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

永井 清^{*1} 嵩 裕一郎^{*1} 西部 雄貴^{*2} 山中 篤^{*2}

Development of a Four DOF High Speed Parallel Mechanism Based on Virtual Force Redundancy Concept

Kiyoshi Nagai^{*1}, Yuichiro Dake^{*1}, Yuki Nishibu^{*2} and Atushi Yamanaka^{*2}

This paper discusses development of a four DOF (Degree of Freedom) high speed parallel mechanism for electronic part mounters. First, the concept of the Virtual Force Redundancy (VFR) is proposed based on an analysis of a typical four DOF pick-and-place motion. VFR is defined as; when the DOF of a robot's endpoint motion is decreased in a certain region, the robot is regarded to have VFR in the region. Second, a noble structure of a four DOF high speed parallel mechanism is proposed using the newly designed Constrained Differential Drive Mechanism (CDDM) based on the VFR concept. The dynamics of CDDM is analyzed to investigate the theoretical maximum acceleration. Then, a trajectory planning and a position controller with a low level velocity controller are embodied for the proposed mechanism. Usually, adopting velocity controller for all the joints of parallel mechanism with force redundancy could cause large internal force because of the over-constraint property. However, the proposed parallel mechanism with VFR does not cause such problems because it does not have the over-constraint property. Finally, the maximum acceleration of CDDM and the cycle time of pick-and-place motion are measured using a prototype in order to investigate the validity of the proposed high speed parallel mechanism and the VFR concept.

Key Words: Parallel Mechanism, High Speed Mechanism, Virtual Force Redundancy, Electronic Part Mounters

1. 緒 言

電子部品実装機は、高精度性ととも高速性が強く求められるロボットであるが、ここで求められる高速性は移動時間を短縮できる特性である。さらに繰り返し動作を行う動作領域が小さいため、実際には高加速性が重要となる。

ところが、主要メーカーの電子部品実装機の多くが、XY テーブルに類似した構造の機構と同程度の性能のモータを使用しているため、高速性において大きな差異が生じにくい現状がある。主要メーカーがXY テーブルに類似した構造を採用している理由は、高速性ととも強く求められる高精度性のためであるが、新たな機構により高速性を大きく向上させることができれば、スピード競争の膠着状態を打破することができる。

現在までにパラレルメカニズムを用いた機構には高速性や高加速性、高剛性といったさまざまな優れた特徴が見られることが報告されている。そのなかでも、高速性に重点をおいたパラレ

ルメカニズムとして、DELTA [1], HEXA [2], FALCON [3], H4 [4] などが知られている。また、力学的冗長性を導入することで、高速化を目指すパラレルメカニズムも数多く報告されている。例えば、Koco と Schumacher らは高速ピック・アンド・ブレース動作を実現させるために設計された平面パラレルマニピュレータ PA-R-MA を提案しており、その実験結果は軌道誤差 0.5 [mm] 未満で加速度 70 [m/s²]、速度 3 [m/s] を実現している [5]。Nagai らは力学的冗長性を有する高速パラレルメカニズム NINJA を提案し、加速度 80 [G] を達成している [6]。しかしながら、冗長性を導入するために、運動自由度よりも多くのアクチュエータを用いることは、産業界におけるロボットのアクチュエータ総数を必要以上に多くしたくないという要求に矛盾する。

そこで我々の研究グループでは、アクチュエータの総数を増やすことにならない仮想的な力学的冗長性の考え方を導入することで、電子部品実装機の高加速性を実現するためのパラレル・メカニズムの設計に取り組んできた [7]~[9]。本報告では、電子部品実装における典型的なピック・アンド・ブレース動作を高速化する新しいパラレル・メカニズムの設計と試作、および実験結果について述べる。

以下 2 章では、4 自由度の典型的なピック・アンド・ブレース動作の解析を行い、本報告で提案する 4 自由度高速パラレル・

原稿受付 2009 年 12 月 8 日

^{*1}立命館大学理工学部ロボティクス学科

^{*2}トヨタ自動車 (株)

^{*1}Department of Robotics, Ritsumeikan University

^{*2}Toyota Motor Corporation

■ 本論文は学術性で評価されました。

メカニズムの基本的な概念である仮想的駆動力冗長性 (Virtual Force Redundancy (VFR)) を示す。3 章では 4 自由度高速ラレル・メカニズムを提案し、その重要な構成要素である拘束付差動駆動機構 (Constrained Differential Drive Mechanism (CDDM)) とその力学解析について述べる。4 章ではピック・アンド・プレース動作の軌道計画と高精度位置決めを実現するための制御系構築手順を示し、5 章では試作機の製作とその実験結果について述べる。

