Stewart Platform 型パラレルリンクマニピュレータの Forward Kinematics 計算アルゴリズム

小 菅 一 弘* 川 俣 裕 行* 福 田 敏 男*

小 塚 敏 紀** 水 野 智 夫*

Forward Kinematic Calculation of Stewart Platform Manipulator

Kazuhiro KOSUGE Hiroyuki KAWAMATA Toshio FUKUDA
Toshiki KOZUKA Tomoo MIZUNO

This paper proposes a method to calculate the forward kinematics of a Stewart Platform type of parallel link manipulators. The Stewart Platform consists of a base platform, a moving platform, and linear actuators connecting the both platforms. First we introduce a virtual parallel link mechanism, having the same kinematic structure as the original parallel mechanism. We assume that the moving platform of the virtual mechanism is directly driven by actuators and the limbs connecting both platforms have no actuators. A trajectory tracking control system is designed for this virtual mechanism based on the resolved motion rate control, so that the displacements of limbs are controlled by the actuators driving the moving platform. We calculate the forward kinematics by numerical simulation of the control system; the position and orientation of the moving platform of the virtual mechanism is a solution for given displacements of limbs, when the tracking error of limbs converges to zero. The method is effective for a time varying displacements of limbs as long as the displacements are differentiable about time. The position and orientation of the moving platform is obtained without error, once the tracking error converges to zero. The simulation results illustrate the method.

Key Words : Robot, Forward kinematics, Stewart platform, Simulation, Resolved motion rate control

1. は じ め に

パラレルリンクマニピュレータは従来から広く用いられているシリアルリンクマニピュレータと比べいくつかの対照的な特徴を有している。シリアルリンクマニピュレータが駆動ジョイントを直列に接続していき必要な自由度を得ているのに対し、パラレルリンクマニピュレータは、駆動ジョイントをすべて並列に配置することによって6個の自由度を得ている。一般にパラレルリンクマニピュレータの作業空間はシリアルリンクマニピュレー

タの作業空間に比べて狭いが、シリアルリンクマニピュレータが不向きとしている高速、高精度、高負荷の作業に耐えられるという利点があり、従来のロボットに採用されてきたシリアル機構では達成できなかった分野への応用が期待されている。

Stewart Platform¹⁾に代表されるパラレルリンクマニピュレータを応用するときには不可欠な Kinematics の計算問題について考えると、シリアルリンクマニピュレータでは難しかった Inverse Kinematics の計算は、パラレルリンクマニピュレータでは幾何学的条件から比較的容易に導出できるが、シリアルリンクマニピュレータでは容易な、Forward Kinematics の計算はパラレルリンクマニピュレータでは非常に難しい。パラレルリン

原稿受付 1992 年 3 月 27 日

* 名古屋大学工学部

** 石川島播磨重工業株式会社メカトロ総合開発センター

クマニピュレータの Forward Kinematics をいかに計算するかということは、重要な課題の一つである。パラレルリンクマニピュレータの Forward Kinematics については、いろいろと研究が行われている。新井らは、Stewart Platform において、数値解法や、マニピュレータのジョイントに角度センサを取り付けることによって Forward Kinematics の解を求める方法⁴⁾を提案している。Nauma らは全体の形状が八面体となる Stewart Platform について Forward Kinematics を求めた⁹⁾。また Merlet らは、一般的なパラレルリンクマニピュレータについて、Forward Kinematics を求めた¹⁰⁾が、計算が煩雑でまた実用的ではない。Sugimoto は、Motor Algebra を用いて Newton-Rophson 法と等価な方法で繰り返し計算を行う方法を提案している¹⁰⁾。

本論文では、Stewart Platform 型マニピュレータにおいて、もとのパラレルリンクマニピュレータと同一の構造を持ち、エンドエフェクタが速度制御される仮想的なパラレルリンクマニピュレータを考え、制御系を設計し、これをシミュレーションすることにより、Forward Kinematics の計算をする方法を提案する。シミュレーションに基づく方法も繰り返し演算を用いた数値計算法の一つであると考えられるが、従来の計算法が、与えられた各ジョイントの長さ(一定)に対する Forward Dynamics の計算を考えていたので、各ジョイントの長さが時間関数の場合には、サンプル点毎に繰返し計算する必要があるのに対し、提案する方法では、各ジョイントの長さが時間関数である場合にも有効である。

