

組合せ理論に基づく6軸力覚センサの 設計に関する基礎的研究

金子 真* 西原 敏晴**

Basic Study of Six-Axis Force Sensor Design Based on Combination Theory

Makoto KANEKO Toshiharu NISHIHARA

Three-axis force sensors based on the principle of pressure pick-up device are characterized by their manufacturability, simple structure, and miniature size. This paper proposes a new six-axis force sensors composed of two three-axis force sensors and connector. This type of sensor is called Twin-Head type Six-Axis Force Sensor or TH force sensor for short. This paper first describes the theoretical basis for the operation of TH force sensors and provides the characteristic matrix connecting the load and sensor output vectors. It is shown that six types of three-axis sensor are theoretically conceivable, and proved that while there are twenty-one combinations, ten combinations can result in their characteristic matrices full ranks. An optimal design approach is introduced to obtain the best sensor configuration using Singular Value Decomposition (SVD) technique. We also show a design orientation using practical six-axis force sensor with experimental validation.

Key Words: Six-axis force sensor, Optimal design, Three-axis force sensor, Combination theory, Force-moment decomposition theorem

1. まえがき

外部の拘束環境に順応するようにロボットを動作させようとする場合には、通常のロボットに見られる硬い位置決め動作と違って、ロボットに柔らかさを付加したり、ロボットと外部環境との接触力を積極的に制御する必要がある。このようなコンプライアンス制御^①や力制御^②においては、ロボットハンド部に加わる外力を計測することが不可欠となる。ロボットの手先に加わる力を計測する方法には、各関節にトルクセンサを配置して等価的に手先に加わる力を計測する方法^③と、手首部に直接力覚センサを装着する方法^{④,⑤}

がある。ただし前者の方法には、トルクセンサとハンド間に不可避的に存在する慣性力や摩擦力を補償しなければならないなどの問題があるため、一般には直接的で確実な後者の方法がよく用いられる。

このように手首部力覚センサの市場ニーズもあって、これまでに多くの力覚センサが開発^{⑥~⑩}され、商品化^{⑪,⑫,⑬}されてきた。これまでの力覚センサは、一部の例外^⑩を除き、丸棒あるいは角材から精密な加工技術を駆使して、センサ形状を削り出すというのが一般的であったように思われる。このため、センサ構造は全体的に複雑でしかも大きくなりがちであった。このような力覚センサに対して、内山らは、力覚センサの各軸方向の検出精度をできるだけ均一にすることが重要であるという認識に立ち、歪コンプライアンス行列を特異値分解して得られる条件数をできる

原稿受付 1993年1月5日

*広島大学工学部

**九州工業大学情報工学部

だけ小さくするという設計指針を打ち出し、力覚センサの設計に極めて明快な指針を与えた¹⁴⁾。また中村らは、ひずみゲージ感度、力覚感度、及び剛性を使って、力覚センサの弾性要素の構造を評価する方法を提案している¹⁵⁾。

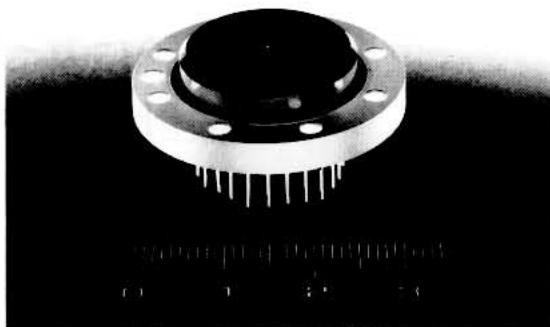
一方、Salisbury は力覚センサ出力を利用すると、力構造だけでなく、ロボットと対象物との接触点情報も得られることを最初に指摘し¹⁶⁾、力覚センサに新たな付加価値を与えていている。その後、このアイデアは Brock and Chiu¹⁷⁾、Tsujimura and Yabuta¹⁸⁾、Bicchi¹⁹⁾によって更に一般的な方法へと展開されている。この一連の研究の中で Brock and Chiu は Salisbury ハンドの指先に直接組み込み可能な十字形の 6 軸力覚センサ¹⁷⁾を開発し、力覚センサの小形化へ初めて挑戦した。また Bicchi は円筒状の単純な 6 軸力覚センサを設計し、Bologna ハンドへの実装を試みている。

このような 6 軸レベルの力覚センサとは別に最近 3 軸レベルの力覚センサが市販されるようになった。このセンサは半導体圧力センサの構造をそのまま生かしたもので、シリコン基盤上に半導体ゲージを 3 組設置しただけの簡単な構造と低価格をアピールしている²⁰⁾。ただし、6 軸の力・モーメント成分のうち実際に計測できるのは 3 成分だけであるため、市場でのニーズはそれほど多くなかった。本研究で提案する力覚センサの設計手法は、このような 3 軸レベルの力覚センサを 2 個組合せてトータルとして 6 軸力覚センサを構築しようとするものである。つまり本研究では、力覚センサの設計をこれまでの“削り出し問題”ではなくて、“組合せ問題”として取り扱おうとしている。本論文では、同一あるいは異種の 3 軸力覚センサを 2 個組合せて構成した 6 軸力覚センサを、特にツインヘッド 6 軸力覚センサと呼び、考えられるすべての構成方法について、センサ出力から、外力、外モーメントが実際に計測可能かどうかについて考察する。次に、市販されている 3 軸力覚センサを利用したツインヘッド 6 軸力覚センサの一設計法を示し、試作モデルによりその動作を確認する。

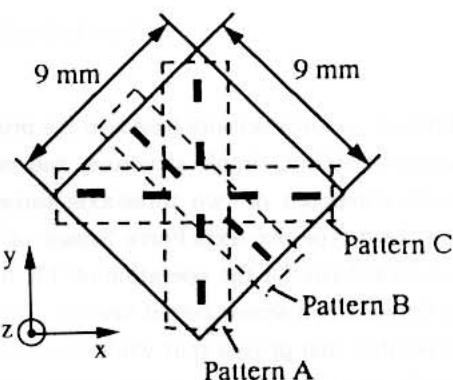
2. ツインヘッド 6 軸力覚センサの提案

2.1 動機

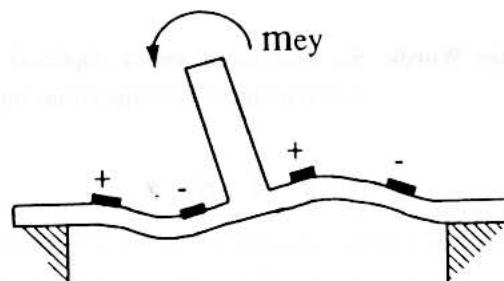
Fig. 1 はすでに市販されている 3 軸力覚センサの一例²⁰⁾である。この 3 軸力覚センサは、半導体圧力センサの構造をそのまま生かしたもので 9 mm × 9 mm のシリコン基盤上に Fig. 1(b) のように 3 組の半導体



