

パラレルマニピュレータのフルクローズド姿勢制御

田中 義人・石井 純子・横道 勲

Full-Closed Control of Parallel Manipulators

Yoshito TANAKA, Junko ISHII and Isao YOKOMICHI

Abstract

For a posture control of a 6-DOF parallel manipulator, a full-closed control technique has been proposed using information of 6-DOF motion of the platform. The feedback signals are obtained via real-time measurement procedure, which utilizes forward kinematics. The servo loop corrects the cylinder lengths by checking the errors between the commands and feedback signals. This paper derives the incremental errors between postures and cylinder lengths by linearizing the nonlinear kinematics equation. The incremental signals for the cylinder length were simulated and compared with those by inverse kinematics solution. By including this relationship in control loop, the experiments of the full-closed control were performed, and the validity of the liner compensator technique was evaluated.

Key words: Full-Closed, Semi-Closed, Parallel Robot, Poisoning

1. 緒 言

アクチュエータを並列に配置したパラレルは、コンパクトな機構で多自由度運動が可能である。高剛性や高速動作の特長を生かした工作機械への実用化や医療・福祉分野への応用研究が進んでおり、機構の高精度化が要求されている⁽¹⁾。パラレルマニピュレータでは、各関節部の運動を解析する逆運動学が一意に求まるため、各シリンダの変位をサーボ制御するセミクローズド制御方式が一般に用いられている⁽²⁾。しかし、この方式ではプラットフォームの多自由度姿勢に対する間接制御となり、関節部のガタや剛性による姿勢誤差が補償されない。

そこで、本研究ではパラレルマニピュレータについて、6自由度姿勢の制御偏差をシリンダ制御偏差に変換する線形化補償方式を定式化し、これを用いたフルクローズド制御方式を提案する。本研究では、線形化補償方式をパラレルマニピュレータの姿勢制御に実装し、実験によりフルクローズド方式を実現する。また、レーザ変位センサによる検証実験を行い、従来のセミクローズド制御方式と比較し、フルクローズド制御方式の有効性について評価する⁽³⁾⁽⁴⁾。

2. パラレルマニピュレータのフルクローズド制御

従来行われているシリンダ長をフィードバックするセミクローズド制御方式を図1に示す。この方式に対し、フルクローズド制御方式とは、プラットフォームの6自由度の運動姿勢を検出しフィードバックする方式である。

外部センサによるリアルタイムの6自由度同時姿勢検出は困難なため、図2に示すように各シリンダの変位検出器

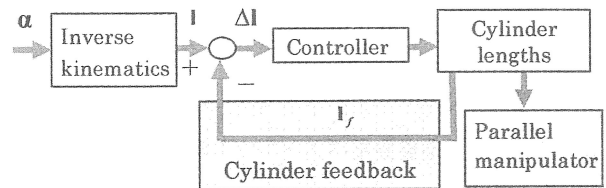


Fig.1 Semi-closed control system

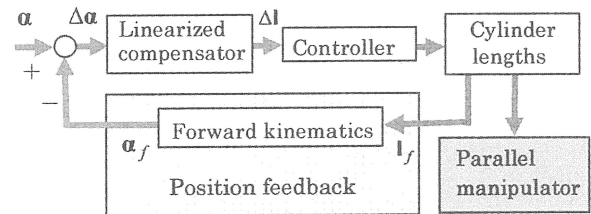


Fig.2 Full-closed control system

の信号 l_f から6自由度の動的な運動姿勢 α_f をリアルタイムで求め、フィードバックする間接フルクローズド姿勢制御を行なう。姿勢の目標値と実際の姿勢との姿勢偏差は、後述する線形化補償器を介してシリンダ変位の偏差に変換される。偏差をサーボ制御することにより、パラレルマニピュレータは所要の運動ができる。

3. 順運動学による姿勢計測

フルクローズド制御には、フィードバック信号としてパラレルマニピュレータの多自由度姿勢が必要である。こ

では計測手法として、順運動学を用いてシリンダ長から解析的に6自由度姿勢を求める方法について述べる。

3.1 順運動学解析

順運動学によりシリンダの伸縮量からパラレルマニピュレータの6自由度姿勢を解析する。図3は本研究の制御対象とするパラレルマニピュレータを構成する各ベクトルの関係図である。この図の*i*番目のシリンダベクトル \mathbf{l}_i について式(1)が成り立つ。