本論文では、まず Stewart Platform 型マニピュレータの機構と座標系について説明する。次に Forward Kinematics を求めるための新しい数値計算法を提案するための準備として、パラレルマニピュレータの Inverse Kinematics の計算と Jacobian の計算法について考える。そして仮想的なパラレルリンクマニピュレータを用いた Forward Kinematics の新しい数値計算法を提案し、最後にシミュレーションでその有効性を示す。

2. パラレルリンクマニピュレータの機構と Inverse Kinematics

Stewart Platform 型パラレルリンクマニピュレータを Fig. 1 に示す。本稿では、上部六角形 $E_1E_2E_3E_4E_5E_6$ で表現されるプラットホームをエンドエフェクタと呼び、基準座標系に固定された下部六角形 $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ で表現されるプラットホームをベースと呼ぶことにする。上部六角形は、球面継手により接続された長さの制御できるアクチュエータ 6 本により支えられている。6 本のアクチュエータの長さを制御することによって可

Fig. 1 Stewart platform

動範囲内でエンドエフェクタに任意の位置姿勢をとらせることができる。

本論文ではプラットホームの形状が任意の一般的な Stewart Platform 型パラレルリンクマニピュレータについて考える。ここでプラットホームとアクチュエータを結ぶ点をプラットホームの頂点とすると、それぞれのプラットホームの 6 個の頂点は必ずしも同一平面内にある必要はない。パラレルリンクマニピュレータにおいて、プラットホームの 6 個の頂点を同一平面内に設けることは、機構上の問題から難しい場合も多く、それらを任意の位置に決めることができることは、実際の問題を考えると非常に有効である。

パラレルリンクマニピュレータの座標系を Fig. 2 のように決定する。XYZ 座標系は固定座標系でベース上に固定する。xyz 座標系は XYZ 座標系に対して移動する座標系で、エンドエフェクタ上に固定する。前述したように、エンドエフェクタ、ベースの形状を決める 6 個の頂点は必ずしも同一平面内にある必要はない。ベースの継手の配置を Fig. 2 に示すようにパラメータ R_i , ϕ_i , ψ_i を用いて極座標で表すとして、ベースの継手の位置は XYZ 座標系で以下のように表せる。但し今後 $i=1\sim 6$ とする。

Fig. 2 Coordinate system

$$B_i = \begin{pmatrix} B_{Xi} \\ B_{Yi} \\ B_{Zi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_i \sin \phi_i \cos \varphi_i \\ R_i \sin \phi_i \sin \varphi_i \\ R_i \cos \phi_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

同様にエンドエフェクタの継手の位置をパラメータ r_i, θ_i, ϕ_i を用いて極座標で表すとする、エンドエフェクタの継手の位置は xyz 座標系以下のように表せる。

$$e_i = \begin{pmatrix} e_{xi} \\ e_{yi} \\ e_{zi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_i \sin \theta_i \cos \phi_i \\ r_i \sin \theta_i \sin \phi_i \\ r_i \cos \theta_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

次に XYZ 座標系からの xyz 座標系の原点の位置を x_c, y_c, z_c とし、姿勢を $X-Y-Z$ 固定角で記述するエンドエフェクタの位置/姿勢を表すベクトルは $x = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)^T$ となる。ここで r, β, α はそれぞれ xyz 座標系を X 軸, Y 軸, Z 軸回りにこの順で回転角を表す。いまベクトル X_c , 行列 T を以下のように定義する¹⁾。但し $\sin \alpha = s\alpha$, $\sin \beta = s\beta$, $\cos \alpha = c\alpha$, $\cos \beta = c\beta$ とした。

$$X_c = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$T = \begin{pmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{pmatrix} \quad (4)$$

