

論文の内容の要旨

論文題目 Research on an Actuator Utilizing Impact Force of Piezo Elements and Its Applications
(圧電素子の衝撃力を用いたアクチュエータ及びその応用に関する研究)

氏名 曾 國浩

1. はじめに

摩擦固定された部品の組み立てでは、熟練する技術者がハンマーを用いて対象物を叩いて精密位置決めさせることが従来のやり方である。

当研究室がこの工程の自動化を求めてアクチュエータを開発してきた。Fig.1(a)にその一つを示す。このアクチュエータはエアシリンダ、圧電素子と圧電素子両側の重りから構成される。図示のように、最初からアクチュエータはエアシリンダにより対象物に押し付ける。ただし、その推力は対象物の摩擦力より小さいため、対象物は移動しない。

積層圧電素子は入力電圧に高速応答できるため、パルス電圧を印加すると、圧電素子が急激に変形し、付けられた重りを高速移動させる。慣性力によりアクチュエータが対象物に Fig.1(b)のように衝撃力を与えることができる。この衝撃力が対象物の摩擦力より大きいため、対象物を移動させることができる。アクチュエータがエアシリンダの推力により対象物と接触するため、衝撃力で一旦対象物と離れてもまた Fig.1(c)のように対象物と接触する。衝撃力の大きさが電圧パターンにより簡単に調整できる上、安定的な衝撃力を印加することができる。

ただし、従来のアクチュエータが発生した衝撃力が限られたため、精密光学部品のような小さい部品の精密位置調整には適していたが、一般の機械部品の位

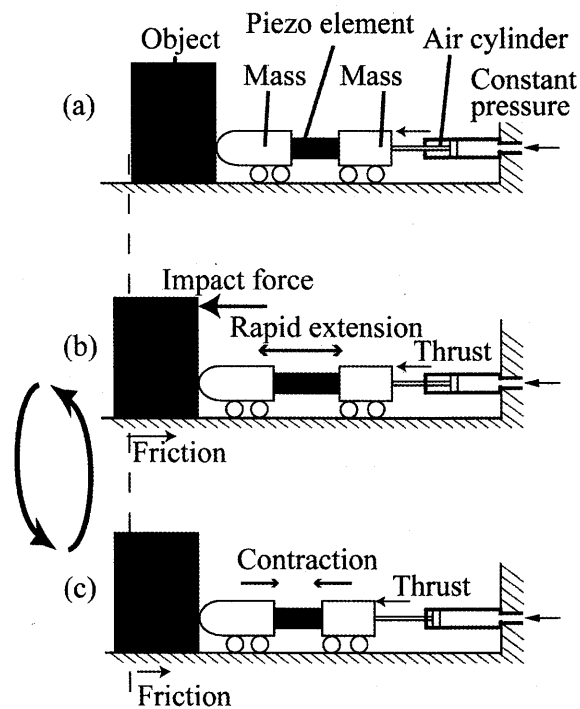


Fig.1 Operation principle of the actuator utilizing impact force of the piezo element

置調整には向かなかった。それ故に応用が限られる。本研究はこのアクチュエータの実用化及び普及させるため、出力の向上及び高分解能駆動などアクチュエータの基礎性能を向上させた。その後、この高性能アクチュエータの性能を発揮ため、超精密加工機の芯出しステージ及粉末プレス機に導入した。

2. 衝撃力を拡大する方法

圧電素子の静的発生力が圧電素子の面積に比例するが、Fig.1 に示したアクチュエータが圧電素子に付けられた重りの慣性力を用いるため、発生する衝撃力が圧電素子の伸張加速度に関わる。ただし、圧電素子が容量性負荷であるため、高速駆動に大電流が必要である。この電流が市販のドライバの負荷を簡単に超えたため、大きい衝撃力が得られなかった。この問題がスイッチ電源で解決された。スイッチが瞬間最大電流 20A の FET(2SK1120)の行列により構成された。

駆動電流の問題を解決した後次の問題が現れた。重りが圧電素子に付けられるため、圧電素子が急に伸張する期間に重りが圧電素子に圧力をかけるが、圧電素子の伸張が止まる瞬間、重りの慣性が圧電素子に張力をつける。圧電素子が張力に弱い特徴がある。市販のドライバと比べると、スイッチ電源により発生した衝撃力が強いため、問題にならなかった張力が圧電素子を破壊するまで強くなった。圧電素子の変位量が定荷重にあまり影響されない特性を利用して圧電素子に予備圧縮をかけた。予圧により、圧電素子のセラミック層が剥離しにくくなり、破壊の問題が解決された。

アクチュエータの出力は圧電素子の伸張速度だけでなく、圧電素子に付けられる重りにも関わる。本研究は接触現象を解析モデルに入れて対象物によって重りの形と重さの最適値を解析した。5×5×10mm の圧電素子を用いたアクチュエータで 10kg の対象物を移動したとき、重りの最適化によって 1 ステップあたりの変位量が 0.17 μ m から 4.5 μ m になった。

