

機関番号：14101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760196

研究課題名（和文）モデルフリー制御器設計法による人間の作業スキルのロボットへの直接移植

研究課題名（英文）Direct Design of Human Skill and Its Implementation on Robot Using Model-free Controller Synthesis

研究代表者

弓場井 一裕 (YUBAI KAZUHIRO)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10324542

研究成果の概要（和文）：本研究では制御対象の数学モデルを求めることなく、適切な作業を行うための制御器を人間の作業データのみを用いて設計するための基礎研究を行った。数学モデルを求めないため、設計された制御器が閉ループシステムを安定化する保証がないため、得られている制御対象の入出力データから閉ループシステムの安定性を評価する方法の提案を行い、線形・非線形な最適化問題に組み込んだ。また、線形な最適化問題の場合に対しては、閉ループシステムの安定性を保証する制御器の設計法の提案を行った。

研究成果の概要（英文）：This research proposed the controller tuning method from human operation data without constructing any mathematical model. Since the mathematical model is not constructed, we have no idea in advance of the controller implementation whether the designed controller actually stabilizes the controlled plant or not. Firstly, as a basic study, the evaluation method of the closed-loop stability from the input/output data of the controlled plant was proposed, and it was incorporated into the nonlinear and the linear optimization problem for the controller tuning. Moreover, in the case of the linear optimization problem, the controller parameter tuning method guaranteeing the closed-loop stability was proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：モデルフリー制御器設計法，安定性，入出力データ，スペクトル解析法

## 1. 研究開始当初の背景

人間の作業スキルを何らかの数理モデルとして表現しようとする研究は盛んに行われており、近年では区分的に線形時不変システムの切り替えとして人間の作業スキルを表現する研究が注目を集めている。これらの研究では人間の作業スキルをインピーダン

スモデルで表現したものや、人間と機械（環境）を含む制御対象から得られる入出力データをクラスタリングし、クラスタリングされたデータからそれぞれ線形時不変なシステムを同定することで人間の作業スキルのモデルを構築する方法などが知られている。これらの研究では人間の作業スキルのモデル

化とその力学的な解釈が主目的であり、得られたモデルを用いた人間の作業スキルを実現する制御則の構築には至っていない。その主な要因は、得られた数理モデルは人間が持つあいまいさを表現するために複雑なハイブリッドシステムや隠れマルコフモデルとして表現されており、設計が困難なためである。

それに対して本研究では人間の作業をインピーダンスモデルとフィードバック制御器からなる一種の2自由度制御器の切り替えであると解釈し、モデルフリー制御器設計法によりインピーダンスモデルとフィードバック制御器を直接獲得できれば上述の制御則構築の困難さを回避できると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、人間と機械の協調システムにおいて、人間が行った動作の入出力データを用いて、人間の作業を実現するロボットの制御器を設計する方法の確立を目指すものである。

本研究の特徴としては、人間の行動の数理モデルを陽に立てることなく、人間による教示データのみを用いて制御器を直接調整する点にある。入出力データから直接制御器を設計する方法として、モデルフリー制御器設計法を採用しているが、モデルフリー制御器設計法は制御対象の数理モデルを利用できないため、設計された制御器により制御系の安定性が確保されるかどうかは実装してみなければ分からないという問題を有している。そこで、まず入出力データから直接調整された制御器により制御系が安定化されることを、実装を行うことなく、事前に利用可能な入出力データのみを用いて評価する方法の開発を行う。

並行して対象とするロボットシステムの開発を行い、両者が完成した時点で人間のスキルを実現する制御器の設計を入出力データから行い、それを実装することでロボットによる人間スキルの再現を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) ロボットシステムの構築

制御対象となる、ロボットシステムの開発を行った。複数軸からなる腕形ロボットであり、ロボットの先端には力センサが取り付けられており、環境との接触力を検出することができる。ロボットシステムから検出可能な情報は、各軸の回転角度と先端に取り付けられた力センサから検出される力情報である。これらの情報はカウンタボード・A/Dボードを介してPCに取り込まれる。制御システムは実時間制御が可能なART-Linux上にC言語を用いて構築しており、マイクロ秒オーダーの制御が可能なシステムを構築した。



図1 作成したロボット制御システム

### (2) 制御系の安定性を保証するモデルフリー制御器設計の開発

代表者がこれまで研究・開発を行ってきたモデルフリー制御器設計法であるNCbTとFCbTに対して制御系の安定性を保証できるように拡張を行った。

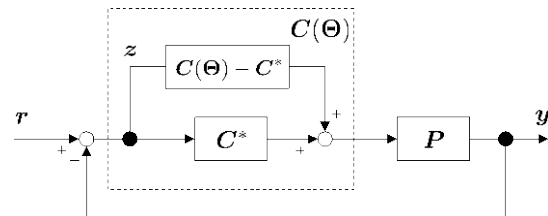


図2 安定条件を考慮するための制御系

図2のような設計された制御器  $C(\rho)$  を用いて構成される制御系を考える。ここで、 $C^*$  は目標とする特性を達成する理想制御器を表している。制御器  $C(\rho)$  を用いた制御系が安定化されるための条件は図2と小ゲイン定理を用いれば  $z$  から  $z$  までの一巡伝達関数の最大特異値が1未満になっていれば良いことがわかる。すなわち、以下の式が成り立てばよい。

$$\begin{aligned} \delta &= \|G(\rho)\|_{\infty} \\ &= \|M - (I - M)PC(\rho)\|_{\infty} < 1 \end{aligned}$$

