

## 内力センサを用いた冗長パラレルマニピュレータの制御手法について\*

三村 宣治<sup>\*1</sup>, 小野寺 良二<sup>\*1</sup>, 佐谷 明映<sup>\*2</sup>A Control Algorithm of a Redundant Parallel Manipulator  
by an Internal Force SensorNobuharu MIMURA<sup>\*3</sup>, Ryouji ONODERA and Akiei SATANI<sup>\*3</sup> Faculty of Engineering, Niigata University,  
8050 Ikarashi, 2-nocho, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

This paper describes a new control method for a redundant parallel manipulator using an internal force sensor. In conventional control methods of a redundant parallel manipulator, optimal torque minimized actuator torque or maximized manipulability by using evaluation function is decided and used. However, these methods have to use a torque controlled actuator. Its torque is small, also it is expensive. So, we propose a new control method using a conventional geared actuator in this paper. In our method, internal forces produced by actuator redundancy is detected by an internal force sensor and controlled to be zero. We demonstrate about the proposed control system and the structure, the principle, and the experimental result of the redundant parallel manipulator using the internal force sensor.

**Key Words:** Internal Force Sensor, Parallel Manipulator, Redundant Actuation, Position Control, Torque Control

## 1. はじめに

パラレルマニピュレータは、エンドエフェクタを複数のリンク機構により並列に駆動する機構（パラレル機構）である。そのため、リンクが直列に駆動される従来のシリアルマニピュレータに比べ、剛性が高く、高速動作に有利であることからロボットの新しい機構として注目されている(1),(2)。

パラレル機構は、以上のような魅力的な特長を有する一方、複数のリンク機構により並列に駆動される機構であるため、作業領域が狭いという欠点がある。そのうえ、リンクの可動範囲内のかかなり広い領域にシリアル機構のものとは異なる種類の特長が存在するため、さらにその可動範囲が制限されてしまうという欠点がある。

このパラレル機構の特長に関する研究では、理論面で Merlet ら(3)~(6)の研究が注目される。これらの研究によれば、パラレル機構の特長は2種類存在し、そのうち一つはパラレル機構固有の特長である。このパラレル機構固有の特長は、通常の動作では抜け出すことが困難で、無理に抜け出そうとすると機構自

体を壊してしまうおそれがありどうしても避けなければならない。Stoughton と Arai は、特長点を考慮したパラレル機構の最適設計について報告している(7)。しかしながら、最適設計を行っても作業領域の大幅な改善には限界がある。

そこで、このパラレル機構特有の特長を避ける手法として、駆動冗長化が提案されている(8),(9)。ただし、パラレル機構は、閉リンク構造であるため、駆動冗長化を行うと、過拘束となり駆動トルクが一意に決まらないという新たな問題が発生する。駆動冗長化の制御手法として、Ropponen ら(8)は、各アクチュエータのトルクを最小化する方法を提案している。一方、Kumar, Gardner ら(9)は、自動的に特長とならないアクチュエータの組み合わせを決定し、駆動トルクを最適化する方法を提案している。また、中村(10)は、ダイナミクスを考慮しさらにアクチュエータの出力を最小化し、駆動トルクを最適化する方法を提案している。これらの手法は、冗長駆動化による過拘束を駆動トルクの最適化により回避しようとする方法であるため、トルク制御が基本となる。したがって、ダイレクトドライブ（DD）モータのようなトルク制御型のアクチュエータが必要で、かつ、トルク最適化のために比較的煩雑な演算が必要となる。

そこで本論文では、過拘束により発生する内力を直接検出し、これを常に0となるように制御する手法を

\* 原稿受付 2004年4月28日。

<sup>\*1</sup> 正員, 新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐二の町8050)。<sup>\*2</sup> 本田技研工業(株)(〒107-8556 東京都港区青山2-1-1).  
E-mail: mimura@bc.niigata-u.ac.jp

提案する。さらに、より一般的な減速機付き位置制御型のアクチュエータを利用しやすくするため、検出した内力を位置修正量（内部変位修正量）に変換し制御する方法についても提案する。つぎに、試作した3自由度内力センサとそれを装着した駆動冗長パラレルマニピュレータ（9自由度）を用いた制御実験結果について報告する。

## 2. パラレルマニピュレータの特異点

パラレルマニピュレータの基本的な性質は、図1に示す8面体モデルで説明することができる。すなわち、マニピュレータのアクチュエータ座標を  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T$ , エンドエフェクタの位置・姿勢を  $P_o = [x \ y \ z \ \xi \ \eta \ \zeta]^T$  で表すと、 $P_o$ と $\theta$ との関係は、陰関数表示を用い、