2. ピック・アンド・プレース動作中の仮想駆動力冗長性に着目した高加速動作の実現

高加速動作を実現するパラレル・メカニズムの機構は、対象動作に依存するものとなる。そこで、ここではまず、対象とする典型的なピック・アンド・ブレース動作を解析し、この動作に適した高速パラレル・メカニズムの設計指針について述べる。

Fig. 1 のピック・アンド・ブレース動作のうち、図の領域 A における動作の始点 (P_1)、折り返し点 (P_4)、および終点 (P_1) の各近傍においては、手先の並進動作 (X, Y, Z) と鉛直軸まわりの回転動作 (θ) の計 4 成分の動作に関する高精度位置決めが重要である。ここでは、Fig. 1 の紙面手前を X 軸の正方向、 Z 軸まわりの回転を θ としている。一方、領域 B における手先の移動動作においては、4 成分の動作のうち、 X 動作と θ 動作の高精度位置決めは必要なく、 Y と Z 動作 (YZ 平面内の動作) の 2 成分に関する高速動作が重要である。すなわち、領域 A においては X, Y, Z 、および θ 動作の高精度位置決めに適し、かつ領域 B においては YZ 平面内の高速動作に適した機構としたい。一方、アクチュエータの数に関しては、必要以上に増やしたくないという要求がある。すなわち、機構のアクチュエータの総数は、機構の運動自由度と同じ 4 個に留めたい。

ここで我々は、ロボットが領域 A で四つの手先制御変数を必要とする場合であっても、領域 B において二つの手先制御変数 (X, θ) を内部変数と見なせることに着眼した。このようにみなすと、そのロボットは領域 B において 2 自由度の駆動力冗長性を有することになり、手先に大きな合力、および加速度を生成する機構にできる可能性が生じる。

そこで、あとでの利用を考え、必要な手先制御変数の数が縮退すると見なせる動作空間において現れる駆動力冗長性を仮想駆動力冗長性 (VFR) と名づけ、以下のように定義する。

仮想駆動力冗長性 (VFR: Virtual Force Redundancy) : ある領域においてロボットの先端制御変数の数が縮退すると見

なせる場合、ロボットはその領域において VFR を有する。

この VFR の考え方をを用いると、次の設計指針を満足する機構が存在すれば、ピック・アンド・プレース動作を高速化する機構となることが期待できる。

設計指針 1: Fig. 1 の領域 A においては、四つのアクチュエータを独立に制御して、 X , Y , Z , および θ の各動作に関する高精度位置決めを可能とする機構であること.

設計指針 2 : Fig. 1 の領域 B においては、四つのアクチュエータの協調動作により、 Y と Z 動作に関する高速動作に適した機構であること。ただし、この間、 X , θ 動作に関しては、その値を一定に保つか、次の高精度位置決め区間で必要とされる値に変化させることができればよい。

本報告では、この設計指針を満たす新たな高速パラレル・メカニズムを提案する。

3. 4 自由度高速平行・メカニズムの提案

3.1 4自由度高速平行・メカニズムの基本構造

提案する 4 自由度高速パラレル・メカニズムの基本構造を **Fig. 2** に示す。Fig. 2 の機構は並進運動を生成する 4 基のアクチュエータにより、並進動作 (X, Y, Z) と、 Z 軸回りの回転動作 (θ) を生成する 4 自由度ロボットであり、 YZ 平面上の高加速性に重点をおいて設計されたものである。以下では、 Y 方向の動作を生成する駆動部を Y モジュール、 Z 方向の動作を生成する駆動部を Z モジュール、 X 方向と θ 方向の動作を生成する駆動部を手先モジュールと呼ぶ。Fig. 2 (a) に示すように、手先モジュールは Y モジュールと Z モジュールによって YZ 空間を移動し、Fig. 2 (b) に示すように、手先モジュール内の動

Fig. 2 Basic structure of four DOF high speed parallel mechanism

Fig. 1 Pick and place motion

Fig. 3 Relation among variables

作によって手先の X と θ 動作を生成する。

本機構は2章で述べた設計指針を踏まえ、 Y と Z 方向に高加速性が発揮できるようなVFRをもたせるため、 Y モジュールと Z モジュールに拘束付差動駆動機構 (Constrained Differential Drive Mechanism (CDDM)) を採用している。CDDMの詳細については3.2節および3.3節において詳述する。CDDMは並進方向を手先制御変数と見た場合、並進方向に1自由度分のVFRを有する機構であるため、 Y モジュールは Y 方向に、 Z モジュールは Z 方向に高加速性が期待できる機構である。そのため、手先モジュールの慣性が大きくならないように設計できれば、 YZ 平面において大きな加速性能が期待できる。さらに、力学的冗長性を有するパラレルメカニズムにおいては、機構学的に過拘束であるために過大な内力が生じてしまうが、提案する機構においては過拘束でなく、機構内部に過大な内力が生じるという心配がない。

