アクチュエーション機能を備えたアクティブ 力センサの開発 (第1報) *

—基本原理の検討—

松 本 潔** 畑村 洋太郎** 中 尾 政 之**

Development of an Active Force Sensor with an Actuation Capability (1st Report)
-A Study on Basic Principles-

Kiyoshi MATSUMOTO, Yotaro HATAMURA and Masayuki NAKAO

Accurate control of tools in precise machining requires force information to compensate for force induced deformation. Many types of force sensors with strain gauges or piezo elements have been developed. However, usual force sensors may disturb a machining system because of their low rigidity. The authors propose an active force sensor which has an actuation capability and a detection capability for force and displacement. This sensor can improve its rigidity using the actuation. Prototypes of the active force sensor are fabricated and examined. It is confirmed that the prototype with a piezo device and two pairs of parallel plates is superior in terms of stability and sensitivity in force and displacement detection.

Key words: precise machining, active force sensor

1. 緒 言

機械加工において、加工力は重要な情報の一つである。加工力を検出し、その情報に基づいて加工状態を制御する研究が多く行われている¹⁾²⁾。通常、圧電素子やひずみゲージを用いた力センサ³⁾⁴⁾によって加工力を測定し、その情報をもとに圧電素子、モータ、油圧シリンダ等のアクチュエータを駆動して、加工にフィードバックをかける。しかし、力センサとアクチュエータという2つの機構が新たに挿入されるため、加工システムの構造が複雑になる。また、これらが力のループの中に挿入されるため、力センサやアクチュエータの剛性不足が本来の加工系を乱し、加工精度を悪化させる。さらに、力センサとアクチュエータが離れて設置されると、その間の構造体の特性の影響を受け、加工システムの制御性が低下することがある。

そこで本研究では、力センサとアクチュエータの機能を兼ね備えた、“アクチュエーション機能を持つアクティブ力センサ”の開発を行った。検出した力の情報をアクチュエータにフィードバックし、力センサの受圧面の位置を制御し高剛性化することを試みた。アクティブ力センサについて、3つの方式を考案し、各々についてプロトタイプを開発し、実験、評価を行った。以下、その結果について報告する。

2. アクティブ力センサに必要な機能

一般に、力センサとアクチュエータは、力が通過すると必ず変形を起こす。たとえそれらが、剛性が高い圧電素子で構成されていてもである。通常の加工において、これらの変形は影響が少ないため無視されてきた。しかし、サブミクロンの加工精度が要求されるようになってくると、これらの変形は加工精度と同等量になり無視できなくなる。

アクティブ力センサの実現のためにセンサに必要となる機能は、力の検出、変位の発生、および変位の検出の3つである。力

の検出および変位の発生機能は、それぞれ力センサおよびアクチュエータとしての基本的な機能である。変位を検出する機能は変位センサとしての機能であるが、ここでは力センサの変形、すなわち受圧面の変位を検出する。アクティブ力センサでは、受圧面の変位をアクチュエータにフィードバックし、受圧面の位置を制御して高剛性化を行うため、センサの変形量の検出は不可欠である。

上記の3つの機能を実現するために、圧電素子、あるいはこれとひずみゲージを用いた平行平板構造を組み合わせたアクティブ力センサのプロトタイプを開発し、評価を行った。これらのプロトタイプはいずれも1次元、すなわち1方向の力、変位を検出し、その方向の変位を発生させるものである。

3. アクティブ力センサA型

3.1 原 理

圧電素子は、通常、逆圧電効果を用いて、電圧をかけて変位を発生させるアクチュエータとして用いられる。しかし同時に、圧電効果によって、外力で変形されると電圧を発生する。圧電素子は、電気的にはコンデンサと近似できるため、これらの電圧は、圧電素子内に蓄えられた電荷と結びつけられる。A型は、これらの二つの効果を同時に用い、一つの圧電素子でアクチュエーションと力の検出を行う。

