り替える**ことで、動作中の安全システムを構築する。

- モデル予測制御 (Model Predictive Control; MPC)^[3]

各時刻で**有限時間未来までの応答を最適化**して制御入力を決定するフィードバック制御手法

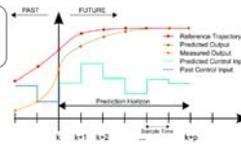


Fig. 3 モデル予測制御

- ✓ MPCの特徴

- ◆ 制約を考慮することが可能
- ◆ 逐次、最適化計算をおこなう
- ◆ 計算量が多い

評価関数

$$J(k) = \sum_{i=1}^{H_p} \|X(k+i|k) - T(k+i|k)\|_{Q_i}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta u(k)\|_{R_i}^2$$

- 時刻 k における未来の目標軌道 $T(k+i|k)$ の生成手法

- ① 制御対象の**手先に掛かる操作力** $F_p(k)$ をセンシング
- ② **操作力は時間で減衰**するものとし、予測ホライズン間における**操作力の減衰モデル** $F_p(k+i|k)$ を生成
- ③ 手先を**仮想的なマス**とし、操作力 $F_p(k+i|k)$ の負荷により**加速度**発生
- ④ 加速度の積分により、**速度・位置**を求め、**未来の目標軌道**とする

ある時刻 k における操作力を $F_p(k)$ とすると予測ホライズン間で以下のように**減衰特性**を持たせる

$$F_p(k+1|k) = F_p(k) * e^{-\frac{ts}{t_{ref}}}$$

$$F_p(k+2|k) = F_p(k) * e^{-2 * \frac{ts}{t_{ref}}}$$

$$\vdots$$

$$F_p(k+H_p|k) = F_p(k) * e^{-H_p * \frac{ts}{t_{ref}}}$$

発生する加速度:

$$\ddot{x}(k+i|k) = \frac{F_p(k+i|k)}{M}$$

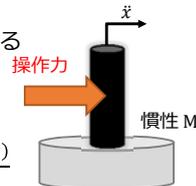


Fig. 4 End Effector

- 動作モード切替

ある時刻 k における目標軌道の y 成分 $T_y(k+\alpha+1|k)$ が **Safety Area** を越えたとき、その直前の $T_y(k+\alpha|k)$ に軌道修正する。

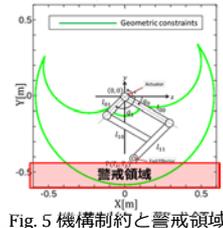


Fig. 5 機構制約と警戒領域

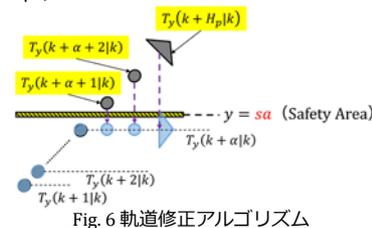


Fig. 6 軌道修正アルゴリズム

4. シミュレーション

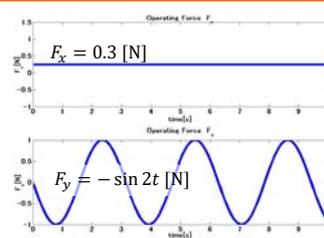


Fig. 7 操作者が加える操作力

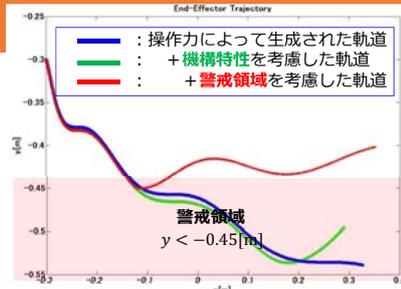


Fig. 8 諸制約を考慮した軌道生成

提案手法により、操作者に近い部分に警戒領域を設けると、動作モードの切り替えにより安全を考慮した軌道の生成を確認できる。今後は実験により、リハビリテーションの効果を検討したアルゴリズム^[4]を検討する。本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(C)26420423)により行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- [1]内閣府:将来推計人口でみる50年後の日本, 高齢社会白書 (2012)
- [2] 池田博康, 齋藤剛, 杉本旭: 人間と共存するロボットの本質安全化—国際安全規格に基づく危険源削除のプロセス, システム制御情報学会誌 13, pp 575-584 (2000)
- [3] J.M.Maciejowski(足立, 菅野訳): モデル予測制御—制約のもとでの最適制御—, 東京電機大学出版社 (2005)
- [4]古荘順次, 小柳健一, 片岡次郎・他: 三次元上肢リハビリ訓練システムの開発 (第一報), 日本ロボット学会誌 23, pp 629-636 (2005)