(a) An overview of three-axis force sensor



(b) Gauge patterns on semiconductor plate



(c) The relationship between an external moment and the gauge outputs

Fig. 1 An overview of three-axis force sensor and its working principle

ゲージが配置されている。センサの出力軸は、シリコン基盤の中心に取り付けられている。センサの動作は、例えば y 軸回りにモーメントが作用すると、Fig. 1(c) のように基盤が弾性変形し、そのときの Pattern C のゲージ出力から y 軸回りのモーメントが得られる。同様に Pattern A のゲージ出力から x

軸回りのモーメントを得ることができる。さらに、Pattern A, B, C のゲージ出力から z 軸方向の力を計測することができる。このように本センサは、構造が簡単、製作が容易、低コスト、小型化が可能といった特徴を有するが、6軸中3つの成分しか検出できないため、従来需要はそれほど多くなかった。

ところが、もしこのような3軸力覚センサを2つ組合せて6軸力覚センサを構築することができれば、6軸力覚センサの製作が比較的容易になるだけでなく、3軸力覚センサに大きな付加価値を与えることができるというのが本研究の動機付けである。

2.2 ツインヘッド6軸力覚センサ

Fig. 2 のように3軸力覚センサを2つ直列に組合せたセンサ系を考えてみよう。この場合、3軸力覚センサからそれぞれ3つの出力が得られるから、全体で6つの出力を得ることができる。本研究では、このような6軸力覚センサを特にツインヘッド6軸力覚センサ(Twin-Head Type Six-Axis Force Sensor: 以下、単にTH力覚センサと略記)と呼ぶことにする。

2.3 具体的問題の設定

TH力覚センサの実現可能性は、6つのセンサ出力から逆に力点に加わっている外力と外モーメントが分解可能かどうかによる。これは数学的には、TH力覚

センサにかかる外力・外モーメントとセンサ出力を対応付ける特性行列のランクがフルランク“6”になるかどうかに対応する。

TH力覚センサの構成方法には、大きく分けて2通り考えられる。1つは同一の3軸力覚センサを2つ組合せる方法で、もう1つは、異種の3軸力覚センサを2つ組合せる方法である。一般に、 n 種類の3軸力覚センサが考えられるとすると、理論上、

$$L = n + {}_nC_2 \\ = n + n(n-1)/2$$

通りのTH力覚センサが考えられ得る。この式の第1項は同一の3軸力覚センサを2つ組合せた場合の組み合わせ数に相当し、第2項は異種の3軸力覚センサ同士の組合せ数に対応する。**Fig. 3**に考えられ得るすべての3軸力覚センサを示す。これより $n=6$ となり、 $L=21$ となる。3軸力覚センサのうち、これまでに実用化されているのは、著者らが知る範囲では Case 1²¹⁾と Case 4²⁰⁾であるが、本論文では理論的好奇心を満足させる意味も含めて、3軸力覚センサを2組使って構成できる21通りのTH力覚センサすべてに対して、特性行列のランクがどうなるか、またフルランクの場合には例えば、最適形状がどうなるかについて考察する。さらに、現時点で実用化されている3軸力覚センサを2組使用した実際的なTH力覚センサの構成方法についても考察する。

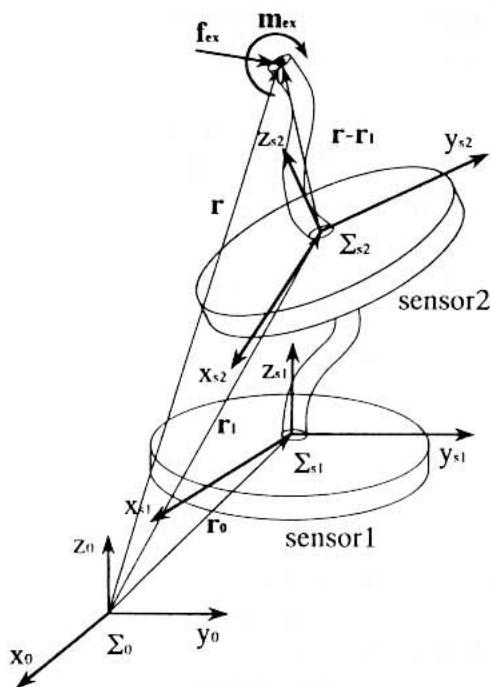


Fig. 2 Twin-Head type six-axis force sensor and its coordinate system

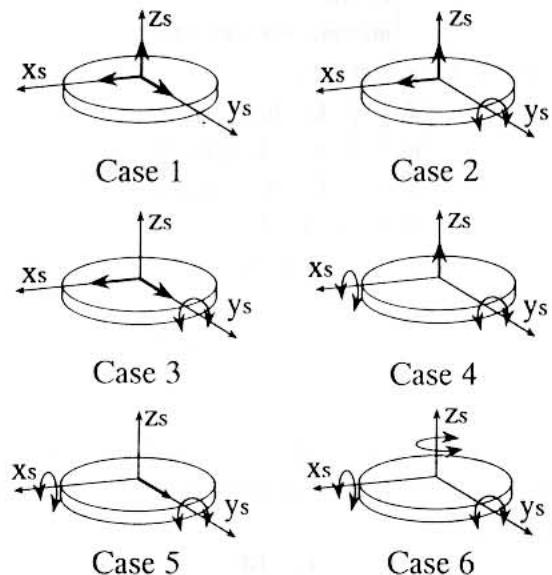


Fig. 3 The possible three-axis force sensors

3. ツインヘッド 6 軸力覚センサの動作原理

ここで用いる主な変数は以下の通りである。

$\Sigma_0 \in R^3$: 絶対座標系

$\Sigma_{s1} \in R^3$: センサ 1 の座標系

$\Sigma_{s2} \in R^3$: センサ 2 の座標系

$\mathbf{r} \in R^{3 \times 1}$: Σ_0 から力点までの位置ベクトル

$\mathbf{r}_0 \in R^{3 \times 1}$: Σ_0 から Σ_{s1} までの位置ベクトル

$\mathbf{r}_1 \in R^{3 \times 1}$: Σ_0 から Σ_{s2} までの位置ベクトル

$\mathbf{f}_i \in R^{3 \times 1}$: 絶対系から見たセンサ i での力 ($i=1, 2$)

$\mathbf{m}_i \in R^{3 \times 1}$: 絶対系から見たセンサ i でのモーメント ($i=1, 2$)

$\mathbf{f}_{ex} \in R^{3 \times 1}$: 絶対系から見た力点での力

$\mathbf{m}_{ex} \in R^{3 \times 1}$: 絶対系から見た力点でのモーメント

$\mathbf{H}_i \in R^{6 \times 6}$: サブフィルタリング行列 ($i=1, \dots, n$)

$\mathbf{E}_i \in R^{6 \times 6}$: センサ i の較正行列 ($i=1, 2$)