図1に、A型の構成を示す。圧電素子は、注入電荷 Q_i に比例した変位 v を発生し、これが受圧面に変位 x を発生させる。通

Fig.1 Configuration of active force sensor type-A

* 原稿受付 平成10年12月9日

** 正 会 員 東京大学大学院工学系研究科 (東京都文京区本郷7-3-1)

Fig.2 Block diagram of actuation and detection system for active force sensor type-A

Fig.3 Detection circuit for force and displacement

常、圧電素子の変位は電圧で制御されるが、電荷で制御することでヒステリシスを低減できる。一方、受圧面に加えられた外力 f は、圧電素子を変形させ、圧電素子内に電荷 Qf を発生させる。この電荷 Qf は、注入電荷 Qi との和 Qs として圧電素子内に蓄えられる。この電荷 Qs を検出し、検出電荷 Qs から注入電荷 Qi を差し引いて Qf を算出でき、 Qf から外力 f を測定できる。しかし A 型では、外力 f によって圧電素子自体が変形するため、駆動変位 v がそのまま受圧面変位 x とならない。受圧面変位 x を測定するためには、外部の変位測定装置を用いるか、または素子の剛性と測定した外力 f とから、間接的に受圧面変位 x を推定する必要がある。

3.2 実験システム

図 2 は、A 型を用いて、アクチュエーションおよび力と変位の検出を同時に行うシステムのブロック図である。チャージドライバは、駆動信号 V_i に比例した電荷 Q_i を圧電素子に注入し、アクチュエーションを行う。同時に注入電荷検出器によって、電荷 Q_i をモニタしておく。また圧電素子内に蓄えられている電荷 Q_s は、蓄積電荷検出器によってモニタされる。駆動変位 v は Q_i から、外力 f は Q_s と Q_i の差 Q_f から、おのおの検出できる。受圧面変位 x は、駆動変位 v (Q_i) から、外力による圧電素子の変形を差し引くことで求められる。後者の圧電素子の変形は外力 f (Q_f) に比例するが、逆圧電効果によるアクチュエータとしての感度と、圧電効果による変位、力センサとしての感度が異なるため、補正係数 K によって Q_f を補正した後、減算している。

図 3 に、図 2 のシステムを実現するための回路の基本構成を示す。差動増幅器とチャージアンプとから構成され、チャージ

Fig.4 Actuation and force detection by active force sensor type-A

アンプの出力をフィードバックする。 C_p は圧電素子、 C_c は電荷検出用のコンデンサである。圧電素子に注入する電荷 Q_i 、蓄えられている電荷 Q_s は、圧電素子の容量 C_p の差動増幅器に近い側を正とすると、次のように表せる。

$$Q_i = -C_c \cdot V_i = -C_c \cdot V_c \quad (1)$$

$$Q_s = C_p \cdot V_p \quad (2)$$

ただし、 C_p 、 C_c に蓄えられている初期電荷は 0 とした。外力 f に比例する電荷 Q_f は、次のように表せる。

$$Q_f = Q_s - Q_i = C_p \cdot V_p + C_c \cdot V_c \quad (3)$$

C_p に圧電素子、 C_c に通常のフィルムコンデンサを用いたところ、圧電素子における電荷のリークのため、検出電荷のドリフトが大きくなりあらわれた。そこで、 C_c にも C_p と同じ圧電素子を用いることで、ドリフトを低減できた。 V_p と V_c は極性が逆で概略等しい電圧がかかるため、 C_p の漏れ電流がそのまま C_c を通って抜け、漏れ電流が相殺されるためである。

実験に用いた圧電素子 (NEC 製, AE0505D16) では、逆圧電効果によるアクチュエータとしての感度を K_a 、圧電効果による変位および力センサとしての感度を K_f とすると、 $K_a=14.7\mu\text{C}/\mu\text{m}$ 、 $K_f=7.0\mu\text{C}/\mu\text{m}$ と測定された。図 2 の変位検出における Q_f の補正係数 K は、 $K = K_a/K_f = 2.1$ とした。

3.3 実験および結果

図 4 は、A 型におけるアクチュエーション、変位および力の検出実験の結果である。 0.5Hz 、 $2\mu\text{m p-p}$ の振幅となる信号で圧電素子の駆動を行いながら、途中で 50N の負荷 (おもり) を受圧面に載せ、再び降ろしたときの、受圧面変位 x と外力 f の検出出力を示してある。