$$f(P_o, \theta) = 0 \quad (1)$$

と表現できる。Gosselin と Angeles は<sup>(4)</sup>, パラレルマニピュレータの特異点に関し、式(1)を変形し、

$$J_p dP_o + J_\theta d\theta = 0 \quad (2)$$

$$J_p = \frac{\partial f}{\partial P_o} \quad (3)$$

$$J_\theta = \frac{\partial f}{\partial \theta} \quad (4)$$

によって定義されるヤコビ行列を用いて、

$$\text{rank } J_\theta < \dim P_o \quad (5)$$

を第1種特異点、

$$\text{rank } J_p < \dim P_o \quad (6)$$

を第2種特異点と定義している。図1のパラレルマニピュレータでは、この第2種特異点が重要で、可動範囲を狭める原因の一つにもなっている。

津坂ら<sup>(11)</sup>の解析によれば、第2種特異点が発生す

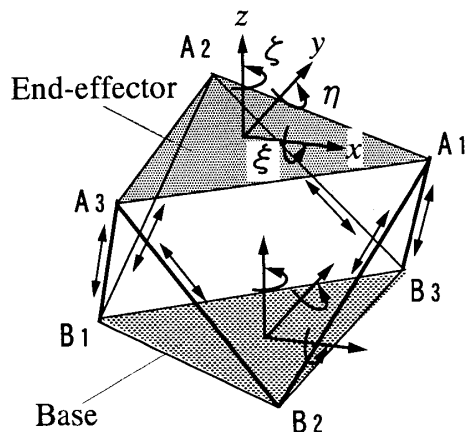


Fig.1 Octahedral design parallel manipulator

る条件は3種存在し、図2のように図示できる。図1に示すように、エンドエフェクタの3角形の各頂点  $A_1, A_2, A_3$  (入力点と呼ぶこととする) にアクチュエータから2方向の力が入力され、その合力により並進、回転それぞれ3自由度の運動を発生できる。図2の各特異点では、以下のような状況が発生する。

- (1) ある入力点  $A_i$  に作用するアクチュエータ出力の合ベクトルがエンドエフェクタの面方向と一致しこの入力点においてエンドエフェクタに垂直な力を発生できなくなる (図2 (a),  $i=1$ , 出力ベクトル  $f_1$  が面  $A_1A_2A_3$  に含まれる場合)。
- (2) 各入力点  $A_1, A_2, A_3$  に作用するアクチュエータ出力の合ベクトルが1点で交わり、この点まわりのモーメントが発生できなくなる (図2 (b))。
- (3) ある入力点  $A_i$  に作用する2つの出力合ベクトルが同方向となり、この入力点において2次元の力を発生できなくなる (図2 (c),  $i=1$ , アクチュエータ  $A_1B_2$  と  $A_1B_3$  が重なった場合)。

以上のように、第2種特異点から抜け出すためには、各入力点において既存の各アクチュエータ出力と直交する力を発生させることが必要であることがわかる。すなわち、アクチュエータを冗長化（駆動冗長化）し、エンドエフェクタの各入力点において任意の3次元力ベクトルを発生させることができれば、第2種特異点を解消できると考えられる (図3)。パラレルマニピュレータでは、多数の受動ジョイントが存在するため、その内のいくつかを能動ジョイント（駆動ジョイント）とすれば駆動冗長化が比較的容易に実現できる。しかしながら、駆動冗長化の方法は多数考えられる。ここでは、上記の特異点の性質を考慮し、ベースの各辺を駆動軸とするように3つのアクチュエータを追加