$\mathbf{M} \in R^{6 \times 6}$: TH 力覚センサの特性行列

$\mathbf{I}_m \in R^{m \times m}$: $m \times m$ の単位行列

$\mathbf{0}_{m \times n} \in R^{m \times n}$: $m \times n$ の零行列

簡単のため、センサ 1 の座標系の原点を絶対座標系に一致させる。この場合、センサ 1, 2 での力、モーメントは絶対系で以下のようになる。

$$\begin{cases} \mathbf{f}_1 = \mathbf{f}_{ex} \\ \mathbf{m}_1 = \mathbf{m}_{ex} + \mathbf{r} \times \mathbf{f}_{ex} \\ \mathbf{f}_2 = \mathbf{f}_{ex} \\ \mathbf{m}_2 = \mathbf{m}_{ex} + (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \times \mathbf{f}_{ex} \end{cases}$$

上式をまとめて書くと、

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{m}_1 \\ \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{m}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \hat{\mathbf{r}} & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \hat{\mathbf{r}} - \mathbf{r}_1 & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{ex} \\ \mathbf{m}_{ex} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{F}_{ex}$$

ただし、 $\hat{\mathbf{r}}$ はベクトルの各成分を次のように並び換えた行列である。

$$\hat{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix}$$

また、 $(\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{r}_1)$ も $\hat{\mathbf{r}}$ と同様のデータ構造を持つものとする。ここで、各センサ座標系での力、モーメントに変換すると、

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{B} \mathbf{F}$$

ただし、

$$\mathbf{F}_s = [\mathbf{f}_{s1}^t, \mathbf{M}_{s1}^t, \mathbf{f}_{s2}^t, \mathbf{M}_{s2}^t]^t$$

$$\mathbf{B} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{I}_6 & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \hline \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{R}^t \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{R}^t \end{array} \right]$$

$$\mathbf{R}^t = \begin{bmatrix} c\theta c\phi & c\theta s\phi & -s\theta \\ s\phi c\phi s\theta - c\phi s\phi & s\phi s\theta s\phi + c\phi c\phi & c\theta s\phi \\ s\phi s\phi + c\phi c\phi s\theta & c\phi s\theta s\phi - s\phi c\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix}$$

ただし、 $c\phi = \cos \phi$, $s\phi = \sin \phi$ である。 ϕ, θ, ψ は、それぞれロール、ピッチ、ヨー角を示し、回転順序は始めに z 軸回りに ϕ 回転、次に回転してできる新しい y 軸回りに θ 回転、そして更に回転してできる新しい x 軸回りに ψ 回転を表す。

ここで、センサ 1, 2 が仮想 6 軸力覚センサの場合を想定する。この場合、

$$\mathbf{e} = \mathbf{E} \mathbf{F}_s$$

と書ける。ただし、 $\mathbf{e} = (\mathbf{e}_1^t, \mathbf{e}_2^t)^t \in R^{12 \times 1}$ で $\mathbf{e}_1 \in R^{6 \times 1}$, $\mathbf{e}_2 \in R^{6 \times 1}$ はセンサ 1, 2 の出力を表す。また、 $\mathbf{E} \in R^{12 \times 12}$ はセンサの較正実験によって得られる行列であり、次のようなブロック行列となる。

$$\mathbf{E} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{E}_1 & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \hline \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{E}_2 \end{array} \right]$$

ただし、 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ はそれぞれセンサ 1, 2 の較正データを基にして得られる較正行列である。次に、センサ 1, 2 がそれぞれ 3 軸センサの場合を考える。 \mathbf{e} の中から実際にセンシング可能な成分をピックアップするフィルタリング行列 $\mathbf{H} \in R^{6 \times 12}$ を次のように定義する。

$$\mathbf{H} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{H}_i & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \hline \mathbf{0}_{3 \times 6} & \mathbf{H}_j \end{array} \right]$$

ここで $\mathbf{H}_i, \mathbf{H}_j$ はセンサ 1 と 2 で出力される力、モーメント信号をピックアップするサブフィルタリング行列である。例えば、Fig. 3 の Case 1 の場合には、

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

また、Case 6 の場合には、

$$\mathbf{H}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

となる。この \mathbf{H} を $\mathbf{e} = \mathbf{E} \mathbf{F}_s$ の両辺に左からかけると

$$\mathbf{He} = \mathbf{HEF}_s$$

$\mathbf{F}_s = \mathbf{BAF}_{ex}$ の関係があるから、

$$\mathbf{He} = \mathbf{HEBAF}_{ex}$$

$\tilde{\mathbf{e}} = \mathbf{He}$, $\mathbf{M} = \mathbf{HEBA}$ (特性行列) とおくと

$$\tilde{\mathbf{e}} = \mathbf{MF}_{ex}$$

したがって、 $\text{rank}(\mathbf{M})=6$ であれば、

$$\mathbf{F}_{ex} = \mathbf{M}^{-1} \tilde{\mathbf{e}}$$

より外力、外モーメント \mathbf{F}_{ex} を算出することが可能となる。ここで、特性行列 $\mathbf{M}=\mathbf{HEBA}$ であるから、 \mathbf{M} のランクは3軸力覚センサのタイプやセンサ同士の幾何学的関係に強く依存する。

4. 力・モーメント分解定理

本章では、特性行列 \mathbf{M} のランクについて考察する際に便利な力・モーメント分解定理を導入する。Fig. 4 のようにはりの先端に外力、外モーメントが作用している状態を想定しよう。ただし、はりの根元側には力センサとモーメントセンサ、あるいは同一のセンサが2個、距離 l_1-l_2 だけ離して設置されているものとする。例えば、Fig. 4(a)の場合、力センサとモーメントセンサが配置されている。この場合、それぞれの出力を f, m とすると静力学的釣合いより、

$$\begin{aligned} f &= f_{ex} \\ m &= m_{ex} + f_{ex}l_2 \end{aligned}$$

の関係が成り立つから、外力、外モーメントは次式により求めることができる。

$$\begin{bmatrix} f_{ex} \\ m_{ex} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -l_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ m \end{bmatrix}$$

Fig. 4(b)の場合も同様にして f, m から f_{ex}, m_{ex} を容易に算出することができる。また Fig. 4(c)のようにモーメントセンサを2組配置する場合でも

$$\begin{bmatrix} f_{ex} \\ m_{ex} \end{bmatrix} = \frac{1}{l_1-l_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -l_2 & l_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix}$$

の関係より、 m_1, m_2 から f_{ex}, m_{ex} を算出することができる。ところが、Fig. 4(d)のように力センサを2組配置する場合には、モーメント情報がセンサ出力に全く含まれないため、原理的に外モーメント m_{ex} が計測できない。以上を一般化すると、次の定理が成り立つ。

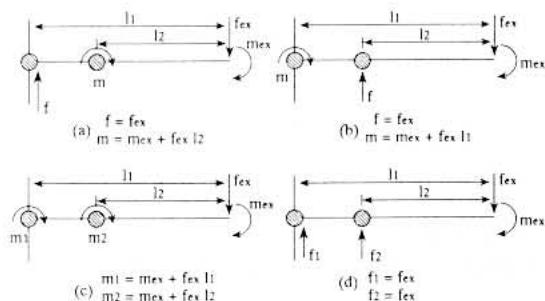


Fig. 4 Force-moment decomposition theorem

〈定理1〉 2つのモーメントセンサ1, 2の軸方向を示す単位ベクトルを $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$ 、センサ1の軸からセンサ2の軸までのベクトルを \mathbf{l}_0 とする。

