力覚センサの弾性要素の設計指針と信号処理

中 村 仁 彦*・吉 川 恒 夫*・二 股 一 郎*

Elastic Component Design Criteria and Signal Processing of Force Sensors

Yoshihiko NAKAMURA*, Tsuneo YOSHIKAWA* and Ichiro FUTAMATA*

This paper proposes to evaluate the elastic components of force sensors based on three criteria, that is, the strain gage sensitivity, the force sensitivity, and the minimum rigidity. The strain gage sensitivity is defined as the Euclidean norm of a row vector of the sensor compliance matrix. The force sensitivity is the minimum singular value of the sensor compliance matrix. The minimum rigidity means the inverse of the maximum singular value of the compliance matrix at the point to which forces and moments are applied. When the number of strain gages is larger than six, there is variety in inverting strain gage signals into the force information. By using this fact, it is also proposed to design the elastic component so that a Wheatstone Bridge should work as the decoupling circuit of the force information. A six axes force sensor is designed as an example to show the effectiveness of the proposed criteria and signal processing method.

Key Words: force sensor, force control, singular value decomposition, strain gage, robot

1. はじめに

ロボットの制御における力制御の重要性は早くから指摘されてきており¹⁾, 精密組立作業や機械加工などへの応用が近年注目されている^{2), 3)}.

力制御において, ロボットの手先に加わる力を計測する方法には, 各関節の駆動軸のひずみを計測して計算する方法⁴⁾やダイレクト・ドライブ・マニピュレータの関節駆動電流から計算する方法⁵⁾なども提案されているが, 摩擦力や慣性力を計算によって除去しなければならないなどの問題があり, 直接的で確実な方法

は手先や指先に近いところに力覚センサを装着することであると考えられる. 力計測の研究は力制御の研究と同様に比較的長い歴史をもち, 数多くの力覚センサが研究・開発されてきた^{6)~13)}. 現在では, 6軸力を計測するセンサがいくつか市販されている^{14), 15)}.

力覚センサの開発においては, ひずみゲージを貼付ける弾性要素の設計が中心であり, 発明的色彩が濃く, 設計の理論的な裏付けや開発されたセンサ間の比較評価は十分にはなされてこなかった. 内山と箱守¹⁶⁾は力覚センサのセンサ・コンプライアンス行列を特異値分解し, 条件数によってセンサの弾性要素の構造を評価することを提案している. この評価法は単に開発されたセンサの評価にとどまらず, 従来開発者の直観と経験の積重ねによって行われてきた力覚センサの設計に, はじめて理論的な指針を与えた. また Uchiyama¹⁷⁾らは力覚センサから着力点までの質量が生じる慣性力を拡張カルマン・フィルタを用いて, 力情報から除去する動的信号処理法も提案している.

本論文では, ひずみゲージ感度, 力覚感度, 剛性の三つの柱によって力覚センサの弾性要素の構造を評価することを提案する. ひずみゲージ感度とは設計仕様として与えられた計測範囲の力やモーメントに対する個々のひずみゲージの感度を表わし, 力覚感度とはひずみゲージ出力が全体として, すべての軸方向の力やモーメントの情報を十分に含むかどうかを評価するものである. 力覚センサは弾性要素を含むため, 一般に機械的剛性が低くなりがちである. 剛性の評価はこれを設計時に考慮するために必要な手段を与える.

つぎに, Wheatstone (WS) ブリッジを利用した逆変換を提案する. ひずみゲージ信号から手先に加わった力やモーメントを計算するには, センサ・コンプライアンス行列を計算やキャリブレーションにより求めておき, ひずみゲージ信号にその逆行列や擬逆行列を掛けて求める方法がよくとられる¹⁸⁾. この方法はセ

* 京都大学工学部 宇治市五ヶ庄

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Uji

(Received September 22, 1986)

(Revised December 23, 1986)