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{A}_{im}\mathbf{T} + \mathbf{R} - \mathbf{B}_i \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 \mathbf{A}_{im} は運動座標系原点 O' からみたシリンダの上部軸支点ベクトル、 \mathbf{B}_i は固定座標系原点 O からみたシリンダの下部軸支点ベクトル、 \mathbf{R} は $O-O'$ 間の位置ベクトルとする。 \mathbf{T} は座標変換行列で、次式で表される。

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots (2)$$

今、サーボ制御が行われているとし、シリンダ変位の実測値を ℓ_{if} 、運動姿勢をベクトル α とおき、 α に関する関数 $f(\alpha)$ を定義すると、式(3)となる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{f}(\alpha) &= (f_1(\alpha) \ f_2(\alpha) \ f_3(\alpha) \ f_4(\alpha) \ f_5(\alpha) \ f_6(\alpha))^T \\ f_i(\alpha) &= \mathbf{A}_{im}\mathbf{A}_{im}^T + \mathbf{R}\mathbf{R}^T + \mathbf{B}_i\mathbf{B}_i^T + 2\mathbf{R}\mathbf{T}^T\mathbf{A}_{im}^T - 2\mathbf{B}_i\mathbf{T}^T\mathbf{A}_{im}^T - 2\mathbf{R}\mathbf{B}_i^T - \ell_{if}^2 = 0 \\ \alpha &= (x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi)^T \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (3)$$

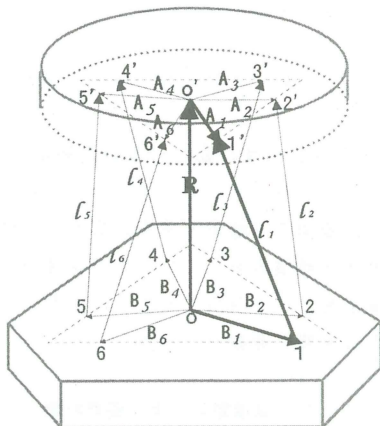


Fig.3 Parallel manipulators

収束計算法を用いて、 α の近似値を導く。求めたい運動姿勢ベクトル α の*n*回目の近似値を $\alpha^{(n)}$ と表して、式(3)にNewton-Rapthton法を適用すると式(4)になる⁽³⁾。

$$\mathbf{M}(\alpha^{(n+1)} - \alpha^{(n)}) = -\mathbf{f}(\alpha^{(n)}) \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 \mathbf{M} は関数 $\mathbf{f}(\alpha)$ を運動姿勢ベクトル α で偏微分した行列で、式(5)で表される。

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(\alpha^{(n)})}{\partial x} & \frac{\partial f_1(\alpha^{(n)})}{\partial y} & \frac{\partial f_1(\alpha^{(n)})}{\partial z} & \frac{\partial f_1(\alpha^{(n)})}{\partial \phi} & \frac{\partial f_1(\alpha^{(n)})}{\partial \theta} & \frac{\partial f_1(\alpha^{(n)})}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_2(\alpha^{(n)})}{\partial x} & \frac{\partial f_2(\alpha^{(n)})}{\partial y} & \frac{\partial f_2(\alpha^{(n)})}{\partial z} & \frac{\partial f_2(\alpha^{(n)})}{\partial \phi} & \frac{\partial f_2(\alpha^{(n)})}{\partial \theta} & \frac{\partial f_2(\alpha^{(n)})}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_3(\alpha^{(n)})}{\partial x} & \frac{\partial f_3(\alpha^{(n)})}{\partial y} & \frac{\partial f_3(\alpha^{(n)})}{\partial z} & \frac{\partial f_3(\alpha^{(n)})}{\partial \phi} & \frac{\partial f_3(\alpha^{(n)})}{\partial \theta} & \frac{\partial f_3(\alpha^{(n)})}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_4(\alpha^{(n)})}{\partial x} & \frac{\partial f_4(\alpha^{(n)})}{\partial y} & \frac{\partial f_4(\alpha^{(n)})}{\partial z} & \frac{\partial f_4(\alpha^{(n)})}{\partial \phi} & \frac{\partial f_4(\alpha^{(n)})}{\partial \theta} & \frac{\partial f_4(\alpha^{(n)})}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_5(\alpha^{(n)})}{\partial x} & \frac{\partial f_5(\alpha^{(n)})}{\partial y} & \frac{\partial f_5(\alpha^{(n)})}{\partial z} & \frac{\partial f_5(\alpha^{(n)})}{\partial \phi} & \frac{\partial f_5(\alpha^{(n)})}{\partial \theta} & \frac{\partial f_5(\alpha^{(n)})}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_6(\alpha^{(n)})}{\partial x} & \frac{\partial f_6(\alpha^{(n)})}{\partial y} & \frac{\partial f_6(\alpha^{(n)})}{\partial z} & \frac{\partial f_6(\alpha^{(n)})}{\partial \phi} & \frac{\partial f_6(\alpha^{(n)})}{\partial \theta} & \frac{\partial f_6(\alpha^{(n)})}{\partial \psi} \end{pmatrix} \quad \dots\dots (5)$$