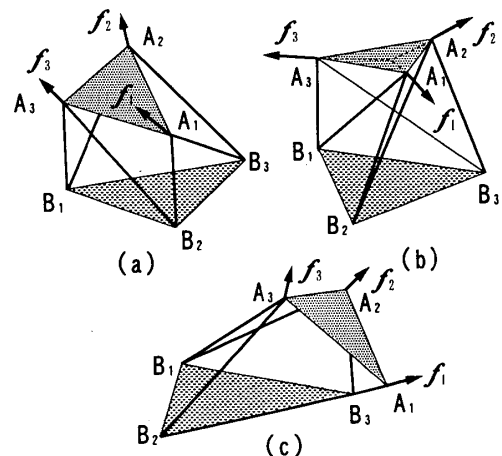


Fig.2 Singular configurations

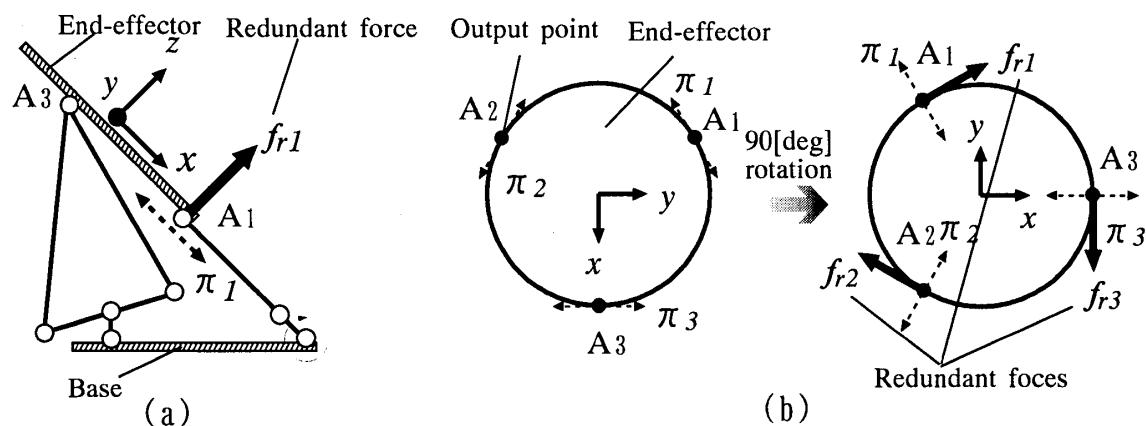


Fig.3 Redundant force to escape from the second singular configuration

することとする (図4)。この配置は、追加したアクチュエータがベース側に固定されるため、冗長化による可動部の重量増は小さい。

### 3. 冗長パラレルマニピュレータの力学

**3.1 基礎式** 前章で示したように、第2種特異点の回避にはアクチュエータの冗長化が有効で、これにより可動範囲の拡大が期待できる。駆動冗長化は、通常のシリアル型でも用いられるが、シリアル型は開リンク構造であるため、駆動冗長化による内力発生はない。それに対し、パラレル型は閉リンク構造であるため過拘束となる。そのため、各関節への適切なトルク配分を行わないと、不必要な内力が発生するおそれがある。この内力は、機構内部に発生する力であり、最悪の場合、機構自体を破壊する。

これを回避する手法として、中村ら(8),(9),(10)は適切な駆動トルクを計算し、制御する方法を提案している。これらの手法ではトルク制御性能の良好なDD型などの特殊な電動機を用いるのが一般的である。しかし、これらの電動機は一般にトルク/重量が減速機付き電動機に比べ小さく、マニピュレータの大きさの割に負荷を大きくできないと言う欠点がある。

そこで、通常のマニピュレータで多用されトルク/重量およびコストの点で有利である減速機付きの位置制御型電動機を用い、駆動冗長化する方法について考える。位置制御型電動機を用いて駆動冗長化を行う場合、閉リンク構造では各アクチュエータに位置制御誤差が存在すると、エンドエフェクタ内に内力  $f_{ij}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) が発生する (図5)。この内力が過大に働くと、機構自体が破損する可能性があるため、内力を常にゼロにする必要がある。

本論文では、この位置制御誤差による内力  $f_{ij}$  ( $j =$

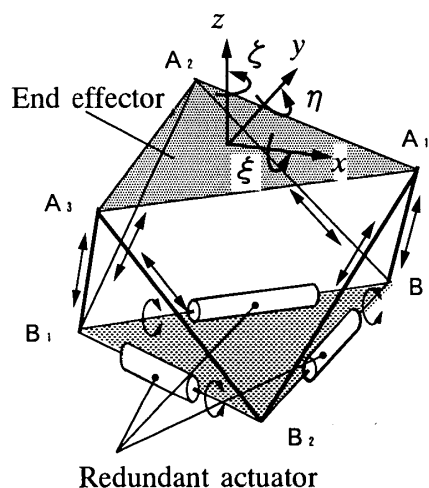


Fig.4 A proposed configuration of redundant actuator

1,2,3) を考慮に入れた駆動冗長パラレルマニピュレータの基礎式を示す。このような力学系は、多指ハンドによる把握の問題(12)と同様に解析できる。

図5に示すように各入力点間の力をそれぞれ  $f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}$  とする。また、エンドエフェクタが発生する力を  $f_o$  トルクを  $t_o$  とし、各入力点における合力ベクトルをそれぞれ  $f_1, f_2, f_3$  とする。さらに内力  $f_i$  およびエンドエフェクタが発生する一般化力 (一般化外力)  $F_o$  を以下のように定義する、

$$f_i = [f_{i1} \ f_{i2} \ f_{i3}]^T \in R^3 \quad (7)$$

$$F_o = [f_o^T \ t_o^T]^T \in R^6 \quad (8)$$

さらに、

$$F = [F_o^T \ f_i^T]^T \in R^9 \quad (9)$$

$$f = [f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T \in R^9 \quad (10)$$

とおくと、 $F$  および  $f$  は、それぞれ外力と内力および各入力点に作用する力をひとまとめでしたベクトルで

ある。両者の間には、力の釣り合いから、

$$F = G^T f \tag{11}$$

$$G^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -r_{1z} & r_{1y} & 0 & -r_{2z} & r_{2y} & 0 & -r_{3z} & r_{3y} \\ r_{1z} & 0 & -r_{1x} & r_{2z} & 0 & -r_{2x} & r_{3z} & 0 & -r_{3x} \\ -r_{1y} & r_{1x} & 0 & -r_{2y} & r_{2x} & 0 & -r_{3y} & r_{3x} & 0 \\ r_{12x} & r_{12y} & r_{12z} & -r_{12x} & -r_{12y} & -r_{12z} & 0 & 0 & 0 \\ r_{13x} & r_{13y} & r_{13z} & 0 & 0 & 0 & -r_{13x} & -r_{13y} & -r_{13z} \\ 0 & 0 & 0 & r_{23x} & r_{23y} & r_{23z} & -r_{23x} & -r_{23y} & -r_{23z} \end{bmatrix} \tag{12}$$

