はめあい作業のハイブリッド制御：シミュレーションと実験

イヴァン ゴドレール^{*1} 山下 忠^{*2} 相 良 慎 一^{*2}
高 橋 佳 之^{*3} 和 田 和 実^{*3} 羅 飛^{*4}

Hybrid Control for Peg-in-Hole Task : Simulation and Experiment

Ivan Godler^{*1}, Tadashi Yamashita^{*2}, Shinichi Sagara^{*2},
Yoshiyuki Takahashi^{*3}, Kazumichi Wada^{*3} and Fei Luo^{*4}

Robots are expected to expand their usages into more complicated tasks and in unstructured environments. As an example of such a task, peg-in-hole task by robot is studied in this paper. We report on a computer simulation and an experiment of peg-in-hole task with no edge chamfers, executed by a robot with a force sensor mounted in the wrist applying an appropriate insertion procedure and a hybrid (position/force) control. The robot is a planar Cartesian robot with three degrees of freedom (translation with two degrees of freedom, rotation with one degree of freedom). A condition for the peg to be jammed in the hole under the force control mode is also studied. When the robot insert the peg into the hole, stronger vibrational behaviors both in the contact force and position signals appeared. Therefore we studied vibrational characteristics to find a method to reduce the vibrations.

Key Words : Robotic Assembly, Peg-in-Hole Task, No Edge Chamfer, Hybrid Control, Force Sensor

1. は じ め に

様々な生産現場を中心として、自動化に対する期待は大きく、自動機械一特にロボットは単純な繰り返し作業の現場だけでなく、複雑な作業現場への使用が期待されている。そこで、複雑な作業環境などに適した動作や制御をロボットに行わせることが問題となる。これらを考慮して我々は組立作業に着目し、その中のはめあい作業に対するシステムの一構成を試みている。

はめあい作業は組立作業において基本的操作であるため、多くの研究がなされている[1][2]。これらは、機械的にコンプライアンスを持たせた RCC (Remote Center Compliance) ハンドや、電気的にコンプライアンスを変化できる VACOM (Variable Compliance) ハンドなどであり、ハンドに受動的な装置を用いた研究である。また、RCC と力覚センサを用いた井手ら[3]は学習による手法を提案している。

多種多様な部品に対してはめあい作業を行うには、環境の変化に対応するための力などのフィードバックを含んだ能動的な

システムを使用する必要がある。このようなシステムにおいて有効な方法であるハイブリッド制御についても多くの研究がされており[4][5][6]、押し付け制御への適用で成果を上げている。文献[7]では、ハイブリッド制御をはめあい作業に適用し、挿入に成功したことが述べられている。しかし、挿入時のデータについては何も触れられていない。本論文では、自製の3次元の力センサをロボットの手に装着し、位置制御と力制御のハイブリッド制御系を用いて2次元平面内ではめあい作業を行い、挿入時のデータについて検討する。なお、Peg と Hole に面取りはしていない。

まず、挿入が可能かどうかを調べるために、実験で採用する挿入手順に従い、コンピュータシミュレーションを行った。次に、力信号のフィードバックを用いたシステムの新しい詰まり現象の発生の可能性を指摘し、その条件について解析し、我々が用いたシステムには詰まり現象が起こらないことを確認した。さらに、3自由度の平面直交型ロボットを用いて実験を行い、挿入が成功することを確認した[8]。しかし、挿入中のPegの接触力の信号に振動が発生しており、ワークピースの破損やロボットに支障をきたす恐れがある。そこで、接触力の振動を解析し、位置制御に速度フィードバック補償[9]を施すことで振動挙動が改善され、良好な制御結果が得られたことを示す。

