

## 駆動冗長パラレルマニピュレータに用いる内力センサについて\*

三村 宣治<sup>\*1</sup>, 小野寺 長二<sup>\*1</sup>, 佐谷 明映<sup>\*2</sup>

## An Internal Force Sensor for Control of a Redundant Parallel Manipulator

Nobuharu MIMURA<sup>\*3</sup>, Ryouji ONODERA and Akiei SATANI<sup>\*3</sup> Faculty of Engineering, Niigata University,  
8050 Ikarashi-2, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

This paper describes an internal force sensor for a new redundant parallel manipulator. 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 proposed a new control method using a conventional geared actuator. In our method, internal forces produced by actuator redundancy was detected by an internal force sensor and controlled to be zero. This force sensor is designed to detect only internal forces loaded the end-effector. We demonstrate about the structure and the principle of the proposed internal force sensor, and experimental result of the internal force sensor when internal and outer forces are loaded it.

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

## 1. はじめに

パラレルマニピュレータ(パラレル機構)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である。そのため, 従来のシリアル型に比べ, 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<sup>(1)~(3)</sup>。

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, 可動範囲が狭いうえに広い範囲に存在する特異点のために, その有効作業領域が著しく制限されてしまうという欠点がある<sup>(4)~(7)</sup>。パラレル機構固有の特異点は, 通常の動作では抜け出すことが困難でどうしても避けなければならないことが指摘されている。

このパラレル機構特有の特異点は, 力(駆動力)空間が退化することにより発生することから, これを避ける手法として, 駆動冗長化が提案されている。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特異点以外の通常作業領域では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。これに対してはトルク制御を前提とした種々の冗長駆動トルクの最適化手法が提案されてい

る<sup>(8),(9)</sup>。しかしこれらの方法ではトルク制御を前提とするため, 特殊な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。

そこで著者らは, 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提案した<sup>(10)</sup>。この手法では, 通常の工業用ロボットで多用される減速機付き位置制御型のアクチュエータの利用が可能となるため設計自由度が増大する。ただし, 過拘束のために機構内部に発生する3自由度の内力を直接検出する必要が生じる。

多自由度の力センサに関しては, Brock が世界に先がけて十字梁構造の6軸力覚センサを開発した<sup>(11)</sup>。また, Fantuzzi は円筒形状の力覚センサを開発し, ハンドへ実装している<sup>(12)</sup>。金子らは, 3軸力覚センサを複数個組み合わせ, より多自由度の力覚センサを構成する手法について報告している<sup>(13)</sup>。永田らは, 超小型の6軸力覚センサを開発し, 小型のハンドに実装している<sup>(14)</sup>。また, 内山らは, 力覚センサの構造評価方法に関し考察し, 力覚センサの設計指針を明らかにしている<sup>(15)</sup>。

しかしながら, これら従来の力覚センサに関する研究は外力を検出するためのセンサに関するものがほとんどで, 内力を直接検出しようとするセンサに関する研究は少ない。機構内部に作用する内力は, 従来の外力検出用の力覚センサを複数個用いても検出可能であるが, 実装や較正が煩雑である。また, 内力の検出に

\* 原稿受付 2005年4月25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

はセンサ間の外力の差分演算を行う必要があるが、検出しようとする内力は外力に比べ小さくセンサ感度の点で不利である。内力のみを検出するためには従来の力覚センサとは全く異なる構造が必要となる。

このようなことから、著者らは駆動冗長型パラレル機構の制御に必要な3自由度内力を直接検出するセンサを試作した。本論文では、以上の制約を考慮して設計した3自由度内力センサとその特性評価結果について報告する。

## 2. 駆動冗長パラレル機構の内力と内力センサ

**2.1 内力の基礎式** 本論文で取り扱う内力センサは、駆動冗長パラレル機構の制御に用いる特殊なもので、その構造は制御方法と密接な関係がある。そこでまず、駆動冗長パラレル機構で発生する外力及び内力について説明する。駆動冗長パラレル機構の力学系を考えやすくするため、図1で示すような8面体モデルを考える<sup>(16)</sup>。図1のエンドエフェクタとベースの間の6つの辺の長さを可変にしたものが Stewart プラットフォームと呼ばれるパラレル機構である。さらに、ベースの3辺にアクチュエータを追加したものが9自由度の駆動冗長パラレル機構である(図2)。

