外部制御PCの導入による産業用ロボットの応答特性整形

木原 康之^{*1} 林 浩一郎^{*1} 藤 平 祥 孝^{*2} 上 野 光^{*1}
村 上 弘 記^{*1} 吉 川 恒 夫^{*3} 永 井 清^{*3}

Reshaping the Response Characteristic of Industrial Robot Using External PC Controller

Yasuyuki Kihara^{*1}, Koichiro Hayashi^{*1}, Yoshinori Fujihira^{*2}, Hikaru Ueno^{*1},
Hiroki Murakami^{*1}, Tsuneo Yoshikawa^{*3} and Kiyoshi Nagai^{*3}

Since automation of tasks with wide variance of position and shape such as bin-picking, finishing and assembling are demanded, more and more robots are becoming adaptive with force-torque sensor and vision sensors. PC-based integration is one of the best solution to construct such sensor-based robot systems because of flexibility and extendability. The robot system become more complex, the number of tuning parameters increases. To solve this problem, we propose a new method to reshape the response characteristic of industrial robot using external controller for reducing the tuning control parameters. In this method, dynamics of a robot arm is measured via real-time communication, its mathematical model is estimated, and then the controller of an external PC is designed. In this paper, the proposed method is validated through simulation and experiments.

Key Words: Industrial Robot, External Controller, Respose Characteristic, Smith Method, Kitamori Method

1. 緒 言

近年、産業用ロボットの適用ニーズは高まっており、これまで困難とされた熟練を要する高技能作業や、食品・衣料品などの多様な分野における軽作業への適用が求められている。適用拡大のためには、位置や寸法・形状にばらつきのある対象物への適応的な作業に対応しなければならない。そのためには、対象物を計測し、ロボットの動作に反映するセンサフィードバック技術と、センサとロボットを含んだシステムを構築する技術が必要である。筆者らは、一般的な産業用ロボットと産業用PCを組み合わせて、製造業における熟練作業の自動化に取り組んできた[1]。産業用PCを利用する利点は、高い親和性によりセンサ・周辺機器の選択肢が広がる点と、複雑な計算や負荷の高い処理を含んだ独自のセンサフィードバックを実装できる点である。これらを利用し、力覚のリアルタイムフィードバック系を構築し、微細な力制御を行うことで、従来の産業用ロボットでは困難とされた精密な組み立てや加工を実現した。

しかしながら、センサフィードバック系の構築において、調整時間が膨大であるという問題があった。ロボットごとの応答特性に合わせた調整が必要となるが、ロボットコントローラの特性が公開されていないため試行錯誤的な調整となるためである。そこで、本論文ではロボットコントローラを含めたロボッ

トシステムの応答特性を計測・同定し、外部PCを用いてロボットの応答特性を所望の伝達関数に整形する手法を提案する。これによって、センサフィードバック系をロボットおよびコントローラの特性的影響を受けずに調整できるようになる。提案手法は、外部制御PCで市販の産業用ロボットを用いる際の制約下でも適用できる実用的な手法である。制約の例としては、通信遅れが存在する、位置指令に限定される、ロボットコントローラがブラックボックスである、などが挙げられる。

産業用ロボットの制御性能の向上に関する研究はこれまでも行われている[2][3]。曾根原らは、P形学習手法[4]を用いて、軌道追従性を向上させている[2]。後藤らは、ロボットの応答特性を基に軌道に修正を加え、高速高精度な位置決めを行う手法を提案している[3]。

また、外部の制御器によってロボットの応答特性を改善しようとする研究もある[5][6]。永井らは、速度制御されるロボットに対し、上位の制御系を加えることで、高速なサーボ系を最大限に利用した高精度な角度制御を実現した[5]。清水らは、モータドライバの外部に制御器を加えることにより、過渡特性も考慮した応答特性の改善を行った[6]。しかし、これらの手法はPCとロボット間の通信遅延や、産業用ロボットコントローラが一般に位置指令しか対応していないといった制約に対応できていない。

これに対して、本論文の手法は、制御PCで産業用ロボットをリアルタイム制御するシステムにおいて、産業用ロボットコントローラの制約を考慮しながら、ロボットの応答特性を、目的に応じた特性に整形する実用的な手法となっている。