性質1： $\mathbf{i}_1=\mathbf{i}_2$ かつ $\|\mathbf{l}_0\|\neq 0$ であれば、 $\mathbf{k}=\mathbf{i}_1\times\mathbf{l}_0$ 方向に作用する外力 f_{ex} と \mathbf{i}_1 (または \mathbf{i}_2) 軸に平行な軸回りの外モーメント m_{ex} はモーメントセンサ1, 2の出力 m_1, m_2 によって分解可能である。モーメントセンサ1, 2の一方が力センサに置き換わっても同様のことが言える。この場合、力センサの軸 \mathbf{i} は検出する力の方向を示す単位ベクトルを \mathbf{w} とするとき、 $\mathbf{i}=\mathbf{w}\times\mathbf{l}_0$ によって与えられる。

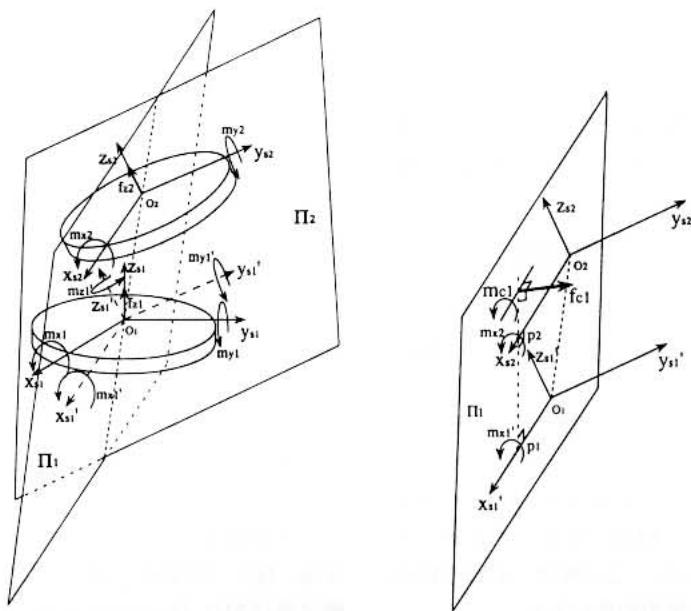
性質2：性質1のモーメントセンサを両方とも力センサに置き換えると、外モーメント m_{ex} は計測できない。

この定理は、5章で特性行列 \mathbf{M} のランクを考察する際、極めて便利な定理で、以下、力・モーメント分解定理(FMD Theorem)と呼ぶことにする。

5. 特性行列 \mathbf{M} のランクに関する考察

本章では特性行列 \mathbf{M} のランクについて考察する。一般に力覚センサでは、各軸間の干渉ができるだけ少なくなるよう設計されるが、実際には、多少の干渉が現れる。ここで、 \mathbf{M} のランクと軸間の干渉との関係に着目すると、軸間の干渉は、 \mathbf{M} の非対角成分を0以外の値で置き換えることを意味するから、結果として \mathbf{M} のランクを大きくする効果がある。ただし、本来なら \mathbf{M} がフルランクにならないのに、たまたま小さな干渉成分によって \mathbf{M} がフルランクになったとしても、 \mathbf{M} は元々特異性の強い行列であるため、このようなセンサは実用的にはうまく動作しない。別の言い方をすると、このようなセンサの \mathbf{M} は特異値分解したときの条件数が極端に大きくなり、結果として精度が著しく劣下するような方向が必ず存在することになる。このような現実的問題を踏まえて、本研究では、軸間の干渉が全くないと仮定して \mathbf{M} のランクを考察することにする。軸間の干渉がないという仮定は、6軸力覚センサとして動作するかどうかを吟味する上で、最も厳しい条件に対応し、この条件の元で \mathbf{M} のフルランクが確認されるということは、実際にTH力覚センサを構築した場合にたとえ干渉成分が入ったとしても、必ずうまく動作することを意味している。ここで、 \mathbf{M} のランクを考察する上で、便利なもう1つの定理を導入しておこう。

〈定理2〉 3軸力覚センサを2つ組み合わせた際、力を検出する軸の総数及びモーメントを検出する軸の総



(a) Geometrical relationship between three-axis sensor and Π_i
 (b) FMD Theorem for Π_i

Fig. 5 An example of Case 4

数をそれぞれ J_f, J_m とする。ただし $J_f + J_m = 6, 0 \leq J_f \leq 6, 0 \leq J_m \leq 6$ 。このとき、 \mathbf{M} のランクがフルランクにならないための十分条件は、

$$J_f \geq 4$$

(証明) $\mathbf{e} = \mathbf{MF}_{ex}$ であるから、

$$\dim(\mathcal{V}) = \dim(\mathcal{W})$$

ただし \mathcal{V}, \mathcal{W} は、それぞれベクトル $\mathbf{e}, \mathbf{MF}_{ex}$ が張るベクトル空間を表す。ここで \mathbf{F}_{ex} はあらかじめ与える外力と外モーメントにより生成される 6 次元ベクトルであるから、 \mathbf{F}_{ex} が張るベクトル空間 \mathcal{P} は $\dim(\mathcal{P}) = 6$ とおける。ここで、 \mathbf{M} のランクを $\text{rank}(\mathbf{M})$ で表すと、 $\dim(\mathcal{P}) = 6$ であるから、 $\dim(\mathcal{W}) = \text{rank}(\mathbf{M})$ となる。したがって、

$$\text{rank}(\mathbf{M}) = \dim(\mathcal{V})$$

ここで $\mathcal{U}_f, \mathcal{U}_m$ をそれぞれ TH 力覚センサによって検出される力ベクトル、及びモーメントベクトルが張るベクトル空間とする。センサ出力 \mathbf{e} が張るベクトル空間 \mathcal{V} の次元は、 \mathcal{U}_f と \mathcal{U}_m が張るベクトル空間の次元の和で表せるから、

$$\dim(\mathcal{V}) = \dim(\mathcal{U}_f) + \dim(\mathcal{U}_m)$$

よって、最終的に

$$\text{rank}(\mathbf{M}) = \dim(\mathcal{U}_f) + \dim(\mathcal{U}_m)$$

の関係式を得る。ただし、 $0 \leq \dim(\mathcal{U}_f) \leq 3, 0 \leq \dim(\mathcal{U}_m) \leq 3$ である。この式は、 \mathbf{M} のランクを調べ

ることと、3 軸力覚センサによって計測される力ベクトル、及びモーメントベクトルが張るベクトル空間の次元を調べることとが等価であることを意味している。

ここで、定理 1 を思い出してみよう。定理 1 はモーメントセンサ出力はモーメント情報と力情報の両方を含むが、力センサ出力は力情報しか含まないことを示唆している。さて $J_f \geq 4$ の場合、 $J_m = 6 - J_f \leq 2$ となる。この場合、 $J_f \geq 4$ とっても、 $\dim(\mathcal{U}_f)$ は高々 3 (空間内の力は独立な 3 变数で与えられる) にしかならないが、 $J_m \leq 2$ だから、 $\dim(\mathcal{U}_m) \leq 2$ となる。つまり、 $\text{rank}(\mathbf{M}) = \dim(\mathcal{U}_f) + \dim(\mathcal{U}_m) \leq 5$ となり、 \mathbf{M} はフルランクにはなり得ない。(証明終わり)