このベクトル X_c と行列 T を用いると, xyz 座標系で表されたエンドエフェクタの継手の位置 e_i は XYZ 座標系では次式のように表せる。

$$E_i = T e_i + X_c \quad (5)$$

ここで $E_i = (E_{Xi}, E_{Yi}, E_{Zi})^T$ はエンドエフェクタの継手の位置を XYZ 座標系で表したものであり、各要素は以下のように表せる。

$$E_{Xi} = (c\alpha c\beta) e_{xi} + (c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma) e_{yi} + (c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma) e_{zi} + x_c \quad (6)$$

$$E_{Yi} = (s\alpha c\beta) e_{xi} + (s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma) e_{yi} + (s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma) e_{zi} + y_c \quad (7)$$

$$E_{Zi} = (-s\beta) e_{xi} + (c\beta s\gamma) e_{yi} + (c\beta c\gamma) e_{zi} + z_c \quad (8)$$

6本のアクチュエータの長さをそれぞれ $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ とし、ベクトルを用いて $l = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)^T$ と表すとする、エンドエフェクタの位置/姿勢 x とアクチュエータの長さ l の関係は

$$l = f(x) \quad (9)$$

と表せる。与えられたエンドエフェクタの位置/姿勢 x から各アクチュエータの長さ l を求める問題がパラレルリンクマニピュレータの Inverse Kinematics の問題である。 i 番目のアクチュエータの長さ l_i は、それぞ

れ i 番目のエンドエフェクタの継手 E_i とベースの継手 B_i の距離であり、

$$l_i^2 = l_{Xi}^2 + l_{Yi}^2 + l_{Zi}^2 \quad (10)$$

$$l_i = \sqrt{l_{Xi}^2 + l_{Yi}^2 + l_{Zi}^2} \quad (11)$$

と表せる。但し

$$l_{Xi} = E_{Xi} - B_{Xi} \quad (12)$$

$$l_{Yi} = E_{Yi} - B_{Yi} \quad (13)$$

$$l_{Zi} = E_{Zi} - B_{Zi} \quad (14)$$

である。

ここで (11) 式の右辺はエンドエフェクタの位置/姿勢を表す $x = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)^T$ の関数であり、与えられたエンドエフェクタの位置/姿勢に対し各アクチュエータの長さ l を求めることができる。

3. パラレルリンクマニピュレータの Jacobian

(9) 式の両辺を時間に関して全微分すると次式を得る。

$$\dot{l} = J \dot{x} \quad (15)$$

$$J \equiv \frac{\partial f}{\partial x} \quad (16)$$

本論文では (16) 式によって定義される J をパラレルリンクマニピュレータの Jacobian ということにする。但しここでいう Jacobian とはシリアルリンクマニピュレータの Jacobian とは定義が異なり、シリアルリンクマニピュレータの Jacobian の逆行列に相当するものとなっている。

(10) 式の両辺を全微分し、これを整理すると、

$$\begin{pmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \\ \dot{l}_4 \\ \dot{l}_5 \\ \dot{l}_6 \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} \quad (17)$$

を得る。ここで J の要素 J_{ij} は次式で計算できる。

$$J_{i1} = l_{Xi} \frac{1}{l_i} \quad (18)$$

$$J_{i2} = l_{Yi} \frac{1}{l_i} \quad (19)$$

$$J_{i3} = l_{Zi} \frac{1}{l_i} \quad (20)$$

$$J_{i4} = (l_{Xi}((-s\alpha c\beta) e_{xi} + (-s\alpha s\beta s\gamma - c\alpha c\gamma) e_{yi} + (-s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma) e_{zi}) + l_{Yi}((c\alpha c\beta) e_{xi} + (c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma) e_{yi} + (c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma) e_{zi})) \frac{1}{l_i} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 J_{15} = & (l_{x1}((-cas\beta)e_{x1} + (cac\beta sr)e_{y1} \\
 & + (cac\beta cr)e_{z1}) \\
 & + l_{y1}((-sas\beta)e_{x1} + (sac\beta sr)e_{y1} \\
 & + (sac\beta cr)e_{z1}) \\
 & + l_{z1}((-c\beta)e_{x1} + (-s\beta sr)e_{y1} \\
 & + (-s\beta cr)e_{z1})) \frac{1}{l_i} \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{16} = & (l_{x1}((cas\beta cr + sasr)e_{y1} \\
 & + (-cas\beta sr + sacr)e_{z1}) \\
 & + l_{y1}((sas\beta cr - casr)e_{y1} \\
 & + (-sas\beta sr - cacr)e_{z1}) \\
 & + l_{z1}((c\beta cr)e_{y1} \\
 & - (c\beta sr)e_{z1})) \frac{1}{l_i} \quad (23) \\
 & (i=1 \sim 6)
 \end{aligned}$$