本機構は大別して、前述した Y モジュール、 Z モジュール、手先モジュール、およびその手先可動部から構成される。 Y モジュールと Z モジュールの位置と姿勢により手先可動部の位置と姿勢は決定される。手先モジュールは姿勢が変わらないように、平行リンク機構を用いて支持されている。 Y モジュールと Z モジュールで発生した回転動作はベルトを介して手先モジュールに伝達され、円筒カムを介して並進動作に変換される。そしてCDDMと同様の構造で手先モジュール内で X と θ 方向の運動を生成する。以上に記した4自由度高速パラレル・メカニズムの各変数の関係を Fig. 3 に示す。なお、Fig. 3 内でCDDMは長方形で表されている。

今回提案する4自由度高速パラレル・メカニズムは2章で述べたピック・アンド・ブレース動作を高速化する機構の設計指針を満たす機構として考案したものである。

3.2 拘束付差動駆動機構 (CDDM)

VFRの概念に基づいた設計指針を満たす機構として、新たに設計した4自由度高速パラレル・メカニズムの基本構成要素であるCDDMを Fig. 4 に示す。CDDMはアクチュエータ側の二つの並進動作 (y_1 , y_2) の組み合わせによって、プーリの並進動作 ($\dot{Y}_p$) と回転動作 ($\dot{\theta}_{py}$) を生成するものである。プーリはスライドガイドによって、並進動作 ($\dot{Y}_p$) と回転動作 ($\dot{\theta}_{py}$) 以外の動作を生成しないように拘束されている。

このCDDMは並進方向に関節駆動力の和を合力として発生させることができるため、手先の並進加速度 $\ddot{Y}_p$ に高加速性を期待できる。一方、関節駆動力の差により生成される内力をプー

Fig. 4 Constrained differential drive mechanism [10]

Fig. 5 Simple model of CDDM

リの回転力として用いているため、過大な内力を生成する恐れがない。

3.3 CDDMの駆動力発生と最大加速度に対する力学解析

本節では、Fig. 5のモデルを用いて力学的解析を行い、CDDMの高加速性に対する有用性を検証する。Fig. 5内の関節並進変位 x_1, x_2 によってプーリの並進変位 x_p と回転変位 θ_p が決定され、関節駆動力 f_1, f_2 によってプーリの中心に作用する力 f とプーリに作用するモーメント n が決定される。ここで、 $x_{ri}(i=1,2)$ はロッドの重心座標を表す。また、 r はプーリの半径を表し、 $m_i, m_{ri}(i=1,2)$ および m_p は各部の質量を表し、 $I_{ri}(i=1,2)$ および I_p はロッドとプーリの慣性モーメントを表す。

手先速度を $\dot{\mathbf{p}} = [\dot{x}_p \ \dot{\theta}_p]^T$ 、関節速度を $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_1 \ \dot{x}_2]^T$ とし、手先力を $\mathbf{F} = [f \ n]^T$ 、関節駆動力を $\boldsymbol{\tau} = [f_1 \ f_2]^T$ とすると、速度の関係式、および静力学関係式は以下のようになる。

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T}\boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

一方、ラグランジュ法などを用いることにより、CDDMの運動方程式は以下のように求められる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{h} + \mathbf{g} = \mathbf{F} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{M}$ は慣性行列を表し、 $\mathbf{h}$ は遠心力およびコリオリ力を、 $\mathbf{g}$ は重力を表す。

また、関節速度 $\dot{\mathbf{x}}$ とモータ回転速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_m = [\dot{\theta}_{m1} \ \dot{\theta}_{m2}]^T$ との関係式、および関節駆動力 $\boldsymbol{\tau} = [f_1 \ f_2]^T$ とモータ駆動力 $\boldsymbol{\tau}_m = [\tau_{m1} \ \tau_{m2}]^T$ の関係式はそれぞれ以下の式で表される。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_m \dot{\boldsymbol{\theta}}_m, \quad \mathbf{J}_m = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_m^T (\boldsymbol{\tau}_m - \boldsymbol{\tau}_c - \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m) \quad (4)$$