ここで、 $M$  は達成させたい  $r$  から  $y$  まで伝達特性を表している。ただし、モデルフリー制御器設計法では制御対象である  $P$  の情報は利用できないため、 $P$  の入出力データを利用して上式が成り立つかの推定を、スペクトル推定を利用して行う。

## 4. 研究成果

制御系の安定性を保証するモデルフリー制御器設計法の開発に関して、最適化の手法が線形なもの非線形なものに対して以下の成果を得た。

① 最適化の手法が線形な場合

制御器のパラメータ調整問題が制御器パラメータに対して線形であるとき、最小二乗法により評価関数  $J_c(\rho)$  を最小化する最適解を導出することができる。このとき、制御器パラメータの調整問題に対して、前述の制御系の安定制約を課すことで、制御系の安定性を保証する制御器パラメータの設計が可能となる。すなわち、以下の凸最適化問題を解くことになる。

$$\begin{aligned} \hat{\rho} &= \arg \min_{\rho} J_c(\rho) \\ \text{subject to} \\ \max_{\{\omega_k | \Phi_s(\omega_k) \neq 0\}} \bar{\sigma} \{ \hat{G}(e^{j\omega_k}, \rho) \} &< \delta_N \\ \omega_k &= 2\pi k / (TT_s), k = 0, \dots, \lfloor (T-1)/2 \rfloor \end{aligned}$$

上述の凸最適化問題を解くことで、制御系の安定性を保証する制御器の設計が可能になることを数値例と簡単な実験システムを用いて確認することができた。

② 最適化の手法が非線形な場合

制御器のパラメータ調整問題が制御器パラメータに対して非線形であるとき、Gauss-Newton 法などの非線形最適化法を用いて評価関数を最小化するような制御器パラメータを評価関数の勾配の方向に徐々に更新しながら (準) 最適解へと至る。パラメータがどこで収束するかが予想できないため、制御器パラメータの更新の過程において制御系を安定化するパラメータが得られることが好ましい。そこで、パラメータの更新時に  $\delta$  の値を推定し、その値が 1 を越える場合には再度パラメータ更新をしない、どの段階においても  $\delta$  の値が 1 未満であるという拘束条件を満たしながらパラメータ更新を行うアルゴリズムを提案した。

このアルゴリズムを用いることで非線形な最適化問題となる場合においても制御系の安定性を保証する制御器パラメータが得られることを数値例と実験システムを用いて確認することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 弓場井一裕, 寺田真也, 平井淳之, 多変数 NCbT に対する入出力データを用いた安定性テスト, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.131, No.4, 2011, pp.773-780
- ② 弓場井一裕, 相互相関関数を利用した最小二乗法による多変数制御器の直接調整, 計測自

動制御学会論文集, 査読有, Vol.45, No.10, 2010, pp.541-543

- ③ 宇佐見秀徳, 弓場井一裕, 平井淳之, 制御対象の入出力データを用いた最小二乗法による相関法に基づく多変数制御器の調整 - 張力・速度制御装置に対する適用 -, 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol.130, No.7, 2010, pp.881-889

[学会発表] (計 22 件)

- ① 藤井宏樹, 弓場井一裕, 平井淳之, パラメータ更新時の閉ループ系の安定性を考慮した FCbT の提案, 電気学会産業計測制御研究会, 2011 年 3 月 8 日, 習志野市
- ② 水谷彰孝, 弓場井一裕, 平井淳之, ラゲールモデルを用いた GMC 構造における Youla パラメータの実験データからの直接調整, 電気学会産業計測制御研究会, 2011 年 3 月 8 日, 習志野市
- ③ 寺田真也, 弓場井一裕, 平井淳之, 凸最適化による安定制約を付加した多変数制御器の直接調整, 電気学会産業計測制御研究会, 2011 年 3 月 8 日, 習志野市
- ④ 藤井宏樹, 弓場井一裕, 平井淳之, 粒子群最適化を用いた閉ループ入出力データに基づく多変数制御器と参照モデルの直接調整, 第 53 回自動制御連合講演会, 2010 年 11 月 4 日, 高知市
- ⑤ 水谷彰孝, 弓場井一裕, 平井淳之, 実験データを用いた GMC 構造における安定制約を満たす Youla パラメータの直接調整, 第 53 回自動制御連合講演会, 2010 年 11 月 4 日, 高知市
- ⑥ 寺田真也, 弓場井一裕, 平井淳之, スペクトル解析法に基づく安定制約を付加した多変数制御器の直接調整, 第 53 回自動制御連合講演

会, 2010年11月4日, 高知市

- ⑦ Hidenori Usami, Kazuhiro Yubai, and Junji Hirai, Correlation-based direct tuning of 2DOF controller by least squares, The 11<sup>th</sup> International Workshop on Advanced Motion Control, 2010年3月24日, 長岡市
- ⑧ Hiroki Fujii, Kazuhiro Yubai, and Junji Hirai, Implementation of Direct Parameter Tuning Method for Multivariable Controller Using a Couple of Closed-loop I/O Data, The 35<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2009年11月3日, ポルト
- ⑨ Akitaka Mizutani, Kazuhiro Yubai, and Junji Hirai, A Direct Design from Input/Output Data of the Youla Parameter for Compensating Plant Perturbation on GIMC Structure, The 35<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2009年11月3日, ポルト
- ⑩ Kazuhiro Yubai, Hidenori Usami, and Junji Hirai, Correlation-based Direct Tuning of MIMO Controllers by Least-squares and Its Application to Tension-and-speed Control Apparatus, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009年8月19日, 福岡市

[その他]

<http://www.ems.elec.mie-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

弓場井 一裕 (YUBAI KAZUHIRO)  
三重大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10324542

### (2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者  
なし