多軸力センサとその応用*

Multi-Axis Force Sensors and their Applications

畑村 洋太郎**

Yotaro HATAMURA

Key words: force sensor, parallel plate structure, radial plate structure, 6-axis force sensor, torque-thrust sensor, force control system, intelligent manufacturing

1. 多軸力センサ

x, y, z の 3 軸方向の力や 3 軸回りのモーメントをそれぞれの成分に分離して検出する多軸力センサは、従来から力学現象の解明に用いられてきた。一方近年になって、ロボット、加工機械、建設機械などの力制御、作業状況の把握、遠隔操作などでも多軸力センサの必要性が高まってきた。これは、例えば、力による加工においては図 1 に示す通り、工具と被加工物（ワーク）との間に作用している力は方向についても位置についても本質的に 3 次元的であり、そこで作用している力の位置や大きさを知ろうとするには、工具側から検出するにせよ、ワーク側から検出するにせよ、本来、3 軸方向の力の各成分と 3 軸回りのモーメントの各成分、合計 6 成分を検出しなければ、事実を把握することができないからである。別の言い方をすれば、工具側からであれ、ワーク側からであれ、加工で生じている 3 分力と 3 モーメントが検出できれば、加工で生じている力の大きさや方向が分かるだけでなく、その力の作用点まで実時間で検知できるからである。

さて、このような目的に使用される多軸力センサには実に多くのことがらが要求される。すなわち、(i) 力やモーメントの各成分が他成分の干渉なく検出できること、(ii) 剛性・固有振動数が高く、センサを挿入

したことで系の力学特性ができるだけ変わらないこと、(iii) 十分な感度を持つこと、(iv) センサ自体が運動部分に取り付けられることが多いので、軽量でコンパクトなこと、(v) 長期安定性・耐環境性に優れること、(vi) コストが安く信頼性が高いこと、などである。

このような多くの要求を満たすセンサとして、筆者らは図 2 に示す平行平板構造と放射平板構造を持つ力センサの研究・開発を行ってきた。その多くは、これらの構造にひずみゲージを組み合わせたものである。いずれも可動部と固定部とを 2 枚の薄板で結んだ構造であり、力やモーメントによって両薄板の表面に直交する方向に生じる力によってその方向にのみ変形し、薄板の両端の根元表面には引張りおよび圧縮のひずみが生じる。このひずみは 2 枚の薄板の根元の合計 4 か

図 1 加工と多軸力センサ

* 原稿受付 平成 3 年 7 月 22 日

** 正 会 員 東京大学工学部 (東京都文京区本郷 7-3-1)

図2 平行平板と放射平板による力とモーメントの検出

所に貼り付けられたひずみゲージで電気抵抗に変換され、ブリッジ回路で電圧に変換される。このようにして平行平板構造は1軸方向の力を、放射平板構造は1軸回りのモーメントを、他の力やモーメント成分の干渉を受けずに検出することができる。これらの構造は、上述の(i)~(vi)の諸要求を満たすほかに(i)構造の重ね合わせにより、任意の多軸力センサを容易に構成することができること、(ii)ひずみゲージ以外の他の変換素子やピエゾ素子などの能動素子との組合せが可能であること、等の特徴を持っている。

図2に示した平行平板構造および放射平板構造はその要求される条件に応じて対称化、回転、ねじり、ひ

きのばしなどの思考演算により図3の(a),(b)に示すような様々な展開が可能である。また、それらの組合せは同図(c)に示すように、必要な力やモーメントの成分に応じて種々のものが可能である。

2. 平行平板構造

平行平板構造を用いた力センサの設計について考える。

平行平板構造は図2(a)に示した主な変形(これを“1次変形”と呼ぶ)のほかにも他の力やモーメントの成分(これを総称して単に“力成分”と呼ぶ)によって、図4に示すように様々の副次的な変形(これらを“2次変形”と呼ぶ)を生じる。2次変形で生じる表面ひずみおよび変位は、通常は1次変形によるそれらより小さいので、力センサの概略設計においてはそれらを無視することができる。なお、詳細な設計および1つの平行平板構造で多くの力成分を検出したいときには、これらの変形を考慮に入れる必要がある。

