

可変剛性と両側駆動を可能とする圧電アクチュエータのための拮抗駆動型変位拡大機構の開発

宮崎大学 工学教育研究部

舩屋 賢

1. はじめに

近年、医療技術の進展に伴い、医療用微動機器のような細かな作業を行える機械が求められている。その駆動において、マイクロメートルオーダーで動作が可能な圧電アクチュエータ、とくに、複数の圧電セラミックスの薄板を積み重ねた積層型圧電アクチュエータがよく用いられている。この積層型圧電アクチュエータは、単層型と比べて小さな電圧で大きな発生変位を得られる。しかし、その変位は全長の 0.1%程度と小さい。

より大きな変位を得るために、圧電アクチュエータのための変位拡大機構がこれまでに研究開発されている^{1,2,3,4)}。しかし、これまでの変位拡大機構では、2つの課題が存在する。ひとつは、積層型圧電アクチュエータが伸展方向のみの力を出力するため、機構の片方向には能動的な駆動を行えるが、逆方向には機構の弾性変形を利用した受動的な動作しか行えないことである。また、もうひとつの課題は、変位拡大機構の出力部に大きな荷重が負荷された場合、積層型圧電アクチュエータの引張方向に大きな荷重が作用することで層の剥離が生じ、破損につながることである。後者の問題に対して、アクチュエータを機構へ設置する際に予圧を与える防止策が採られているが、予圧の調整の難しさが新たな課題となる。一方で、前者の問題に対しては、変位拡大機構を直列した拮抗駆動による双方向駆動の実現が行われている⁵⁾。しかし、この場合、複数の変位拡大機構を必要とするため、機構全体の大型化につながるとともに、予圧の調整が別途必要である。

そこで本研究では、予圧の調整を必要とせずに双方向駆動を実現できるコンパクトな変位拡大機構の開発を目的とする。この目的のもと、本研究では、機構の構築順序とアクチュエータの設置方法に着目し、変位拡大機構の開発を行った。さらに、その動作制御のために、力・変位・電圧の関係をモデル化し、制御方法を構築した。駆動実験により、制御性能を検証するとともに、機構が双方向駆動できることを確認した。

2. 双方向駆動可能なコンパクトな変位拡大機構

開発した双方向駆動可能なコンパクトな変位拡大機構の概要を図 1 に示す。図 1 の赤い部分が積層型圧電アクチュエータであり、その周りの黒枠が提案する変位拡大機構である。提案する変位拡大機構では、矢羽根状の形状をした機構に 2つの積層型圧電アクチュエータを並列に設置している。ここで、従来の機構の構築順序が変位拡大後に拮抗駆動する順序であったことに対して、開発した機構では大型化を避けるために拮抗駆動後に変位拡大する構築順序とした。また、予圧の調整をなくすために、各アクチュエータの片端は変位拡大機構に接しており、もう一端は隙間を空けて機構に取り付ける構造とした。

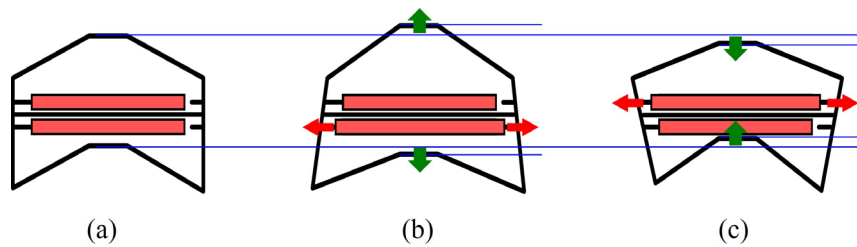


図 1. 開発した双方向駆動可能なコンパクトな変位拡大機構の概要. (a)両方のアクチュエータの伸展量がない基準状態に対して, (b)下側のアクチュエータの伸展量が多い場合は機構が収縮し, (c)上側のアクチュエータの伸展量が多い場合は機構が伸展する.