アクチュエータの使用はよく伝動機構を使って力の方向を転換し、力を拡大する。通常の圧電素子を用いたアクチュエータの変位は限られるため、伝動機構の使用ができなかった。一方、本アクチュエータのストロークがエアシリンダで調整できるため、伝動機構を使っても十分なストロークが得られる。伝動機構はいろいろあるが、本研究がバックラッシュの無いくさびを使用した。Fig.2 にくさびの使い方を示す。同じ傾斜角度を持つくさびとステージがそれぞれ水平移動と垂直移動に制限されるため、アクチュエータでくさびを左方向に移動させると、重い荷重を受けるステージを上げることが可能である。実験結果により、くさびと対象物が比例移動した。また、くさびの使用により、2000N の定荷重を移動させることを実現した。

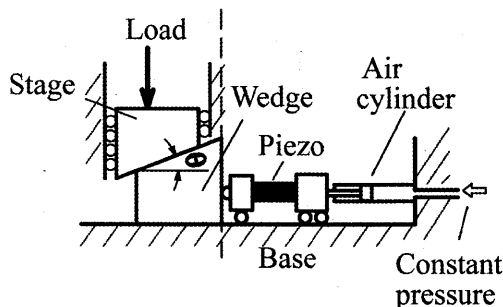


Fig.2 Utilization of the wedge mechanism

3. 分解能を高くする方法

このアクチュエータは対象物を高い分解能で動かせるが、Fig.3 は、入力パルス電圧と位置パルス当たりの平均変位を示す。図示のように、対象物の移動量が入力電圧の平方値に比例するが、60V 付近において分解能が著しく低下する。

電圧を下げてより小さい移動量が得られなかったため、外部から移動を静止制止する装置が必要と考えられる。しかし、衝撃力による移動が一瞬で終わったため、この短い間に通常のブレーキの反応が起こることが難しいと思われる。

このアクチュエータが推力しか提供できないため、双方向移動するためアクチュエータ二つが要る。通常駆動する片側に移動させるときは一つのアクチュエータだけを駆動するが、本研究では、使われていないアクチュエータをブレーキとして使うことを提案した。

Fig.4 に実験装置を示す。まず一つのアクチュエータにパルス電圧を印加して対象物を移動させる。

短い時間差が経つと反対側のアクチュエータにもパルス電圧を印加する。反対側の衝撃力が対象物の移動を止めるため、移動距離が短くなる。

片側のアクチュエータだけで駆動したときの観察により、対象物の移動が数 ms で終わったため、両アクチュエータに印加する電圧の時間差を 1ms 付近に設定した。

Fig.5 に一つのアクチュエータだけで駆動したときの様子を示す。安定なステップ移動が得られたが、Fig.3 に示したように印加電圧がある閾値より少ないと変位が不安定となった。

Fig.6 に提案した方法の駆動様子を示す。この方法により、対象物の移動量が少なくなった場合でも安定した動きを確認した。分解能の調整は、反対側のアクチュエータに印加する電圧の調整で容易に可能である。その結果分解能は $0.5\mu\text{m}$ から $0.05\mu\text{m}$ 弱になった。