冗長でない場合には、エンドエフェクタ上の3つの力入力点  $A_1, A_2, A_3$  における合力ベクトルをそれぞれ  $f_1, f_2, f_3$  とすると、それぞれ  $f_1, f_2, f_3$  は2次元力となる。ベースの3辺は受動ジョイントで構成され、入力点間 ( $A_1-A_2, A_2-A_3, A_3-A_1$ ) の力が逃がされるため、各入力点間に力は発生しない。

一方、駆動冗長の場合には、 $f_1, f_2, f_3$  が3次元力となり、ベースの3辺が駆動ジョイントであるため、特別な制御をしなければ2つの入力点間に力  $f_{11}, f_{12}, f_{13}$  が発生する(図3)。この力が駆動冗長パラレル機構特有の内力である。著者らが提案する駆動冗長パラレル

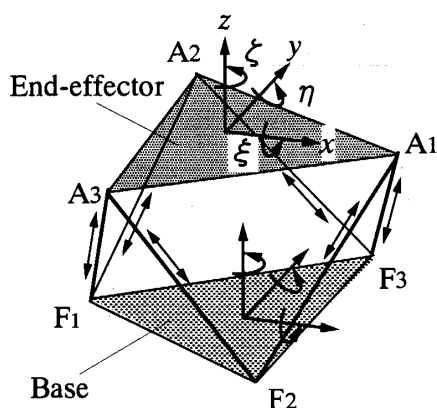


Fig.1 Octahedral design parallel manipulator

機構<sup>(10)</sup>は、わずかな位置制御誤差でも比較的大きな内力が発生し、これが過大に働くと機構自体が破損するため、内力を極力ゼロにする必要がある。

エンドエフェクタが発生する力を  $f_0$ 、トルクを  $t_0$  とし、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)  $F_0$  を以下のように定義する。

$$f_i = [f_{i1} \ f_{i2} \ f_{i3}]^T \in R^3 \quad (1)$$

$$F_0 = [f_0^T \ t_0^T]^T \in R^6 \quad (2)$$

さらに、

$$F = [F_0^T \ f_1^T]^T \in R^9 \quad (3)$$

$$f = [f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T \in R^9 \quad (4)$$

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、

$$F = G^T f,$$

$$G^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -r_{1z} & r_{1y} & 0 & -r_{2z} & r_{2y} & 0 & -r_{3z} & r_{3y} \\ r_{1z} & 0 & -r_{1x} & r_{2z} & 0 & -r_{2x} & r_{3z} & 0 & -r_{3x} \\ -r_{1y} & r_{1x} & 0 & -r_{2y} & r_{2x} & 0 & -r_{3y} & r_{3x} & 0 \\ r_{12x} & r_{12y} & r_{12z} & -r_{12x} & -r_{12y} & -r_{12z} & 0 & 0 & 0 \\ r_{13x} & r_{13y} & r_{13z} & 0 & 0 & 0 & -r_{13x} & -r_{13y} & -r_{13z} \\ 0 & 0 & 0 & r_{23x} & r_{23y} & r_{23z} & -r_{23x} & -r_{23y} & -r_{23z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

が成立する。ただし、

$$r_i = [r_{ix} \ r_{iy} \ r_{iz}]^T, (i=1,2,3) : \text{エンドエフェクタ中心から第 } i \text{ 入力点へのベクトル}$$

$$r_{jk} = [r_{jky} \ r_{jky} \ r_{jkz}]^T, (j,k=1,2,3) : \text{第 } j \text{ 入力点から第 } k \text{ 入力点へのベクトルである。}$$

式(5)から明らかのように、 $G^T$  は3つの入力点  $A_1, A_2, A_3$  の位置のみで決定される行列である。結局、式(5)が駆動冗長系における外力及び内力の関係式である。駆動冗長系では、内力  $f_i$  を直接検出できれば、 $f_i = 0$  となるように制御系を構成すればよいので、結局、内力  $f_i$  の検出が重要となる。

通常、力覚センサでは、力をそれに対応する変位に置き換え検出するのが一般的である。本論文の内力センサも一般的なひずみゲージを用いることを想定している。センサ構造を検討する際、変位に関する関係式を導いておいた方がよい。そこで、式(5)を変位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  $dp_0, d\phi_0$  (外部変位)、内力に対応する変位(内部変位)を  $dp_{11}, dp_{12}, dp_{13}$ 、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、