5.1 同一の 3 軸力覚センサを 2 つ組み合せる場合

以下、考えられ得る 6 通りについて、 \mathbf{M} のランクを考察する。

5.1.1 Case 1, Case 2, Case 3 :

$J_f \geq 4$ であるから定理 2 より、 $\text{rank}(\mathbf{M}) \leq 5$ にしかなり得ない。つまり、6 軸力覚センサは構成できない。

5.1.2 Case 4 :

市販されているコンパクトタイプの 3 軸力覚センサ(例えばエンプラス社 Rixen)はほとんどが、このタイプである。いま、センサ 2 にとった座標軸方向と一致

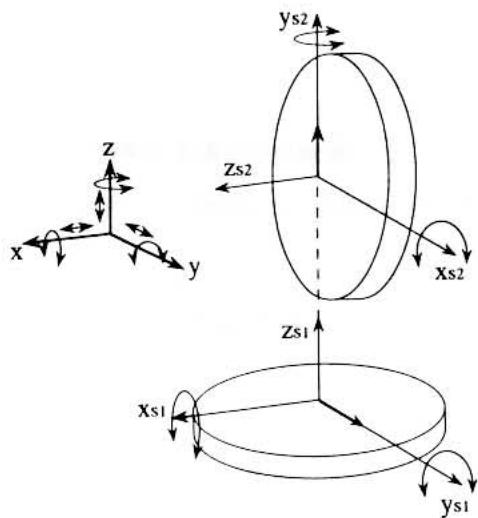


Fig. 6 An example of Case 5

させた座標系 x'_s, y'_s, z'_s 系をセンサ 1 上に考える。このときの線分 $o_1 o_2, x'_s$ 軸を含む平面を Π_1 平面と呼ぶことにする。同様に線分 $o_1 o_2, y'_s$ 軸を含む平面を Π_2 平面と呼ぶことにする (Fig. 5(a))。いま y_s 軸の方向が z_s 軸と一致しない限り、 m_{x1}, m_{y1} は y'_s 軸回りにモーメント成分 m'_{y1} を生成する。ただし、 $m'_{x1}, m'_{y1}, m'_{z1}$ は元々 m_{x1}, m_{y1} を分解したものであるから、それらは互いに独立ではない点に注意されたい。ここでは議論の展開上 m'_{x1}, m'_{y1} を独立変数として選び、 m'_{z1} は従属変数とみなすこととする。以上の点に留意した上で、 m'_{x1} と m_{x2} に対して力・モーメント分解定理の性質 1 を適用する。この場合、 m'_{x1}, m_{x2} より直線 $p_1 p_2$ の任意の点に作用する力 f_{c1} と x'_s (又は x_{s2}) に平行な軸回りのモーメント m_{c1} が分解可能になる。ただし、 f_{c1} の方向は Π_1 平面に垂直である (Fig. 5(b))。同様に Π_2 面の 2 つのモーメント m'_{y1} と m_{y2} に対して力・モーメント分解定理を適用することにより、 Π_2 平面に垂直な力成分 f_{c2} と y'_s (又は y_{s2}) に平行な軸回りのモーメント m_{c2} が測定可能になる。ここで特別な場合を除き f_{c2}, f_{c1}, f_{c2} は 3 次元ベクトル空間を張る。すなわち $\dim(\mathcal{U}_f) \leq 3$ となる。次にモーメントが張る空間 \mathcal{U}_m 着目した場合、 x_{s2}, y_{s2} 軸回りのモーメントはそれぞれ独立に測定可能である。一方 z_{s2} 軸回りのモーメントとしては唯一 m'_{z1} が対応するが、先の仮定により $m'_{z1} = m'_{z1}(m'_{x1}, m'_{y1})$ となり独立変数ではないため、最終的に $\dim(\mathcal{U}_m) \leq 2$ となる。よって $\text{rank}(\mathbf{M}) = \dim(\mathcal{U}_f) + \dim(\mathcal{U}_m) \leq 5$ となり、6 軸力覚センサとして動作し得ないことが分かる。

5.1.3 Case 5 :

例えば、 f_y, m_x, m_y のみが測定可能としよう。Fig. 6 の m_{y1} 、 m_{x2} に対して力・モーメント分解定理の性質 1 を適用すると、 z_{s2} 方向 (又は x_{s1} 方向) の力と x_{s2} 軸 (又は y_{s1} 軸) に平行な軸回りのモーメントが分解可能になる。Fig. 6 より、この場合すべての軸方向の力と軸回りのモーメントが測定可能となり、 $\text{rank}(\mathbf{M}) = 6$ となる組合せが存在することが分かる。一般的な組合せに対しては、 $5 \leq \text{rank}(\mathbf{M}) \leq 6$ となる。(証明略)

5.1.4 Case 6 :

ここでは、モーメントだけが測定できる 3 軸力覚センサを 2 つ組合せても 6 軸力覚センサは構築できないことを示す。この場合、3 軸回りのモーメントが検出できることは自明であるが、測定可能な力ベクトルが張る空間 \mathcal{U}_f は 3 次元ではなく 2 次元平面にしかならないことを示す。

Fig. 7(a) のような一般的な組合せを想定する。Case 4 の場合と同様にセンサ 2 にとった座標軸方向と一致させた新たな座標系 x'_s, y'_s, z'_s をセンサ 1 上に考える。この場合 x_s, y_s, z_s 系の各モーメントは等価的に x'_s, y'_s, z'_s 系に変換することができる。ここで、 m'_{x1} と m_{x2}, m'_{y1} と m_{y2}, m'_{z1} と m_{z2} に対して力・モーメント分解定理の性質 1 を適用すると、分解された各力が直交する平面は、例えば Fig. 7(b) のように必ず 2 つの座標系の原点を結んだ線分 $o_1 o_2$ を含む。したがって、各平面に垂直方向の力は、3 次元空間ではなく 2 次元平面を張ることになる。つまり $\text{rank}(\mathbf{M}) \leq 5$ であることが言える。また、 $\text{rank}(\mathbf{M}) = 4$ まで低下しないことも容易に証明できる。ゆえに、 $\text{rank}(\mathbf{M}) = 5$ である。以上より、実際に同一の 3 軸力覚センサを 2 つ組合せた場合 6 軸力覚センサとして動作するのは唯一 Case 5 の場合だけである。