3.2 シミュレーション

入力姿勢に一方方向の運動を与え、繰返し計算の初期姿勢に中立状態の姿勢を与えた。10回繰返し計算を行なった結果の例を図4、5に示す。図4は運動として、*x*軸方向に10mm、図5は*x*軸回転30°を与えた場合で、横軸に計算回数、縦軸に各運動方向の姿勢検出誤差を表示している。

他の運動についてもシミュレーションを行なった結果、6回以内の繰返し回数で誤差は 10^{-10} mm以内、計算時間は0.25ms以内(PC:クロック周波数2.8GHz/プログラム言語:Visual Basicの場合)に収まった。これにより、パラレルマニピュレータの6自由度リアルタイム姿勢計測に実装できることが分かった。

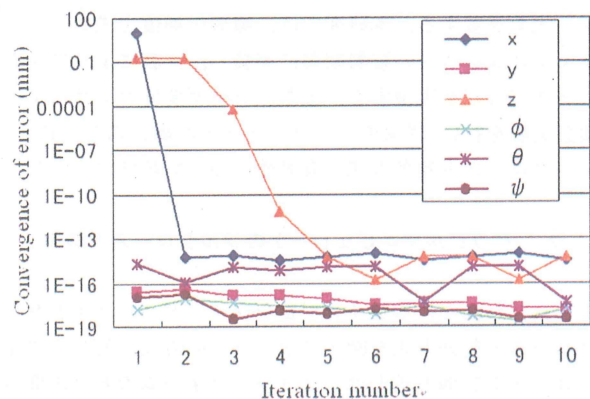


Fig.4 Evaluation of Convergence in Forward Kinematics Solutions: x-motion

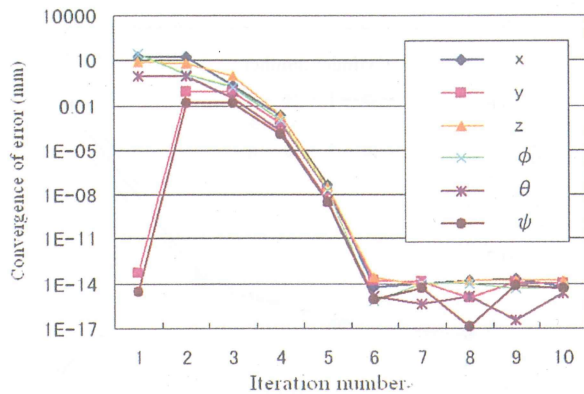


Fig.5 Evaluation of Convergence in Forward Kinematics
Solutions : x- rotation

3.3 姿勢計測実験

順運動学による6自由度姿勢の計測を行うと同時に、比較のためにレーザ変位センサを用いて、リアルタイム計測手法の評価実験を行なった。x軸直線運動として、0.5mmのステップ応答による姿勢計測結果を図6に示す。順運動学による計