平行平板構造を用いた力センサの設計に用いる1次変形の計算式を図5に示す。例えば、S45C(調質材)の20mmの角棒に端部から5mmのところから $l=1\text{ mm}$, $t=0.35\text{ mm}$ になるようにワイヤカットで角穴を明け、薄板の根元にひずみゲージを貼って力センサを作ると、定格荷重 10 kgf (98 N) の場合、

$$\delta = 0.28 \mu\text{m}, \quad \varepsilon = 290 \times 10^{-6},$$

$$k = 36 \text{ kgf (353 N)} / \mu\text{m}, \quad f = 754 \text{ Hz}$$

図3 平行平板構造と放射平板構造の展開

図4 平行平板構造の種々の変形

図5 平行平板構造による力センサの設計

となる。これを実際に作ってみると、種々の簡略化や製作誤差にもかかわらず、出力（約 4ϵ ）、剛性、固有振動数とも、この簡略計算の約 80% 程度のものが得られ、平行平板構造の性能が優れていることが分かる。

平行平板構造はこのように多軸力センサの構成のしやすさと優れた特性とを持っているが、実際の製作上、角穴が作りにくい場合や、ひずみゲージを外部に露出させたくない場合、さらに高い比出力（単位変位量当たりの出力）が欲しい場合などが生じることがある。そのようなときには、図 6 に示すように角穴を丸穴にしたり、単穴を多穴にしたり、平行平板構造とせん断板とを並用するなどの工夫を採用することができる。

3. 多軸力センサとその応用システム

筆者らは平行平板構造、放射平板構造を用いた力センサを多数試作・開発を行ってきたが、主なものの構造とその応用システムを紹介する。

図6 平行平板構造の種々のバリエーション

1) ロボット用 6 軸力計^{1)~3)}

プロトタイプの検出ブロックの構造を図 7 に示す¹⁾。ここでは平行平板構造と放射平板構造との 1 次変形モードのみで検出しているが、構造が複雑で大きくなり過ぎる欠点があった。現在市販されている実用タイプでは平行平板構造の 2 次変形モードを用い、それを 2 段に重ねただけの構造で 6 軸力を検出しており、特に力制御ロボットのシステムに広く使用されている。これを用いれば例えば自動バリ取りロボットや金型の自動研削システムなどを構成することができる。

2) リング状 6 軸力計⁴⁾

上記のものと同じ目的に使用されるものであるが、検出部全体が図 8 に示すようにリング状になっており、加工工具を中心部に配置することができるので、

図7 プロトタイプの6軸力計の検出ブロック

力によるモーメント検出性能への干渉を少なくすることができる。金型の自動研削などへの適用が試されている。

3) ドリル用トルク・スラスト検出ホルダ

この検出器の構造を図9に示す⁴⁾⁵⁾。検出器は回転する工具ホルダの内部に配置した支承部と変換部とから成り、図3(c)左に示した平行平板と放射平板の組合せで中心軸を支え、その軸にねじれと軸方向の変位を生じさせる。それらの変位量を同図(c)右の検出ブ

図8 リング状6軸力計の基本構造

ロックで検出することにより、トルクとスラストをそれぞれ独立に検出するものである。その出力はFM送受信機を用いて回転系から静止系に送信される。これを用いドリルの折損についての知識を集約し、それを制御システムに取り込むことで、小径ドリルの折損検知予知システムを作ることができる。

4) バイトセンサ

旋削用のバイトをセンサ化したものである。3分力検出ホルダの例を図10に示す⁹⁾。この例では、3分力をそれぞれ別々の平行平板構造で検出しているが、平行平板の2次変形(図4)やバリエーション(図6)を用い、1個の平行平板構造で3分力を検出するものも作ることができ、単純な形で高剛性のものが得られる⁷⁾。またこれらの3分力の知識を用い、平行平板構造の主分力計で旋削状態を全自動モニタするシステム⁸⁾も作ることができる。

5) 6分力検出テーブル⁹⁾¹⁰⁾

加工中に被加工物にかかる6軸力を検出するものである。プロトタイプの検出ブロックの構造を図11に示す⁹⁾。被加工物の取り付けられる上部ブロックは4個の平行平板構造の3軸力検出ブロックで支えられており、それらからの12個の出力から計算により6軸力が算出されるものである。このセンサを用いるとマシニングセンタでの切削情報の自動収集システムを作ることができ、それによって得られた知識をもとに加工の知能化システムの構築が可能になるものと考えられる。

6) ビン形ロードセル

建設機械などの大形作業機械のリンクの関節部には回転ビンが多用されるが、そのビンの両端部にかかるそれぞれ2方向の力を検出するものである。その一例を図12に示す¹¹⁾。通常数tfから数十tf($10^4 \sim 10^6$ N)もの大きな力がかかるビンの端部のせん断変形分だけをビン内部に配置した2段重ねの平行平板構造で2方向に分離して検出することができる。現在までのところ1個のビンで最大500tf(4.9×10^6 N)まで検出できるものを試している。これを用いると建設作業中に生じる異常検知や転倒防止などのシステムを構築することができる。