受圧面変位 x の検出は外部の変位計を用いて校正を行い、検出誤差が $0.1\mu\text{m}$ 以下であることを確認した。アクチュエーションについては、駆動信号通りの変位 v が得られている。この変位 v は、負荷が加わらないときはそのまま受圧面変位 x であるが、 50N の負荷が加わると負荷によって圧電素子自体が変形し、約 $0.8\mu\text{m}$ 変化している。すなわち、駆動変位 v に素子の変形が重畳され、受圧面変位 x となって観測されている。また、圧電素子の電荷リークが完全に補償されていないため、時間の経過につれてドリフトが生じている。

力の検出は、外力 f に応じた出力が得られている。また、アクチュエーションから力の検出出力への干渉はほとんど見られ

Fig.5 Configuration of active force sensor type-B

ないが、アクチュエーションの振幅を $10\mu\text{m p-p}$ とすると干渉が見られた。なお、検出波形の立ち上がり、立ち下がりがなまっているのは、手で負荷（重り）をのせたためである。また、力の検出出力には時間の経過につれてドリフトが生じているが、これも圧電素子の電荷のリークの影響と思われる。この実験のように、外力が 50N 程度の場合、きれいな外力の検出信号が得られるが、 10N 以下ではノイズが多く、良好な S/N 比が得られなかった。これは、発生力の定格が 850N と大きい圧電素子を実験に用い、力の検出感度 K_f が低かったためと思われる。力の検出感度 K_f は素子に固有であるため、検出感度を自由に設定できない。

4. アクティブカセンサB型

4.1 原理

B型は、A型と受圧面変位 x の検出方法のみが異なる。すなわち、受圧面変位 x を検出電荷 Q_i , Q_f から推定するのではなく、ひずみゲージを用いたホイートストンブリッジで検出する。アクチュエーションおよび外力の検出方法は、A型と同様である。

図5に、B型の構成を示す。圧電素子の上面に、受圧面変位 x の測定のためにひずみゲージを貼付した平板を設けている。ひずみゲージで検出した平板の表面ひずみから、受圧面変位 x に比例した出力 E を得る。圧電素子の伸縮には、A型と同様に電荷で制御を行い、注入電荷 Q_i に比例した変位 v を得る。また外力の検出もA型と同様、検出電荷 Q_s から注入電荷 Q_i を差し引いて Q_f を算出し、外力 f を得る。

4.2 実験システム

図6に、B型を用いて、アクチュエーションおよび外力 f と変位 x の検出を行うシステムのブロック図を示す。ひずみゲージの信号から受圧面変位 x を検出するため、ストレインアンプを用いる。検出された受圧面変位 x は駆動信号にフィードバックされ、サーボ回路、チャージドライバを通して圧電素子を駆動する。このようにフィードバックループによって受圧面の変位を一定に保つことは、荷重が引き起こした圧電素子の変形を補償し、外力に対して高剛性化することに他ならない。なお、A型でフィードバックを行わなかった理由は、受圧面変位 x の検出出力のドリフトが大きき、安定した動作が期待できなかったからである。外力 f は、A型と同様に、圧電素子内の蓄積電荷 Q_s と注入電荷 Q_i の差 Q_f から検出している。

実験に用いた圧電素子は、A型と同じものである。フィードバックループは、制御帯域 100Hz 、DCゲイン 60dB とした。後者は、制御しない場合と比べ静剛性が約 1000 倍向上することを示している。

4.3 実験および結果

図7は、B型におけるアクチュエーション、変位および力の

Fig.6 Block diagram of actuation and detection system for active force sensor type-B

Fig.7 Actuation and force detection by active force sensor type-B

検出実験の結果である。A型と同様、 0.5Hz 、 $2\mu\text{m p-p}$ の信号で圧電素子を駆動しながら、途中で 50N の負荷（おもり）を受圧面に載せ、再び降ろした場合の、受圧面変位 x と外力 f の検出出力を示している。