5.2 異種の 3 軸力覚センサを 2 つ組み合わせる場合

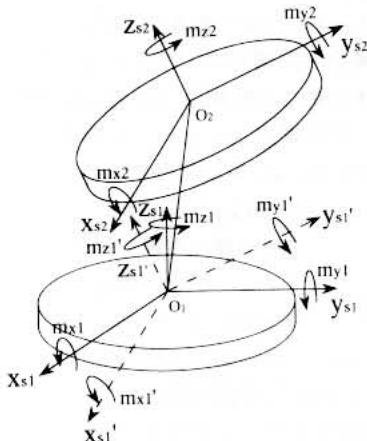
この場合、全部で 15 通りの組合せが考えられ得るが、定理 2 により、 $\text{rank}(\mathbf{M}) \leq 5$ にしかなり得ない組合せが 5 種類存在することが分かる。すなわち、Case 1 と Case 2, Case 1 と Case 3, Case 1 と Case 4, Case 1 と Case 5, Case 2 と Case 3 の各組合せである。残り 10 種類について、5.1 と同様の考察を行うと、最終的に Table 1 のような TH 6 軸力覚センサの実現可能性マップを得ることができる。ただし、○印は、 $\text{rank}(\mathbf{M}) = 6$ になる可能性を秘めた組合せで、×印は $\text{rank}(\mathbf{M}) \leq 5$ にしかなり得ない組合せである。

る。

Table 1 で興味深い点は同一種類の 3 軸力覚センサを 2 つ組合せるよりも、異種の 3 軸力覚センサを 2 つ組合せる方が、 $\text{rank}(\mathbf{M})=6$ になる可能性はずっと高くなっている点である。このことは、同一種類の 3 軸

Table 1 Combination table for TH force sensors

sensor ²	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
sensor ¹						
Case 1	×	×	×	×	×	○
Case 2	×	×	×	○	○	×
Case 3	×	×	×	○	○	○
Case 4	×	○	○	×	○	○
Case 5	×	○	○	○	○	○
Case 6	○	×	○	○	○	×



(a) Moments in Σ_{s1} , Σ_{s2} and Σ_{s1}' coordinate systems

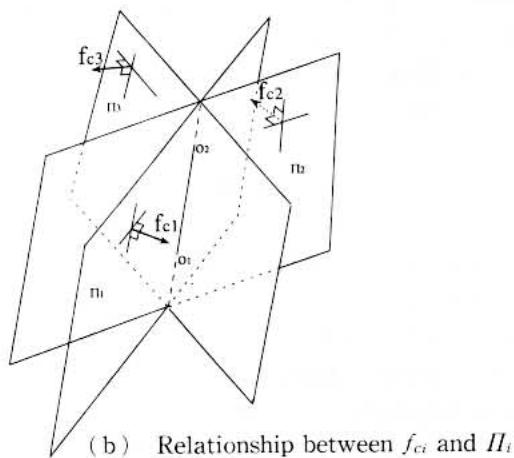


Fig. 7 An example of Case 6

力覚センサを 2 つ組合せても、ベクトル空間は広がりにくいことを意味しており、異種混合を推奨する生物の遺伝生理学とのアナロジーが興味深い。

6. 最適形状に関する考察

本章では、最適性の評価指標として内山らが提案した条件数を用い、代表的なケースについて、シミュレーション結果を示す。はじめに \mathbf{M} を

$$\mathbf{M} = \mathbf{U}_p \Sigma_p \mathbf{V}_p^T$$

のように特異値分解する。ただし、

$$\Sigma_p = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_6 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{U}_p, \mathbf{V}_p \in R^{6 \times 6}$ は直交行列である。

ここで、特異値 $\sigma_i (i=1, \dots, 6)$ の最大値を σ_1 とし、最小値を σ_6 とすると、条件数 C は $C = \sigma_1/\sigma_6$ で定義される^{22),23)}。Case 5 の条件の下で条件数 C を調べるために、シミュレーションを行った。シミュレーション結果を Fig. 8 に示す。横軸にはセンサの組合せパラメータ(例えば、センサ 1 に対するセンサ 2 のロール、ピッチ、ヨー角)をシリアル番号で置き換えたものをとり、縦軸に条件数 C をとっている。ただし、特異値 $\sigma_i (i=1, \dots, 6)$ のいずれかが 0 である場合は C を 0 と表示してある。別の言い方をすると、 $C=0$ と表示してあるのは、 $\text{rank}(\mathbf{M}) \leq 5$ にしかなり得ない組合せである。Fig. 8 より、特別な場合を除き $\text{rank}(\mathbf{M}) = 6$ になっていることが分かる。例えば横軸の number 329 に対応する角度 ($\phi=90^\circ, \theta=0^\circ, \psi=90^\circ$) のとき、 C は最小となり、条件数最小の意味において最適

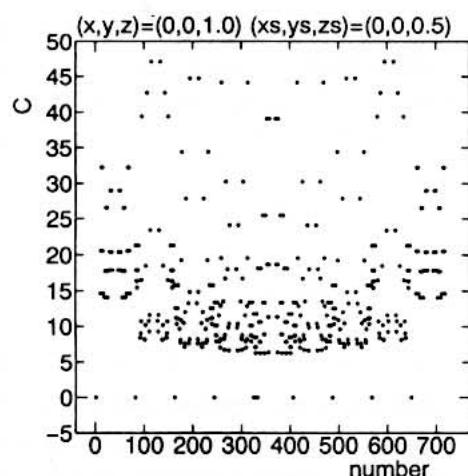


Fig. 8 Singular value decomposition of matrix \mathbf{M}

形状が存在することも分かる。このときの6軸力覚センサの形成はFig. 6の形状と一致する。なお、($\phi=270^\circ, \theta=0^\circ, \psi=90^\circ$)でも J は最小となる。この場合のセンサ形状は、Fig. 6の上側のセンサを y_{s2} 軸回りに 180° 回転した場合に相当する。

7. 実用的 TH 力覚センサの試作と評価実験

7.1 実用的 TH 力覚センサの試作

5.1において、実用化されているCase 4の3軸力覚センサを2つ組合せた場合、 \mathbf{M} のランクは $rank(\mathbf{M}) \leq 5$ にしかならないことを示した。このことは、Case 4の3軸力覚センサを単に2つ組合せただけでは、6つの出力がすべて独立になるのではなくて、必ず冗長な出力が存在することを示唆している。したがって、このようなセンサは単に組合せただけでは6軸力覚センサにならない。ところが、冗長な出力端子を外して代わりに独立な軸を新たに1軸分追加すれば、 $rank(\mathbf{M}) = 6$ となる可能性があり、6軸力覚センサとして動作させることができる。本章では、Case 4の3軸力覚センサを2つ組合せる際に必要となるコネクター部に着目し、ここにひずみゲージを貼って1軸分追加し、この出力を冗長な出力の代わりに利用することで6軸力覚センサを構築することを試みる。Fig. 9に構成例を示す。始めにコネクター部にひずみゲージがない場合を想定してみよう。 m_{x2}, m_{y1} に力・モーメント分解定理を適用すると、 f_{z2} は m_{x2} と m_{y1} を使えば分解可能である。ところが、 z_{s2} 軸には元々力センシング機能が備わっているため、 z_{s2} 軸