ンサ・コンプライアンス行列が複雑な場合には、計算に時間を要する点が欠点である。一方、ひずみゲージが多軸力の一軸成分だけに影響を受けるように弾性要素を設計することも提案されている¹⁴⁾。これによれば、センサ・コンプライアンス行列は対角行列となり、逆変換のための計算が不要になるが、弾性要素の構造がやや複雑になるように思われる。本論文では、ひずみゲージの温度補償などに用いられる WS ブリッジで逆変換回路が構成できるように弾性要素とひずみゲージ貼付位置を決定することを提案する。

最後に、以上の考え方に基いて設計した 6 軸力・力覚センサの例を示す。

2. 力覚の計測

2.1 基礎式

Fig. 1 のように、ロボットの手先に固定された座標系 (ハンド座標系) を $O_h\text{-}xyz$ 、力覚センサ固有の座標系 (センサ座標系) を $O_s\text{-}xyz$ とし、 O_s から O_h へ向うベクトルをセンサ座標系で表わしたものを r_o 、ハンド座標系の x, y, z 軸方向を向く単位ベクトルをセンサ座標系で表わし、第 1, 第 2, 第 3 列ベクトルとした直交行列を A_o とする。手先に加わる力とモーメントはハンド座標系の原点に加わる力 F_h とモーメント N_h としてハンド座標系で表わされる。 F_h と N_h は等価的に O_s に加わる力とモーメント F_s と N_s に変換できる。

$$F_s = A_o F_h \quad (1)$$

$$N_s = A_o N_h + r_o \times A_o F_h \quad (2)$$

いま、力覚センサの弾性要素に弾性変形を仮定するならば、ひずみゲージのひずみ $\varepsilon_i (i=1, \dots, m)$ と F_s, N_s との関係は次式ようになる¹⁵⁾。

$$\varepsilon = C f, \quad \varepsilon \triangleq \text{col}(\varepsilon_i) \in R^m \quad (3)$$

$$f \triangleq (F_s^T N_s^T)^T \in R^6$$

ここで、 m はひずみゲージの数であり、 $C \in R^{m \times 6}$ はセンサ・コンプライアンス行列と呼ばれる。

力覚の計測は、 ε の測定値と (1)~(3) 式から F_h, N_h を求める問題である。力覚センサの設計は、本来 (1)~(3) 式の関係 considering して行われるべきものであ

Fig. 1 Measurement of force and moment

るが、ロボットの作業によって座標系の方向 A_o や着力点の位置 r_o が変化するため、作業を特定しなければ設計できないことになる。以下では、力覚の計測を ε の測定値と (3) 式から F_s, N_s を求める問題に単純化することによって力覚センサの設計を論じる。

議論に一般性をもたせるために、設計仕様として与えられる力とモーメントの最大値 $F_{\max}, N_{\max}$ と弾性材料の比例限度 $\varepsilon_{\max}$ で (3) 式を正規化した次式を基礎式とする。

$$\bar{\varepsilon} = \bar{C} \bar{f} \quad (4)$$

$$\bar{\varepsilon} \triangleq \varepsilon / \varepsilon_{\max}$$

$$\bar{f} \triangleq (F_s^T / F_{\max} N_s^T / N_{\max})^T$$

$$\bar{C} \triangleq \frac{1}{\varepsilon_{\max}} C H$$

$$H \triangleq \text{diag}(F_{\max}, F_{\max}, F_{\max}, N_{\max}, N_{\max}, N_{\max})$$

たとえば、弾性材料として鋼を用いる場合、比例限度は 0.12% であるが、弾性要素のひずみゲージを貼る部分以外での応力状態や安全率を見込んで $\varepsilon_{\max}$ を決定すべきであろう。

2.2 条件数による構造評価¹⁶⁾とその問題点

任意の $\bar{\varepsilon}$ に対して、 $\bar{f}$ が求められるためには $m \geq 6$ で、 $\text{rank } \bar{C} = 6$ であることが必要である¹⁶⁾。このとき $\bar{C}$ の特異値分解はつぎのように表わされる¹⁸⁾。

$$\bar{C} = U \Sigma V^T \quad (5)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & & & \\ & \sigma_2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ 0 & & & \sigma_6 & & \\ \vdots & & & & \ddots & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \in R^{m \times 6} \quad (5)$$