Fig. 6 Conversion of joint driving force to end point acceleration

ただし、 P はボールねじのリードであり、 $D = \text{diag.}[D_1 \ D_2]^T$ は粘性摩擦係数行列、 $\tau_c = [\tau_{c1} \ \tau_{c2}]^T$ はクーロン摩擦力である。

今、CDDM が基準姿勢 ($\theta = 3\pi/2$) の場合を考えると、ヤコビ行列 J と慣性行列 M は以下になる。ただし、 $m = m_p + m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ 、 $I = I_p$ である。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2r} & \frac{1}{2r} \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (5)$$

このとき、手先力 F は、 $\tau = [f_{0MAX} \ f_{0MAX}]^T$ のときに並進方向に対する最大力を発生し、式 (1) (5) より以下の値をもつ。

$$F = J^{-T} \tau = \begin{bmatrix} 2f_{0MAX} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

さらにこのとき、並進方向に対する加速度は最大となり、その手先加速度 $\ddot{p} = [\ddot{x}_{MAX} \ 0]^T$ は、式 (2) (4) (5) (6) より、以下の式で与えられる。ただし、基準姿勢において $h = g = 0$ であり、 τ_{mMAX} はモータの最大駆動力である。

$$\ddot{p} = M^{-1} F = \begin{bmatrix} \frac{2\tau_{mMAX} - (\tau_{c1} + \tau_{c2}) - (D_1 \dot{\theta}_{m1} + D_2 \dot{\theta}_{m2})}{mP} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式 (6) (7) の関係式を図示すると、Fig. 6 のようになる。

式 (6) より、CDDM の手先力 F は、二つのアクチュエータが同じ向きに同じ速さで動作するとき、 X 軸方向の並進動作に対して最大で 2 倍のアクチュエータの駆動力を生成することができる。このことは、CDDM が高加速性に期待できる機構であることを示している (付録 A 参照)。

4. 軌道計画と制御

4.1 ピック・アンド・プレース動作の軌道計画

ピック・アンド・プレース動作の軌道例を Fig. 7 (a) に示す。しかし、この図のように直角な空間軌道を描くことは大きなタイムロスとなるので、Fig. 7 (b) に示すような軌道計画を採用する。すなわち、 Y 方向および Z 方向の軌道の重ね合わせを行うことで、サイクルタイムを短くすることを考える。

Fig. 7 の考え方をとて、ピック・アンド・プレース動作の軌道計画を以下の 2 点に留意して定めた。

- (1) 領域 B においては移動時間の短縮化を図るため、手先の Y あるいは Z 方向の運動が収束する前に、他方向の運動を開始させる (軌道の重ね合わせ)。

Fig. 7 Superposition of trajectory

Fig. 8 Trajectory planning

- (2) 領域 B において参照点を 2 点定め、目標軌道がその内側に入らないように定める (軌道高さの確保)。

ここでの参照点は、成分ごとの目標軌道を時間軸上で重ね合わせる際に用いるものであり、実際の軌道がその内側に入らないことを保証するものではない。 Y 動作を 75 [mm]、 Z 動作を 25 [mm] と定め、参照点を S 点 [20, 20]、T 点 [20, 55] と定めたときの、軌道計画を Fig. 8 に示す。ここでは、 Z 座標が 0.5 [mm] 以下の場合を領域 A、それより上方の場合を領域 B としている。まず、 Z 軸の正方向に 0.5 [mm] 上昇した後、 Y 軸の正方向への動作を開始させる。 Z 軸方向の最大値に到達したあとは Y 軸の正方向に進み、その後 Z 軸の負方向への動作を開始させる。最後に Z 軸の負方向に 0.5 [mm] 下降して折り返し地点に到達する。復路においては逆の軌道を描かせる。

4.2 位置制御系の構築とフィードバックゲインの決定法

電子部品実装機は高加速性能とともに高精度性も要求される装置である。そこで、設計した機構の各モータに対して速度制御型ドライバを採用し、ドライバの機能を用いて実現する速度制御系の上位に関節変数に関する位置制御系 (関節サーボ系) を設けることとした。速度制御型ドライバは速度制御機能を有するものであるが、追従性能を向上させるため、オートチューニング機能を利用してドライバ内部のゲイン調整を行った。また、上位の位置制御系には、後に述べる理由により I-PD 制御を採用することとした。このような階層的な位置制御系を構築することにした理由は、高精度性の実現に際して、高性能な速度制御型ドライバの運動制御機能を最大限利用するためである。