以下ではまず、提案手法の概要について述べ(2章)、ロボットの応答特性を同定・モデル化し(3章)、制御系設計手法について述べる(4章)。設計した制御系に対し、シミュレーション

原稿受付 2018 年 4 月 27 日

^{*1}株式会社 IHI

^{*2}室蘭工業大学

^{*3}立命館大学

^{*1}IHI Corporation

^{*2}Muroran Institute of Technology

^{*3}Ritsumeikan University

■ 本論文は有用性(要素分野)で評価されました。

Fig. 1 Industrial robot controlled by external PC

Fig. 2 Block diagram of the system with external PC

および実験によって提案手法の有効性を検証する (5 章, 6 章)。

2. 提案手法

2.1 対象とするロボットシステム

本稿では、産業用ロボットを、外部の制御 PC から一定周期で送信され、外界センサの情報をもとにした位置指令によって制御することを前提とする、通信を含んだリアルタイム制御システム (Fig. 1) を対象とする。対象システムのブロック線図を Fig. 2 に示す。ここで、 r_d , r_c , r'_c , r , q および u は目標位置, 外部制御器が出力した位置指令, ロボットコントローラが受け取った位置指令, ロボットの先端位置, ロボットの関節角およびロボットへの入力をそれぞれを示す。また、 C_1 , C_2 はそれぞれロボットコントローラ, 外部 PC 内の制御器を示し、 F は関節角から先端位置への変換を示す。ただし、通信やロボットコントローラ内部の処理は、一般的に公開されていないが、制御 PC とロボットコントローラ間の通信には時間 T の通信遅延があると想定している。

2.2 提案手法

筆者らが提案する手法は以下の手順からなる。

Step 1 ロボット・ロボットコントローラで構成される、通信を含んだ制御対象の周波数応答特性を同定する。

Step 2 制御対象の特性を基に制御器を設計し、望みの応答特性に整形する。

ここで、Step 1 では、一般的な産業用ロボットを想定し、ロボットコントローラ内部処理やロボットの応答特性はブラックボックスとして扱うとともに、利用可能な入出力対象作業信号を現在位置と位置指令に限定する。また、Step 2 では、利用するロボットの応答特性に対して適切な制御手法を選択し、対象作業で用いるセンサフィードバック系に適した応答特性に整形する。

3. ロボットの応答特性の同定

3.1 応答特性の計測

ロボットに円弧運動を与えたときの、位置指令と応答の振幅・位相の関係から周波数応答特性を同定した。円弧運動の参照点とは、Fig. 3 に示すように、ロボットの工具中心 (Tool Center Point, 以下 TCP) とする。ロボットの最大速度の制約のため、円軌道の半径と TCP の速度の両方を用いて、周波数を調整した。円軌道の中心は、システムにおいて、ホームポジションとよんでいるロボットの標準の位置姿勢のときの TCP 位置とした。

Fig. 3 Robot motion for identification of the system

Fig. 4 High precision finishing system

Table 1 Detail of the system

Controller PC	Beckhoff brand industrial PC OS: Windows7 (with TwinCAT) CPU: Core i7 2.3[GHz]
Robot Controller	KUKA KRC4 compact
Robot	KUKA KR6 R900 sixx
Communication type	Ethernet
Control period	0.004[s]

試験装置は、筆者らが開発した精密仕上げシステム [1] (Fig. 4) を用いた。システムの緒元を Table 1 に示す。なお、制御 PC に Beckhoff 社製産業用 PC を採用し、同社の Windows 制御ソフトウェア TwinCAT による、0.004 [s] 周期のリアルタイム制御を行う。

x 軸方向, z 軸方向それぞれに対するボード線図を Fig. 5 と Fig. 6 に示す。

Fig. 5, Fig. 6 のゲイン特性を見ると、極小点・極大点を持つ。極大点はロボットの共振現象、極小点はロボットコントローラの特性の影響と考えられるが、ブラックボックスであり詳細は不明である。また、Fig. 5, Fig. 6 の位相特性を見ると、 x 軸方向, z 軸方向ともに、高周波数になっても、一定の値に収束することなく、位相遅れが大きくなっていくことが分かる。これは、通信遅延等によるむだ時間を持つシステムの応答特性に類似している。また、Fig. 5 と Fig. 6 を比較すると、方向ごとに特性が異なる。