(16) 式で定義される Jacobian は x だけの関数であるが, (18)~(23) 式で表される Jacobian は x と l の関数である. 与えられたエンドエフェクタの位置/姿勢 x に対して Jacobian を計算するには, まず (10) (11) 式から l_i を計算し, (18)~(23) 式に代入すればよい. この Jacobian を用いることによって一般的な形状の Stewart Platform 型パラレルリンク マニピュレータにおける各アクチュエータの速度とエンドエフェクタの速度を関係づけることができる.

4. Forward Kinematics の計算方法

もとのパラレルリンクマニピュレータと構造は同一であるが, ベースとエンドエフェクタが球面継手を介して非駆動のプリズマティックジョイントで結合され, エンドエフェクタ自身の速度がアクチュエータによって直接制御できるような仮想パラレルリンクマニピュレータを考える. この仮想パラレルリンクマニピュレータに対して, 速度分解制御の考え方に基きジョイントの長さを制御することを考え, Fig. 3 に示すような制御系を構成する.

いま仮想パラレルリンクマニピュレータのジョイントの長さの目標値を l_d とし, エンドエフェクタの速度が制御入力 u によって次式のように制御できるとする.

$$\dot{x} = u \quad (24)$$

仮想パラレルリンクマニピュレータは, もとのパラレルリンクマニピュレータとは同一の構造を持つとしたので, アクチュエータの長さ l とエンドエフェクタの位置/姿勢 x の間には, (9) 式ならびに (15) 式の関係が成立する.

いま J は正則であると仮定して, J の逆行列を両辺に左からかけると次式が成立する.

Fig. 3 Numerical calculation system

$$\dot{x} = J^{-1} \dot{l} \quad (25)$$

Fig. 3 に示すように, (24) 式に対して

$$u = J^{-1}(\dot{l}_d + K(l_d - f(x))) \quad (26)$$

なるフィードバックを考えると, 次式を得る.

$$\dot{x} = J^{-1}(\dot{l}_d + K(l_d - f(x))) \quad (27)$$

(9) (25) (27) 式を書き直すと

$$J^{-1} \dot{l} = J^{-1}(\dot{l}_d + K(l_d - l)) \quad (28)$$

となり,

$$J^{-1}(\dot{l}_d - \dot{l} + K(l_d - l)) = 0 \quad (29)$$

が成立する. ここで J は正則であると仮定したので次式が常に成立する.

$$\dot{l}_d - \dot{l} + K(l_d - l) = 0 \quad (30)$$

また,

$$l_d - l = e \quad (31)$$

とすると (30) 式は次式のように書き直せる.

$$\dot{e} + Ke = 0 \quad (32)$$

となる. (32) 式の解は

$$e(t) = e^{-Kt} e(0) \quad (33)$$

となるので, $K > 0$ とすれば任意の初期値 $e(0) \neq 0$ に対して

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (34)$$

が成り立つ. このとき仮想パラレルリンクマニピュレータは (31) 式より

$$\lim_{t \rightarrow \infty} l = l_d \quad (35)$$

が成り立つ. このとき, 仮想パラレルリンクマニピュレータはもとのパラレルリンクマニピュレータと同一の構造を持つと仮定したので, 仮想パラレルリンクマニピュレータのエンドエフェクタの位置/姿勢 x は $l_d = f(x_d)$ の一つの解となることがわかる. したがって与えられたアクチュエータの長さを l_d として Fig. 3 の制御系をシミュレーションすることによってエンドエフェクタの位置/姿勢 x を求めることができることがわかる.