ここで、 $U \in R^{m \times m}$ 、 $V \in R^{6 \times 6}$ は直交行列であり、 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_6 > 0$ である。内山と箱守¹⁶⁾は $m=6$ のとき

$$\bar{f} = \bar{C}^{-1} \bar{\varepsilon} \quad (6)$$

に基づいて計測値 $\bar{\varepsilon}$ から $\bar{f}$ を計算する場合に、 $\bar{\varepsilon}$ が計測誤差 $\Delta \bar{\varepsilon}$ によって $\bar{\varepsilon} + \Delta \bar{\varepsilon}$ と計測され、 $\bar{f}$ が $\bar{f} + \Delta \bar{f}$ と計算されるならば $\Delta \bar{\varepsilon}$ と $\Delta \bar{f}$ は

$$(\text{cond } \bar{C})^{-1} \leq \frac{\|\Delta \bar{f}\| / \|\bar{f}\|}{\|\Delta \bar{\varepsilon}\| / \|\bar{\varepsilon}\|} \leq \text{cond } \bar{C} \quad (7)$$

の関係を満たすことを示した。ここで $\|\cdot\|$ はユークリッド・ノルムを表わし、 $\text{cond } \bar{C} \triangleq \sigma_1 / \sigma_6$ は条件数と呼ばれる。上式は $\bar{\varepsilon}$ の相対誤差から $\bar{f}$ の相対誤差への拡大率が最大 $\text{cond } \bar{C}$ 倍であり、最小 $\text{cond } \bar{C}$ の逆数倍であることを示している。このことから内山と箱守は条件数を力覚センサの構造を評価する指標とし、これが 1 に近いほど望ましいとした。この評価法は従来、開発者の直観と経験に頼ってきた力覚センサの設計に、はじめて理論的な指針を与えたといえよう。

しかしながら、条件数による構造評価には、つぎの

ような問題点がある。

i) 二つの力覚センサのセンサ・コンプライアンス行列を $\bar{\mathbf{C}}^1, \bar{\mathbf{C}}^2$ とする。たとえば、 $\bar{\mathbf{C}}^1 = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{C}}^2$ となると両方の力覚センサの条件数は等しい。いわゆるセンサの感度という考え方からすれば、 $\bar{\mathbf{C}}^2$ のほうが良いように思われるが、これを評価することができない。

ii) $\bar{\mathbf{C}}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ とし、このセンサの ε_1 を与えるひずみゲージの位置に同じものをもう1枚貼る。このときのセンサ・コンプライアンス行列 $\bar{\mathbf{C}}^2$ は $\bar{\mathbf{C}}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ となる。cond $\bar{\mathbf{C}}^1 = 1$ に対して cond $\bar{\mathbf{C}}^2 = \sqrt{2}$ となり、 $\bar{\mathbf{C}}^1$ のほうが良いと評価される。 $\bar{\mathbf{C}}^2$ は $\bar{\mathbf{C}}^1$ に較べて無駄があるかもしれないが、センサとしての計測機能が劣るようには思えない。

iii) $m > 6$ のとき(6)式は

$$\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{C}}^* \bar{\varepsilon} \quad (8)$$

と書き換えることができる。ここで $\bar{\mathbf{C}}^* \in R^{6 \times m}$ は $\bar{\mathbf{C}}$ の擬似逆行列¹⁷⁾である。このとき

$$\begin{aligned} \|\bar{\mathbf{f}}\|^2 &= \bar{\varepsilon}^T (\bar{\mathbf{C}}^*)^T \bar{\mathbf{C}}^* \bar{\varepsilon} \\ &= \bar{\varepsilon}^T \mathbf{U} (\mathbf{Y}^*)^T \mathbf{Y}^* \mathbf{U}^T \bar{\varepsilon} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_6} & \cdots \end{bmatrix} \in R^{6 \times m}$$

となり、つぎの不等式が導かれる。

$$0 \leq \|\bar{\mathbf{f}}\| / \|\bar{\varepsilon}\| \leq 1 / \sigma_6 \quad (10)$$

