冗長マニピュレータのオンライン制御の為の 逆キネマティクス的高速数値解法

学生員 高橋 太郎 (横浜国立大学)

正員 河村 篤男 (横浜国立大学)

Low Cost Numerical Calculation Method for
On-line Inverse Kinematics of Redundant Manipulators

Taro Takahashi, Student-member Atsuo Kawamura, Member (Yokohama National University)

A large calculation cost is required to solve the inverse kinematics problem by the numerical iterative method (i.e. Newton-Raphson method) if the dimension of the Jacobian matrix becomes large. In this paper a new high speed numerical calculation method (SMJM method : Simply Modified Jacobian Matrix method) to solve the inverse kinematics of non-redundant manipulators and redundant manipulators are proposed. The calculation time is decreased, by replacing some elements of the Jacobian matrix with zeroes. The Monte Carlo method had been used to verify the advantage of the proposed SMJM method for the six links non-redundant manipulator and the four links redundant manipulator.

キーワード: マニピュレータ、逆キネマティクス、オンライン制御、ヤコビ行列

1. はじめに

通常、マニピュレータを制御する際の逆キネマティクス問題はオフラインで行われることが多い。しかし2足歩行ロボットなどのように環境に応じた軌道計画を行う場合には逆キネマティクスをオンラインで解く必要がある。また、ロボットマニピュレータの構造が複雑になると解析的な手法では解が得られないので数値的解法を用いる必要がある。このとき、マニピュレータの関節が多い場合、大きな次元のヤコビ行列の逆行列を求める必要があり、長い計算時間が必要となる。そこで、本稿ではロボットマニピュレータのための逆キネマティクス的高速数値解法を提案する。

マニピュレータのオンライン制御は2つに分類できる。

一つ目の手法はニュートンラプソン法による繰り返し演算であり、この手法においてはヤコビ行列の逆行列が必要になる。冗長マニピュレータでは、疑似逆行列を用いる手法などのいくつかの手法が提案されている⁽¹⁾。しかし、関節の数が多くなるとヤコビ行列の次数も大きくなり、その結果オンラインの制御にとって非常に長い計算時間が必要となる。

一方、逆ヤコビ行列を用いない手法も提案されている^{(2) (3) (4) (5)}。この手法では、ヤコビ行列の転置行列によってデカルト座標系における力が関節座標系におけるトルクに変換され、閉ループ制御系が設計される。この手法では、計算時間は減少させることができるものの、ロボットマニピュレータにおける制御ゲインがトライアンドエラーによって決定され、応答時間が短くならない⁽³⁾。

提案するSMJM法(Simply Modified Jacobian Matrix method)では、ヤコビ行列の一部の成分を0に置き換えることにより、計算時間を減少させることが出来る非常にシンプルなアルゴリズムである。このSMJM法を4軸冗長マニピュレータ及び6軸マニピュレータに適用し、シミュレーションを行なった。また、通常のニュートンラプソン法とSMJM法の計算コストを比較するためのモンテカルロシミュレーションによって、提案する手法の計算量が従来の手法に比べて少なくなることが示された。

2. 提案するSMJM法 (Simply Modified Jacobian Matrix method)

関節角度座標系における関節角度変数 q とデカルト座標系における手先位置変数 r の関係を式(1)で表すと、ニュートンラプソン法による逆キネ

図1 0への置換法

Fig. 1. Method of Replacing with 0

マトリクスでは、ヤコビ行列 J の逆行列を用いた式(3)の繰り返し計算によって目標とする先端の位置や姿勢 r_{ref} を実現する関節角度 q が求まる。

$$r = f(q) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{r} = J\dot{q} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$q_{i+1} = q_i + J^{-1}(r_{ref} - r_i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

提案する SMJM 法では、計算量を減らすためにヤコビ行列 J の代りに SMJ 行列 J_{mod} が用いられる。

〈2・1〉 SMJ 行列

ヤコビ行列において、各行各列において0でない成分を1つずつ残し、それ以外の成分を0に置換して SMJ 行列 J_{mod} をつくる。例えば j_{11}, j_{23}, j_{32} を残し、それ以外の成分を0に置換するとすると、変形ヤコビ行列の逆行列は式(4)となる。

$$J_{mod}^{-1} = \begin{pmatrix} j_{11} & 0 & 0 \\ 0 & j_{23} & 0 \\ 0 & j_{32} & 0 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{j_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{j_{32}} \\ 0 & \frac{1}{j_{23}} & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