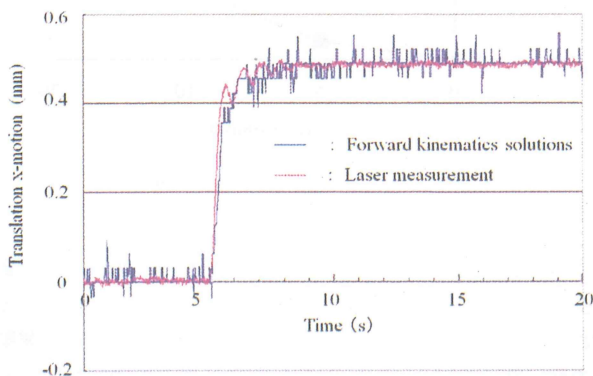


Fig.6 Laser measurement and forward kinematics solutions

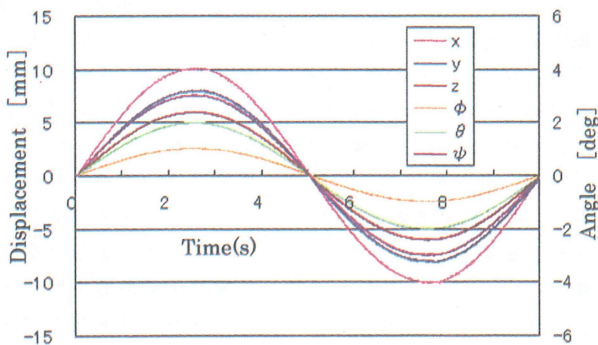


Fig.7 Measurement of multiple DOF motions

測とレーザによる計測の誤差は、最大で0.13mm以下であり、順運動学による計測手法の有効性を確認した。

多自由度運動の計測として、6自由度全てに運動を与えた複合運動に対して計測を行なった結果を図8に示す。入力指令として $x = \pm 10\text{mm}$, $y = \pm 8\text{mm}$, $z = \pm 6\text{mm}$, $\phi = \pm 1^\circ$, $\theta = \pm 2^\circ$, $\psi = \pm 3^\circ$ の正弦波運動を与えた。図7より今回検討した計測手法によって、多自由度運動のリアルタイム姿勢計測が可能であることを確認した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

4. 姿勢制御偏差の線形化補償

4.1 線形化補償の解析

フルクロード制御では、図2に示したように姿勢偏差 $\Delta \alpha$ からシリンダ変位の偏差 Δl を求めることが必要になる。この関係を求める方法を述べる。いま運動姿勢を $\alpha = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ とする。6自由度の運動姿勢 α から各シリンダの変位ベクトル l_i を求める逆運動学は、式(1)で与えられる。式(1)の関係において、姿勢変化に対するシリンダ長を計測した。例として、姿勢変化としてx方向運動を与えた場合を図8に、z方向運動を与えた場合を図9に示す。このように運動姿勢の変化と各シリンダ変位の変化は、非線形の関係にあり、運動によっても非線形性は異なる。そこで、この関係を線形化近似することによる線形化補償の定式化を行なった。

シリンダ長さ $|l_i|$ は、式(1)より次のようになる

$$|l_i|^2 = (A_{im}T + R - B_i)^T (A_{im}T + R - B_i) \quad (i=1,2,\dots,6) \quad \dots\dots (6)$$

式(6)をベクトル表示すると、

$$l = (|l_1(\alpha)|, |l_2(\alpha)|, \dots, |l_6(\alpha)|)^T \quad \dots\dots (7)$$

ここで、ある運動姿勢 α_0 からの微小な運動姿勢変化 $\Delta \alpha$ を考える。

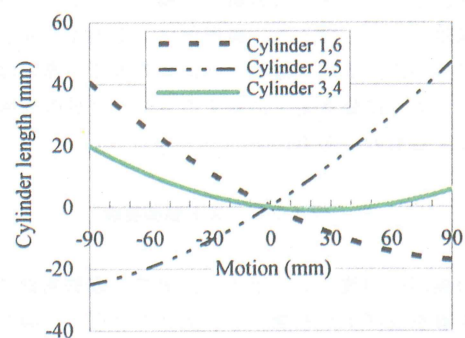


Fig.8 Relation of motions and cylinder length (x-motion)