図 2. 製作した提案機構.

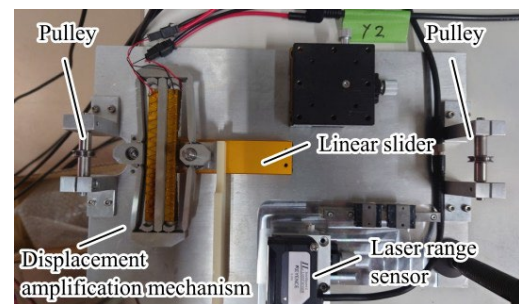


図 3. 動作モデリングのための実験環境.

提案する変位拡大機構では, 図 1(b)のように下側アクチュエータの伸展量が多い場合は, 機構の収縮が生じる. 一方で, 上側アクチュエータの伸展量が多い場合, 図 1(c)のように機構は伸展する.

製作した提案機構を図 2 に示す. ここで, 積層型圧電アクチュエータとして, THORLABS 製 PK4GA7P1 を用いた. また, 変位拡大機構では, 機構の変形部に弾性ヒンジを用いることとし, ワイヤカット放電加工により全体を製作した. その材料として, 弾性ヒンジ曲げ方向の剛性を低下させつつ, 高い比強度を得られ, 調質により加工ひずみを低減できることから ANP79 を使用した.

3. 提案機構の動作モデリング実験

提案機構はそれぞれの圧電アクチュエータに電圧を印加することで, 力と変位を出力する. それらの関係をモデル化するために, 複数の荷重条件下での動作実験を行った. 図 3 に実験環境を示す. ここで, 変位拡大機構の一端は台に固定し, 他端をリニアスライダに接続した. また, 変位計測はレーザ変位計 (KEYENCE 製 IL-030) により行い, 荷重は滑車を介して錘を吊るすことで与えた. この荷重として, -18N から 18N までの荷重を 3N 刻みで与えた. ここで, 印加電圧のパターンがモデリングに与える影響を検証するために, 片方のアクチュエータのみに電圧を印加する図 4(a)のパターン 1 と, 両方のアクチュエータに相補的に電圧を印加する図 4(b)のパターン 2 の 2 つのパターンで駆動した. 各パターン・各荷重の組合せに対して, 3 回ずつ実験を行った.

実験結果を図 5 に示す. 図 5(a)・(b)がパターン 1 の電圧を各アクチュエータに印加した場合の結果であり, 図 5(c)がパターン 2 の電圧を各アクチュエータに印加した場合の結果であ