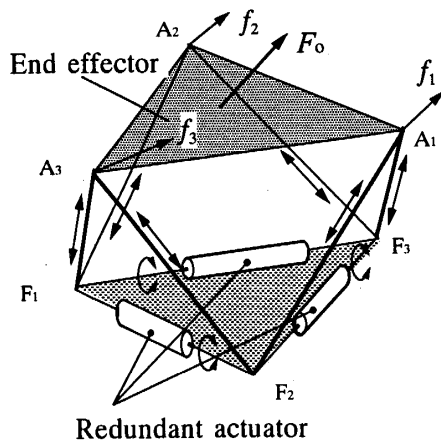


Fig. 2 A redundant actuator system

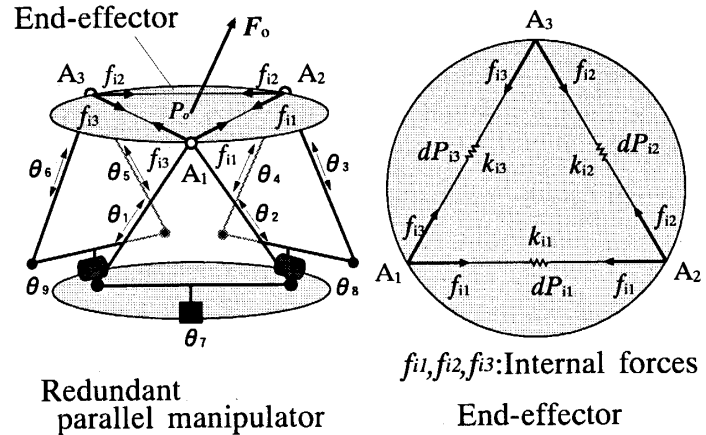


Fig. 3 Internal force produced by actuation redundancy

$$dP_o = [dp_o^T d\xi_o^T]^T \in R^6 \quad (6)$$

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

$$dP = [dP_o^T dP_i^T]^T \in R^9 \quad (8)$$

$$dp = [dp_1 dp_2 dp_3]^T \in R^9 \quad (9)$$

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一般化変位ベクトルである。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 (5) に仮想仕事の原理を適用し、整理すると、

$$dp = G dP \quad (10)$$

式 (10) を外部および内部変位  $dP_o$ 、 $dP_i$  の部分に分割すると、

$$dp = G dP = G_o dP_o + G_i dP_i \quad (11)$$

$$[G_o \ G_i] = G \quad (12)$$

となる。式 (11) 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、

$$dp = dp_o + dp_i \quad (13)$$

$$dp_o = G_o dP_o \quad (14)$$

$$dp_i = G_i dP_i \quad (15)$$

である。式 (10) ~ (15) がひずみゲージなどで直接検出できる変位に関する式である。

一般化力と一般化変位との間にフックの法則が成立すると仮定すると、センサ起わい体の剛性行列  $K \in R^{9 \times 9}$  を用い

$$F = K dP \quad (16)$$

と書ける。また、剛性行列  $K$  を

$$K = \begin{bmatrix} K_o & K_{oi} \\ K_{io} & K_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

のように部分行列に分解し、式 (16) に式 (3), (8) を用いると、

$$\begin{bmatrix} F_o \\ f_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_o & K_{oi} \\ K_{io} & K_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dP_o \\ dP_i \end{bmatrix} \quad (18)$$

である。ここで考えている内力センサでは、できるだけ少ない変位データから内力成分  $f_i$  のみを検出することが望ましいので、

$$K_{oi} = 0, \quad K_{io} = 0 \quad (19)$$

とするのが良い。また、このとき、

$$F_o = K_o dP_o \quad (20)$$

$$f_i = K_i dP_i \quad (21)$$

となり、外部および内部変位はそれぞれ外力および内力のみで決定されることになる。内力のみを検出することを目的とするセンサでは、 $K_o$  を大きく設定することが望ましく、 $K_i$  を適切に設定することにより必要なセンサ感度を実現できる。