同様の関係は $\Delta \bar{\mathbf{f}}$ と $\Delta \bar{\varepsilon}$ の間にも成立し

$$0 \leq \|\Delta \bar{\mathbf{f}}\| / \|\Delta \bar{\varepsilon}\| \leq 1 / \sigma_6 \quad (11)$$

となる。(10), (11)式より相対誤差の関係式は

$$0 \leq \frac{\|\Delta \bar{\mathbf{f}}\| / \|\bar{\mathbf{f}}\|}{\|\Delta \bar{\varepsilon}\| / \|\bar{\varepsilon}\|} \leq \infty \quad (12)$$

となり、相対誤差と条件数の関係は明確でない。

iv) $m > 6$ で rank $\bar{\mathbf{C}} = \text{rank} [\bar{\mathbf{C}}, \bar{\varepsilon}]$ のとき、(4)式の逆変換法は(8)式だけでなく、一般に

$$\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{C}}^- \bar{\varepsilon} \quad (13)$$

で与えられる。ここで、 $\bar{\mathbf{C}}^- \in R^{6 \times m}$ は $\bar{\mathbf{C}}$ の一般化逆行列であり、rank $\bar{\mathbf{C}} = 6$ のときには rank $\bar{\mathbf{C}}^- = 6$ となり、 $\bar{\mathbf{C}}$ の反射的一般化逆行列となる¹⁹⁾。 $\bar{\mathbf{C}}^-$ は $\bar{\mathbf{C}}^*$ のように一意でなく

$$\bar{\mathbf{C}}^- = \bar{\mathbf{C}}^* + (\mathbf{Z} - \bar{\mathbf{C}}^* \bar{\mathbf{C}} \bar{\mathbf{C}}^*) \quad (14)$$

のように表わされる¹⁹⁾。ここで $\mathbf{Z} \in R^{6 \times m}$ は任意行列である。このように逆変換法に多様性がある

が、条件数とこれらの関係が明らかでない。

次章では、条件数による評価法の以上のような問題点を考慮して、ひずみゲージ感度、力覚感度、剛性の3つの柱に基づく評価法を提案する。

3. 弾性要素の評価法

3.1 ひずみゲージ感度

設計仕様として与えられる計測範囲は $\bar{\mathbf{f}}$ のつぎの式で表わされるものとする。

$$\|\bar{\mathbf{f}}\| \leq 1 \quad (15)$$

このとき、 ε_i はつぎの不等式を満足する。

$$|\varepsilon_i| \leq \|\bar{\mathbf{C}}_i\| \quad (16)$$

ただし $\|\bar{\mathbf{C}}_i\|$ は $\bar{\mathbf{C}}$ の第 i 行ベクトルである。したがって ε_i が $\varepsilon_{\max}$ を越えないためには

$$\|\bar{\mathbf{C}}_i\| \leq 1 \quad (17)$$

でなければならない。 $\|\bar{\mathbf{C}}_i\|$ は許容されるべき範囲の力 $\bar{\mathbf{f}}$ に対する第 i ひずみゲージの感度を表わすと考えられるから、 $\|\bar{\mathbf{C}}_i\|$ をひずみゲージ感度と呼ぶことにする。ひずみゲージの出力信号が大きくなるように弾性要素を設計することがセンサの S/N 比の向上などのために望ましいため、(17)式を満たす範囲でひずみゲージ感度を1に近づけることが一つの設計指針となる。

3.2 力覚感度

(4), (5)式より $\bar{\mathbf{C}}$ の最小特異値 σ_6 は(15)式を満たす $\bar{\mathbf{f}}$ が加わる時、ひずみベクトル $\bar{\varepsilon}$ のノルムが最も小さくなる方向の、 $\bar{\mathbf{f}}$ に対する $\bar{\varepsilon}$ の感度を意味すると考えられる。したがって、 $\bar{\mathbf{C}}$ の最小特異値 σ_6 を力覚感度と呼ぶことにする。力覚センサがすべての方向の $\bar{\mathbf{f}}$ に対して十分大きな出力信号を発生することが S/N 比の向上などの観点から望ましいから、力覚感度を大きくすることが一つの設計指針となる。