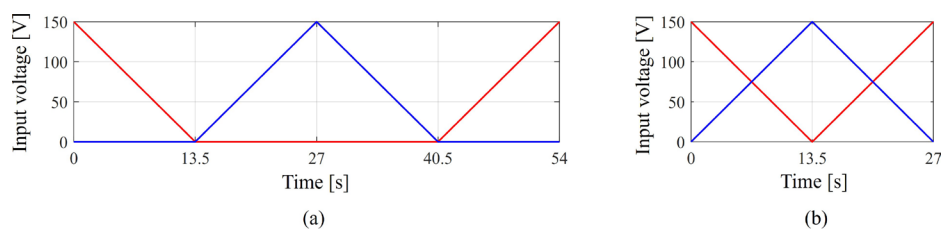


図 4. 動作モデリング実験における印加電圧のパターン (赤：下側アクチュエータ，青：上側アクチュエータ). (a)パターン 1. (b)パターン 2

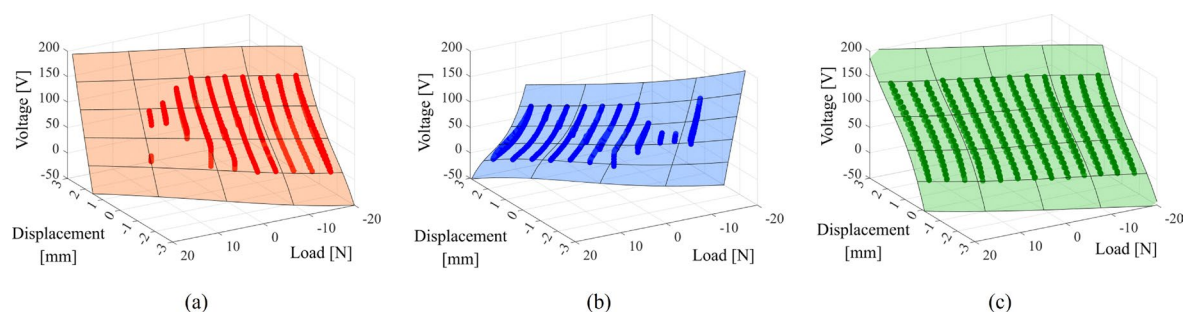


図 5. 動作モデリング実験により得られた変位・荷重・電圧の関係と 3 次多項式による近似モデルの結果. (a)パターン 1 で動かした場合の下側アクチュエータの結果. (b)パターン 1 で動かした場合の上側アクチュエータの結果. (c)パターン 2 で動かした場合の下側アクチュエータの結果.

表 1. 3 次多項式による近似モデルの適合率

Input voltage	Pattern 1		Pattern 2
Actuator	Lower	Upper	Lower
Fitness [%]	81.51	86.59	87.7

る．ここで，パターン 2 では電圧を相補的に与えたため，下側アクチュエータのみの結果を示している．結果において，パターン 1 では得られたデータが部分的である．これは，提案する変位拡大機構へ荷重を与えた際に機構の変形が事前に生じ，アクチュエータと機構の間の隙間が広がったためだと考えられる．一方で，相補的に電圧を与えるパターン 2 においては，すべての荷重条件において変位を計測できていることがわかる．また，このことから，提案する機構では同じ変位であっても異なる荷重に対応付けができる，すなわち，可変剛性が実現できると考えられる．

得られた実験結果に対して，3 次多項式で近似モデルを構築し，モデルパラメータの同定を行った．同定したモデルが描く曲面を図 5 に示す．また，図 5(a)～(c)に対する各モデルの適合率を表 1 にまとめる．表 1 より，すべての場合において適合率が 80%以上となっており，3 次多項式モデルはモデルとして比較的妥当であるといえる．

4. 動作モデルに基づくフィードフォワード制御

次に得られた動作モデルに基づいて，変位に対するフィードフォワード (FF) 制御器を構築し，実験により制御性能を検証した．実験環境は図 3 のものと同じものを利用した．検証において，次の 4 つの FF 制御器を比較した．

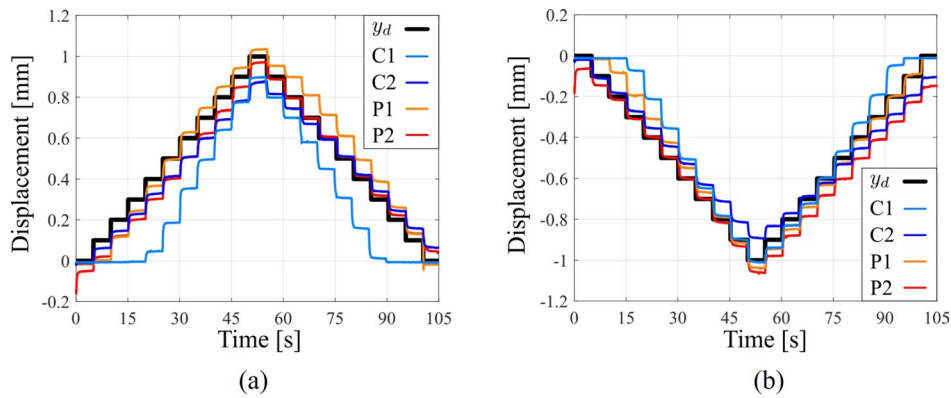


図 6. FF 制御の実験結果. (a)正方向駆動の結果. (b)負方向駆動の結果.