すなわち各成分は、式(5)で表される。

$$j_{modij}^{-1} = \begin{cases} \frac{1}{j_{ji}} & (J_{mod} \text{で残された成分の } ij) \\ 0 & (\text{それ以外の } ij) \end{cases} \quad (5)$$

マニピュレータが冗長自由度を有する時、ヤコビ行列は正方行列でないので逆行列は存在しないが、疑似逆行列 $J^{\dagger}$ に相当する行列 $J_{mod}^{\dagger} = J_{mod}^T (J_{mod} J_{mod}^T)^{-1}$ を求めることができ、その成分は次式の様になる。

$$j_{modij}^{\dagger} = \begin{cases} \frac{j_{modji}}{\sum_k j_{modjk}^2} & (J_{mod} \text{で残された成分の } ij) \\ 0 & (\text{それ以外の } ij) \end{cases} \quad (6)$$

図2 SMJM法の流れ

Fig. 2. Flow of SMJM Method

ここで $\sum_k$ は J_{mod} の i 行において残された全ての成分の j による項の和である。

〈2・2〉 SMJM 法

ヤコビ行列 J の一部の成分を0に置換することによって、求まる解に誤差が生じる。この誤差が増大することを防ぐため、次のアルゴリズムによって0に置換する成分を決定する。

それぞれの成分について $\Delta \varepsilon_{ij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$) を式(7)の様に定義する。

$$\Delta \varepsilon_{ij} \triangleq \left| \left(\sum_{k=1, k \neq j}^n j_{ik} \dot{q}_k \right)^2 - \left(\sum_{k=1}^n j_{ik} \dot{q}_k \right)^2 \right| \quad \dots\dots\dots (7)$$

$\max_{i,j} \{\Delta \varepsilon_{ij}\}$ を満足する成分に第1番目の優先順位を与え、 i 行および j 列の成分のうち ij 成分以外を0に置き換える(図1)。次に、同じ操作が残りの行および列の成分に対して行なわれる。すなわち、 i 行および j 列以外の成分の中で $\max_{i,j} \{\Delta \varepsilon_{ij}\}$ を満足する成分に第2番目の優先順位を与え、その成分以外の成分を0に置き換える。この時本手法では、関節角速度 $\dot{q}$ が必要となる。この操作を繰り返し、各行各列に1つずつの成分が残るようにする。本手法の誤差 err は式(8)により評価される。

$$err = r_{ref} - r_i \leq \lambda \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)が満足されない場合には、SMJ行列は不十分であると判断し、次のように成分を選択し直す。すなわち、1つ前の段階へ戻り、最後に優先順位を与えた成分 ($\Delta \varepsilon_{ij}$ が最大だった成分) を元に戻し、2番目に大きい $\Delta \varepsilon_{ij}$ をとる成分を残し、それ以外の成分を0に置き換える。

式(8)の条件を満足した場合、これが最終的な SMJ ヤコビ行列となる。式(8)の条件を満足しない

図3 4軸冗長マニピュレータ

図4 計算例 (4軸)

図5 手先位置座標 (4軸)

Fig. 3. Redundant Manipulator Fig. 4. Simulation Result (4 Link) Fig. 5. End Point Position (4 Link)

場合は、3番目に大きい $\Delta \varepsilon_{ij}$ をとる成分を選択する。これらの操作が再帰的に行なわれる (図2)。

〈2・3〉 誤差が増大する問題に対する対策

SMJ行列を用いた逆キネマティクスでは、まれに誤差が徐々に大きくなり最終的に発散することがあるので、次の操作 (のいずれか) を行う。

- 数回に一度、定期的に通常のヤコビ行列を用いて解を求める。これは、通常のヤコビ行列を目標軌道から外れていく解を、強制的に正しい解に近づけることになる。
- 生じる誤差を3.3節で後述する近似によってあらかじめ求め、生じる誤差が大きくなる場合には通常のヤコビ行列を用いて解を求める。