方向の力センシングに関して、センサ系は冗長な出力を出していることになる。ところが、本来出力は6つじゃないため、1箇所でも冗長になってしまい、別のところでセンシングできない軸が現れる。本構成の場合、 x_{s2} (または y_{s1})方向の力がセンシングできない構成になっている。次に、コネクター部にひずみゲージを貼った場合を想定してみよう。Fig. 9のように配置すると、 m_{x1} と新たに追加された7番目の軸回りのモーメント m_7 によって、 x_{s2} (または y_{s1})方向の力がセンシング可能になる(力・モーメント分解定理の性質1)。つまり、 m_{x2} か m_{y1} のうち一方の出力を捨てて(Fig. 9では m_{x2} を捨てている)、その代わりに新たに追加した7番目の軸回りのモーメント m_7 の出力を加えれば、理論上 $rank(\mathbf{M}) = 6$ となり、6軸力覚センサが構築できることになる。このアイデアのポイントは市販されている3軸力覚センサを利用している点、またコネクター部にひずみゲージを貼るだけのシンプルな構造を有している点である。Fig. 10に試作したセンサの概観を示す。ただし試作モデルでは、ひずみゲージはコネクター部ではなくて、センサ2からの出力軸側に取り付けられている。

なお、このように市販されている3軸力覚センサを2つ組合せて、それに1軸分追加して、 \mathbf{M} をフルランクにする構成方法としては、もう一通り存在する。例えば、Case 1とCase 4を単純に組み合わせたのでは、センサ系によって検出されるモーメントベクトル

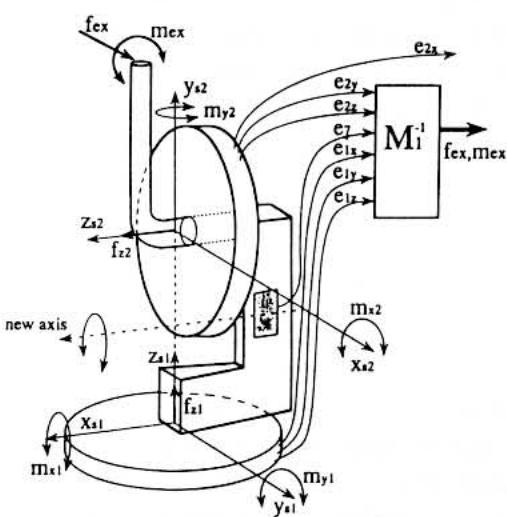


Fig. 9 TH force sensor with additional sensing axis

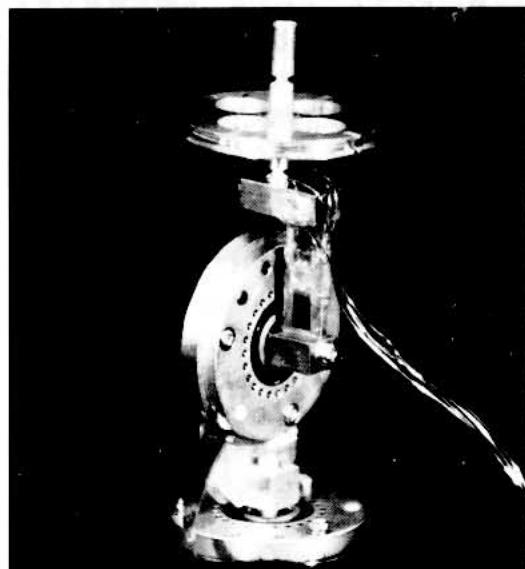
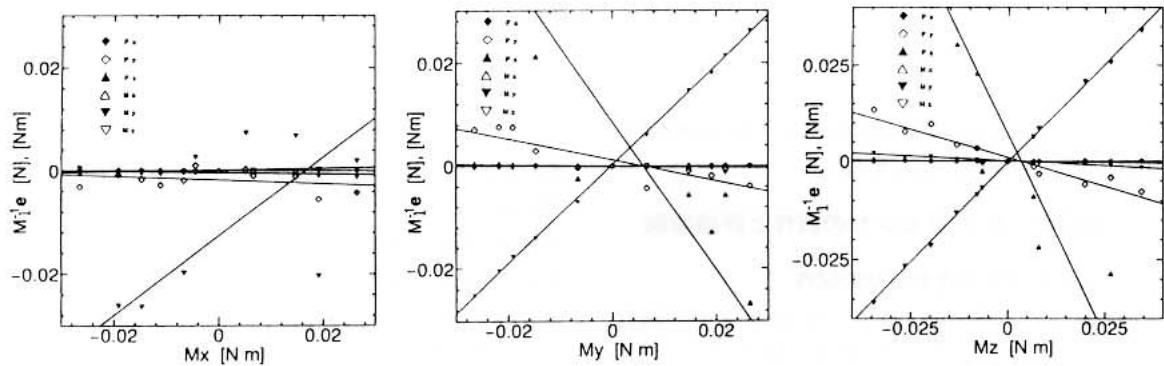
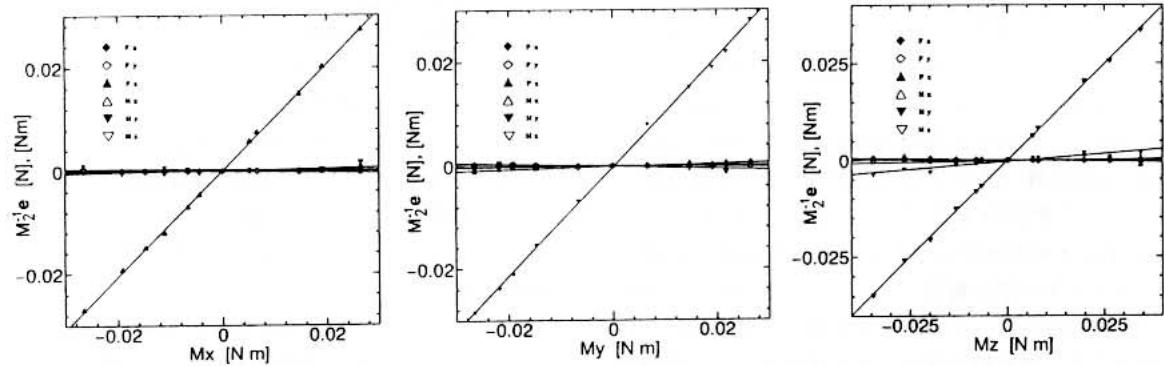


Fig. 10 An overview of the developed TH force sensor

Fig. 11 Experimental results using \mathbf{M}_1 Fig. 12 Experimental results using \mathbf{M}_2

の張る空間は2次元平面にしかならないが、コネクタ一部にモーメント検出用の1軸を追加してやれば、 $\text{rank}(\mathbf{M})=6$ にすることができ、6軸力覚センサとして動作させることができることを付記しておく。もちろん非現実的な3軸力覚センサ同志の組み合わせまで含めると、可能性は更に増えるが、本研究では、そこまでは理論的好奇心を広げないことにする。