力覚感度とひずみゲージ感度の関係を調べよう。

(5)式よりつぎの式が導かれる。

$$\begin{aligned} \text{trace } \bar{\mathbf{C}} \bar{\mathbf{C}}^T &= \text{trace } \mathbf{U} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^T \mathbf{U}^T \\ &= \text{trace } \mathbf{Y} \mathbf{Y}^T \mathbf{U}^T \mathbf{U} \\ &= \sum_{i=1}^6 \sigma_i^2 \end{aligned} \quad (18)$$

一方、

$$\text{trace } \bar{\mathbf{C}} \bar{\mathbf{C}}^T = \sum_{i=1}^m \|\bar{\mathbf{C}}_i\|^2 \quad (19)$$

である。(18), (19)式よりひずみゲージ感度と特異値はつぎの関係を満足する。

$$\sum_{i=1}^6 \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^m \|\bar{\mathbf{C}}_i\|^2 \quad (20)$$

したがって、ひずみゲージ感度が一定のとき、力覚

感度が最大になるのは $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_6$ のときであり、その最大値は

$$\sigma_{6\max} = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^m \|\bar{\mathbf{C}}_i\|^2} \quad (21)$$

となる。また、このときひずみゲージ感度が $\|\bar{\mathbf{C}}_i\| = 1$ ($i=1, \dots, m$) と最大になっているならば

$$\sigma_{6\max} = \sqrt{\frac{m}{6}} \quad (22)$$

となる。これは力覚感度の理論的な最大値を表わしている。

つぎに、力覚感度と計測誤差の伝播について考察する。(13)式の一般化逆行列による逆変換を仮定しよう。いま計測誤差によって $\bar{\mathbf{e}}$ が $\bar{\mathbf{e}} + \Delta\bar{\mathbf{e}}$ と計測されたとする。このとき、力覚情報は真値 $\bar{\mathbf{f}}$ と誤差 $\Delta\bar{\mathbf{f}}$ の和として

$$\bar{\mathbf{f}} + \Delta\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{C}}^-(\bar{\mathbf{e}} + \Delta\bar{\mathbf{e}}) \quad (23)$$

と求められる。(23)式から(13)式を辺々引算して

$$\Delta\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{C}}^- \Delta\bar{\mathbf{e}} \quad (24)$$

を得る。いま、 $\mathbf{Z} = \mathbf{V}[\mathbf{Z}_1 \mathbf{Z}_2] \mathbf{U}^T$, $\mathbf{Z}_1 \in R^{6 \times 6}$, $\mathbf{Z}_2 \in R^{6 \times (m-6)}$ とおき、(24)式と(5)式を(14)式に代入すれば

$$\bar{\mathbf{C}}^- = \mathbf{V} \Sigma^- \mathbf{U}^T \quad (25)$$

$$\Sigma^- \triangleq \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1} & 0 & \vdots \\ \sigma_1 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \frac{1}{\sigma_6} \end{bmatrix} \mathbf{Z}_2 \in R^{6 \times m}$$

となる。計測誤差の拡大率 α を

$$\alpha = \max \|\Delta\bar{\mathbf{f}}\| / \|\Delta\bar{\mathbf{e}}\| \quad (26)$$

と定義すると、 α は $\mathbf{Z}_2$ によって変化するが $1/\sigma_6$ を下回ることはなく、 $\mathbf{Z}_2 = 0$ のとき $\bar{\mathbf{C}}^- = \bar{\mathbf{C}}^*$ となり $\alpha = 1/\sigma_6$ となるが、(13), (14), (25)式よりわかる。つまり、擬逆行列によって逆変換する場合の測定誤差拡大率が、一般化逆行列によって逆変換する場合の測定誤差拡大率の下限となり、その値は力覚感度の逆数となる。

3.3 剛 性

力覚センサは弾性要素に生じるひずみを計測することによって力やモーメントを計算するのが計測原理であり、剛性を下げることが力覚感度を高めることにつながるため、一般に機械的剛性が低くなりがちである。したがって、力覚感度を大きくとりながらも、機械的剛性を高く保つという相反する要求に応えることが、弾性要素設計の重要な点である。本節では、力覚センサの機械的剛性を設計の段階で評価できるようにするために、力覚センサの機械的剛性の計算法を提案す