以上より内力センサ起わい体の構造に求められる条件をまとめると、

**条件 1**  $K_{oi} = 0, \quad K_{io} = 0$

**条件 2**  $K_o$  : できるだけ大きくすることが望ましい

**条件 3**  $K_i$  : センサ感度を考慮して設定

である。

**2.2 内力センサの構造** エンドエフェクタに作用する外力の影響を受けず内力のみを検出するためには前節で示した 3 つの条件が成立する必要がある。

この 3 つの条件を考慮して製作した 3 軸内力センサ起わい体の構造を図 4 に示す。また、図 5 が本内力センサを装着した駆動冗長パラレル機構である。内力センサは 3 組の 3 自由度 5 角形リンク機構とエンドエフェクタの間に装着できるようになっている。図 4 にお

いて、 $A_1, A_2, A_3$  がユニバーサルジョイントを介して5角形リンク機構が取り付けられる部分であり、 $B_0, B_1, B_2, B_3$  がエンドエフェクタに取り付けられる部分である。本センサでは、 $A_1, A_2, A_3$  がお互いのできるだけ内部変位方向のみに変位しやすく、かつ、 $B_0, B_1, B_2, B_3$  をエンドエフェクタに固着する構造とすることにより、前節の3つの条件を満足するように工夫している。内力に対応する内部変位が、 $A_1, A_2, A_3$  のそれぞれの間の相対変位であることから、 $A_1, A_2, A_3$  の中間に細長いスリットを有する梁(Sensing beam)を設けることにより、内力発生時に内部変位のみが発生しやすい構造としている。さらに、外力に対する影響を少なくするため、補強部材(Stiffened frame)を取り付けてある。なお、起わい体は直径 180mm, 厚さ 10mm の円盤状で、ジュラルミンの板材から放電ワイヤカット加工により切り出した一体構造である。A2-A3 間に内力を加えた場合に想定される起わい体の変形状況の模式図を図6に示す。本センサ構造では、内力が生じている Sensing beam とそうでない部分の変形状況が異なるので、これを考慮してひずみゲージを貼付することで内力(内部変位)を検出することができる。な

お、本センサ構造では、内力方向だけではなくセンサ平面内の他の方向 ( $f_{ox}, f_{oy}, f_{oz}$  方向) にもひずみが生じ、前節の条件2を満足しない可能性も考えられるが、これに関しては実験的に検討することとした。

### 3. 実験

3.1 内力センサ評価実験1 (内力および外力付加の影響) 想定される起わい体の変形状況(図6)を考慮し、図4に示す梁部にひずみゲージ  $G_1, G_2, G_3, G_4$  を貼付した。梁部のひずみを電気信号に変換するためのブリッジ回路は、図7のように構成し、ブリッジ用安定化電源およびひずみゲージ用高ゲイン直流アンプは起わい体内部に実装した。他の2組の梁部についても同じようにひずみゲージを貼付し、ブリッジ回路を構成した。これら3組の梁部より得られる出力電圧  $s = [s_1 s_2 s_3]^T$  [V] が式(21)の内部ひずみ  $dP_i$  と対応する。ただし、必ずしも一対一対応ではないため、以下のようにおく。