3.2 ロボット応答特性の推定

同定試験で得た特性データを基に、ロボット応答特性をむだ

Fig. 5 Bode plot of x axis of the system Fig. 6 Bode plot of z axis of the system

時間要素と二次の零点を持つ三次遅れ系

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} e^{-Ts} = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + n_0}{d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0} e^{-Ts} \quad (1)$$

としてモデル化する。ロボットコントローラを含むロボット系は安定しているため、零点、極はともに安定であると仮定する。二次の零点を含む三次遅れ系は、ロボットなどの二次遅れ系にPID制御を加えたときと同じ次数である。また、むだ時間要素 e^{-Ts} は制御PCとロボットコントローラ間の通信遅延を想定している。

実験結果に式(1)のモデルをフィッティングして得られたパラメータをTable 2に示す。また、その数式モデルのボード線図をFig. 5, Fig. 6に実線で示す。Fig. 5, Fig. 6を見ると推定したモデルは実験で得られた応答特性とよく一致しているため、以降の章ではこのモデルを使用して、制御系を構築する。

4. 制御系設計

3.2節で推定したモデルに対して、望みの伝達関数に整形する手法について述べる。本稿では、応答特性の整形手法の代表的な手法である北森法[7]を用いて整形することを考える。

推定したモデルの特徴としては以下の二つがある。

- (i) 零点が存在する
- (ii) むだ時間要素が存在する

Table 2 Parameter of identified model

Parameter	x axis	z axis
d_0 [1]	1	1
d_1 [s]	1.56×10^{-2}	1.45×10^{-2}
d_2 [s ²]	8.64×10^{-5}	7.78×10^{-5}
d_3 [s ³]	3.09×10^{-7}	3.23×10^{-7}
n_0 [1]	1	1
n_1 [s]	3.85×10^{-3}	9.79×10^{-3}
n_2 [s ²]	5.91×10^{-5}	1.50×10^{-4}
T [s]	0.032	0.020

Fig. 7 Block diagram of PID controller

北森法を適用するには、対象とするシステムを分母系列で表現する必要がある。そこで、まず、零点の補償を行い、分母系列で表現できるようにする。次に、むだ時間要素を、近似および補償器によって対応する。

以下の節では、まず北森法について述べる。次に、零点の補償として極零相殺について述べ、最後に、むだ時間要素に対する手法としてスミス法と級数展開近似[8]について述べる。

4.1 北森法を用いた応答特性の整形

応答特性の整形には、PID制御を想定した北森法を用いる。

PID制御は、Fig. 7に示すブロック線図であり、 $C(s)$ は、

$$C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2)$$

とする。ここで、 K_P , K_I および K_D はそれぞれ、比例ゲイン、積分ゲインおよび微分ゲイン（以下、PIDゲインとよぶ）である。

北森法は部分モデルマッチングともよばれる手法であり、制御対象の閉ループ伝達関数を参照モデルと、低次の項から順に係数比較することで、制御パラメータを決定する手法である[7]。

本稿では、参照モデルとして用いる伝達関数 $W(s)$ を

$$W(s) = \frac{1}{\alpha_0 + \alpha_1 \sigma s + \alpha_2 \sigma^2 s^2 + \alpha_3 \sigma^3 s^3 + \dots} \quad (3)$$

$$\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots\} = \left\{1, 1, \frac{1}{2}, \frac{3}{20}, \dots\right\} \quad (4)$$

とする。この伝達関数は、時定数 σ によって時間スケールが可変となっており、 $\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots\}$ によって、応答特性を決めることができる。本稿では、二乗誤差面積最小であり、文献[8]で推奨されている式(4)の係数を用いる。係数比較する際には、PIDゲイン K_P , K_I , K_D とともに σ も未知数として係数比較を行う。これは、ロボットシステムによって大きく時定数が変わる場合にも対応するためである。なお、係数比較時には、未知数が四つであるため、三次の項で打ち切り計算を行う。