が成立する。ただし、

$$r_i = [r_{ix} \ r_{iy} \ r_{iz}]^T, (i=1,2,3) :$$

エンドエフェクタ中心から第  $j$  入力点へのベクトル

$$r_{jk} = [r_{j kx} \ r_{j ky} \ r_{j kz}]^T, (j,k = 1,2,3) :$$

第  $j$  入力点から第  $k$  入力点へのベクトル

である。

駆動冗長系では、式 (11) において内力  $f_i = 0$  となるように、合力  $f_1, f_2, f_3$  を発生させれば良いが、この場合にはトルク制御型のアクチュエータが必要となる。そこで、位置制御型のアクチュエータを用いるために、式 (11) を位置に関する表現に改める。エンドエフェクタの並進および回転変位をそれぞれ  $dp_o, d\xi_o$  (外部変位)、内力に対応する変位 (内部変位) を  $dP_{i1}, dP_{i2}, dP_{i3}$ 、エンドエフェクタ各入力点の変位をそれぞれ  $dp_1, dp_2, dp_3$  とする。また、

$$dP_o = [dp_o^T \ d\xi_o^T]^T \in R^6 \tag{13}$$

$$dP_i = [dP_{i1} \ dP_{i2} \ dP_{i3}]^T \in R^3 \tag{14}$$

$$dP = [dP_o^T \ dP_i^T]^T \in R^9 \tag{15}$$

$$dp = [dp_1 \ dp_2 \ dp_3]^T \in R^3 \tag{16}$$

とおく。  $dP$  および  $dp$  は、それぞれ外部変位と内部変位および各入力点のそれぞれの変位をひとまとめにしたベクトルである。なお、内部変位は内力に対応しているため、各入力点間の相対変位と考えることができ、この変位の影響は外部変位には現れない。式 (11) に仮想仕事の原理を適用し、整理すると、

$$dp = G \ dP \tag{17}$$

式 (17) を外部変位  $dP_o$  と内部変位  $dP_i$  の部分に分割すると、

$$dp = G \ dP = G_o \ dP_o + G_i \ dP_i \tag{18}$$

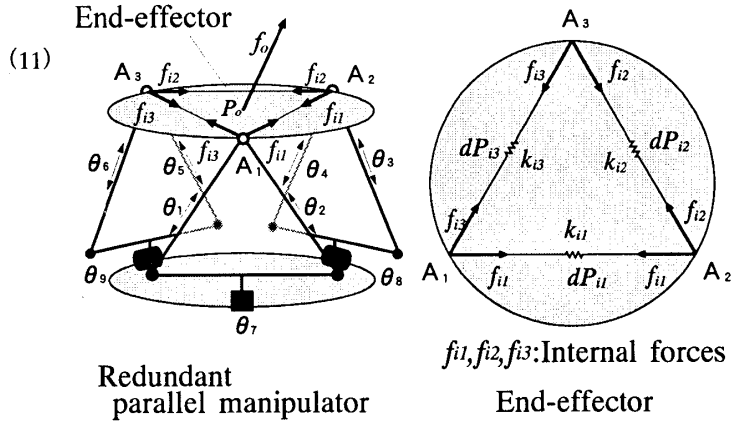


Fig.5 Internal force produced by actuation redundancy

$$[G_o \ G_i] = G \tag{19}$$

となる。式 (18) において右辺第 2 項が内部変位に対応する各入力点の変位を表す。そこで、入力点変位の外部および内部変位成分をそれぞれ  $dp_o$  および  $dp_i$  とおくと、

$$dp = dp_o + dp_i \tag{20}$$

$$dp_o = G_o \ dP_o \tag{21}$$

$$dp_i = G_i \ dP_i \tag{22}$$

式 (22) で表される  $dp_i$  が駆動冗長誤差により発生する内力に対応する各入力点位置の位置制御誤差 (修正量) である。以上が、位置制御型アクチュエータを用いる場合の駆動冗長制御の基礎式となる。通常のパラレルマニピュレータでは、エンドエフェクタはほぼ剛体と考えられるので、内部変位は 0 であり、駆動冗長による位置制御誤差があると大きな内力が発生する。一方、本論文では、逆に内力を計測し式 (22) に基づき、内力が常に 0 となるように各入力点位置を修正し制御する方法を提案する。

### 3.2 位置制御ベースの駆動冗長制御法 通常のパラレルマニピュレータの制御では、

- (1) エンドエフェクタ中心位置・姿勢目標値  $P_{ot}$  から各入力点位置目標値  $p_{1t}, p_{2t}, p_{3t}$  を計算する。
- (2) 各入力点位置目標値から関節角目標値  $\theta_{jt}$ , ( $j=1,2,\dots,6$ ) を計算する。
- (3) 各関節において、 $\theta_{jt}$ , ( $j=1,2,\dots,6$ ) を目標値とする関節角 (位置) サーボ系を構成する。

の手順で関節角制御を行い、エンドエフェクタ中心位置・姿勢を目標値に一致させる。

図 4 に示したような駆動冗長系では、マニピュレータの構造上の誤差および関節角制御誤差が入力点位

置に現れ、その結果として、各入力点間に内力が発生する（冗長でない場合には、このような誤差はエンドエフェクタ位置・姿勢  $P_o$  の誤差となる）。そこで、この種々誤差に伴う内力が計測できれば、式(22)を用い、内力を0とする方向に上記(1)で求めた各入力点位置目標値を修正すれば良いと考えられる。内力と内部変位の方向は同じであるので、

$$dP_i = K_i^{-1} df_i \quad (23)$$

$$\text{diag}[K_i] = [k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}] \quad (24)$$