$$s = G_s dP_i \quad (22)$$

ただし、 $G_s$  は内部ひずみを出力電圧に変換する  $3 \times 3$  の正則行列である。内力センサでは、センサ出力

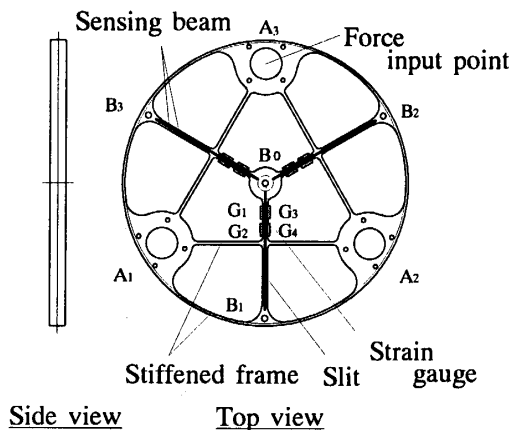


Fig.4 A proto-type 3 DOF internal force sensor

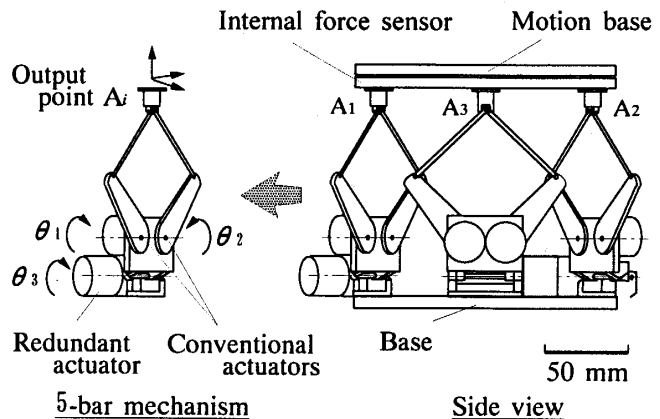


Fig.5 A proto-type 9 DOF redundant parallel manipulator

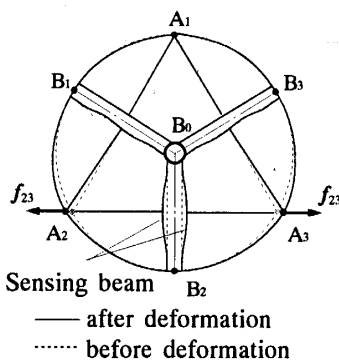


Fig.6 Deformation of the sensing beam loaded an internal force  $f_{23}$ .

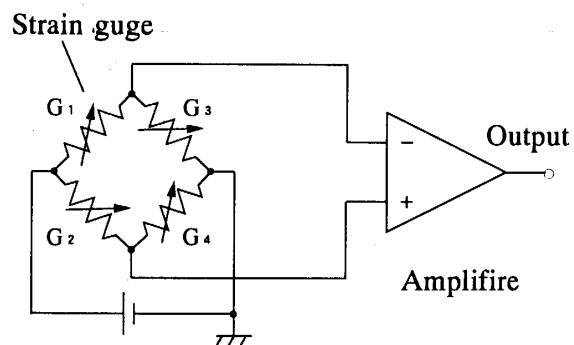


Fig.7 A bridge circuit of strain gauges

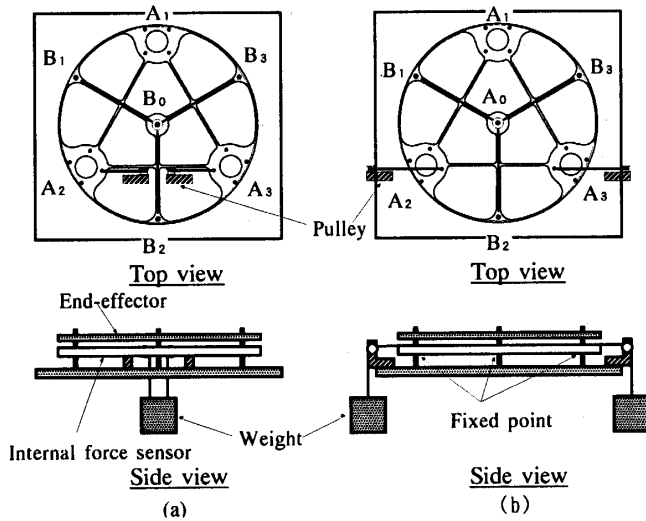


Fig.8 A sensor calibration device.

電圧  $s$  から内力  $f_i$  を決定できればよいので、式(21)と(22)より、

$$f_i = K_i G_s^{-1} s \quad (23)$$

ここで、

$$C = K_i G_s^{-1} \quad (24)$$

とおけば、

$$f_i = C s \quad (25)$$

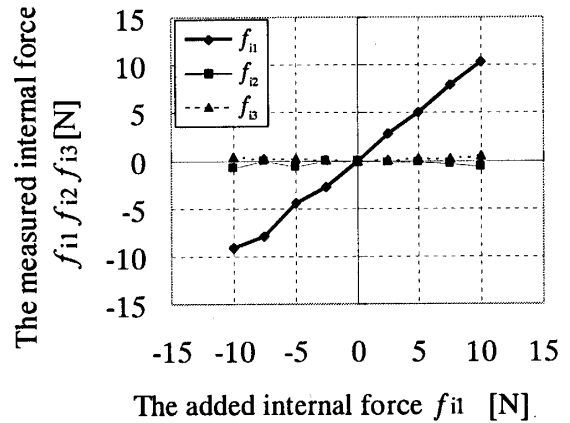
である。行列  $C$  は通常力覚センサの校正行列に相当し、以下に示す校正実験により決定した。