2. はめあい作業の一構成法

Peg を Hole にはめ込む作業には、1) すきまばめ、2) 締まりばめがあり、これをそれぞれ挿入と圧入という[10]。挿入では

原稿受付 1993年2月4日

^{*1}株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ

^{*2}九州工業大学工学部

^{*3}九州工業大学大学院

^{*4}中国北京科技大学大学院

^{*1}Harmonic Drive Systems Incorporation

^{*2}Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

^{*3}Graduate School, Kyushu Institute of Technology

^{*4}Graduate School, Beijing University of Science and Technology

すきまを利用して軸芯ずれの吸収をすることができるが、圧入では吸収できない。すきまばめは組立作業の大部分を占めているので、我々はすきまばめについて考えていく。

2.1 ロボットシステム

ロボットには3自由度の平面直交型ロボットを用い、先端に円筒形のPegを固定する。ロボットは並進2軸、回転1軸で構成されており、またHoleは固定されている。Fig. 1はロボットを鉛直面内で見た様子であり、ヤコビ行列の簡素化や重力項を考えなくてもよいという利点から、このように配置を決定した。Pegの固定部に自製の力センサを装着した。

2.2 挿入手順

Fig. 2のように挿入手順を3つのStepに分ける。HoleとPegの両方に面取りをしていないので、挿入が始まる前にPegをHoleに対して斜め($\theta = -30^\circ$)に置く[11]。これは面取りの影響と同じでPegをHoleに導き、初期位置誤差を吸収するためである。

Step I : 指定した接触力が検出されるまで、PegをZ軸方向へ動かす。

Step II : Z軸方向とX軸方向へ一定の力で押しながら、 θ 軸を 0° まで動かす。

Step III : Holeの角度誤差を補償するために、 θ 軸方向にも力制御を行う。

2.3 挿入条件

挿入が可能であるためには条件がある。

- 幾何学的な条件 : $\cos \theta_{lim} > \frac{d}{D}$ (1)

ここで、

Fig. 1 Schematic diagram of a planar Cartesian robot with three degrees of freedom

Fig. 2 Insertion procedure

θ_{lim} : Pegを 0° に傾けたときの角度誤差

d : Pegの直径

D : Holeの直径

である。この条件はFig. 3から導かれ、式(1)を満たさない場合、Step IIIでPegがHoleに入らないということが分かる。

2.4 ハイブリッド制御系の構成

はめあい作業を位置制御だけで行うためには、クリアランスの許容範囲内でPegとHoleの両方を高精度で位置決めしなければならないが、力制御を並用することでこの問題を解消することができる。我々は作業を3自由度で行うため、Fig. 4で示すようなハイブリッド制御系を構成した。

各軸に独立した位置制御と力制御のループを構成し、制御方向指令ベクトル $s = [s_x, s_z, s_\theta]^T$ で各軸の制御ループを決める。ベクトル s の要素が1なら力制御、0なら位置制御を行うように決定した。Fig. 2の3つのステップに対する s は次の通りである。

Step I : $s = [0 \ 1 \ 0]^T$

Step II : $s = [1 \ 1 \ 0]^T$

Step III : $s = [1 \ 1 \ 1]^T$

3. シミュレーションによる解析

2.2の挿入手順と2.4のハイブリッド制御系が、適当であるかどうかを実験とほぼ同一の条件で、コンピュータシミュレーションによって解析した。

3.1 カセンサの出力の計算

挿入中は、1点、2点及び3点の接触状態が想定される。例として、Fig. 5に1点接触の状態を示す。

画面上のPegとHoleの位置は正確に分かるものとしているので、接触状態を発見するのは困難ではない。摩擦を考慮に入

Fig. 3 Geometrical insertion condition

Fig. 4 Hybrid control system

れない場合には反力の方向は接する両面に垂直である。摩擦はクーロン摩擦として考慮した。

力の大きさは次のように決めた。接触点で Peg が Hole 側に入り込むとし、反力 N は入り込んだ深さ δ に比例するとして、 $N=k\cdot\delta$ とする。ここで、 k は剛性係数である。さらに反力を座標変換することにより、力センサの出力を計算する。