これらのアルゴリズムを組み込むことにより、誤差が増大することを防ぐことができる。(なお、可操作度が大きい場合、すなわち特異姿勢から遠い場合はこのような状態は発生しない⁽⁷⁾。) 次節において、前者の手法を4軸冗長マニピュレータに適用した例を3.1節3.2節に示す。また、後者の手法を6軸非冗長マニピュレータに適用した例を3.3節3.4節に示す。

3. 計算例

〈3・1〉 4軸冗長マニピュレータにおける計算例

図3の4軸冗長マニピュレータにおいて2回に1回、通常のヤコビ行列を用いてSMJM法による逆キネマティクスの演算を行なった。

目標軌道 r_{ref} は、平面 $y = 0.15$ 上の半径 0.05 [m] の円軌道とし、 10 [sec] で一周させた。サンプリングタイム h は 0.01 [sec]、収束判断基準 $\lambda = 0.001$ [m] とし、通常のニュートンラプソン法の誤差許容値

$tol = 0.00001$ [m] とした。なお、 tol を小さくすると、はじめのSMJ行列によって解が求まる確率が高くなる傾向がみられ、逆に λ を小さくするとその確率が低くなる傾向が見られる。シミュレーションにおいて関節角速度 $\dot{q}$ は関節角度の時間差分を用い、SMJ行列を用いたニュートンラプソン法の繰り返し演算は1回のみ行なうものとした。

結果は図4の様になりマニピュレータは目標軌道の円軌道を描いていることがわかる。さらに、時間 t に対し手先位置座標をプロットしたグラフが図5であるが、先端が目標軌道を描いていることがわかる。なお、この時通常のニュートンラプソン法が選択された場合は手先位置誤差は tol 以下となり、SMJM法が選択された場合の誤差は最大で $\lambda = 0.001$ [m] 以下となり、十分実用範囲であった。

〈3・2〉 4軸冗長マニピュレータのモンテカルロ法による計算コストの比較

提案するSMJM法ではSMJ行列の成分の組合せを変更した回数によって計算コストが異なるため、モンテカルロ法によるシミュレーションによって計算コストを求め、従来の手法と計算コストを比較した。

乱数によりランダムな3000通りの初期姿勢と先端速度 0.01 [m/sec] の直線軌道を設定し、正確な解が求まるまでに組合せを変更したそれぞれの回数の相対度数を求めることによりSMJM法の計算コストを求めた。その際設定した姿勢は、特異姿勢を除くために可操作度 $w_2, w_3 > 0.00001$ の姿勢に限定した。この可操作度は J の特異値を $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ として $w_2 = \sigma_m / \sigma_1, w_3 = \sigma_m$ と定義される^{(8) (9) (10)}。また、誤差を95%の信頼区間として定義して区間推定を行った。なお、ここでは便宜上、速度については一定としてシミュレーションを行った。

表1 冗長マニピュレータにおける計算コスト (2回に1回、SMJ行列を選択)

Gauss-Jordan 法により疑似逆行列を求める方法	+	×
	$m^3 + 2m^2n + mn$	$m^3 + 2m^2n - 3m^2 + m$
SMJM 法 (() は相対度数 [%])		
1 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (46.16 ± 0.27)	$3mn - 2m + n$	$2mn - m + 3n$
2 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (2.77 ± 0.23)	$3mn - 3m + 2n$	$2mn - 3m + 6n$
3 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (0.07 ± 0.02)	$3mn - 4m + 3n$	$2mn - 5m + 9n$
4 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (0.19 ± 0.02)	$3mn - 5m + 4n$	$2mn - 7m + 12n$
5 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (0.50 ± 0.08)	$3mn - 6m + 5n$	$2mn - 9m + 15n$
6 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (0.05 ± 0.02)	$3mn - 7m + 6n$	$2mn - 11m + 18n$
通常のニュートンラプソン法 (50.00 ± 0.00)	$(m^3 + 2m^2n + mn) + 3mn - \dots$	$(m^3 + 2m^2n - 3m^2 + m) + 2mn - \dots$
SMJM 法の計算コスト	$0.5m^3 + m^2n + 3.5mn + \dots$	$0.5m^3 + m^2n - 1.5m^2 + 2mn + \dots$

*相対度数は4軸冗長マニピュレータのシミュレーションを元にした

表2 非冗長マニピュレータにおける計算コスト (近似により誤差を見積もり、SMJ行列を選択)