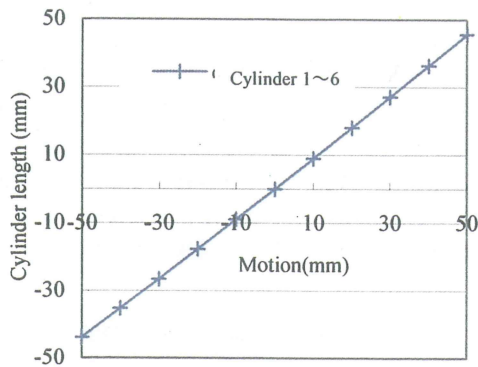


Fig.9 Relation of motions and cylinder length (z-motion)

$$|l_i(\alpha_0 + \Delta\alpha)| = l_i(\alpha_0) + \sum_{j=1}^6 \frac{\partial l_i}{\partial \alpha_j} \bigg|_{\alpha_0} \Delta\alpha_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 \frac{\partial^2 l_i}{\partial \alpha_j^2} \bigg|_{\alpha_0} (\Delta\alpha_j)^2 + \dots \quad (8)$$

$\alpha_0 \gg \Delta\alpha$ として, $\Delta\alpha$ の 2 次以上の高次項を省略し,
 $\Delta l = (\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_6)$, $\Delta\alpha = (\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_6)$ とおくと,
 式(4)は次のようになる.

$$\Delta l = J(\alpha_0) \Delta\alpha \quad (9)$$

ただし, $J(\alpha_0)$ の要素は, $\frac{\partial l_i}{\partial \alpha_j} \bigg|_{\alpha_0}$ ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) で

ある.

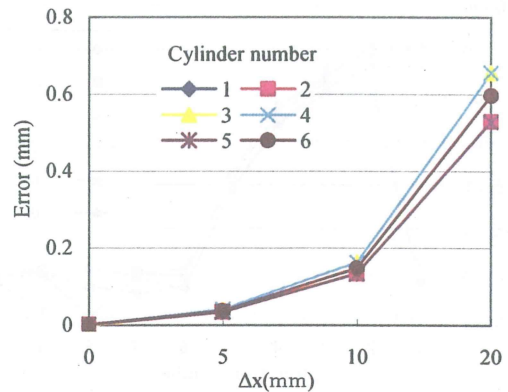
式(9)より, 任意の運動姿勢 α_0 からの姿勢の変化 $\Delta\alpha$ と, シリンダ変位の変化 Δl との線形化近似の関係が求められる.

4.2 線形化補償によるシリンダ誤差

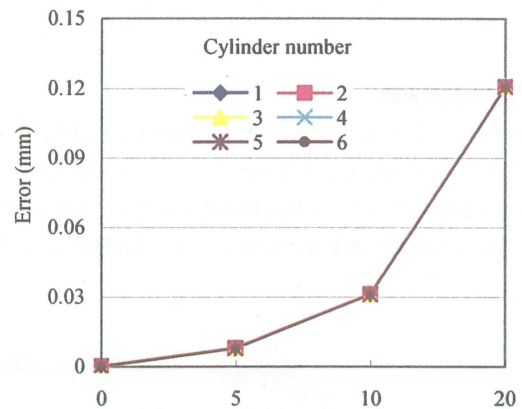
解析結果をもとに, ある運動姿勢 α からの姿勢偏差 $\Delta\alpha$ に対し, シリンダ変位の偏差 Δl を算出した. 運動姿勢の一例として, 中立位置から x 軸方向, z 軸方向にそれぞれ動作させた場合について, 線形化補償によるシリンダ誤差をそれぞれ図 10 に示す. シリンダ誤差とは, 逆運動学によって計算されるシリンダ長の真値との誤差である. 各軸方向運動の偏差が大きくなると, 線形化による誤差が大きくなることが分かる. また, 運動方向による誤差の違いは, 図 8, 9 に示すように姿勢変化に対するシリンダ長の非線形性の違いによるものである.