このとき、3.1 節で記した手先位置および関節位置をそれぞれ $r = [\theta \ X \ Y \ Z]^T$ および $\theta = [\theta_{y1} \ \theta_{y2} \ \theta_{z1} \ \theta_{z2}]^T$ とし、それらの間に成立する順運動学を $r = f(\theta)$ とすると、全体の制御系は、逆運動学と上述の関節サーボ系の組み合わせによって構成されることになる。すなわち、逆運動学 $\theta_d = f^{-1}(r_d)$ を用いて、4.1 節に記述した時々刻々の目標手先位置 $r_d = [\theta_d \ X_d \ Y_d \ Z_d]^T$

から時々刻々の目標関節位置 $\theta_d = [\theta_{y1d} \ \theta_{y2d} \ \theta_{z1d} \ \theta_{z2d}]^T$ を算出し、それを関節サーボ系の目標値とすればよい。

さて、以下では関節サーボ系のフィードバックゲインの決定法について述べよう。

Fig. 9 (a) に上述した関節サーボ系のブロック線図を示す。ただし、ここでの θ や θ_d は、上述の θ や θ_d の4成分のうちの1成分を表し、対応する諸量はその成分に該当するものとする。

速度制御型ドライバによって運動制御されるロボット（図中の Controlled Object）は、動作試験 [8] を通して、速度指令値と速度の応答の間に標準二次系に近い特性をもたせることが可能であると分かっているため、その特性を次式で近似することにする。

$$\theta(s) = \frac{\omega_{nR}^2}{s^2 + 2\zeta_R \omega_{nR} s + \omega_{nR}^2} \frac{1}{s} \phi_d(s) \quad (8)$$

ただし、 ω_{nR} 、 ζ_R はそれぞれロボットとドライバによって構成される制御対象の固有角周波数と減衰係数である。また、上位の位置制御系は、I-PD 制御とすると次式となる。

$$\phi_d(s) = \frac{K_I}{s} (\theta_d(s) - \theta(s)) - K_P \theta(s) - K_D s \theta(s) \quad (9)$$

ただし、 K_P 、 K_I および K_D はそれぞれ、比例動作、積分動作および微分動作のフィードバックゲインである。これらの2式より、制御系全体は次の四次系となる。

$$\begin{aligned} \frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} &= \frac{a_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (10) \\ a_3 &= 2\zeta_R \omega_{nR}, a_2 = (\omega_{nR}^2 + K_D \omega_{nR}^2) \\ a_1 &= K_P \omega_{nR}^2, a_0 = K_I \omega_{nR}^2 \end{aligned}$$

一方、標準二次系の二乗の式は次式となる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \right)^2 \\ = \frac{\omega_n^4}{s^4 + 4\zeta \omega_n s^3 + (4\zeta^2 \omega_n^2 + 2\omega_n^2) s^2 + 4\zeta \omega_n^3 s + \omega_n^4} \quad (11) \end{aligned}$$

ただし、 ω_n 、 ζ はシステム全体の固有角周波数と減衰係数である。

Fig. 9 (a) に対応する式 (10) と Fig. 9 (b) に対応する式 (11) を恒等式として比較することにより、以下の関係式を得る。位置制御系に I-PD 制御を採用した理由は、この恒等式を成立さ

Fig. 9 Control system

せるためである。

$$K_P = \frac{4\zeta \omega_n^3}{\omega_{nR}^2} \quad (12)$$

$$K_I = \frac{\omega_n^4}{\omega_{nR}^2} \quad (13)$$

$$K_D = \frac{4\zeta^2 \omega_n^2 + 2\omega_n^2 - \omega_{nR}^2}{\omega_{nR}^2} \quad (14)$$

$$\zeta_R = \frac{2\zeta \omega_n}{\omega_{nR}} \quad (15)$$

システム全体の周波数特性である ω_n 、 ζ は同定試験より得ることができ、モータが制御可能な範囲で速度制御ドライバのゲインを最大にしたときの ω_{nR} は仕様書より知ることができるので、式 (12)~(14) により、フィードバックゲイン K_P 、 K_I および K_D を決定することができる。 ζ_R に関しては、仕様書に記載がないため直接は求められないが、必要な場合は、式 (15) より推定することができる。

5. 試作と実験

5.1 試作

提案した4自由度高速平行・メカニズムの機構をもとに試作機を製作した。

Fig. 10 に試作した平行・メカニズムの写真を示す。この写真は、Fig. 2 (a) に示す構造で、Fig. 2 (b) に示す手先モジュールは写真の右下、Yモジュールは写真の下側、Zモジュールは写真の右側に位置している。本機構のYモジュールおよびZモジュールにおいてリード $P_y = P_z = 40$ [mm]、プーリ半径 $r_{py} = r_{pz} = 37$ [mm] であり、動作範囲はXストローク ± 5 [mm]、Yストローク 90 [mm]、Zストローク 40 [mm]、 θ ローター ± 180 [deg] である。