7.2 実験

Fig. 11, Fig. 12に実験結果を示す。ただし、紙面の関係上 Fig. 11, Fig. 12 では各軸回りのモーメントについての較正試験のみが示されているが、力についても同様の傾向があることを付記しておく。Fig. 11 は Fig. 9 の $e_{1x}, e_{1y}, e_{1z}, e_{2x}, e_{2y}, e_{2z}$ の各出力を使って特性行列 \mathbf{M} を構成したものであり、Fig. 12 は e_{2x} の代わりに e_7 を使って特性行列 \mathbf{M} を構成したものである。ここでは両者の \mathbf{M} を区別するためにあえて前者を \mathbf{M}_1 、後者を \mathbf{M}_2 とする。理論的には、 $\text{rank}(\mathbf{M}_1)=5$ であり、 $\text{rank}(\mathbf{M}_2)=6$ であるが、実際には、わずかながら軸間の干渉が現れるため、実験的に得られるランクは $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ いずれも 6 となる。ただし、いずれ

にせよ \mathbf{M}_1 のランクは 5 に近いものであるため、 \mathbf{M}_1 を使って外力、外モーメントを分解しようとすると、場合によって極端に検出精度が悪くなることが予想される。Fig. 11 の結果からも明らかなように全体的にデータのばらつきが目立つ。一方、 \mathbf{M}_2 は干渉成分がなくても、 $\text{rank}(\mathbf{M}_2)=6$ になるから、この場合には \mathbf{M}_1 を用いる場合に比べ、検出精度ははるかに向上することが期待できる。Fig. 12 の実験結果からも分かるように、ばらつきの少ない良好な結果が得られている。Fig. 11, Fig. 12 からも分かるように 7番目の軸を追加した効果は極めて顕著に現れている。

8. あとがき

本論文では、6軸力覚センサの設計をこれまでの“削り出し”から“組合せ”的問題としてとらえ、構造が極端にシンプルで安価な3軸レベルの力覚センサを2つ組合せて6軸力覚センサ（本論文ではこのタイプの6軸力覚センサのことを特にTH力覚センサと呼んでいる）を構築する新たな設計法を展開した。その結果、3軸力覚センサの組合せ方は全部で21通りあ

るが、そのうち 6 軸力覚センサが構築できるのは、10 通りであることを証明した。次に代表的な組合せに対して、条件数が最少になる最適組合せ形状の導入方法について論じた。さらに、実際に実用化されている 3 軸力覚センサ (Case 4) を 2 つ組合せたセンサ系に更に 1 軸のセンシング軸を付加して特性行列をフルランクにする方法を示し、実験によりセンサの基本動作を確認した。

本研究を通じて得られた興味深い結果は、同一の 3 軸力覚センサを 2 つ使うよりも、異種の 3 軸力覚センサを 2 つ使う方が、特性行列はフルランクになりやすいという点である。現時点では、市販されている 3 軸力覚センサは 3 軸とも力が計れるタイプと、2 軸のモーメントと 1 軸の力が計れるタイプである。残念ながらこの 2 つの 3 軸力覚センサを組合せても力センシング軸の総和 J_f が 4 となり、定理 2 により、原理的に 6 軸力覚センサにはなり得ないが、将来的にもし別のタイプの 3 軸力覚センサが開発された暁には、異種の 3 軸力覚センサを 2 つ組合せた TH 力覚センサも製作可能になるものと思われる。

最後に、TH 力覚センサを試作していただいた(株)エンプラスの梶原靖氏、並びにセンサの較正実験に協力していただいた九工大情報工学部大学院 2 年生の Rosa Paulo 君に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J. K. Salisbury, "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. of 19th IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 83-88 (1980)
- 2) D. E. Whitney, "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions," ASME J. of Dynamic System, Measurement, Control, pp. 91-97 (1977)
- 3) L. E. Pfeffer et al., "Joint Torque Sensory Feedback in the Control of a PUMA Manipulator," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5-4, pp. 418-425 (1989)
- 4) W. S. Kim et al., "Force-Reflection and Shared Compliant Control in Operating Telemanipulators with Time Delay," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 8-2, pp. 176-185 (1992)
- 5) Y. F. Zheng and Y. Fan, "Robot Force Sensor Interaction with Environments," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7-1, pp. 156-164 (1991)
- 6) C. R. Flatau, "Force Sensing in Robots and Manipulators," Proc. of 2nd Ro'Man'Sy, pp. 294-306 (1976)
- 7) 小野他, "6 軸力覚センサ", 精密工学会誌, Vol. 52-4, pp. 619-622 (1986)
- 8) 広瀬、米田, "光学式 6 軸力センサの開発とその非線形校正", 日本ロボット学会誌, Vol. 8-5, pp. 19-28 (1990)
- 9) 矢吹、浅川, "ロボット用 6 軸力覚センサの開発", 第 4 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 133-134 (1986)
- 10) 村奈嘉他, "板ばねを使用した 6 軸力覚センサの開発", 日本ロボット学会誌, Vol. 10-2, pp. 208-215 (1992)
- 11) LORD Corporation, "Force/Torque Wrist Sensing Systems, Technical Note F/T Series," pp. 6-85 (1985)
- 12) BL. AUTOTEC, "6 軸力覚センサカタログ BL-FTS-005", (1992)
- 13) 小野他, "6 軸力センサ LSA 6000 の開発", 第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 19-20 (1985)
- 14) 内山他, "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. 5-1, pp. 4-10 (1987)
- 15) 中村他, "力覚センサの弹性要素の設計指針と信号処理", 計測自動制御学会論文集, Vol. 23-5, pp. 13-19 (1987)
- 16) J. K. Salisbury, "Interpretation of Contact Geometries from Force Measurements," Proc. of 1st International Symposium on Robotics Research, Bretton Woods, N. H. pp. 134-150 (1984)
- 17) D. L. Brock and S. Chiu, "Environment Perception of an Articulated Robot Hand Using Contact Sensors," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 89-96 (1987)
- 18) T. Tsujimura and T. Yabuta, "Object Detection by Tactile Sensing Method Employing Force / Torque Information," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5-4, pp. 444-450 (1989)
- 19) A. Bicchi, "Intrinsic Contact Sensing for Soft Fingers," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 968-973 (1990)
- 20) "エンプラスカタログ RIXEN EFS-202" (1991)
- 21) BL. AUTOTEC, "3 軸力覚センサカタログ BL-3 FS-001" (1992)
- 22) T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms," Robotic Research, Vol. 2, p. 439 (1985)
- 23) 内山、箱守, "力覚センサの構造設計に関する 2, 3 の考察", 第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 17 (1985)

金子 真 (Makoto KANEKO)

1954 年 1 月 18 日生。1981 年 3 月東京大学博士課程卒業、工学博士。同年 4 月、通産省工業技術院機械技術研究所入所。1990 年 4 月、九州工業大学情報工学部助教授。1993 年 10 月、広島大学工学部教授。現在に至る。IEEE, 計測自動制御学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



西原敏晴

(Toshiharu NISHIHARA)

1968 年 11 月 5 日生。1992 年九州工業大学情報工学部機械システム工学科卒業。同年、九州工业大学大学院情報工学研究科修士課程進学。現在、同課程 2 年、6 軸力覚センサの設計に関する研究やミニチュア超音波モータの制御に関する研究に従事。