4.2 零点補償

3.2節で、システムの零点は安定という仮定のもとモデル化しているため、零点・極相殺が可能である[9]。そこで、Fig. 8のようなフィードフォワードを加えると、

Fig. 8 Block diagram of zero compensation

Fig. 9 Block diagram of Smith method

$$N(s)^{-1}P(s) = \frac{1}{N(s)} \frac{N(s)}{D(s)} e^{-Ts} = \frac{1}{D(s)} e^{-Ts} \quad (5)$$

となり、零点を補償することができる。

4.3 むだ時間への対応

4.3.1 スミス法

スミス法はむだ時間に対する補償器を加えることで、むだ時間に依存しない制御器設計を可能にする手法である[8]。制御対象 $P_r(s)e^{-Ts}$ に対して、補償器 $P_s(s)$ を

$$P_s(s) = P_r(s)(e^{-Ts} - 1) \quad (6)$$

とし、Fig. 9 のように制御器 $C(s)$ に対して補償を行う。

目標入力 p_d から応答 p への伝達関数 $P(s)$

$$P(s) = \frac{C(s)P_r(s)}{1 + C(s)P_r(s)} e^{-Ts} \quad (7)$$

は、むだ時間要素が分離された形となる。

4.3.2 級数展開近似

級数展開近似は、むだ時間要素を線形システムで近似する手法である。北森法の制約を考慮し、

$$e^{-Ts} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1!}(Ts) + \frac{1}{2!}(Ts)^2 + \frac{1}{3!}(Ts)^3 + \dots} \quad (8)$$

と分母多項式で近似する[8]。なお、係数比較時には、式(3)と同様に三次の項で打ち切り計算を行う。

5. 零点補償の有効性検証

制御対象のみの場合（以下 Case I）と、零点補償を加えた場合（以下 Case II）について、シミュレーションと実験によって比較し、零点補償の有効性を検証した。シミュレーションでは、周波数応答特性とステップ応答によって、実験では周波数応答特性と軌道追従性について検証した。

5.1 シミュレーション

制御系の比較を行うためにシミュレーションを行った。シミュレーションに用いるモデルは、Fig. 5 で得られた x 軸方向の応答モデルを 1 入力 1 出力のモデルとして用いた。シミュレーションには Matlab/Simulink を用いた。

Case I と Case II に関するゲイン線図とステップ応答を Fig. 10, Fig. 11 にそれぞれ示す。Fig. 10 を見ると、Case I にある 20 [Hz] 近傍の極小点が Case II ではなくなっている。また、Fig. 11 を見ると、Case I は、0.04 [s] あたりで一度停滞しており、零点を有する特徴を示している。これに対し、Case II

Fig. 10 Simulation result; gain diagram of case I and case II

Fig. 11 Simulation result; step response of case I and case II

は滑らかに、かつ、速く収束していることから、零点が補償されていると言える。

5.2 実験

実験では、Fig. 4 のシステムを用いた。周波数応答特性は、3 章のシステム同定と同様の方法で計測した。

x 軸、 z 軸それぞれに対する結果を Fig. 12, Fig. 13 に示す。零点補償によって帯域が x 軸方向、 z 軸方向ともに拡大しつつ、共振点におけるゲインが小さくなった。このことから、零点補償器によって応答性がよくなりつつ、高周波の振動が抑制されたと言える。

次に、軌道追従性の検証を行った。軌道は、円軌道、矩形軌道の 2 種類を用いた。速度 100 [mm/s]、加速度 500 [mm/s²] とし、目標の動作では、加減速は軌道の開始時と終了時のみ、角部を含め軌道の曲率にかかわらず一定の速さとした。

軌道に対する追従誤差の平均および最大値で評価し、追従誤差は、ある時刻における手先位置から軌道への最短距離とする。つまり、精密な加工や組み立てで求められる空間的な軌道再現性で評価する。