5.2 CDDMの最大加速性能

まず、試作機の構成要素であるCDDMの理論的な最大加速度を求める。

このため、パラメータ同定実験を行い、粘性摩擦係数行列 D 、

Fig. 10 A picture of prototype

Fig. 11 Produced acceleration of CDDM

Fig. 12 Displacement of endpoint module

クーロン摩擦力 τ_c および基準姿勢状態の慣性行列 $\mathbf{M}$ を得た。この結果と式 (7) を用いると、並進方向における理論的な最大加速度 $\ddot{x}_{MAX}$ が 22 [G] となることが分かった。

次に、CDDM の最大加速度を計測する。

実験手順はモータに最大速度指令電圧 10 [V] を印加し、手先を 80 [mm] 変位させる。実験手順を説明する。試作機のモータの最大電圧 10 [V] を印加して手先を 64 [mm] 変位させる。その後 P-D 制御にて 80 [mm] に収束させる。なお、サーボアンプの制御モードは速度制御モードを用いた。

実験結果を Fig. 11 に示す。本実験により最大加速度 20 [G] ($\approx 196 \text{ [m/s}^2\text{]}$) を得ることができた。加速度が 20 [G] に到達すると同時に急激に減少しているのは、P-D 制御に切り替えて制動動作を開始したためである。

5.3 ピック・アンド・プレース動作実験

試作機に対して 4.1 節の目標軌道と 4.2 節の制御系を用いてピック・アンド・プレース動作を行った。

実験結果を Fig. 12～15 に示す。Fig. 12 は手先部における Y 方向と Z 方向の変位を示しており、サイクルタイムを 320 [ms] とすることができたことを示している。Fig. 13 は YZ 空間における手先部の目標軌道と実際の軌道を示しており、領域 A において 1.06 [mm]、領域 B において 6.29 [mm] の平均誤差が出ていることが分かった。Fig. 14 は Y モジュールと Z モジュールにそれぞれ存在するアクチュエータ間の位置誤差を、Fig. 15 は手先モジュールの X および θ の位置を示している。

設計指針を踏まえ、実験結果について考察する。Fig. 13 の領域 B において誤差が出ている理由は、5.4 節で示すように Z モジュールのほうが Y モジュールよりも応答性が悪いためだと考えられる。しかしながら、領域 A においては領域 B よりも精度がよい結果が得られており、領域 B においては速度制御ドラ

Fig. 13 Trajectory of endpoint module

Fig. 14 Error of Y module and Z module

Fig. 15 Internal DOF of endpoint module

イバをハイゲインで使用できるような高速動作に適した機構の枠組みであると言えるため、2 章で示した二つの設計指針を満たす枠組みとなっている。

ここで、速度制御ドライバをハイゲインで使用できる理由を示す。Fig. 14 に着目してほしい。Fig. 14 より Y モジュールおよび Z モジュールにそれぞれ二つ存在するアクチュエータ間に

Fig. 16 Frequency property

位置誤差が現れていることが分かる。これは速度制御ドライバを高ゲインで使用しているためであり、通常の2入力1出力の力学的冗長性を持つ機構であれば、この位置誤差を生じさせる駆動力の差により過大な内力が発生してしまう。CDDMはこの位置誤差をプーリの回転変位とすることで過大な内力を生じさせない機構であり、CDDMを構成要素とする本機構も同様に、過大な内力を生じさせない。Yモジュール内およびZモジュール内の位置誤差は手先モジュールに伝わり、最終的には X および θ の位置誤差となるが、領域Bにおいては問題とならない。

5.4 周波数応答実験

ロボットとドライバの特性を調べるために、周波数応答実験を行った。YモジュールおよびZモジュールのプーリ速度の目標値 θ_d にsin波を与えて周波数応答実験を行った。データは $f = 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100$ [Hz]の8点取得した。目標値を式(16)に示す。ただし A_1 は振幅で、 $A_1 = \pi/2$ としている。

$$\theta_d = A_1 \sin \omega T \quad \omega = 2\pi f \quad (16)$$

実験結果をゲイン $(=20 \log_{10} \theta(s)/\theta_d(s))$ を用いてFig. 16に示す。ここではYモジュールとZモジュールを同時に動かしている。この実験結果を標準二次系のボード線図に対してカーブフィッティングを行うことにより、Yモジュールの固有周波数 $\omega_{ny} = 8$ [Hz]、減衰係数 $\zeta_y = 0.8$ およびZモジュールの固有周波数 $\omega_{nz} = 7$ [Hz]、減衰係数 $\zeta_z = 0.8$ を得た。