Fig. 2 Computation of elastic strain energy

る。

Fig. 2 のように、力覚センサの弾性要素とそのひずみは、弾性要素の中心を通る曲線（弾性要素の軸）とその上の各点においてこれに直交する軸（弾性変形の軸）のまわりのモーメントによる曲げひずみで表わされると仮定する。弾性要素の軸に沿って座標 x をとり、着力点から x へ向うベクトルを $\mathbf{r}_x$ とする。このとき x における曲げモーメント M_x は、弾性変形の軸方向を向く単位ベクトルを $\mathbf{e}_x \in R^3$ とすると、

$$M_x = \mathbf{e}_x^T (\mathbf{N}_i - \mathbf{r}_x \times \mathbf{F}_i) \quad (27)$$

となる。これを用いれば弾性要素全体が曲げ応力によって生じるひずみエネルギー U は次式で計算される²⁰⁾。

$$U = \int_x \frac{M_x^2}{2EI_x} dx \quad (28)$$

ここで、 E は弾性材料の縦弾性係数であり、 I_x は x において弾性要素の軸に直交する平面による断面 2 次モーメントである。(27)式を(28)式に代入すると

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{f}^T \mathbf{G} \mathbf{f} \quad (29)$$

$$\mathbf{G} \triangleq \int_x \frac{1}{EI_x} \mathbf{h}_x \mathbf{h}_x^T dx$$

$$\mathbf{h}_x \triangleq \begin{bmatrix} -\mathbf{R}_x^T \mathbf{e}_x \\ \mathbf{e}_x \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_x \triangleq \begin{bmatrix} 0 & -r_{x3} & r_{x2} \\ r_{x3} & 0 & -r_{x1} \\ -r_{x2} & r_{x1} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_x \triangleq (r_{x1} \ r_{x2} \ r_{x3})^T$$

となる。 $\mathbf{f} = (\mathbf{F}_i^T \ \mathbf{N}_i^T)^T$ による着力点における変位 $\mathbf{u}$ はカステリアーノの第 2 定理²⁰⁾により

$$\mathbf{u} = \left(\frac{\partial U}{\partial \mathbf{f}} \right)^T = \mathbf{G} \mathbf{f} \quad (30)$$

で計算できる。(30)式を正規化して表わすと

$$\bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{f}} \quad (31)$$

$$\bar{\mathbf{u}} \triangleq \frac{1}{N_{\max}} \mathbf{H} \mathbf{u}$$

$$\bar{G} \triangleq \frac{1}{N_{\max}} H^T G H$$

となり、 $\bar{G}$ は着力点における無次元化コンプライアンス行列となる。したがって $\bar{G}$ の特異値を $\sigma_{G_1} \geq \sigma_{G_2} \geq \dots \geq \sigma_{G_6} > 0$ とすれば、 $1/\sigma_{G_6}$ が最大剛性、 $1/\sigma_1$ が最小剛性を表わす。最小剛性を大きくすること、すなわち σ_{G_1} を小さくすることが一つの設計指針となる。

4. WS ブリッジを利用した逆変換

弾性要素に貼るひずみゲージの必要最小限の数は $m=6$ である。しかし、マルタ十字をなす4本の角柱の各面に合計16枚のひずみゲージを貼った Sheinman の例¹⁴⁾のように、ひずみゲージの数を $m>6$ とすることが多い。これは、2枚のひずみゲージを対にして WS ブリッジの二つのアクティブアームとして用いることによって、温度補償効果やひずみゲージの貼付誤差の影響を小さくする効果があることや、逆変換を単純化できるなどの理由による。

構造的に逆変換を単純化した例としては、センサ・コンプライアンス行列が対角行列になるように弾性ノ

要素を設計した小野ら^{13),14)}の研究がある。本章では、 $m>6$ の場合に、(13), (14)式のように一般化逆行列を用いることによって逆変換に多様性が許されることから、WS ブリッジが一般化逆行列による逆変換の一部を行う演算回路となるように、弾性要素を設計することを提案する。