Table 2. Calculation Costs of Non-Redundant Manipulators (Select SMJ matrix by approximation to error)

Gauss-Jordan 法	+	×	÷
	$\frac{n(n-1)(n+1)}{2}$	$\frac{n(n-1)(n+1)}{2}$	$\frac{n(n+1)}{2}$
SMJM 法 (() は相対度数 [%])			
1 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (28.07 ± 1.14)	$4n^2 + n + 1$	$3n^2 + 3n + 1$	$n^2 - n$
2 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (7.79 ± 0.50)	$5n^2 + 2n + 2$	$4n^2 + 4n + 2$	$2n^2 - 2n$
3 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (6.52 ± 0.41)	$6n^2 + 3n + 3$	$5n^2 + 5n + 3$	$3n^2 - 3n$
4 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (3.24 ± 0.28)	$7n^2 + 4n + 4$	$6n^2 + 6n + 4$	$4n^2 - 4n$
5 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (4.64 ± 0.34)	$8n^2 + 5n + 5$	$7n^2 + 7n + 5$	$5n^2 - 5n$
6 つめの SMJ 行列により解が求まる場合 (2.22 ± 0.22)	$9n^2 + 6n + 6$	$8n^2 + 8n + 6$	$6n^2 - 6n$
SMJM 法の計算コスト	$11.5n^2 + 8.53n + 8.53$	$10.53n^2 + 10.53n + 8.53$	$8.53n^2 - 8.53n$

*相対度数は6軸マニピュレータのシミュレーションを元にした

計算コストは (a) $\Delta \varepsilon_{ij}$ を求めるコスト、(b) $\Delta \varepsilon_{ij}$ のソートコスト、(c) J_{mod}^{-1} を求めるコスト、(d) J_{mod}^{-1} に対する式 (3) のコスト、に分けられる。このうち表1は (a)(c)(d) のコストを示す ((b) を含めたコストについては後で考察する)。表1において左の列の括弧内に相対度数を示し、ヤコビ行列が $m \times n$ 行列であるとした各演算コストを右の欄に示す。これらをそれぞれの回数について掛け合わせ、その結果を加え合わせることで提案する手法の演算コストが求められる。従来手法として Gauss-Jordan 法により疑似逆行列を用いて解を求めた場合の演算コスト (最上段) と比較して、 n および m が大きくなると SMJM 法が有利であることがわかる。

(3.3) 6軸非冗長マニピュレータにおける計算例
生じる誤差を近似によって求めることによって SMJ 行列を用いるかを決定する方法によって図6の6軸の PUMA 型マニピュレータにおいて逆キネマティクスの演算を行った。

生じる誤差は、次の様に近似によって求めることができる。SMJ 行列を用いてニュートンラプソン法の繰り返し演算を1回行なうと、式 (9) より SMJ 行列で求めた関節角度 q_{modi} が求まる。

$$q_{modi} = q_{i-1} + J_{mod}^{-1} (r_{ref} - r_{i-1}) \dots \dots (9)$$

式 (3)、式 (9) より J_{mod} を用いたニュートンラプソン法の演算1回で生じる関節角度の誤差 $q_i - q_{modi}$

が求まり、これはヤコビ行列 J によってデカルト作業座標系に変換することができる。

$$\begin{aligned} r_i - r_{modi} &\approx J(J^{-1} - J_{mod}^{-1})(r_{ref} - r_{i-1}) \\ &= (I - JJ_{mod}^{-1})(r_{ref} - r_{i-1}) \dots \dots (10) \end{aligned}$$

ここで $A = I - JJ_{mod}^{-1}$ とおく。また、通常のニュートンラプソン法により求めた r_i が目標値 r_{ref} とほぼ等しいとすれば、

$$err_{mod} = r_{ref} - r_{modi} \dots \dots (11)$$

$$\approx A(r_{ref} - r_{i-1}) \dots \dots (12)$$

この式 (12) は、デカルト作業座標系での目標軌道に対する J_{mod} を用いる場合の誤差を表している。

例えば、ヤコビ行列 J が 3×3 であり成分 j_{11}, j_{23}, j_{32} が残されたとすると、 A は次式 (13) のようになる。

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{j_{13}}{j_{23}} & \frac{j_{12}}{j_{32}} \\ \frac{j_{21}}{j_{11}} & 0 & \frac{j_{22}}{j_{32}} \\ \frac{j_{31}}{j_{11}} & \frac{j_{33}}{j_{23}} & 0 \end{pmatrix} \dots \dots (13)$$