とし、式(22)により、修正量  $dp_i$  を決定すればよい。ここで、 $k_{i1}$ ,  $k_{i2}$ ,  $k_{i3}$  は定数で内部ステイフネスあるいは内力制御ゲインの逆数と考えることができる。すなわち、本論文で提案する駆動冗長制御手順は、

(1) エンドエフェクタ中心位置・姿勢目標値  $P_{ot}$  から各入力点位置目標値  $P_{1t}$ ,  $P_{2t}$ ,  $P_{3t}$  を計算する。

(2) 内力  $f_i$  を計測し、式(22), (23)により入力点修正量  $dp_i$  を求める。この修正量を用い、新しい入力点目標位置  $p_{it}^*$  を

$$p_{it}^* = p_{it} - dp_i \quad (25)$$

とする。

(3) 修正した各入力点位置目標値  $p_{it}^*$  から関節角目標値  $\theta_{jt}$ , ( $j=1,2,\dots,9$ ) を計算する。

(4) 各関節において、 $\theta_{jt}$ , ( $j=1,2,\dots,9$ ) を目標値とする関節角（位置）サーボ系を構成する。

となる。この制御系のブロック図を図6に示す。このように、提案する駆動冗長制御系では、エンドエフェクタ内力を計測する必要はあるが、従来の位置制御型パラレルマニピュレータに比べ、式(22)～(25)の演算が余分に必要となるだけである。図6において、ハッチングを施した部分が、駆動冗長化のために付加した部分であり、従来の制御系を大幅に変更する必要のないことが分かる。

#### 4. 実験

##### 4.1 駆動冗長パラレルマニピュレータ 図7, 8

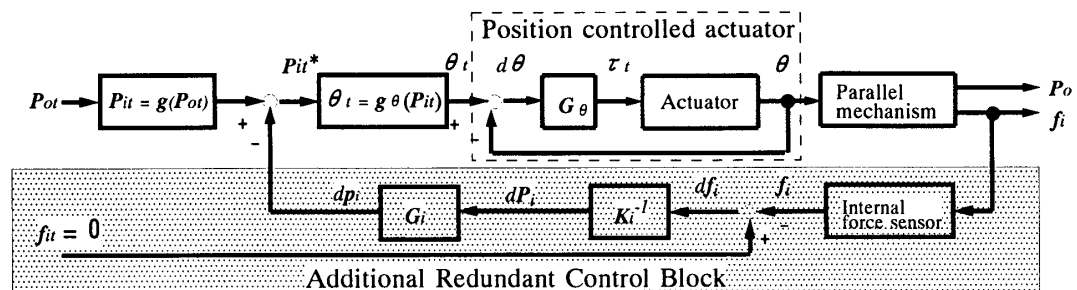


Fig.6 A proposed control system for a redundant parallel manipulator.

は、それぞれ試作した位置制御型駆動冗長パラレルマニピュレータの構造図と写真である。これは、著者が過去に試作した大型パラレルマニピュレータ<sup>(13)</sup>の1/10スケールモデルに3つの駆動冗長軸を追加したものである。なお、駆動冗長軸は容易に外せる構造となっている。この構造は図1に示す一般的な Stewart プラットフォームの2組のシリンダ型アクチュエータを5角形リンク機構に置き換えたもので、従来の Stewart プラットフォームに比べ2倍近い可動領域を有する。関節角度を積極的に制限しなければ、第2種特異点(図2(a)および(b))が発生する(なお、図2(c)は発生しない)。使用しているアクチュエータは9個全て同じもので、減速比約1/500、瞬時最大トルク1.3 N-mである。

4.2 内力センサ 内力の計測法としては、エンドエフェクタ各入力点に2軸のカセンサを取り付ける方法が考えられるが、ここでは、図9に示すような内力のみを計測するセンサを試作した。各入力点間に細いスリットが切っており、内力のみに感応する構造となっている。なお、この詳細については別報で報告する予定である。本センサの代表的特性を図10(a),(b)に示す。図10(a)は、3つの内力成分のうち  $f_{i1}$  のみを加えた場合である。他の成分  $f_{i2}$ ,  $f_{i3}$  に  $f_{i1}$  の影響がほとんど現れておらず、各成分が分離されていることが分かる。図10(b)は、外力  $f_{ox}$  のみを加えた場合の内力の計測結果であるが、ほとんど外力の影響を受けていないことが分かる。なお、他の方向の内力や外力の付加についてもほぼ同様の結果が得られた。

4.3 特異点回避数値シミュレーション 図4, 7に示す駆動冗長マニピュレータに対し、冗長化の効果を確認するための数値シミュレーションを行った。冗長でない場合も含め全て同じアクチュエータを用いているため、発生できる最大/最小トルクは全て同一として、エンドエフェクタで発生可能な最大並進力およびモーメントをシミュレーションで求めた。シミュレー