Fig. 3 に WS ブリッジの回路図を示す。WS ブリッジで $V=0$ となるための平衡条件は

$$r_2/r_1 = r_3/r_4 \quad (32)$$

である。このとき、 $r_1=r_2=r_3=r_4$ とし各ひずみゲージが r_i から $r_i + \Delta r_i$ へ抵抗値が変化すると

$$V \propto \Delta r_1 - \Delta r_2 + \Delta r_3 - \Delta r_4 \quad (33)$$

の出力を得る²¹⁾。いま $r_1 \sim r_4$ のすべてにひずみゲージを取り付けアクティブアームとし、ひずみと抵抗変化は比例すると仮定すると次式を得る。

$$V = k(\varepsilon_{r_1} - \varepsilon_{r_2} + \varepsilon_{r_3} - \varepsilon_{r_4}) \quad (34)$$

ここで k は比例定数であり ε_{r_i} は Δr_i に対応するひずみである。したがって $m=24$ とし、六つの WS ブリッジを用いるときの、WS ブリッジの伝達関数は次式のようにになる。

$$B = k \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \in R^{6 \times 24} \quad (35)$$

WS ブリッジと六つのゲイン調節アンプ W_i ($i=1, \dots, 6$) を用いて、Fig. 4 のような回路を構成する。

ゲイン行列 $W = \text{diag}(W_i) \in R^{6 \times 6}$ を調節して

$$WB = \frac{1}{\varepsilon_{\max}} \bar{C} \quad (36)$$

を満たすことができるように、 $\bar{C}$ を設計できれば Fig. 4 の回路の出力 $\bar{f}^*$ は $\bar{f}$ に等しくなる。

(36)式の関係を満たす弾性要素の一般的な構造を与えることは困難である。しかし、対称構造の弾性要素にひずみゲージの貼付位置を調節することにより、 $\bar{C}$ が(36)式を満たすようにすることは比較的容易である。次章でこのような弾性要素の設計例を示す。また、弾性要素を対称構造にすることは解析を容易にし、ひずみゲージ感度、力覚感度、剛性などを解析的に評価するのに役立つことを指摘しておきたい。

このような逆変換法の欠点は、理論的に $\bar{C}$ が (34) 式を満たすように設計できたとしても、機械加工誤差ひずみゲージの貼付誤差、理論上無視した変形などの影響のために、実際に $\bar{C}$ が(36)式を厳密に満たす

ようにすることはむずかしく、ある程度の計測誤差を覚悟しなければならない点である。しかしながら、逆変換をアナログ回路で実時間で行えるため、高いサンプリング周波数で力制御を行わなければならない

Fig. 3 Wheatstone bridge

Fig. 4 Inverse circuit

- 1) ひずみゲージ感度： $\|\bar{\mathbf{C}}_i\|$ をひずみゲージ感度と呼ぶ。(17)式は弾性要素が塑性変形をしないための拘束条件を与える。(17)式を満たす範囲でひずみゲージ感度を1に近づけることが望ましい。
- 2) 力覚感度： $\bar{\mathbf{C}}$ の最小特異値を力覚感度と呼ぶ。力覚感度を高めることは S/N 比の向上に役立つ。また、擬似逆行列によって逆変換する場合の測定誤差拡大率が力覚感度の逆数となり、一般化行列によって逆変換する場合の測定誤差拡大率の下限を与えるため、力覚感度を高めることは測定誤差拡大率の低減にも役立つ。ひずみゲージ感度が $\|\bar{\mathbf{C}}_i\|=1$ ($i=1, \dots, m$) と最適化されているとき、力覚感度の最大値は $\sqrt{\frac{m}{6}}$ となる。これは力覚感度の理論的最大値を表わす。
- 3) 最小剛性：全ひずみエネルギーをカベクトルで偏微分することによって着力点のコンプライアンス行列を求め、この最大特異値の逆数を最小剛性と呼んだ。最小剛性を大きくすることが弾性要素の一つの設計指針である。