3.2 シミュレーション

シミュレーションソフトは TURBO C を用い、コンピュータ NEC PC 9801 RA で作成した。サンプリングタイムは 10[ms] で、実時間で行う。ロボットの伝達関数は、

$$G(s) = \frac{1}{s(0.15s+1)}$$

と仮定した。

システムのパラメータを実験系の実測値に基づき、以下のよう設定した。

Peg の直径	$d=11.95[\text{mm}]$
Hole の直径	$D=12.01[\text{mm}]$
Hole の深さ	$h=20[\text{mm}]$
システムの剛性	$k_x=30[\text{N/mm}](X \text{ 軸方向})$ $k_z=60[\text{N/mm}](Z \text{ 軸方向})$
摩擦係数	$\mu=0.2$
初期位置誤差は 0 とした。	

そして、位置は P 制御、力は PI 制御であり、力の目標値は Step II では X, Z 軸方向に 8[N], 10[N] とし、Step III では 0[N], 10[N], θ 軸方向に 0[Ncm] とした。

こうした条件の下でシミュレーションを行った結果を Figs. 6, 7 に示す。ここで、 F_x, F_z, M_y は固定座標系での力とモーメントを表す。グラフを見やすくするために Z, F_z を $-Z, -F_z$ として表示した。以上より、このシステムのシミュレーションで挿入が可能であることを確認した。

4. 詰まり現象の解析

はめあい作業においては、ある特定の接触状態で、挿入が妨げられる現象が起こる。この現象を詰まり現象と呼ぶ。Whitney[12]は RCC ハンドを用いて力信号のフィードバックがない状態で、Peg に加える力と摩擦によって生じる詰まり現象について解析している。本論文の方法のように力制御を行う場合、別の原因で挿入が停止する可能性がある。すなわち、挿入途中で力の偏差が零になると、P 制御の場合ロボットの駆動力

$f_x, f_z \cdots$ force sensor's output

Fig. 5 One point contact between peg and hole

が発生されずにロボットがその状態で停止する、新しい詰まり現象が生じる可能性がある。PI などのほかの制御モードでも、挿入中に駆動力が零となる状態が考えられるが、P 制御の場合だけについてその発生条件を調べてみよう。

Peg と Hole を剛体と考え、挿入ができる最大角度誤差を θ_{lim} とすると、幾何学的な条件は式(1)のようになる。一方、Hole の中で Peg が詰まる条件は次のように表される[13](誘導は付録を参照)。

$$\alpha - \beta S_{|\theta|} [2\mu S_{|\theta|} C_\theta + (1 - \mu^2) S_{|\theta|}^2] - \frac{1}{2} S_{|\theta|} [(1 - \mu^2) S_{|\theta|} C_\theta + \mu(C_\theta^2 - S_{|\theta|}^2 - 1)] - C_\theta = 0 \quad (3)$$

ここで、

$$\alpha = D/d, \beta = (l - l_s)/d, S_{|\theta|} = \sin|\theta|, C_\theta = \cos \theta,$$

l : θ 軸から Peg の先端までの距離

l_s : 力センサの中心から基準点までの距離

μ : 摩擦係数

である。

式(3)を満たす α と θ の関係は、 β をパラメータとしてグラフにすると、Figs. 8, 9 のようになる。ここで、 $\theta < 0^\circ$ については α 軸に対して対称となるので $\theta > 0^\circ$ のグラフだけを图示した。この論文では、文献[12]で定義されている jamming と wedging を参考にして、摩擦の影響を受けた場合の力学的な詰まり現象と摩擦係数を 0 とした幾何学的な詰まり現象をそれぞれ jamming, wedging とする。また、曲線 θ_{lim} は幾何学的な挿入条件式(1)から得られる $\theta_{lim} = \arccos(d/D) = \arccos(1/\alpha)$ の曲線である。 $\alpha \geq 1.0$ の範囲でこの曲線の下側の