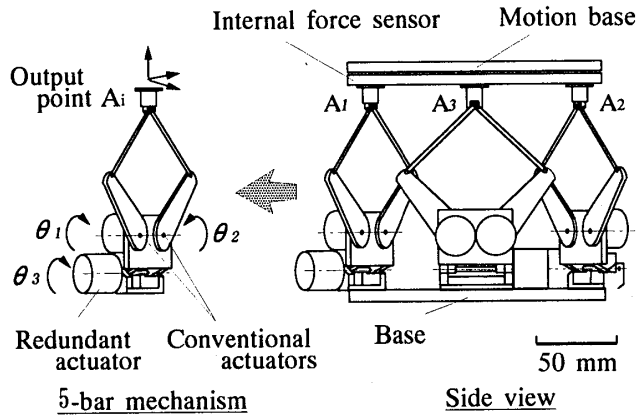


Fig.7 A proto-type 9 DOF redundant parallel manipulator

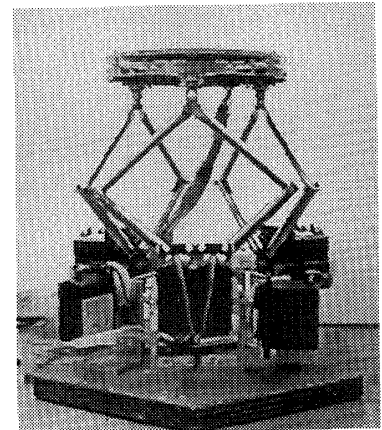


Fig.8 A photograph of proto-type

シオンでは、高さ  $P_{oz}$  を一定として、その他の方向に変位させ最大発生力を計算した。シミュレーション結果を図 11(a),(b)に示す。どちらも図 2 (a)の特異点に対するシミュレーション結果である。なお、最大発生並進力およびモーメントはそれぞれの最大値で除した相対値（無次元値）で表示してある。図 11(a)に示すように、冗長でない場合には  $\eta = 30\text{deg}$  付近でトルク  $t_{oy}$  が急速に減少し、特異となっていることが確認できる。それに対し、冗長化を行うと、図 11(b)に示すように、特異点近傍でもトルク  $t_{oy}$  の発生が確認でき、特異点が回避されているのが確認できる。なお、ここでは示さなかったが、図 2 (b)の特異点に対しても駆動冗長化の効果を確認している。また、駆動冗長化を行うと並進力についても約 20～50%程度増加することも確認している。

4.4 内力センサによる駆動冗長制御実験 図 9 に示す内力センサを装着し、図 6 に示す制御系を用いて特異点回避実験を行った。式 (24) で示した内部スティフネスの逆数が内力制御に関する比例ゲインに相当するが、この値は実験的に最適値を決定した。機構の対称性から  $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}$  は全て同一とした。なお、内力計測および座標変換を含めたサーボレートは、20ms とした。図 12(a),(b),(c)に内部スティフネス値  $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}$  を 5,10,15[N/mm]とした場合の内力変化を示す。この結果から  $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3} \leq 10$  では、応答が振動的となるため、 $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3} = 15$  として以後実験を行った。なお、負荷質量は、2.5kg (アクチュエータ瞬時最大トルク時の約 1/3) まで加えたが、このゲインで安定な動作を行った。図 13(a)は、冗長でない状況で、負荷 1.0kg として、図 2 (a)の特異点状態から中立位置へ移動させた場合の内力の計測結果である。ほぼ 0～3sec の間が特異点から中立位置へ移動する区間で、それ以後は特異でない状態での移動である。冗長でな

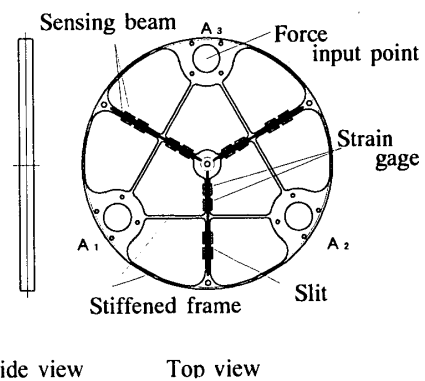
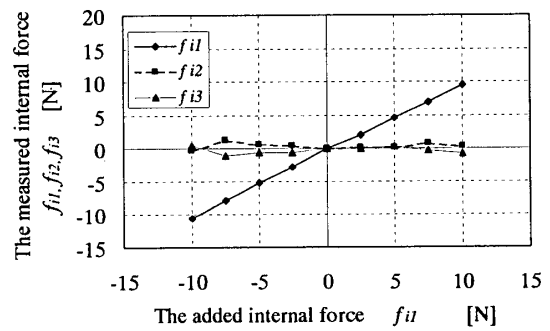
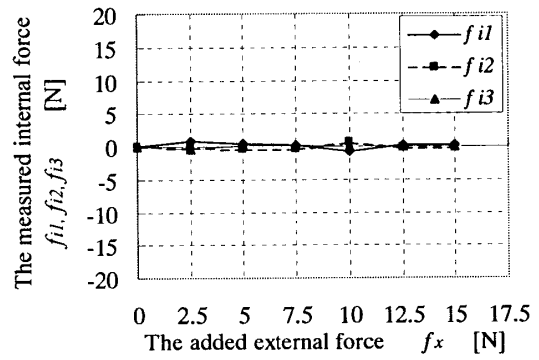


Fig.9 A proto-type 3 DOF internal force sensor



(a) A case of adding  $f_{i1}$  only



(b) A case of adding  $f_{ox}$  only

Fig.10 A characteristic of trial internal force sensor.