表 2. 片方向駆動におけるそれぞれの FF 制御器の RMSE

	RMSE [μm]	
	Positive	Negative
C1	197.1	86.59
C2	70.5	63.3
P1	69.1	52.9
P2	57.5	76.5

- Castigliano の第 2 定理に基づく FF 制御器

C1 : 片側のみを駆動させる FF 制御器

C2 : 相補的な電圧入力を加味した FF 制御器

- 3 次多項式モデルによる FF 制御器

P1 : 電圧パターン 1 の結果に基づく FF 制御器

P2 : 電圧パターン 2 の結果に基づく FF 制御器

ここで、C1 と P1 では片方のアクチュエータにのみ電圧を加えていることから、目標変位の範囲を正方向と負方向に分けて実験を行った。このとき、5s ごとに 0.1mm 刻みで目標変位を変化させながら、正方向では 0mm から 1mm までの範囲で、負方向では -1mm から 0mm までの範囲でそれぞれ往復させた。それぞれの FF 制御器について、無負荷の状態を実験を 3 回ずつ行った。また、収束後の制御性能を定量的に評価するために、評価指標として二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いることとし、目標値を切り替える直前の 1 秒間の結果から RMSE を計算した。

変位の制御結果を図 6 に、FF 制御器の RMSE を表 2 に、それぞれ示す。図 6 において、すべての FF 制御器で往路と復路の制御結果が異なることが確認できる。これは、圧電アクチュエータがもつヒステリシスの影響であると考えられる。また、図 6(a)の 0s から 20s までの範囲や 85s から 105s までの範囲で、目標値の変化に対して C1 の制御結果が変化していない。これは、予圧の調整を不要とするために設けたアクチュエータと機構の間の隙間によって、不感帯が生じたためと考えられる。同様に、多項式近似による P1 では、RMSE は小さいが、図 6(b)の 0s から 10s の範囲で不感帯の影響が確認できる。これらに対して、C2 や P2 では、RMSE が小さいことに加えて、不感帯の影響もまた見られない。このことから、相補的に電圧入力を印加することで不感帯の影響を低減できると考えられる。

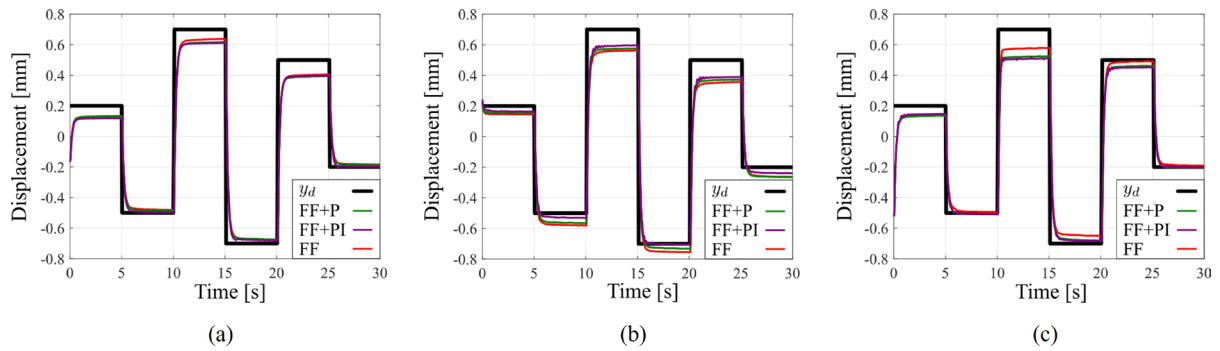


図 6. FF 制御器と 2 自由度制御器の比較実験結果. (a)荷重なし. (b)7N の荷重を印加. (c)-7N の荷重を印加.