Fig. 6 Time-position diagram by simulation

Fig. 7 Time-force diagram by simulation

領域に式(3)の関係が入る。 $\beta > 0$ の場合には詰まりが発生する可能性がある。一方、 $\beta \leq 0$ ではその可能性がないことが分かる。

力制御の基準点の位置 β の条件は次のようになる。

$\beta > 0$ のとき, Peg の先端よりセンサ側にある。

$\beta = 0$ のとき, Peg の先端にある。

$\beta < 0$ のとき, Peg の先端より先にある。

この関係を Fig. 10 に示す。つまり、力制御の基準点の位置が Peg の先端にあるか仮想的に先端より先にあるとすると、詰まり現象を生じることなく挿入が可能となる。基準点の位置により詰まる可能性があるかないか、という結果は、RCC ハンドの場合にコンプライアンス中心が Peg の先端に近いほど詰まらないという結果[12]に対応し、興味深い。

Fig. 8 Condition of wedging, $\mu=0$

Fig. 9 Condition of jamming, $\mu=0.2$

Fig. 10 Condition of β

5. はめあい実験

5.1 はめあい実験

3自由度の平面直交型ロボット (PRODALL CTZ-033 東光サービス製), パソコン (NEC PC 9801 RA), 力センサ (3次元定格 100[N], 10[Nm]) を用いて実験を行った。サンプリングタイムは 2.7[ms] である。実験ではシミュレーションと同様に位置制御と力制御の基準点を Peg の先端に選定し、システムのパラメータ値はシミュレーションの場合とほぼ同じである。なお、Step I の θ 軸の位置制御を、位置の定常偏差を除去するため、PI 制御とした以外は、シミュレーションと同じ制御法を用いた。また、力の目標値は Step II では X, Z 軸方向に 8[N], 15[N], Step III では摩擦を考慮して 0[N], 30[N], θ 軸方向に 0[Ndm] とした。グラフを見やすくするために、長さの単位として [dm] を採用した。

以上の条件から得られた結果を Figs. 11, 12 に示す。実験結果はシミュレーションと類似の変化パターンとなっている。しかし、力の出力信号に大きな振動が見られた。

5.2 振動解析

Fig. 12 において、固定座標系で表した接触力 F_x, F_z に大きな振動が見られたため、その振動の原因について解析を行うことにする。最も振動が顕著に現れている Step II の力信号を FFT (Fast Fourier Transform) 解析した。その結果 17[Hz] 前後の振動成分が多く含まれていることが分かった (Fig. 13)。以下、17[Hz] 前後の振動成分について検討する。

Step II において X, Z 軸は力制御, θ 軸は位置制御であるため, θ 軸に着目した Fig. 14 に示す 3 つの実験を行った。測

Fig. 11 Time-position diagram by experiment

Fig. 12 Time-force diagram by experiment

定値は、関節座標系での力 f_x, f_z 及び角度 θ である。

〈実験〉

1. θ 軸に負荷をかけた状態で、 θ 軸を位置制御。
2. θ 軸を位置制御すると同時に X 軸を力制御。
3. θ 軸を位置制御すると同時に Z 軸を力制御。

実験 1, 3 において、接触力に挿入時の周波数の振動は見られず、実験 2 において f_x の信号に挿入時の周波数の振動成分が多く見られた (Fig. 15)。

以上のことから、振動は θ 軸の位置制御と X 軸の力制御との相互作用によって発生しているといえる。さらに、 f_x の振動が顕著になるのは、 θ 軸の回転角速度が増加するときであることが分かる。また、実験 3 において f_z の信号に 17[Hz] 前後の信号が発生していないことから、挿入時の F_z の振動は、 Z 軸、 θ 軸の挙動による影響は少ないといえる。したがって、挿入時に発生する F_z の振動は、力センサの出力信号を固定座標系の力信号に座標変換することにより導入される f_x の振動の影響であると思われる。