このとき、 A の対角成分は必ず0であり、それ以外の成分については A の i 列成分の分母は J_{mod} の i 行において残された成分となる。また、 A の ij 成分の分子は、その ij のうち i をそのまま、 j は分母と同じ j を用いた J_{mod} の ij 成分となる。実際の計算においては、行列 A の各成分には、この規則性により簡単に求めることができる。

図6 6軸マニピュレータ

Fig. 6. Six Links Manipulator

図7 計算例 (6軸)

Fig. 7. Simulation Result (6 Link)

図8 手先位置座標 (6軸)

Fig. 8. End Point Position (6 Link)

結果は、図7の様になり、先端姿勢を一定に保ちながら目標としていた円を描いていることが分かる。さらに、時間 t に対し手先位置座標をプロットしたものが図8であるが、手先効果器が目標軌道を描いていることがわかる。

〈3・4〉 6軸非冗長マニピュレータのモンテカルロ法による計算コストの比較

3.2と同様の方法により、6軸マニピュレータにおけるモンテカルロシミュレーションにより従来の手法と計算コストを比較した。ヤコビ行列が $n \times n$ 行列の場合のSMJM法の計算コストを表2に示す。なお、この表には式(12)の演算量も含まれる。本シミュレーションでは $n=6$ であるが、 n が大きくなるとSMJM法が有利であることがわかる。

〈3・5〉 実用上の計算コスト 本手法は実用上は次の(a)(b)(c)の3通りの方法によりさらに演算量を減らすことができる。(a)いくつかのSMJ行列によっても正確な解が求まらない場合、通常のヤコビ行列によって解を求める。また、(b)式(7)の代りに、計算量の少ない $\Delta \varepsilon_{ij} \triangleq |j_{ij} \dot{q}_j|$ を用いる。この変更はSMJ行列の選択に影響し相対度数の違いとなって現れるが、最終的な解の誤差の最大値は収束判定基準 λ によって保証されるので変化しない。さらに、(c) $\Delta \varepsilon_{ij}$ のソーティングは、図9のように、2つの成分をセットにして順次比較し、最大の成分を見つける。この最大の成分を残し、その行および列の成分を0にした後、残りの成分の中から同様の方法で最大の成分を選ぶ。この際にはそれ以前に利用したセットは再び利用する。

例えばヤコビ行列が 6×6 行列であるとする、式(14)より53回の比較によりSMJ行列の成分を決定することができる。ここで2つ目の括弧の中の $-10-5$ などは、以前に利用したセットを再利用するための減少分であり、この部分は組合わせによ

図9 改良した置換法

Fig. 9. Improved Method of Replacing

り多少増減する。

$$\begin{aligned}
 & (36 \text{ 個の中から最大の成分を選ぶための比較回数}) \\
 & + (25 \text{ 個の中から最大の成分を選ぶための比較回数}) \dots \\
 & = (35) + (24 - 10 - 5) + (15 - 8 - 4) + (8 - 3) + (3 - 2) \\
 & = 53[\text{回}] \dots \dots \dots (14)
 \end{aligned}$$

2つ目のSMJM行列により解が求まる場合は、最後に決定した成分を変更するのみでよいから $53 + 1 = 54[\text{回}]$ が2回までSMJ行列を変更する場合の比較回数である。なお、マニピュレータの姿勢変化が微少であるとして式(12)の計算は毎回行わないものとする。その後通常のニュートンラプソン法を行う場合の計算量も含め、表にまとめると表3のようになる。さらに、SMJM法を複数回用いる場合の計算コストの変化は図10のようになり6回程度が最適であることがわかる。

4. 必要なサンプリング周期

本手法では終了するまでの時間が変化するので、制御のサンプリング周期は最長の場合に合わせる必要があるが、図11の様にサンプリング周期は長く設定する必要があるものの、総合的には必要な時間は従来の手法よりも短くなる。よってこれらの残存時間を、例えば経路生成や環境のモデリング等の様なコントローラの上位の部分によって利用することにより本手法のメリットを生かすことができる。