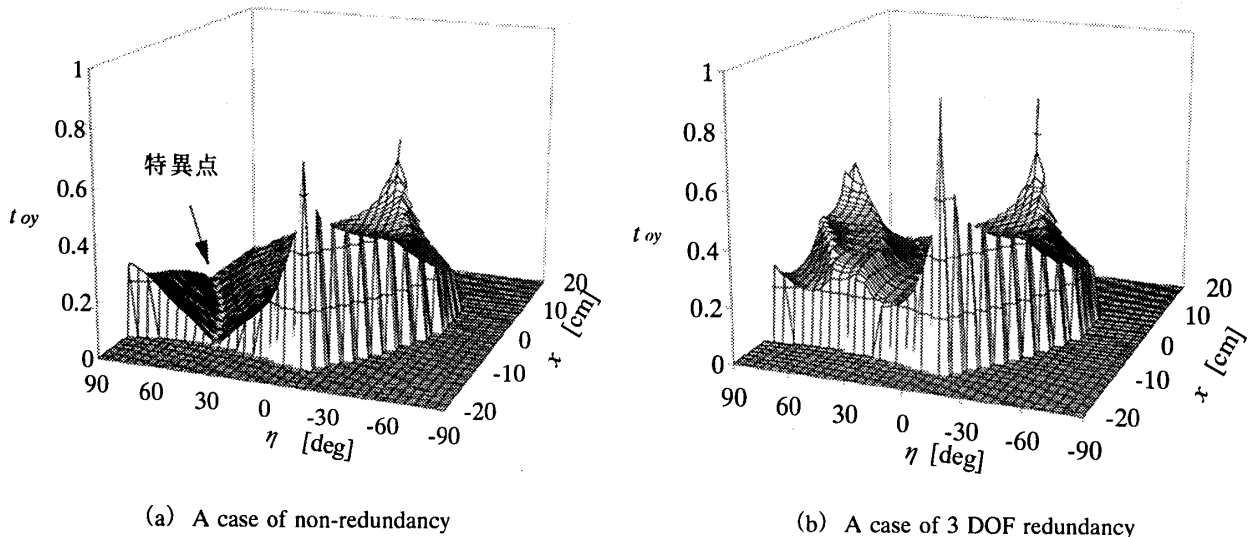


Fig.11 A result of singular configuration simulation.

い場合には、特異点から離れるように目標値を生成しても、0～2secの間は特異状態のままであり、内力が次第に増加している（冗長でない場合では、特異点において退化した外部空間の自由度が内部空間に現れるため、内力が発生する）。約2secの時点で、特異点からのわずかなズレのために突然ジャンプが発生し、通常状態（本来の目標位置）に移行した。このように、冗長でない場合、一旦特異点近傍に入るとそこからの脱出が困難になることが確認できた。

図13(b)は、(a)と同一条件で、3自由度の駆動冗長とした場合である。ただし、内力フィードバックを行っていない。このときには、特異点近傍を滑らかに通過できるが、駆動冗長アクチュエータの位置誤差のため、常に内力が発生している。

図13(c)は、(b)に内力補償フィードバックを付加した場合である。この場合には、特異点近傍を滑らかに通過できると同時に、内力がほぼ0に保たれている。

以上のように、提案する駆動冗長制御法の有効性が確認できた。なお、図2(b)の特異点に関してもほぼ同様の結果を確認している。

## 5. まとめ

本論文で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 冗長パラレルマニピュレータの制御法として、過拘束により発生する内力を直接計測し補償する手法を提案した。本手法は、余分に発生する内力を0とするように直接制御するため、制御内容が従来法に比べより明確である。
- (2) 内部変位という概念を導入し、過拘束に伴う内力を、入力点の内部変位に変換し制御する手法を提案

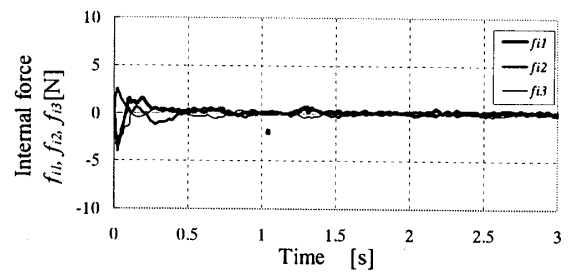
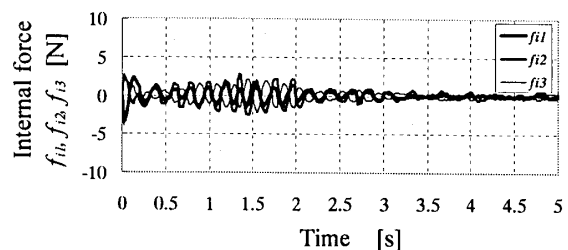
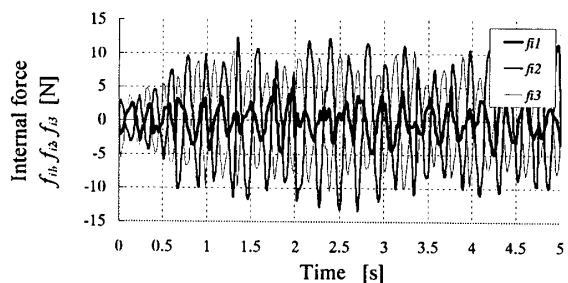
(a)  $ki_1, ki_2, ki_3 = 15 \text{ N/mm}$ (b)  $ki_1, ki_2, ki_3 = 10 \text{ N/mm}$ (c)  $ki_1, ki_2, ki_3 = 5 \text{ N/mm}$ 

Fig.12 Effect of the Internal Stiffness on Stability.