受圧面変位 x は、 50N の負荷が加わってもその影響は受けていない。フィードバックループの作用によって、負荷が引き起こした圧電素子の変形が、外乱として抑圧されているためである。またひずみゲージで受圧面変位 x の検出を行っているため、A型で生じたような検出出力のドリフトは生じていない。

力の検出出力については、外力 f に応じた出力が得られ、また図ではアクチュエーションからの干渉も見られないが、アクチュエーションの振幅を $10\mu\text{m p-p}$ とすると干渉が見られた。これは外力 f の検出手法が、A型と同じためである。また力の検出出力は、圧電素子の電荷のリークによりドリフトが生じており、その傾きはA型より若干大きい。これは、負荷が引き起こした圧電素子の変形をフィードバックループで補償するために、より多くの注入電荷 Q_i が圧電素子に加えられたためと考えられる。検出出力の S/N については、A型と同様であった。

5. アクティブカセンサC型

5.1 原理

C型は、外力 f および受圧面変位 x を、電荷を用いずひずみゲージを用いて検出する。また圧電素子を電荷ではなく電圧で駆動し、ひずみゲージの出力をフィードバックして駆動電圧に対するアクチュエーションの直線性を確保する。

C型の構成を図8に、変形の様子を図9に示す。圧電素子の

Fig.8 Configuration of active force sensor type-C

Fig.9 Deformations of active force sensor type-C

両端に、ひずみゲージを貼付した平板が取り付けられている。図に示すように、上側、下側のひずみゲージの出力をそれぞれ Eu , EI とする。図9 (a) のように、圧電素子の伸縮によってアクチュエーションを行うが、受圧面変位 x は、上側のひずみゲージ出力 Eu として検出する。図9 (b) は力の検出を示し、上下のひずみゲージ出力の差 $EI - Eu$ から外力 f の検出を行う。差を取ることで、アクチュエーションによる力検出への干渉を相殺できる。C型は、図9 (a) (b) の2つのモードの重ね合わせによって動作する。また、平板部の形状設計によって、外力 f および受圧面変位 x の検出感度を自由に設定できる。

C型は、力の検出に電荷制御を用いないため、A型あるいはB型で見られたような出力のドリフトを低減できる。また圧電素子を電圧で駆動して変位の発生を行うが、受圧面変位を直線性の良いひずみゲージで検出してフィードバックするため、ヒステリシスの影響を低減できる。

5.2 実験システム

図10に試作したC型の構造を、図11に写真を示す。A型およびB型では、力の検出感度が使用する素子により決まり、実験に用いた素子では10N以下の力では検出出力にはノイズが多かった。それに対してC型では、力の検出感度を平板部の設計によって自由に設定できる。そこで力の定格を10Nとして設計し、10N以下の力の検出を行うこととした。また使用した圧電素子（NEC製、AE0505D08）の定格から、アクチュエーションレンジは $\pm 3\mu\text{m}$ とした。

図12に、C型を用いて、アクチュエーションおよび外力 f と変位 x の検出を行うシステムのブロック図を示す。上下の平板上に貼付されたひずみゲージからの信号を取り出すために、ストレインアンプが用いられている。上側平板のひずみゲージ出力 Eu から受圧面変位 x を、上側、下側平板のひずみゲージ出力 Eu , EI の差から外力 f を検出する。検出された受圧面変位 x は駆動信号にフィードバックされ、サーボ回路を通して圧電素子を駆動する。このフィードバックループによって荷重が引き起こした圧電素子の変形を補償でき、外力に対して高剛性化でき

Fig.10 Structure of fabricated sensor block

Fig.11 Photograph of fabricated sensor block

Fig.12 Block diagram of actuation and detection system for active force sensor type-C

Fig.13 Actuation and force detection by active force sensor type-C

Fig.14 Force detection characteristics of active force sensor type-C

る。また、C型では、外力 f の検出もひずみゲージで行うため圧電素子を電荷で駆動する必要はなく、サーボ回路から直接電圧で駆動している。フィードバックループは、B型と同様、制御帯域100Hz、DCゲインは60dBとした。