この数値計算法を用いると, 一般的な形状の Stewart Platform 型マニピュレータについて, Forward Kinematics を容易に計算することができ, また (35) 式は時間に関して一階微分可能な任意の $l_d(t)$ に対して成り

立つので、目標値 l_d として正弦波のような時間関数をあたえても自然に Forward Kinematic の計算を連続して行える。また、計算誤差の収束性は、ゲイン K によって調整できる。

5. シミュレーション結果と考察

ここでは Fig. 4 に示すエンドエフェクタとベースの形状を持つ Stewart Platform 型マニピュレータを考え、シミュレーションを行った。その形状を決めるためのパラメータを Table 1, Table 2 に示す。

アクチュエータの長さの目標値 l_d としてステップ入力と時間関数入力を与えてシミュレーションするが、いずれの入力を与える場合においても、最初のエンドエフェクタの位置/姿勢 x の初期値 x_0 を次の値とする。

$$x_0 = \begin{pmatrix} x_c0 \\ y_c0 \\ z_c0 \\ \alpha_0 \\ \beta_0 \\ \gamma_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0.5 \text{ m} \\ -20^\circ \\ 0^\circ \\ 0^\circ \end{pmatrix} \quad (36)$$

5.1 l_d が一定の場合

まず、アクチュエータの長さ l_d が一定の場合についてシミュレーションを行った。6本のアクチュエータの長さ $l_d = (l_{d1}, l_{d2}, l_{d3}, l_{d4}, l_{d5}, l_{d6})^T$ とゲイン K の値を Table 3 に示す。

シミュレーション結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より各アクチュエータの長さはステップ入力である目標値 l_d に収束しており、そのときのエンドエフェクタの位置/姿勢 x を計算できることがわかる。本シミュレーションでは、収束性がわかり易いようにゲイン K を設定したが、ゲイン K を大きくすることによって、さらに収束性を高めることも可能である。

5.2 l_d が時間関数の場合

次にアクチュエータの長さの l_d が時間関数の場合についてシミュレーションを行う。ここでは時間関数の例として正弦波を考える。6本のアクチュエータの長さ l_d として $l_d = \sin 3t + 2.5$ を与え、ゲインを $K=6$ としてシミュレーションを行った。

シミュレーション結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、アクチュエータの長さの目標値 l_d が正弦波で表される時間関数の場合にも一度計算誤差が零に収束すれば、あとはリアルタイムでエンドエフェクタの位置/姿勢 x を計算できることがわかる。

6. ま と め

本論文ではパラレルリンクマニピュレータの Forward

Fig. 4 Platform configuration

Table 1 Parameters for endeffector ($i=1\sim6$)

r_i [m]	θ_i [deg]	ϕ_1 [deg]	ϕ_2 [deg]
1	90	0	80
ϕ_3 [deg]	ϕ_4 [deg]	ϕ_5 [deg]	ϕ_6 [deg]
120	200	240	320

Table 2 Parameters for base ($i=1\sim6$)

R_i [m]	ψ_i [deg]	φ_1 [deg]	φ_2 [deg]
2	90	0	40
φ_3 [deg]	φ_4 [deg]	φ_5 [deg]	φ_6 [deg]
120	160	240	280

Table 3 Parameters for simulation

l_{d1} [m]	l_{d2} [m]	l_{d3} [m]	l_{d4} [m]
2.4	2.0	1.6	1.6
l_{d5} [m]	l_{d6} [m]	K	
2.0	2.4	10	

Kinematics の数値計算法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した。提案する方法は、対象とするパラレルリンクマニピュレータと同一の構造を持ち、エンドエフェクタが速度制御できる仮想パラレルリンクマニピュレータに対して制御系を構成し、そのシミュレーションによって解を求めるもので、解析解では求めることのできない一般的な形状の Stewart Platform 型マニピュレータに対して Forward Kinematics の計算を

(a) Actuator length

(b) Position of endeffector

(c) Orientation of endeffector

Fig. 5 Simulation result 1

容易に行うことができる。また、アクチュエータの長さ l_d が時間関数の場合にも一度計算誤差が零に収束すれば、あとはリアルタイムで誤差なくエンドエフェクタの位置/姿勢 x を計算できる。

参考文献

- 1) J. J. Craig, 三浦訳: “ロボティクス”, (1991), pp. 42-44, pp. 141-144, 共立出版.
- 2) 武田・舟橋・平原: “パラレルマニピュレータの特異点

(a) Actuator length

(b) Position of endeffector

(c) Orientation of endeffector

Fig. 6 Simulation result 2

解析”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1991), 61-63.