7) 磁気ディスク用ヘッドセンサ

磁気ディスクとヘッドの間に働く力を検出するものである。図13にこの目的に使う5分力計の構造の例を示す¹²⁾。この例では2段に重ねた平行平板構造に放射平板構造を重ねたものである。ヘッドがディスク表面上に接して停止

図9 小径ドリル用トルクスラスト検出ホルダの構造

図10 3分力検出ホルダ

での5軸力を検出することができる。これらの5軸力のうち最も重要なのはディスク回転方向の摩擦力の検出であり、今後、浮上高さを小さくするための表面構造と潤滑剤の開発にはこの摩擦力のみを検出する高性能の1軸力センサの開発が望まれる。

筆者らは上に紹介した力センサのほかにも、金型センサ¹³⁾、ナノロボット用主分力計¹⁴⁾、マイクロテスト用2方向力センサ、積層基板圧着用圧力分布計¹⁵⁾、セラミックス成形用壁面応力計¹⁶⁾、粉粒体用壁面応力計¹⁷⁾などの多分力計の開発を試みているが、ここでは紙面の都合上割愛する。

た状態から、ディスクの回転とともに浮上し、最後に回転が止まってヘッドがディスク表面上に停止するま

定格: F_x, F_y 1000 N, F_z 2000 N, M_x, M_y 200 N・m,
 M_z 100 N・m

固有振動数: f_x, f_y 1.05 kHz, f_z 1.48 kHz

剛性: k_x, k_y 185 N/ μ m, k_z 360 N/ μ m

図11 6分力検出テーブル

直径: ϕ 50 mm, 長さ 390 mm, 重量 8.26 kg, 定格荷重
 100 kN, 定格出力 1500×10^{-6} strain

図12 ピン形ロードセルの構造

定格: 500 mN, 15 mN・m

剛性: 1.1 N/ μ m, 固有振動数 > 2.8 kHz

図13 磁気ディスクヘッド用5軸力センサ

4. 今後の発展

上述のように平行平板構造と放射平板構造とから始まった多軸力センサの開発で得た多くの経験から次第に次のような考え, すなわち, (1) 平行平板構造の2次変形の利用, (2) 力センサから能動素子への転換, (3) 加工の知能化に用いる知能化素子の開発, という考えを得るようになった。

1) 平行平板構造の2次変形の利用

多軸力の検出で1成分ごとに1つずつの平行平板構造や放射平板構造を用いると互いの干渉を小さくするには効果があるが, 図7の例に示すように全体が大きく, 重くなり, 加工が困難な上に全体の剛性が落ちる欠点が生じる。これらの欠点を解決するには図4に示した平行平板構造の2次変形と図6に示した平行平板構造の種々のバリエーションを利用するのが得策である。特にロボット用のように軽量・小形を要求される場合や, 加工機械用のように高剛性を必要とする場合に有効であり, 今後の多軸力センサではこれらの構造とひずみゲージの組合せが発展するものと考えられる。

2) 力センサから能動素子へ

力センサは力を受けて情報を発生するものであり, 力や変位の側面からみると受動的(パッシブ)な素子である。これを逆転し, 情報を受けると力や変位を発生する素子が能動的(アクティブ)な素子である。現在微小な変位を発生する素子として積層圧電素子が広く用いられ始めているが, これには非線形性と履歴性の2つの欠点が付随している。この問題を解決し, 見かけ上完全な線形性を持つ微動素子が図14に示す“平行平板構造による微動素子”である。平行平板構造の間に配置された圧電素子によって上ブロックが変位しその変位量を平行平板の根元に貼り付けられたひずみゲージで検出し, フィードバック回路を用いて目標とする変位を発生させるものである。力センサの時と同じく, この素子を重ね合わせることで任意の多軸アクチュエータを容易に構成することができ, 種々の微細位置決め装置¹⁸⁾, ナノロボット¹⁴⁾, マイクロテストシステム, などに用いられている。