表3 5回までSMJM法を用いる場合の計算回数の比較(ヤコビ行列が 6×6 の場合)

Table 3. Each Operation Number when SMJ Matrix was Changed until Five Times (Jacobian is 6×6)

	+	×	÷	比較	合計
Gauss-Jordan 法による場合	105	126			231
SMJM 法(()は相対度数[%])					
1 回目の SMJ 行列による場合 (33.42)	12	42	53		107
2 回目の SMJ 行列による場合 (9.16)	18	48	54		120
3 回目の SMJ 行列による場合 (6.95)	24	54	59		137
4 回目の SMJ 行列による場合 (7.33)	30	60	60		150
5 回目の SMJ 行列による場合 (3.88)	36	66	64		166
その後 Gauss-Jordan 法 (39.26)	141	192	64		397
SMJM 法の期待値	66.3	104.5	58.8		229.6

図10 計算回数の変化(6軸の場合)

Fig. 10. Number of Calculation (6 axis)

図11 計算時間

Fig. 11. Calculation Time

5. まとめ

本稿では、ヤコビ行列の一部の成分を0に置換することにより短い計算時間によって解くことのできる逆キネマティクスの数値解法、SMJM法を提案し、モンテカルロシミュレーションにより演算コストが通常の方法より小さくなることを示した。本手法を適用することにより、冗長マニピュレータのオンライン制御がより容易になる。

最後に本研究の一部は文部省科学研究費補助金によって行われたことを付記する。

(平成12年2月1日受付、平成12年10月11日再受付)

文 献

- (1) D.L. Pieper: "The Kinematics of Manipulators under Computer Control", Ph. D. Thesis, Stanford University (1968)
- (2) 花房、吉川、中村: "関節形ロボットアームの冗長性の解析とその優先順位を有する作業への応用", 計測自動制御学会論文集, vol. 19, No. 5, 421/426 (1983)
- (3) 竹垣、有本: "マニピュレータの作業座標フィードバック制御" 計測自動制御学会論文集, vol. 17, No. 5, 582/588 (1981)
- (4) 井上: "冗長マニピュレータの漸近的制御について" 計測自動制御学会論文集, vol. 26, No. 3, 339/343 (1990)
- (5) 播磨、川口、中谷、二宮: "新しいスライディングモードを用いた宇宙用冗長マニピュレータの制御", 日本ロボット学会誌, vol. 9, No. 7, 821/829 (1991)
- (6) 高橋、河村: "非冗長マニピュレータにおける逆キネマティクスの高速数値解法の提案", 電気学会論文誌D, Vol.118-D No.12, pp.1454-1455 (1998)
- (7) 高橋、河村: "逆キネマティクスにおける逆ヤコビ行列の簡易計算法の提案", 電気学会産業計測制御研究会, IIC-99-15, pp.95-100 (1999)
- (8) T. Yoshikawa: "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy", Robotics Research, The First International Symposium, eds. M. Brady and R. Paul, MIT Press, Cambridge, Mass. pp.735-747 (1984)
- (9) J.K. Salisbury, J.J. Craig: "Articulated Hands, Force Control and Kinematic Issues", Int. J. Robotics Research, 1, 1, pp.4-17 (1982)
- (10) C.A. Klein: "Use of Redundancy in the Design of Robotic System, Robotics Research, The Second International Symposium, eds. H. Hanafusa and H. Inoue, MIT Press, Cambridge, Mass., pp.207-214 (1985)

高橋 太郎

(学生員) 1973年9月10日生。1997年3月横浜国立大学電子情報工学科卒業、同年4月同大学院工学研究科博士課程入学。同年4月より日本学術振興会特別研究員。2足歩行ロボット及びマニピュレータのオンライン制御に関する研究に従事。電気学会、ロボット学会、IEEE 学生会員。現在、横浜国立大学大学院工学研究科博士課程後期在学中。

河村 篤男

(正員) 1953年12月17日生。1981年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学博士課程修了。現在、横浜国立大学工学部電子情報工学科教授。主として、パワーエレクトロニクス、ロボティクス、デジタル制御などの研究に従事。工学博士。1988年IEEE/IAS論文誌論文賞、1996年電気学会論文賞授賞。IEEE、電子情報通信学会、ロボット学会、計測自動制御学会等会員。