6. 結 言

電子部品実装機において典型的な4自由度ピック・アンド・プレース動作を高速化するパラレル・メカニズムについて述べた。本論文で得られた主な結論は以下のとおりである。

1) 仮想駆動力冗長性 (Virtual Force Redundancy (VFR)) の概念を明らかにした。VFRとは、ある領域においてロボットの先制御変数が縮退すると見なせる場合に、ロボットがその領域で仮想的にもつ駆動力冗長性である。このVFRの概念に基づき、高速動作生成のための拘束付差動駆動機構 (Constrained Differential Drive Mechanism (CDDM))、およびCDDMを構成要素とするピック・アンド・プレース動作のための4自由度高速パラレル・メカニズムが設計できることを示した。

2) 設計したパラレル・メカニズムにおいて高速高精度な運動制御を実現するため、速度制御ドライバを用いた位置制御系の構成方法を明らかにした。設計したパラレル・メカニズムは、通常の力学的冗長性を有するパラレル・メカニズムと異なって過拘束な機構でないため、各関節を高ゲインで速度制御することができる。試作機を用いた実験により、CDDMが最大加速度

20 [G]を達成できること、および、このCDDMを構成要素とする高速パラレル・メカニズムがピック・アンド・プレース動作実験のサイクルタイム 320 [ms]を実現できることを示した。これらの実験結果により、VFRの概念に基づく高速パラレル・メカニズムの設計の妥当性が示された。

本論文で述べた手法によるパラレル・メカニズムをさらに高速化するには、機構設計における最適化や、制御系設計におけるフィードバックゲインのファイン・チューニングを試みることなどが有効である。

なお、本論文で明らかにしたVFRの概念は、本論文で取り上げたピック・アンド・プレース動作だけでなく、ロボットに必要なとされる先制御変数が動作領域によって縮退すると見なせるような一連の動作に適用できるものである。

参 考 文 献

- [1] R. Clavel: "DELTA. A fast robot with parallel geometry," Proc. Int'l. Symposium on Industrial Robots, pp.91-100, 1988.
- [2] 内山勝, 飯村憲一, 多羅尾進, フランソワ・ピエロ, 外山修: "6自由度高速パラレルロボット HEXAの開発", 日本ロボット学会誌, vol.12, no.3, pp.451-458, 1994.
- [3] S. Kawamura, et al.: "Development of an Ultrahigh Speed Robot FALCON Using Parallel Wire Drive System," Proc. of Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA 1995), vol.1, pp.215-220, 1995.
- [4] チェビビュン, 内山勝: "高速4自由度パラレルロボット H4の設計", 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会'02, 講演論文集, 2A1-E08, 2002.
- [5] S. Kock and W. Schumacher: "Control of a Fast Parallel Robot with a Redundant Chain and Gearboxes: Experimental Results," Proc. of Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2000), pp.1924-1929, 2000.
- [6] K. Nagai, M. Matsumoto, K. Kimura and B. Masuhara: "Development of Parallel Manipulator "NINJA" with Ultra-High-Acceleration," Proc. of Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2003), pp.3678-3685, 2003.
- [7] 永井清, 山中篤: "電子部品実装機のための高速パラレル・メカニズムの設計", 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3B13, 2006.
- [8] K. Nagai, Y. Nishibu, Y. Dake and A. Yamanaka: "Design of a High Speed Parallel Mechanism Based on Virtual Force Redundancy Concept," Proc. of Int'l Conf. on Industrial Technology (ICIT 2009), pp.1209-1214, 2009.
- [9] 永井清, 嵩裕一郎, 西部雄貴: "仮想駆動力冗長性に基づく4自由度高速パラレル・メカニズムの制御系設計", 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3M2-06, 2009.
- [10] 永井清ほか: 特願 2005-51241, 2005.