5. フルクローズド制御実験

上記の線形化補償による誤差が, 実際の姿勢制御にどのように影響を及ぼすかを調べる. 図 2 のように, 線形化補償器をパラレルマニピュレータの姿勢制御装置に組み込んだフルクローズド制御と, 図 1 に示すセミクローズド制御



(a) x-motion



(b) z-motion

Fig.10 Error of Δl

のステップ応答について比較する. 姿勢の計測にレーザ変位センサを用い, 運動姿勢を評価する. z 軸方向にそれぞれ 5, 10, 20mm のステップ変位をしたときの z 軸方向運動の測定結果を図 11 に示す. フルクローズド制御においても指令値どおりに整定していることが確認できた. しかし, 応答にはセミクローズドとフルクローズド制御ではわずかに違いが現れており, そのずれは, 姿勢偏差の大きい立ち上がり部分に見られる. それを詳しく調べるために, 図 11 において, セミクローズドとフルクローズド制御による運動姿勢の計測結果の差をとったものを図 12 に示す. 図 12 より, 立ち上がりの部分で約 0.3mm の差がでている. ステップ幅が大きいほど非線形性が大きくなるために, その差は長く続くが, 定常状態では差がなくなることが分かった.

今回, 順運動学による計測姿勢をフィードバックしたため, 線形化補償器による誤差がフルクローズド制御の特性に影響を及ぼした. 今後, 外部センサによる計測姿勢をフィードバックし, 提案した線形化補償器を用いたフルクローズド制御を行う. これにより, 関節部のガタや剛性による姿勢誤差を補償し, より高い精度の姿勢制御の可能性が期待できる.

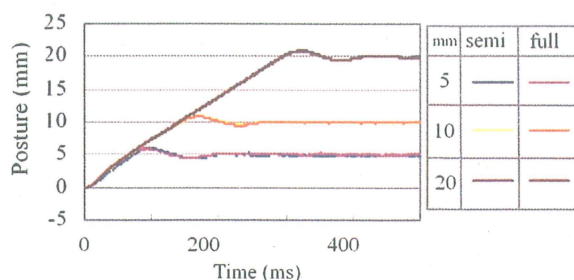


Fig.11 Experiments of step response in z-motion

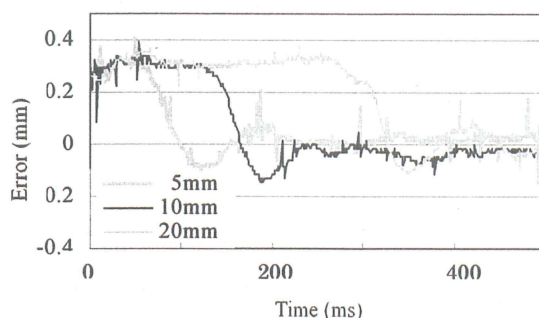


Fig.12 Difference between semi and full-closed in z-motion

6. 結 言

パラレルマニピュレータについて、フルクロード姿勢制御方式を検討し、以下の結論を得た。

- (1) プラットフォームの 6 自由度姿勢と各シリンダ長さとの非線形性を補償する線形化補償器を解析し、シミュレーションによって、制御装置実現の可能性を検討した。
- (2) 線形化補償器を制御装置に実装し、フルクロード姿勢制御方式を評価した。
- (3) 順運動学で求めた 6 自由度姿勢をフルクロード制御に適用し、制御動作をレーザ変位測定で確認した。
- (4) フルクロード制御とセミクロード制御によるステップ応答を行い、フルクロード制御の実現を実験で確認した。

今後、外部姿勢センサを用いたフルクロード制御により、精度の向上を検討していく。

文 献

- (1) 中川昌夫, パラレルメカニズム工作機械 PM-600 の実用化, 計測と制御, 42-7, (2003), pp. 591-594.
- (2) 石井・ほか 3 名, パラレルメカニズム姿勢制御のディジタル化, 平成 16 年度秋季フルールドパワーシステム講演会, (2004), pp. 179-181.
- (3) 田中・ほか 2 名, パラレルマニピュレータのフルクロード制御, 2005 年度精密工学会秋季大学術講演会講演会, (2005), pp. 1203-1204.
- (4) Y.Tanaka, et al., Posture Measurement of multiple

Motion of a Parallel Manipulator, ICMDT (2005), pp. 85-86.

- (5) 田中・ほか 3 名, 多自由度運動の動的姿勢計測, 機械学会九州支部第 58 期総会講演会予行集, (2005), pp. 303-304.
- (6) 田中・ほか 2 名, パラレルリンクの多自由度姿勢検出(第 3 報: 6 自由度運動の動的姿勢計測), 北九州工業高等専門学校研究報告第 39 号, (2006), pp. 63-67.

(2007 年 10 月 4 日 受理)