5.3 実験および結果

図13は、C型におけるアクチュエーション、変位および力の検出実験の結果である。A型、B型と同様、0.5Hz、 $2\mu\text{m p-p}$ の信号で圧電素子の駆動を行いながら、途中で負荷を加えた時の結果である。力の検出感度を上げたので、加えた負荷を5Nとした。

受圧面変位 x の検出は、5Nの負荷が加わってもその影響は受けていない。またひずみゲージで受圧面変位 x の検出を行っているため、検出出力のドリフトも生じていない。

力の検出は、外力 f に応じた出力が得られ、またアクチュエーションからの干渉も見られない。さらに、アクチュエーションの振幅を可動範囲最大の $6\mu\text{m p-p}$ としても、出力に干渉は見られなかった。また、力の検出もひずみゲージで行っているため、出力のドリフトは見られず、A型、B型に比べて低荷重の検出を行ったにもかかわらず、ノイズは少なかった。

図14は、いくつかの一定の外力 f を負荷しながらアクチュエーションを行った場合の、受圧面変位と力の検出出力とを示す。受圧面を変位させても検出出力には影響がなく、アクチュエーションと力の検出が独立して行えることを示している。図中の点線は、圧電素子の可動範囲 $6\mu\text{m}$ で制限される、C型の動作限界である。また、検出している力の大きさによって、アクチュエーション可能な範囲が変化する。これは図9で示したように、C型が、アクチュエーションと力の検出の2つのモードの重ね合わせにより動作しているからである。

6. 評価

アクティブ力センサを実現するために必要な3つの機能、す

なわち力の検出、変位の発生、変位の検出を、基本的には3つのプロトタイプとも実現できた。しかしながら、それらを実際に使用する時には、それぞれの特性をつかんでおく必要がある。

A型は、構造が簡単であり、加工装置にも簡単に取り付けられる。その反面、力、変位の検出を行うための電気回路が複雑となる。また、電荷のリークによって受圧面変位出力、外力の検出出力にドリフトが生じやすいため、短時間の現象の測定に適する。また外力の検出特性は、感度が圧電素子の特性で決まり、現状の市販品を用いると低荷重ではノイズが目立つため、大きな荷重の測定に適する。

B型は、構造はやや複雑である。また、受圧面変位の検出にはひずみゲージを用いるため変位出力は安定しているが、外力の検出出力にはドリフトが生じやすく、やはり短時間の現象の測定に適する。また、外力の検出特性は、A型と同様、大きな荷重の測定に適する。

C型は、構造は複雑であるが、電気回路構成は簡単になる。また、受圧面変位や力の検出にひずみゲージを用いるため、長時間の使用に対しても安定である。また、外力の検出特性を平板部の設計によって自由に設定でき、小さな荷重の測定にも対応できる。ただし圧電素子の可動範囲によってセンサの動作範囲が決まるため、実際の使用条件に合わせた設計が必要となる。

これらの特性の検討から、実機として用いるアクティブ力センサには、C型が最も適していると考えられる。

7. 結論

力のセンシングとアクチュエーションの機能を備え、制御によって高剛性化できるアクティブ力センサの開発を試みた。アクティブ力センサを実現するために、力の検出、変位の発生、および変位の検出の3つの機能を備えた、3種のプロトタイプを試作し、その特性を検証した。その結果、圧電素子と2組の平行平板を組み合わせたC型が、安定性、感度の点から優れていることがわかった。

参考文献

- 1) 中尾政之, 畑村洋太郎, 渡辺宗徳, 大野勝俊: 知能化研削盤の基本構成とその構造要素の評価, 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1995) 1107.
- 2) 中尾政之, 太田和重, 高嶋康裕, 畑村洋太郎: 知能化研削盤におけるカップ砥石の傾き補正の試み, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1997) 675.
- 3) Y. Hatamura, K. Matsumoto and H. Morishita: A Miniature 6-axis Force Sensor of Multilayer Parallel Plate Structure, Proc. IMEKO, Houston, USA, (1988) 621.
- 4) Y. Hatamura: A Ring Shape 6-axis Force Sensor and its Applications, The Int. Conf. Advanced Mechatronics, Tokyo, (1989) 647.