付録 A. XY テーブルモデルとCDDMモデルの比較

新しく考案したCDDMの高加速性に対する有用性を検証するために、多くの電子部品実装機に用いられているXYテーブル機構と比較する。

Fig. 17にXYテーブル機構を示す。手先速度を $\dot{p}_1 = [\dot{x}_1 \ \dot{y}_1]^T$ 、関節速度を $\dot{x}_1 = [\dot{x}_{11} \ \dot{x}_{12}]^T$ とし、手先力を $F_1 = [f_{x1} \ f_{y1}]^T$ 、関節駆動力を $\tau_1 = [f_{11} \ f_{12}]^T$ とすると、速度の関係式、および静力学関係式は次式ようになる。ここで第一添え字の1は比較されるFig. 17に示される機構を示す。

$$\dot{p}_1 = J_1 \dot{x}_1, \quad F_1 = J_1^{-T} \tau_1, \quad J_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

Fig. 17 A simplified model of XY table mechanism

Fig. 18 Conversion of Driving force to end point (XY table mechanism)

次に CDDM に関して, Fig. 5 における基準姿勢 ($\theta = 3\pi/2$) の場合を考える. 式 (6) より $\mathbf{F} = [f \ n]^T$ を手先力, $\boldsymbol{\tau} = [f_1 \ f_2]^T$ を関節駆動力とすると, 静力学関係式は次式のようになる.

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2r} & \frac{1}{2r} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

これらの関係式を図示すると Fig. 18, Fig. 6 のようになる. Fig. 18 に記入した $[f_{xMAX} \ f_{yMAX}]^T$ は関節駆動力 $[f_{1MAX} \ f_{1MAX}]^T$ を手先の駆動力に射影したものである. ここで式 (A.1) より, $\boldsymbol{\tau}_1 = [f_{1MAX} \ f_{1MAX}]^T$ のとき, 次式を得る.

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} f_{1MAX} \\ f_{1MAX} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

一方, Fig. 6 に記入した $[f_{MAX} \ 0]^T$ は関節駆動力 $[f_{0MAX} \ f_{0MAX}]^T$ を手先の駆動力に射影したものである. ここで式 (A.2) より, $\boldsymbol{\tau} = [f_{0MAX} \ f_{0MAX}]^T$ のとき, 次式を得る.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 2f_{0MAX} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

ここで比較のためアクチュエータのトルクを同じとし,

$$f_{1MAX} = f_{0MAX} \quad (\text{A.5})$$

とすると, 以下の式を得る.

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} f_{0MAX} \\ f_{0MAX} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 2f_{0MAX} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

よってそれぞれの力の大きさは次式のようになる.

$$\|\mathbf{F}_1\| = \sqrt{2}f_{0MAX}, \quad \|\mathbf{F}\| = 2f_{0MAX} \quad (\text{A.7})$$

式 (A.7) と Fig. 18 より, XY テーブル機構の手先力 $\mathbf{F}_1$ は X, Y 軸方向の並進成分に対してアクチュエータの最大の駆動力しか伝達することができない. また f_x と f_y が同一の値となる方向に動作するときのみ二つのアクチュエータが協調動作をすることにより, アクチュエータの駆動力より大きな力を手先に伝達することができるがその大きさは最大でも $\sqrt{2}$ 倍であり, その方向が望みの方向であるとは限らない.

これに対して, 式 (A.7) と Fig. 6 で表されるように, CDDM の手先力 $\mathbf{F}$ は, X 軸方向の並進動作を二つのアクチュエータが同じ向きに同じ速さで動作するとき, 最大で 2 倍のアクチュエータの駆動力を生成することができる. このことは CDDM が, 先ほど述べた XY テーブル機構の $\sqrt{2}$ 倍よりも大きなアクチュエータの駆動力を生成することができ, 高加速性に期待できる機構であることを示している.

永井 清 (Kiyoshi Nagai)

1987 年京都大学大学院工学研究科中途退学. 同年立命館大学理工学部助手 (情報工学科). 1995 年同学部助教授 (同学科). 1996 年同学部助教授 (ロボティクス学科). 2007 年同学部教授 (同学科). 現在に至る. この間, 1995 年から 1996 年, 米国スタンフォード大学客員研究員, 2004 年から 2005 年, 英国レディング大学客員研究員. 博士 (工学). ロボット工学の研究に従事. 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)

嵩裕一郎 (Yuichiro Dake)

2009 年 3 月立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業. 同年同大学大学院理工学研究科博士課程前期課程創造理工学専攻 (機械システムコース) 入学. 現在に至る. (日本ロボット学会学生会員)

山中 篤 (Atsushi Yamanaka)

2008 年 3 月立命館大学理工学研究科博士前期課程前期創造理工学専攻 (機械システムコース) 修了. 同年トヨタ自動車株式会社入社. 現在に至る.

西部雄貴 (Yuki Nishibu)

2009 年 3 月立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業. 同年トヨタ自動車株式会社入社. 現在に至る.