(1) 円軌道

半径 10 [mm] の円軌道への追従性を検証した結果を Fig. 14, Fig. 15, Table 3 に示す。Fig. 14 を見ると、追従性が向上している。ただし、 $(x, z) = (3, 7)$ 付近において大きく離れているところがある。これは、方向ごとに制御器の時定数が違うことが原因と考えられる。

Fig. 12 Gain diagram of x axis Fig. 13 Gain diagram of z axis

Fig. 14 Desired motion and actual path of circle motion

(2) 矩形軌道

一辺 20 [mm] の正方の軌道への追従性を検証した結果を Fig. 16, Fig. 17, Table 4 に示す。

Fig. 16 を見ると、角部における追従性が向上している。この結果は Fig. 17 の 0.3 [s] および 0.7 [s] 付近において Case II でピークが 0.2 [mm] 程度小さくなっていることから分かる。これは、零点補償の結果、帯域が拡大し、応答性が向上したため

Fig. 15 Tracking error diagram of circle motion

Table 3 Tracking error of circle motion

	Case I	Case II
Maximum error	0.65 [mm]	0.43 [mm]
Average error	0.28 [mm]	0.20 [mm]

Fig. 16 Desired motion and actual path of square motion

Table 4 Tracking error of square motion

	Case I	Case II
Maximum error	1.0 [mm]	0.65 [mm]
Average error	0.16 [mm]	0.15 [mm]

といえる。

以上の周波数特性、ステップ応答、軌道追従性の結果により、零点が補償されたことが確認され、北森法の適用に適した分母系列表現に特性を整形できたといえる。なお、本手法は通常単体で用いるものではないが、応答性のみが重要である場合には、単体で使用することも考えられる。

6. むだ時間を考慮した応答特性整形

応答特性の整形について、以下の 3 手法によって検証する。

Case III 零点補償 + 北森法

Case IV 零点補償 + 北森法 + スミス法

Fig. 17 Tracking error of square motion

Table 5 Control parameters obtained from Kitamori Method

	σ	K_P	K_I	K_D
Case III	0.0128	0.716	78.2	2.58×10^{-4}
Case IV	0.0128	0.716	78.2	2.58×10^{-4}
Case V	0.0538	0.384	18.6	1.98×10^{-3}

Case V 零点補償+北森法+級数展開近似

まず, Case III によって, むだ時間考慮の要否を確認する. 次に Case IV と Case V によって, スミス法と級数展開近似の特徴を比較する. 比較は, Matlab/Simulink によるシミュレーションで行う. なお, 実機を用いた試験は, 試験機の都合により実施できていない.

Table 5 に, 北森法で得られた参照モデルの σ の値と PID ゲインを示す. Case III と Case IV は, 遅れを含まない特性である $1/D(s)$ を参照モデルとしているのに対し, Case V では遅れを含む特性である $1/D(s)e^{-Ts}$ を参照モデルとしている. そのため, 時定数に相当する σ の値が変わる. Table 5 からむだ時間を含む Case V では σ の値が大きくなっていることが分かる. また, ゲインを見ると, 時定数の影響で Case V では P ゲイン K_P , I ゲイン K_I ともに小さくなっており, ゲインを小さくすることでむだ時間に対応している様子が見受けられる.

Case III と Case IV, および, 参照モデルに関するゲイン線図とステップ応答を Fig. 18, Fig. 19 に, Case V および参照モデルに関するゲイン線図とステップ応答を Fig. 20, Fig. 21 に, それぞれ示す.

まず, むだ時間考慮の要否について確認する. Case III は, Fig. 18 を見ると, 参照モデルに一致できておらず, 共振点が発生したことが分かる. また, Fig. 19 から, ステップ応答は, 発散しており不安定であることが分かる. むだ時間を無視すると不安定な PID ゲインが選択されたことから, むだ時間を考慮する必要があることが確認された.

次に, 二つのむだ時間への対応方法を比較する. Case IV では, Fig. 18 から高周波領域でわずかに誤差があるのみでよく一致しており, Fig. 19 から, ステップ応答も参照モデルによく一致している様子が見られる. このことから, スミス法を用いることで, 応答特性を高精度に整形できたと言える.