内力測定のための実験装置の概略を図8に示す。図8(a)は内向きの内力、(b)は外向きの内力を測定するための装置構成で、外力が加わらないように  $B_0 \sim B_3$  の4点を固定し、上面にはエンドエフェクタを取り付けている。基準のおもりのついた糸を滑車に通し、図8(a)、(b)の様に内向きおよび外向きに力が加わるようにしている。外力  $F_0 = 0$  とし、内力  $f_i$  を  $\pm 10$  [N] の範囲で種々のおもりに変更しセンサ出力を計測した。得られたデータから最小二乗法により行列  $C$  を決定した。これを以下に示す。

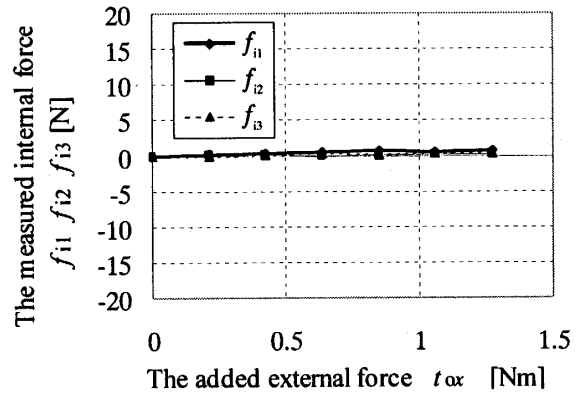
$$C = \begin{bmatrix} 2.119 & 1.048 & 0.5733 \\ -0.7907 & 2.731 & -0.5721 \\ -0.6433 & -0.7725 & 1.851 \end{bmatrix} \quad (26)$$

この校正した行列  $C$  を用い、計測したセンサ出力  $s$  から式(25)を用いて計算した内力  $f_i$  の計測結果を図9(a)に示す。比較的良好に3つの内力が分離されていることが分かる。

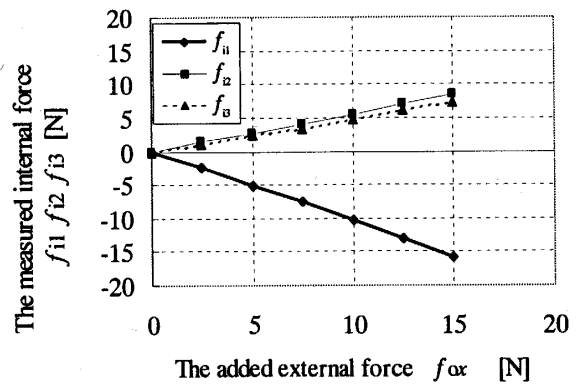
次に外力  $F_0$  の影響を調べるため、内力  $f_i = 0$  として外力  $F_0$  を加え、式(26)の行列  $C$  を用いて内力  $f_i$  を求めた。外力  $t_{ox}$  に対しては、ほとんど影響を受けない



(a) Interference of other internal forces



(b) Interference of external force  $t_{ox}$



(c) Interference of external force  $f_{ox}$

Fig.9 A characteristic of trial internal force sensor

ことが確認できた(図9(b)、詳細は省略するが  $f_{ox}, t_{oy}$  に対しても同様)。一方、 $f_{ox}$  方向には比較的大きな影響が現れている(図9(c)、図示していないが  $f_{oy}, t_{oz}$  に対しても同様)。このように、センサ平面内の外力

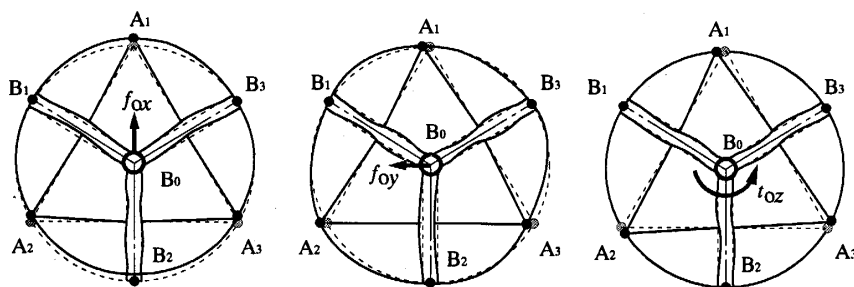


Fig.10 Deformation of the sensing beam loaded external forces and moment.