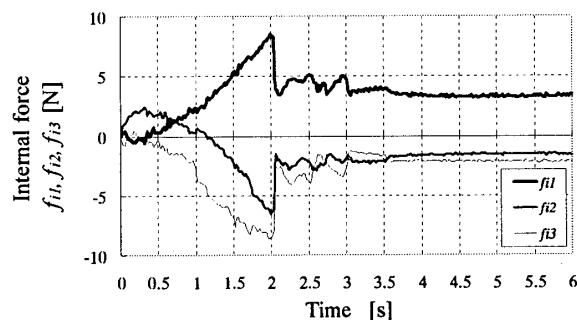
した。この手法は、従来の位置制御を基礎としたパラレルマニピュレータの制御系を若干修正するだけ

で駆動冗長系の制御が可能となるので、従来法に比べ、演算量が少なく、さらにトルク/重量比の大きな減速機付き位置制御型のアクチュエータを用いることができるという実用上有利な特長を持つ。

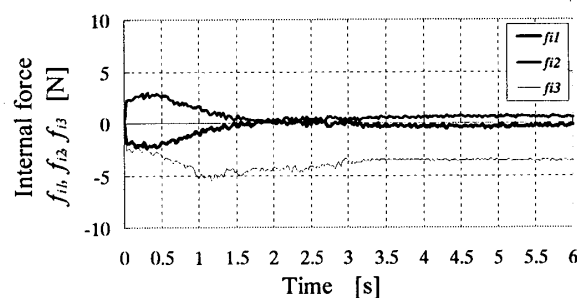
- (3) 内力を直接計測するセンサを試作し、各内力および外力間の非干渉性を確認した。
- (4) パラレルマニピュレータの特異点について考察し効率的と思われる駆動冗長アクチュエータの配置法を提案した。
- (5) 提案した内力センサと3自由度の冗長駆動アクチュエータを持つパラレルマニピュレータ(全9自由度)を試作した。これに、提案した内力ベースの駆動冗長制御手法を適用し、有用性を確認した。

## 文 献

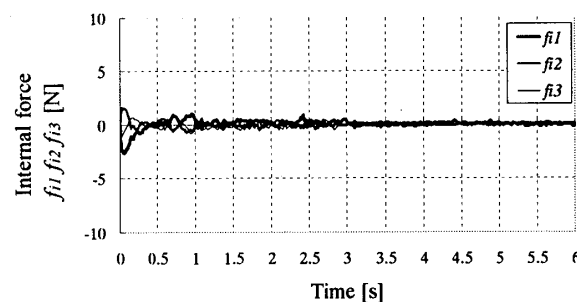
- (1) 新井 健生・小関 義彦・他3名, 可変構造型パラレルメカニズム, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.1, pp.140-147, 2004.
- (2) 太田 祐介・稲垣 淑彦・米田 完・広瀬 茂男, 出力均質性の高いパラレルメカニズムを利用した省自由度歩行ロボットの研究, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.1, pp.66-74, 2000.
- (3) J. P. Merlet, *Singular Configurations of Parallel Manipulators and Grassmann Geometry*, Int. J. of Robotics Research, Vol.8, No.5 pp.45-56, 1989.
- (4) C. Gosselin and J. Angeles, *Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chain*, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 6 No. 3, pp.281-290, 1990.
- (5) 内山 勝, パラレルマニピュレータの機構と特性, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.715-720, 1992.
- (6) F. Pierrot, M. Uchiyama, P. Dauchez and A. Fournier, *A New Design of a 6-DOF Parallel Robot*, J. of Robotics and Mechatronics, Vol.2, No.4, pp.308-315, 1990.
- (7) R. Stoughton and T. Arai, "Kinematics Optimization of a Parallel Link Manipulator," 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.69-70, 1991.
- (8) T. Ropponen and Y. Nakamura, *Singularity-Free Parametrization and Performance Analysis of Actuation Redundancy*, Proc. IEEE Robotics and Automation, pp.806-811, 1990.
- (9) V. R. Kumar and J. F. Gardner, *Kinematics of Redundantly Actuated Closed Kinematic Chains*, Proc.



(a) A case of non-redundancy



(b) Without the internal force feedback



(c) With the internal force feedback

Fig.13 Measured internal forces in singular configuration.

ICAR '89 pp.488-512,1989.

- (10) 中村 仁彦, 閉リンクロボットのダイナミクス計算法と駆動冗長化の最適化, 計測時同制御学会論文集, Vol.25, No. 5, pp.600-607, 1989.
- (11) 津坂 祐司・福泉 武史・井上 博允, 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, Vol.5, No.3, pp.180-187, 1987.
- (12) M. T. Mason and J. K. Salisbury, *Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*, The MIT Press, 1985.
- (13) 三村 宣治, 電動6軸パラレルリンクマニピュレータとその応用, 日本機械学会論文集(C編), 62巻, 597号, pp.1866-1871,1996.