5.3 振動減少法

振動解析の結果、 θ 軸の回転角速度の増加が X 軸と Z 軸の力制御系に影響を与えていることが分かった。したがって θ 軸の位置制御ループに速度フィードバック補償を施すことによって、回転角速度の過大な増加を防ぎ、力制御系への干渉を抑えることができると考えられる。補償後の θ 軸のブロック線図を Fig. 16 に示し、はめあい実験の結果を Figs. 17, 18 に示す。ここで、 K の値は予備実験の結果より 0.6 とし、 $\Delta\theta$ は θ

Fig. 13 Results of FFT Analyses (F_x, F_z)

Fig. 14 Experiment for vibrational analysis

の 1 サンプル周期間の変化分である。

補償を行わない Figs. 11, 12 の結果と比べると、補償を行う場合には回転角速度の変化が一樣で緩やかとなり、 F_x, F_z の振幅は減少している。

Fig. 19 は F_x, F_z の Step II における信号を FFT 解析した結果であり、 F_x, F_z の 17[Hz] 前後の振動成分が減少していることが分かる。

6. ま と め

手先に力センサを取り付けた 3 自由度の平面直交型ロボットを用いてハイブリッド制御を構成し、はめあい作業を行った。

Peg と Hole には面取りをしていない。

挿入手順を定義し、シミュレーションでこのシステムの有効性を確認した。また、力信号のフィードバックを用いたシステムで発生する可能性のある、従来指摘されていなかった詰まり現象について解析し、力制御の基準点が Peg の先端が先端より先にあれば詰まり現象が生じないことが分かった。はめあい実験を行ったところ同様の条件で挿入が可能であり、シミュレ

Fig. 15 Result of experiment 2

Fig. 16 Position control loop of θ axis with derivative feedback compensation

Fig. 17 Time-position diagram after compensation

Fig. 18 Time-force diagram after compensation

Fig. 19 Results of FFT analyses (F_x , F_z) for derivative feedback compensation

ーションが正しいことを確認した。

しかし、力の出力信号に大きな振動が見られたので、その原因をFFTで解析し、顕著な振動成分の原因となる軸を3つの実験から検証した。その結果、 θ 軸の位置制御と X 軸の力制御との相互作用によって発生していることが分かった。そこで、 θ 軸の位置制御ループに速度フィードバック補償を施すことで、回転速度の過大な増加を防ぎ、力制御系への干渉を抑えることができることを示した。

なお、力制御を行う場合に生じる詰まり現象のシミュレーション等による、より詳しい解析は今後の課題としたい。

参考文献

- [1] J. L. Nevins and D. E. Whitney: "Computer-controlled assembly," Scientific American, vol. 238, pp. 62-74, 1978.
- [2] K. Asakawa, F. Akiya and F. Tabata: "A variable compliance device and its application for automatic assembly," Proc. of AUTOFACT 5, 10. 1, 1983.
- [3] 井手他: "力覚情報を用いたはめあい作業の学習," 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 1, pp. 118-127, 1992.
- [4] 川村他: "学習方式による位置と力のハイブリッド制御," 日本ロボット学会誌, vol. 5, no. 2, pp. 109-120, 1987.
- [5] 福田他: "対象物の動特性を考慮したグリッパの適応ハイブリッド力制御方式," 日本ロボット学会誌, vol. 6, no. 2, pp. 91-100, 1988.
- [6] 鎌田他: "神経回路モデルによるロボットマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御 (2自由度マニピュレータの適応制御)," 日本ロボット学会誌, vol. 9, no. 1, pp. 45-54, 1991.
- [7] M. H. Raibert and J. J. Craig: "Hybrid position/force control of

manipulators," Robot Motion: Planning and Control, pp. 419-438, MIT Press, 1982.