これに対し, Fig. 20 を見ると, Case V は, 参照モデルのカットオフ周波数近傍でゲインが小さくなっている. また, Fig. 21 を見ると, ステップ応答で最大で 10%程度の誤差がのっている

Fig. 18 Simulation result; gain diagram of case III, case IV and reference model

Fig. 19 Simulation result; step response of case III, case IV and reference model

ものの傾向としては一致している. 誤差はむだ時間要素の近似時の打ち切り誤差からきているものと考えられる. このことから, 誤差はスミス法に比べ大きいものの, 級数展開近似を用いることで, 応答特性をある程度整形できたと言える.

以上のことから, むだ時間を考慮し, 北森法により PID ゲインを決定することで制御対象の応答特性を参照モデルに整形できることを確認した.

Case IV と Case V どちらがよいかは, 応答特性のモデル化の精度と要求される整形の精度によって判断できる. モデル化誤差に対するロバスト性はないため [11], モデル化の精度が悪い場合には, Case V が適している. また, 級数展開は簡便な方法であるため, 要求される整形の精度が高くない場合にも, Case V が適している. これに対し, 高い整形精度が要求され, かつ, 高い精度でモデル化できている場合には, Case IV が適している.

7. 結 言

本稿では, ロボットコントローラの外部の PC からリアルタイム制御するロボットシステムに対して, 同定したロボットの応答特性を元に, ロボットの応答特性を望みの特性に整形する手法を提案し, シミュレーションと実験を通じて有効性を示した.

Fig. 4 の精密仕上げロボットシステムを対象とし, ロボット, ロボットコントローラ, PC との通信系, を含む系を対象とし

Fig. 20 Simulation result; gain diagram of case V and reference model

Fig. 21 Simulation result; step response of case V and reference model

て、その応答特性を同定した結果、通信遅れやロボットコントローラ内部の制御器に起因すると考えられる極大・極小のある特性が得られ、零点ありの三次遅れ系とむだ時間要素としてモデル化した。制御系設計では、目標の応答特性への整形手法の設計、および、零点補償要素およびむだ時間補償要素を設計した。また、零点補償の有効性を、シミュレーションと実験にて実証した。さらに、むだ時間への対応方法として、スミス法と

級数展開近似を用いて、北森法による目標の応答特性への整形の有効性をシミュレーションによって確認した。

提案した手法は、制御パラメータを理論的に決定することで、調整作業を軽減することに加え、ロボットの応答特性を目標の特性に整形できることからロボット間の応答特性の差を軽減できる可能性がある。さらに、制御パラメータを外部機器からの割り込み周期ごとのロボット位置データに基づいており、ロボットを購入して使用するユーザでも利用可能な手法であり、今後拡大が見込まれる PC ベースのロボットシステムの適用拡大を促進することが期待される。

今後の課題としては、フィードバックを含む制御系に対する実験による検証が挙げられる。また、ロボットの応答特性は、姿勢変化が大きい場合には一定とみなせない可能性があるため、姿勢変化が大きな動作への拡張は今後の課題である。さらに、ロボットの方向ごとの応答特性の違いによる追従性への影響の検証、センサフィードバック系への提案手法の適用性の検証、および、外乱が存在する場合の影響の検討なども今後の課題である。