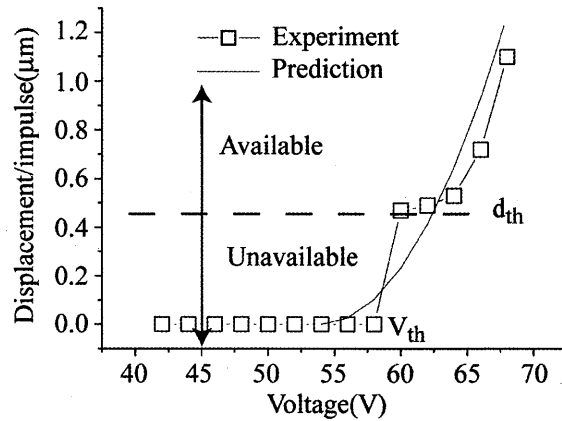


Fig.3 Limitation of the minimum step size

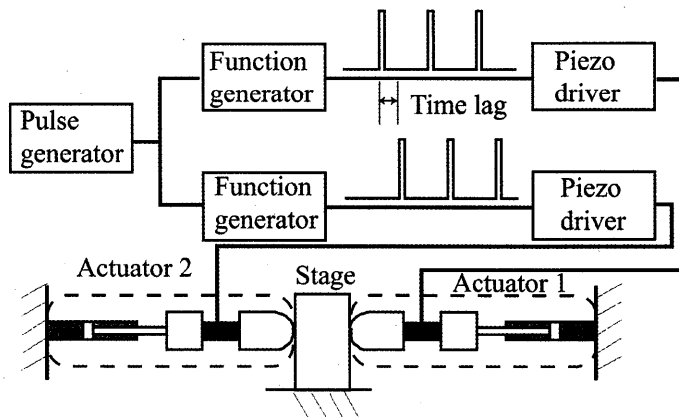


Fig.4 Schematic view of the experiment setup

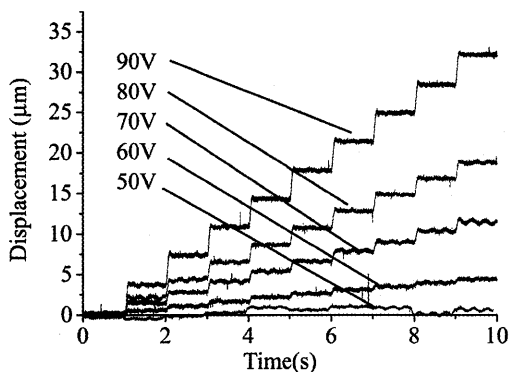


Fig.5 Movement of the object while actuating it by one actuator

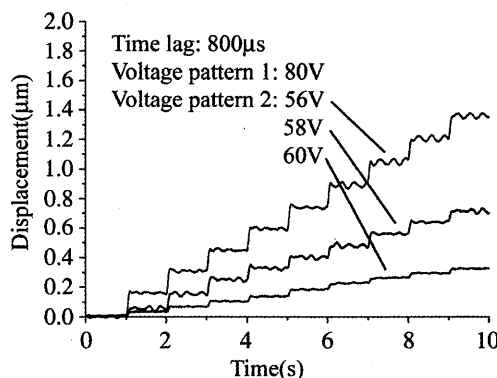


Fig.6 Movement of the object while actuating it by the proposed method

4. 位置決めでの応用

旋盤により加工される物のヘソは、工作物の回転中心のバイトの芯出しエラーにより起こされる。超精密加工機では、このヘソの大きさが再加工のコストに大きく影響する。

このエラーを最小限に抑えるため、本研究では、弾性ヒンジにより構成されたステージ、圧電素子の衝撃力を用いたアクチュエータ及びくさびの組み合わせにより超精密加工機の芯出しステージを設計し、製作した。Fig.7 に製作した小型、高剛性、高分解能で長ストロークを持つステージを示す。従来の手動芯出し機構と比べると、自動化ができる上に分解能が100nm から20nm まで向上した。

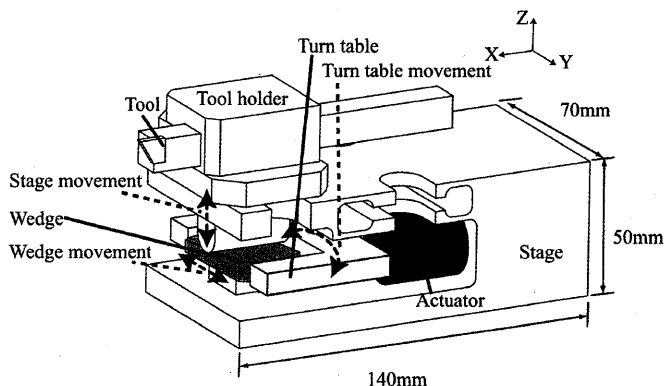


Fig.7 The centering stage for ultra-precision tooling machine

5. 粉末プレスでの応用

粉末プレスは、圧力を粉末にかけることにより成形させること。成形した圧粉体のバインダが焼結過程で飛ばされるため、製品と材料が同じ特性を持つことができる。しかし、圧縮過程にプレス機の圧力が圧粉体に均一に伝えないため、圧粉体に応力勾配及び密度勾配がある。細長い製品の場合に金型と圧粉体の摩擦力の影響が特に大きいため、応力勾配及び密度勾配が特に大きい。応力勾配により製品内部の残留応力が製品亀裂の原因となり、密度勾配が製品の品質に悪い影響をもたらすため、それらを無くす方法が求められている。

本研究は圧電素子の衝撃力を細長い円柱状の圧粉体（超硬合金とアルミナ）に繰り返し

印加することにより、実用密度までの圧縮力を従来の半分以下に減らせることを実現した。低い圧力の使用により応力勾配及び密度勾配が低くなると考えられ、プレス機の小型化にも繋がる。

従来の振動充填に印加する力が金型の摩擦力に消費されるため、効果が明白でない。振動充填と比べると、衝撃力を使用する場合に密度の増加速度が速いし、最終密度も振動充填より高い。金型の摩擦力が静摩擦から動摩擦に減少し、印加する力の消費が少ないことが原因だと考えられる。

6. まとめ

これまで圧電素子の衝撃力を利用したアクチュエータの出力が弱いため、応用が限られていた。本研究はまずアクチュエータの出力の増大に力を入れた。また、性能を向上させるため、高分解能駆動方法を提案した。

発生する衝撃力が大きい、ストロークが長い、駆動速度が高い及び移動分解能が高いことがこのアクチュエータの特徴と考えられる。これらの特性を十分発揮できるため、超精密加工機の芯出しステージ及び粉末プレスに応用した。

厳しい使用条件が要求される加工機の芯出しステージでは、アクチュエータと弾性ヒンジの組み合わせにより、分解能が 20nm まで上がった。粉末プレスの分野では、困難と言われる細長い製品の製作に使われた。圧電素子の衝撃力により、圧粉体は短い時間に従来の半分以下の圧力で圧縮された。密度が低い圧力で実用密度まで上げられるため、圧粉体の圧力勾配及び密度勾配が低いと考えられる。圧力勾配及び密度勾配が製品の損傷及び性能に多く関わるため、本研究のプレス機を使うと製品の品質向上が期待できる。