- [8] 高橋他: "はめあい作業のハイブリッド制御," ロボティクス・メカトロニクス '91 講演会講演論文集, vol. B, pp. 37-38, 1991.
- [9] F. Luo et al.: "Stiffness compensation to reduce vibrations in assembly operation using hybrid control," Proc. of the IMACS/SICE '92, pp. 1301-1306, Kobe, Japan, Sep. 16-20, 1992.
- [10] 精密工学会組立データバンク分科会編: "組付け要素技術マニュアル (はめあい編)," pp. 1-14, 日刊工業新聞社, 1989.
- [11] R. P. C. Paul and B. Shimano: "Compliance and control," Robot Motion: Planning and Control, pp. 405-417, MIT Press, 1982.
- [12] D. E. Whitney: "Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts," Robot Motion: Planning and Control, pp. 439-471, MIT Press, Cambridge, 1982.
- [13] T. Yamashita et al.: "Peg-and-hole task by robot with force sensor: simulation and experiment," Proc. IECON '91, pp. 980-985, Kobe, Japan, Oct. 28-Nov. 1, 1991.

付録 A. 式(3)の導出

力とトルクの偏差が零となる条件がここで対象としている詰まりの発生条件となるので、(1)目標値をセンサ部の成分に変換した式、(2)Pegに働く力・トルクをセンサ出力に変換した式、をそれぞれ求め、この両者より偏差が零になる条件を求めればよい。まず、 $\theta > 0$ の場合、各式は以下のように定式化される。

(1) 目標値のセンサ成分への変換

固定座標系で表されるロボットが発生する力の目標値(F_x , M_y)をセンサ部の成分(f_x , m_y)に変換すると、Fig. Aより次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} f_x &= -F_x \cos \theta + F_z \sin \theta \\ f_z &= -F_x \sin \theta - F_z \cos \theta \\ m_y &= -F_x l_s \cos \theta + F_z l_s \sin \theta - M_y \end{aligned} \quad (\text{A } 1)$$

Step IIIで F_x , M_y の目標値は0なので、

$$F_x = 0, M_y = 0, F_z = F_z \quad (\text{A } 2)$$

となり、力センサの成分は以下ようになる。

$$\begin{aligned} f_x &= F_z \sin \theta \\ f_z &= -F_z \cos \theta \\ m_y &= F_z l_s \sin \theta \end{aligned} \quad (\text{A } 3)$$

(2) Step IIIにおける接触力のセンサ出力への変換

接触状態 (Fig. A) により力センサの出力は(A 4)で得られる。

$$\begin{aligned} f_x &= -N_L + N_R \cos \theta - F_{JR} \sin \theta \\ f_z &= N_R \sin \theta + F_{JL} + F_{JR} \cos \theta \\ m_y &= -N_L b - N_R(r \sin \theta - l_s \cos \theta) + F_{JL} r \\ &\quad - F_{JR}(r \cos \theta + l_s \sin \theta) \\ F_{JL} &= \text{sgn}(\dot{Z}) \mu N_L \\ F_{JR} &= \text{sgn}(\dot{Z}) \mu N_R \\ r &= \frac{d}{2} \end{aligned} \quad (\text{A } 4)$$

ここで、

$$\text{sgn}(\dot{Z}) = \begin{cases} 1, & \dot{Z} > 0 \\ 0, & \dot{Z} = 0 \\ -1, & \dot{Z} < 0 \end{cases}$$

とする。

(3) 詰まりの発生条件

Fig. A Force acting in two point contact between peg and hole

Fig. B Forces acting in two point contact between peg and hole ($\theta = -\phi < 0$)

(A 3)と(A 4)より、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} F_z \sin \theta &= -N_L + N_R \cos \theta - N_R \mu \sin \theta \\ F_z \cos \theta &= -N_R \sin \theta - N_L \mu - N_R \mu \cos \theta \\ F_z l_s \sin \theta &= -N_L b - N_R (r \sin \theta - l \cos \theta) + N_L \mu r \\ &\quad - N_R \mu (r \cos \theta + l \sin \theta) \end{aligned} \quad (\text{A } 5)$$