$f_{ox}, f_{oy}, t_{oz}$  に対しセンサ剛性が十分でなく、影響を受けることが判明した。本センサの目的は内力のみを分離して検出することであるので、上記の結果は望ましくない。この対策については以下で検討する。

**3.2 内力センサ評価実験2 (外力付加の影響軽減方法の検討)** 本センサでは、外力付加時の出力発生は駆動冗長制御系を乱す原因となるので、これを極力抑える必要がある。

そこで、センサの固定状況などを考慮し外力  $f_{ox}, f_{oy}, t_{oz}$  付加時の変形状態を推察すると、図10のようであると考えられる。図4に示す補強部材 (Stiffened frame) がこのような変形を防止するためのものであるが、その構造や大きさが十分でなかったものと考えられる。この対策方法としては、センサ構造自体を変更することも考えられ、大幅な変更を必要とする可能性が高い。一方、試作センサの内力に対する特性は良好であることから、現状でも、外力を別に検出できれば、それを用いて補正を行うことが可能であると考えられる。

そこで、本センサ構造が、内力  $f_i$  以外に外力  $f_{ox}, f_{oy}, t_{oz}$  にも感受性を有する6軸 (内力3軸, 外力3軸) 力覚センサと考え、ひずみ検出部を3箇所増設することとした。内力および外力付加時において、Sensing beamの外側 (当初ひずみゲージを貼付した部分) と内側では、変形の位相が異なることが予想できるので、Sensing beam 外側3箇所にはひずみ検出部を増設する (図11)。増設したひずみ検出部は、図4と同様の4枚ゲージのブリッジ構成である。合計6組の梁部より得られる出力電圧  $s' = [s_1 s_2 s_3 s_4 s_5 s_6]^T$  [V]とし、外力の一部  $f_o' = [f_{ox} f_{oy} t_{oz}]^T$  および内力  $f_i$  をひとまとめにしたベクトルを

$$f' = [f_o'^T f_i'^T]^T \quad (27)$$

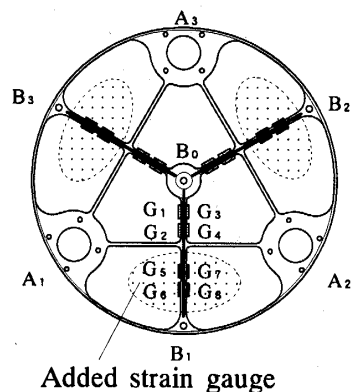


Fig.11 A modified sensor

とおくと、式(25)と同様に

$$f' = C' s' \quad (28)$$

とでき、行列  $C'$  と同様に最小2乗法により決定すると、

$$C' = \begin{bmatrix} -3.238 & -5.925 & 5.155 & 1.070 & -1.604 & 4.633 \\ 2.465 & 1.714 & -1.670 & 0.8513 & -1.043 & -3.388 \\ 3.499 & -1.418 & 1.397 & -0.4270 & 0.7481 & -5.019 \\ 6.923 & 4.220 & -2.203 & -1.464 & 1.448 & -8.438 \\ -4.020 & -3.531 & 4.282 & 1.830 & -1.658 & 4.568 \\ 5.568 & 4.359 & -4.999 & -0.4478 & 2.380 & -5.911 \end{bmatrix} \quad (29)$$

となった。この較正した行列  $C'$  を用い、計測したセンサ出力  $s'$  から式(28)を用いて計算した内力  $f_i$  の計測結果を図12(a)に示す。比較的良好に3つの内力が分離されていることが分かる。また、外力付加時の内力計測結果を図12(b), (c)に示す。外力  $t_{oz}$  (図示しないが  $f_{oy}, t_{oz}$  に対しても同様) だけではなく  $f_{ox}$  (図示しないが  $f_{oy}, t_{oz}$  に対しても同様) に対しても影響を受けなくなっていることが確認できる。以上のように、影響を受ける外力  $f_o' = [f_{ox} f_{oy} t_{oz}]^T$  を計測し補正することにより、外力  $F_o$  の影響を排除し内力  $f_i$  のみを計測するセンサを開発できた。