力覚センサの弾性要素の設計は自由度が多く、上記の評価法によっても弾性要素の構造を完全に特定することはできない。また、実装形状からくる制約や、機械加工精度・ひずみゲージ貼付位置精度を高くできるような形状の選択など考慮すべき制約も多い。しかしながら、上記の評価法は、設計者に一つの明確な方向性を与えるものであり、弾性要素の設計に役立つと考えられる。

力覚センサのひずみゲージの数が $m > 6$ の場合には逆変換法に多様性があることを示し、逆変換法の一つとして Wheatstone ブリッジを力覚情報の非干渉化回路とするように弾性要素を設計することを提案した。この方法によれば、ゲイン調節アンプ6個を付加するだけで、逆変換がアナログ回路で実時間で行えるため、高いサンプリング周波数で力制御を行わなければならない場合などに特に有効である。

また、力覚センサの弾性要素の設計例とこれに対する Wheatstone ブリッジを用いた逆変換回路の構成例によって、本論文で提案した弾性要素評価法と信号処理法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) H. Inoue: Computer Controlled Bilateral Manipulator, Bull. of Japan Society of Mechanical Engineers, 14-69, 199/207 (1971)
- 2) T. Goto, T. Inoyama and K. Takeyasu: Precise Insert Operation by Tactile-Controlled Robot, Robot Sensors, 2, ed. A. Pugh, IFS Ltd., 45/52 (1986)
- 3) 畑村洋太郎：力・トルクセンサ, 日本機械学会誌, 89-814, 1055/1058 (1986)
- 4) E. Nakano, S. Ozaki, T. Ishida and I. Kato: Cooperative Control of the Anthropomorphic Manipulator "MELARM", Proc. 4th International Symposium on Industrial Robots, 251/260, Tokyo (1974)
- 5) 荒井, 館: 直接駆動マニピュレータの人力操作における操作力検出と能動的力補助, 日本ロボット学会誌, 4-3, 209/219 (1986)
- 6) 木下源一郎: 触覚センサの開発現状, 日本ロボット学会誌, 2-5, 430/437 (1984)
- 7) C. R. Flatau: Force Sensing in Robots and Manipulators, Proc. 2nd International CISM-IFTOMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators, 294/306, Warsaw (1976)
- 8) P. C. Watson and S. H. Drake: Pedestal and Wrist Force Sensors for Automatic Assembly, Proc. 5th ISIR, 501/511 (1975)
- 9) M. Kasai, et al.: Trainable Assembly System with an Active Sensory Table Possessing 6 Axes, Proc. 11th ISIR, 393/404 (1981)
- 10) 浅川和雄: センサフィードバックによる高精度作業の実現, 精密機械, 51-11, 2034/2039 (1985)
- 11) T. L. De Fazio, D. S. Seltzer and D. E. Whitney, The IRCC Instrumented Remote Center Compliance, Robot Sensors 2, ed. A. Pugh, IFS Ltd., 33/44 (1986)
- 12) 内山 勝: ロボットのセンサ, ロボット基礎講習会テキスト, 計測自動制御学会, 89/113 (1986)
- 13) 小野, 畑村, 緒方, 高田, 草木: 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, 19/20 (1985)
- 14) 小野耕三: 高機能ロボット・マニピュレータ用6軸力センサ, オートメーション, 30-2, 48/52 (1985)
- 15) LORD Corporation: Force/Torque Wrist Sensing Systems, Technical Note F/T Series-6/85 (1985)
- 16) 内山, 箱守: 力覚センサの構造設計に関する二, 三の考察, 第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 17/18 (1985)
- 17) M. Uchiyama, M. Yokota and K. Hakomori: Kalman Filtering the 6-axis Robot Wrist Force Sensor Signal, Proc. '85 International Conference on Advanced Robotics, 153/160, Tokyo (1985)
- 18) 伊理, 児玉, 須田: 特異値分解とそのシステム制御への応用, 計測と制御, 21-8, 763/772 (1982)
- 19) 児玉, 須田: システム制御のためのマトリクス理論 (第2版), 計測自動制御学会 (1981)
- 20) 井上達雄: 弾性力学の基礎, 日刊工業新聞社 (1979)
- 21) 塩田, 谷口: センサ, 産業図書 (1983)