参考文献

- [1] 林浩一郎：“PC を活用したロボットエンジニアリング”，ロボット，no.231，pp.3-7，2016。
- [2] 曾根原光治，林浩一郎，西嶋和之，村上弘記：“ロボットアームによる精密仕上げ自動化技術”，IHI 技報，vol.52，no.2，pp.58-65，2012。
- [3] 後藤悟，中村正敏，久良修郎：“ロボットアームの高速高精度位置決めのための教示信号修正法”，計測自動制御学会論文集，vol.27，no.12，pp.1396-1404，1991。
- [4] 南條義人，有本卓：“ロボット軌道追従のための学習制御系の設計指針”，日本ロボット学会誌，vol.11，no.7，pp.1047-1055，1993。
- [5] 永井清，嵩裕一郎，西部雄貴，山中篤：“仮想駆動力冗長性に基づく 4 自由度高速パラレル・メカニズムの開発”，日本ロボット学会誌，vol.28，no.6，pp.766-773，2010。
- [6] 清水昌幸：“速度制御サーボドライバを用いた PA10 の軌道追従制御系の構築”，第 33 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM，3L3-07，2015。
- [7] 北森俊行：“制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法”，計測自動制御学会論文集，vol.44，no.11，pp.549-555，1979。
- [8] 阿部直人，延山英沢：“むだ時間システム入門 1—伝達関数からのアプローチ—”，計測と制御，vol.15，no.4，pp.799-804，2005。
- [9] 吉川恒夫：古典制御論，昭晃堂，2004。
- [10] 木原康之，林浩一郎，清水拓，上野光，村上弘記，永井清，吉川恒夫：“外部 PC を用いた産業用ロボットの軌道追従性向上における同定試験”，第 33 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM，1G1-08，2015。
- [11] Z. Palmer: “Stability Properties of Smith Dead-Time Compensator Controllers,” Int. J. Control, vol.32, no.6, pp.937-949, 1980.

木原康之 (Yasuyuki Kihara)

2014 年京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻博士課程修了，同年株式会社 IHI に入社，現在に至る。博士（工学）。ロボットアームや産業システムの動作計画・運動制御技術の研究開発に従事。日本機械学会会員。（日本ロボット学会正会員）

林浩一郎 (Koichiro Hayashi)

2005 年京都大学工学研究科機械工学専攻修士課程修了，同年石川島播磨重工業株式会社（現 株式会社 IHI）入社，現在に至る。技術士（機械部門）。ロボットアームの制御技術や，力制御を利用した加工システムの開発に従事。（日本ロボット学会正会員）

藤平祥孝 (Yoshinori Fujihira)

2016 年金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。2016 年より室蘭工業大学大学院工学研究科助教，現在に至る。博士（工学）。柔らかい指の把持安定性や流体を用いた柔らかい指による物体の把持操作に関する研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，IEEE の会員。（日本ロボット学会正会員）

上野 光 (Hikaru Ueno)

1988 年日本大学理工学部物理学科卒業，1990 年日本大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年石川島播磨重工業株式会社（現 株式会社 IHI）入社，現在に至る。入社以来，液晶パネル関連装置や自動化システムの開発に従事。近年は，品質保証活動に取り組んでいる。

村上弘記 (Hiroki Murakami)

1985 年京都大学工学部精密工学科卒業, 1987 年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了, 同年石川島播磨重工業株式会社 (現 株式会社 IHI) 入社, 現在に至る。入社以来, 研究開発に従事し, ロボットマニピュレータの制御, ロボティクス・メカトロニクス技術の応用システム開発に数多く取り組み, 近年は, 災害対応システムの開発に取り組んでいる。日本機械学会フェロー, 計測自動制御学会フェロー, システム制御情報学会, 感性工学会の会員。 (日本ロボット学会正会員・フェロー)

永井 清 (Kiyoshi Nagai)

1986 年 3 月京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。1987 年 3 月同大学大学院博士課程中途退学。同年立命館大学理工学部情報工学科助手。1995 年助教授。1996 年同学部ロボティクス学科助教授。2007 年教授となり, 現在に至る。この間, 1995 年から 1996 年に米国スタンフォード大学客員研究員, 2004 年から 2005 年に英国レディング大学客員研究員。博士 (工学, 京都大学)。高速ロボット, 冗長駆動ロボット, 医療福祉ロボットなどの研究に従事。日本機械学会フェロー, 計測自動制御学会, IEEE などの会員。 (日本ロボット学会正会員)

吉川恒夫 (Tsuneo Yoshikawa)

1969 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了, 同年京都大学工学部助手, 1970 年助教授, 1986 年教授, 1994 年組織変更により同大学工学研究科教授。2005 年から 2012 年まで立命館大学情報理工学部教授, 2013 年同大学総合科学技術研究機構上席研究員となり現在に至る。ロボット工学, 制御工学の研究に従事。ロボットアームの可操作性, 動的ハイブリッド制御などの概念を提唱。工学博士。京都大学名誉教授。米国 IEEE 学会などのフェロー。 (日本ロボット学会名誉会長・フェロー)