(A 5)の第1式、第2式より、

$$\frac{N_R}{N_L} = \cos \theta - \mu \sin \theta \quad (\text{A } 6)$$

となり、(A 5)の第3式を第1式に代入すると、

$$\frac{N_R}{N_L} = \frac{l_s - b + \mu r}{(l - l_s)(\mu \sin \theta - \cos \theta) + r(\sin \theta + \mu \cos \theta)} \quad (\text{A } 7)$$

が得られる。

幾何学的関係より

$$b = l - \frac{D - d \cos \theta}{\sin \theta}$$

となるので、(A 6)と(A 7)より以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} &a - \beta \sin \theta [2\mu \sin \theta \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin^2 \theta] \\ &\quad - \frac{1}{2} \sin \theta [(1 - \mu^2) \sin \theta \cos \theta + \mu (\cos^2 \theta \\ &\quad - \sin^2 \theta - 1)] - \cos \theta = 0 \end{aligned} \quad (\text{A } 8)$$

$\theta < 0$ の場合、ロボットが発生する力および接触力をセンサ成分へ変換する時に、それぞれの作用する力の方向が $\theta > 0$ の場合と異なる。Fig. Bのように、 $\phi = -\theta$ ($\phi > 0$)とし、 $\theta > 0$ の場合と同様に解析すると、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} &a - \beta \sin \phi [2\mu \sin \phi \cos \phi + (1 - \mu^2) \sin^2 \phi] \\ &\quad - \frac{1}{2} \sin \phi [(1 - \mu^2) \sin \phi \cos \phi + \mu (\cos^2 \phi \\ &\quad - \sin^2 \phi - 1)] - \cos \phi = 0 \end{aligned} \quad (\text{A } 9)$$

(A 9)は、(A 8)の θ を ϕ とおきかえた形となっている。したがって、 $\theta > 0$ 、 $\theta < 0$ の両方を統一して表現すれば、次式が得られる。

$$\begin{aligned} &a - \beta S_{|\theta|} [2\mu S_{|\theta|} C_\theta + (1 - \mu^2) S_{|\theta|}^2] \\ &\quad - \frac{1}{2} S_{|\theta|} [(1 - \mu^2) S_{|\theta|} C_\theta + \mu (C_\theta^2 - S_{|\theta|}^2 - 1)] - C_\theta = 0 \end{aligned} \quad (\text{A } 10)$$

イヴァン ゴドレール (Ivan Godler)

1962年1月7日生。1986年スロベニア・リュブリアナ大学機械工学科卒業。1991年九州工業大学大学院博士前期課程修了。同年(株)ハーモニック・ドライブ・システムズ入社。現在研究開発センター勤務。精密工学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

相良慎一 (Shinichi Sagara)

1964年1月13日生。1987年九州工業大学制御工学科卒業。1989年同大学大学院修士課程修了。同年農林水産省水産大学校機関学助手。1990年九州工業大学工学部助手。現在に至る。工学博士。適応制御、ロボティクスの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

和田和実 (Kazumichi Wada)

1969年1月17日生。1991年九州工業大学制御工学科卒業。1993年同大学大学院博士前期課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。現在八幡製鉄所設備部機械技術室にて設備診断技術の開発に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

山下 忠 (Tadashi Yamashita)

1938年5月10日生。1961年九州工業大学機械工学科卒業。1966年東京大学大学院博士課程修了。工学博士。九州工業大学制御工学科助教授。現在、同工学部教授。ロボット工学、制御工学の教育と研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

高橋佳之 (Yoshiyuki Takahashi)

1968年12月28日生。1991年九州工業大学制御工学科卒業。1993年同大学大学院博士前期課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。現在、加古川製鉄所制御部制御システム技術室にて圧延プロセス制御技術の開発に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

羅 飛 (Fei Luo)

1957年8月3日生。1982年中国・北京科技大学制御工学科卒業。1986年同大学大学院修士課程修了。同年中国・広西工業大学講師。現在北京科技大学大学院博士課程在学中。知能ロボットの研究に従事。