3) 加工の知能化と知能化素子

現在生じている加工現象からセンサを通じて情

図14 ナノメータ変位の発生機構とその変形

報を取り込み、あらかじめ用意してある知識に当てはめて近未来の状態などの所要の情報を作り、それによってアクチュエータを通じて現象そのものを制御する“加工の知能化”¹⁹⁾ではセンサとアクチュエータとが一体となった素子である“知能化素子”が必要になる。現在のところ、筆者らは超精密切削用の知能化素子の開発を行っている²⁰⁾。これは主分力センサと、切込み方向の微細送り機構とが一体化されたもので、薄肉感光ドラムの切削などで所期の機能を発揮している。

以上、筆者らの行っている多軸力センサの研究、開発とその基本的な考え方を紹介した。今後ともこの方向はますます発展するものと考えられ、拙文が読者のご参考になれば幸いである。

参考文献

- 畑村洋太郎, 飯野謙次, 小野耕三, 高田龍二: ロボット用6軸力計の試み, 日本機械学会論文集, 54, 497 (1988) 241.
- K. Ono and Y. Hatamura: A New Design for 6-component Force/Torque Sensors, 11th Int. Conf. Measurement of Force and Mass, IMEKO, Amsterdam, (1986) 39.
- Y. Hatamura, K. Matsumoto and H. Morishita: A Miniature 6-axis Force Sensor of Multi-layer Parallel Plate Structure, Proc. IMEKO, Houston, USA, (1988) 621.
- Y. Hatamura: A Ring Shape 6-axis Force Sensor and its Applications, The Int. Conf. Advanced Mechatronics, Tokyo, (1989) 647.
- T. Nagao and Y. Hatamura: Investigation into Drilling Laminated Printed Circuit Board, Ann. CIRP, 37, 1, (1988) 79.
- 畑村洋太郎, 森下 広: 薄肉円筒切削時の3分力の測定の試み, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1988) 669.
- 畑村洋太郎, 足立光明: 磁気ディスク切削用モノブロック形3分力検出ホルダの試み, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1989) 255.
- 伊藤豊次, 畚 雅夫, 稲城正高, 川田 尚, 橋本隆美, 畑村洋太郎, 足立光明: 超精密切削における加工状態のインプロセス検出(第1報, 切削状態検出システムの開発), 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 255.
- 畑村洋太郎, 長尾高明, 光石 衛, 高橋一敏, 一戸誠之, 西保木宏男: 6分力テーブルを用いたフレキシブル・マシニングシステム(第一報, 6分力テーブルの開発), 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1987) 395.
- 大庭孝志, 光石 衛, 畑村洋太郎, 長尾高明: 加工の知能化用実用形6分力テーブルの試作研究, 関東学生会第29回学生員卒業研究発表講演前刷集, (1990.3) 207.
- 畑村洋太郎, 高田龍二: ピン型ロードセルの開発, 日本機械学会論文集, 54, 497-C (1988) 234.
- Y. Hatamura, M. Nakao, H. Miyazaki and T. Shinohara: A Measurement of Sliding Resistance Forces for Various Heads and Disks by High-rigid Force Sensor, IEEE Trans. Mag., 24, 6, (1988) 2638.
- 米山 猛, 畑村洋太郎: 金型センサの開発, 日本機械学会論文集, 52, 481-C (1986) 2551.
- Y. Hatamura and H. Morishita: Direct Coupling System between Nanometer World and Human World, Proc. IEEE, Micro Electro Mechanical Systems, Napa Valley, California, (1990) 203.
- Y. Hatamura and K. Yamauchi: Analysis of the Dynamic Phenomena during Lamination of Multilayer Printed Circuit Board by the Measurement of Pressure Distribution, Japan Int. Electronic Manufacturing Technology Symp., Nara, Japan, (1989) 303.
- Y. Hatamura and T. Mikami: 2-Directional Stress Measurement on Ceramic Forming in High Pressure, 1st Int. Conf. Measurement and Control of Granular Materials, Shenyang, (1988) 237.
- Y. Hatamura and T. Takeuchi: A New Detecting Method of Granular Stresses Acting on Silo Wall, 1st Int. Conf. Measurement and Control of Granular Materials, Shenyang, (1988) 288.
- 畑村洋太郎, 小野耕三, 村山 健: 平行平板・放射平板構造を用いた多軸微細位置決め機構, 昭和61年度精密工学会北海道地方講演会, (1986) 75.
畑村洋太郎, 小野耕三, 長澤 潔, 村山 健: 平行平板・放射平板構造を用いた多軸微細位置決め機構, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1987) 495.
- 畑村洋太郎: 加工の知能化とその基本構成, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1989) 297.
- 畑村洋太郎, 足立光明: 知能化切削の考えに基づく薄肉感光ドラム切削の試み, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 259.