#### 4. まとめ

本論文で得られた結果は、以下のとおりである。

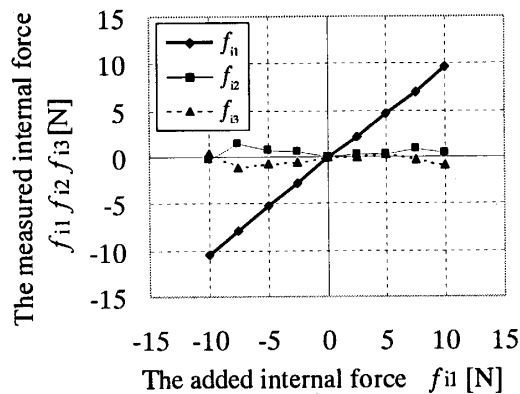
- (1) 内部変位という概念を導入し、駆動冗長機構の過拘束に伴う内力および内部変位の関係を導いた。この関係に基づき、内力 (実際には内部変位) を直接計測するセンサ構造を考案した。このセンサは、従来の外力力覚センサとは全く異なる構造である。
- (2) 考案したセンサ構造では、内力間の干渉は比較的少ないが外力  $f_{ox}, f_{oy}, t_{oz}$  方向の剛性が十分ではなく、内力に対し比較的大きな干渉が生じた。しかしなが

ら、ひずみゲージを追加し、干渉の生じる外力  $f_{ox}$ ,  $f_{oy}, f_{oz}$  の情報を追加することにより、すべての外力に対し非干渉化することができた。

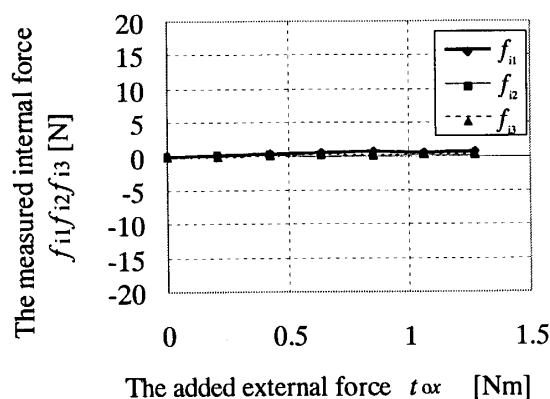
なお、本論文では示さなかったが、提案した内力センサを3自由度の冗長駆動アクチュエータを持つパラレ

ルマニピュレータ（全9自由度）に実装し、内力ベクトルの駆動冗長制御手法の有効性を確認している<sup>(10)</sup>。

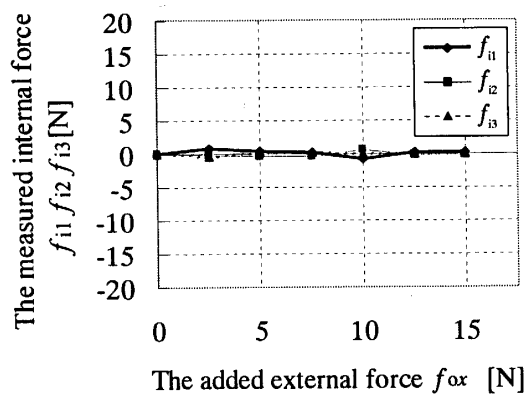
## 文 献



(a) Interference of other internal forces



(b) Interference of external force  $t_{ox}$



(c) Interference of external force  $f_{ox}$

Fig.12 A characteristic of modified internal force sensor

- (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) 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.
- (4) J. P. Merlet, *Singular Configurations of Parallel Manipulators and Grassmann Geometry*, Int. J. of Robotics Research, Vol.8, No.5 pp.45-56, 1989.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (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. ICAR '89 pp.488-512, 1989.
- (10) 三村宣治・他 3 名, 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, 日本機械学会論文集 (C 編), 71 巻, 701 号, pp.185-192, 2005
- (11) D. Brock and S. Chiu, *Environment Perception of an Articulated Robot Hand Using Contact Sensors*, ASME Pub. PED -vol.15, Robotics and Manufacturing Automation, pp. 89-96, 1985.
- (12) C. Fantuzzi et al., *A Smart Sensory and Actuation*, pp. 968-973, 1990.
- (13) 金子 真, 組み合わせ理論に基づく 6 軸力覚セ

- ンサの設計に関する基礎的研究, 日本ロボット学会誌, Vol.11, no.8, pp.1261-1271,1993.
- (14) 永田和之・他2名, 指先力覚センサの開発と接触点検出誤差評価, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.8, pp.1221-1228,1996.
- (15) 内山 勝・他2名, 特異値分解によるロボット力覚センサの構造評価, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.1,pp.4-10,1987.
- (16) 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.
-