- 3) 内山・飯村・多羅: “パラレルロボット HEXA の特異点解析”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1991), 65-66.
- 4) 中島・片岡・永田・和田・新井: “パラレルリンク マニピュレータ用制御装置の開発”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1991), 73-74.
- 5) 新井・K. Clearly・中村・安達・本間: “パラレルリンク マニピュレータの開発第2報”, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1990), 685-686.
- 6) 新井・R. Stoughton・中村・安達・本間: “パラレルリンク マニピュレータの開発第3報”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1991), 71-72.
- 7) 津坂・福泉・井上: “パラレルマニピュレータの設計と機構特性”, 日本ロボット学会誌5巻3号, (1987), 12-19.
- 8) 舟橋・堀江: “6自由度パラレルマニピュレータの開発”, 日本機械学会論文集(c編), (1990), 829-823.
- 9) Nauma, P.: “Direct Kinematics Solution of a Stewart Platform”, Trans. IEEE Robotics and Automation, Vol.6-4, pp. 438-444, (1990).
- 10) Sugimoto, K.: “Kinematics and Dynamic Analysis of Parallel Manipulators by Means of Motor Algebra”, Trans. ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.6-4, pp. 438-444, (1990).

- 11) C. Gosselin, J. Angeles: "Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.6, No.3, pp.281-290, (1990).
- 12) K. Lee, D. Shah: "Dynamic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.3, pp.354-367.
- 13) Fichter, E. F.: "A Stewart platform-based manipulator", general theory and practical construction, The Int. J. Robotics Research, Vol.5, No.2, pp.157-182, (1986).
- 14) Hunt, K. H.: "Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms", Trans. ASME, J. Mech., Trans., and Auto. in Design, Vol.105, pp.705-712, (1983).
- 15) Do, D. Q. W. and Yang, D. C. H.: "Inverse dynamic analysis of a platform type of robot", J. Robotic Syst., Vol.5, No.3, pp.210-227, (1988).
- 16) J. P. Merlet: "An Algorithm for The Forward Kinematics of General 6 D.O.F. Parallel Manipulators", INRZA Research Report, N°1331, Novembre (1990).
- 17) D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom", Proc. Institute of Mechanical Engineering, Vol.180, Part 1, No.15, pp.371-386, 1965-1966.

小菅一弘 (Kazuhiro KOSUGE)

1955年10月2日生。1978年3月東京工業大学工学部制御工学科卒業。1980年3月同大学大学院修士課程修了。日本電装株式会社を経て、1982年10月東京工業大学工学部助手。1990年9月名古屋大学工学部機械情報システム工学助教授、現在に至る。日本機械学会、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)

川俣裕行

(Hiroyuki KAWAMATA)

1969年3月24日生。1992年3月名古屋大学工学部機械学科卒業。同年4月運輸省入省、現在、建設省北陸地方建設局企画部企画課所属。

福田敏男 (Toshio FUKUDA)

1948年12月12日生。1971年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1977年東京大学大学院博士課程修了、工学博士。通産省工業技術院機械技術研究所研究官、及び東京理科大学工学部機械工学科助教授を経て、1989年4月より名古屋大学工学部機械情報システム工学科教授。IEEE IES Vice President, IEEE NNC Secretary, IEEE R & A TC 委員長等歴任。
(日本ロボット学会正会員)

小塚敏紀 (Toshiki KOZUKA)

1950年10月17日生。1976年3月成蹊大学工学部機械工学課修士課程修了。同年4月石川島播磨重工業株式会社入社、技術本部メカトロ総合開発センター勤務、機械システム開発業務に漢事、現在に至る。

水野智夫 (Tomoo MIZUNO)

1962年11月9日生。1986年3月名古屋大学工学部機械工学科卒業。同年4月石川島播磨重工業株式会社入社、技術本部メカトロ総合開発センター勤務。