表 3. 複数荷重条件下における FF 制御器と 2 自由度制御器の RMSE

	RMSE [μm]
FF	76.5
FF+P	72.7
FF+PI	63.7

5. 複数の荷重条件下における 2 自由度制御

次に、構築した FF 制御器 P2 を用いて、変位に対する 2 自由度制御器を構築し、実験により制御性能を検証した. 実験環境は図 3 のものと同じものを利用した. また、検証において、次の 3 つの制御器を比較した.

FF : FF 制御器のみ

FF+P : FF 制御器と P 制御の組合せによる 2 自由度制御器

FF+PI : FF 制御器と PI 制御の組合せによる 2 自由度制御器

フィードバック制御における比例ゲインと積分ゲインはそれぞれ $10[\text{V}/\text{mm}]$, $10[\text{V}/(\text{mm} \cdot \text{s})]$ とした. 荷重は 0N , $\pm 2\text{N}$, $\pm 4\text{N}$, $\pm 7\text{N}$ の 7 つの条件とした. それぞれの荷重条件下で目標変位を $0.2, -0.5, 0.7, -0.7, 0.5, -0.2\text{mm}$ の順に 5s ごとに変化させる試行を 1 試行として、3 試行ずつ行った. FF 制御実験と同様に、目標値を切り替える直前の 1 秒間の結果から計算した RMSE を評価指標として用いた.

図 7 に、結果の例として 0N , $\pm 7\text{N}$ の実験結果を示す. また、すべての荷重条件下での結果を踏まえた RMSE を表 3 に示す. 結果において、どの制御器においても双方向駆動が実現できていることがわかる. さらに、FF 制御のみの場合に比べて、どちらの 2 自由度制御器でも誤差を低減できることを確認した.

6. まとめ

本研究では、積層型圧電アクチュエータのための、予圧の調整を必要とせずに双方向駆動を実現できるコンパクトな変位拡大機構の開発を目的として、拮抗駆動後に変位を拡大する矢羽根状の機構を開発した. 開発した機構における変位・荷重・電圧の関係について、3 次多項式により動作モデルを構築した. 構築した動作モデルに基づき、FF 制御器や 2 自由度制御器を

設計し、実験により制御性能を検証した。さらに、実験を通して、開発した機構では双方向駆動が行えることを確認するとともに、可変剛性の実現可能性もまた確認できた。

本研究では、変位・荷重・電圧の関係を3次多項式としてモデル化したが、実際の動作にはアクチュエータのヒステリシスが影響する。そこで、今後の課題のひとつとして、より詳細なモデル化が挙げられる。また、可変剛性を実現するための各アクチュエータの制御方法についても今後の課題のひとつである。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) K. Onitsuka, A. Dogan, J. F. Tressler, and Q. Xu, and S. Yoshikawa, and R. E. Newnham, "Metal-ceramic composite transducer, the "moonie"," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 6, no. 4, pp. 447–455, 1995.
- 2) A. Dogan, K. Uchino, and R. E. Newnham, "Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps" cymbal", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 44, no. 3, pp. 597–605, 1997.
- 3) J. Ueda, T. W. Secord, and H. H. Asada, "Large effective-strain piezoelectric actuators using nested cellular architecture with exponential strain amplification mechanisms," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 15, no. 5, pp. 770–782, 2010.
- 4) J. Chen, C. Zhang, M. Xu, Y. Zi, and X. Zhang, "Rhombic micro-displacement amplifier for piezoelectric actuator and its linear and hybrid model," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 50–51, pp. 580–593, 2015.
- 5) W. Huang, J. Lian, D. An, M. Chen, and Y. Lei, "Bidirectional drive with inhibited hysteresis for piezoelectric actuators," Sensors, vol. 2, no. 4, 1546, 2022.