

静電フィルムアクチュエータを用いたロボットアームの開発

西嶋 隆 山本 晃生* 樋口 俊郎* 稲葉 昭夫

A Robotic Arm using Flexible Electrostatic Actuator

Takashi NISHIJIMA Akio YAMAMOTO* Toshiro HIGUCHI* Akio INABA

あらまし 静電フィルムアクチュエータを用いた2自由度ロボットアームを開発した。本静電フィルムアクチュエータはポリイミドをベースとしたFPC(Flexible Printed Circuit)基板で製作した移動子、固定子フィルムから構成され、軽量、高出力、柔軟という特徴を有している。これらの特徴をいかし、2種類のアクチュエータの構成を提案し、2自由度ロボットアームに適用した。アームは前腕部と上腕部からなり、上腕部はアームの構造をシンプルにするためにアクチュエータを柔軟に曲げた状態でアームの筐体内の隙間に配置し、前腕部はアームの軽量化のために、ギア類の力伝達機構を用いず、生物の拮抗筋を模擬したアクチュエータの配置とした。

試作した上腕部のアクチュエータと前腕部のアクチュエータはそれぞれ約23N, 10Nの推力を発生した。次に、アーム間接角を制御するフィードバック制御系を構成し、アーム回転運動のステップ応答を測定した。また、アクチュエータの優れたバックドライバビリティをいかし、ダイレクトティーチングによるPick and Placeタスクを実行した。最後に本アクチュエータをロボットに用いる際の有効性についてまとめる。

キーワード 静電気力, アクチュエータ, 柔軟, ロボットアーム

1. はじめに

近年、非製造業分野で用いられる民生用ロボットの開発研究^{[1][2]}や商品化が活発に行われており、今後その市場は拡大すると期待されている。このようなロボットが人間に対して行う作業にはさまざまなレベルがあると想定されるが、ロボットの運動性能の向上や使用する環境の安全性確保のためには、ロボットは必要最低限の重量であることが望ましい。

一般的にロボットには数多くのアクチュエータが配置されるため、ロボットの軽量化には軽量でパワーのあるアクチュエータの開発や効率的なアクチュエータの配置方法の考案が有効的な手段であると考えられる。

本研究で用いる静電アクチュエータ^[3]は、軽量、高出力、柔軟性^[4]を有する特徴がある。これらの特徴は、ロボットで多く用いられるシリアルリンク系のマニピュレータに応用する場合、様々な利点を見いだすことができる。

本報告では、柔軟な静電アクチュエータを利用したロボットアームを試作し、アクチュエータの性能評価やロボットアームの制御を行い、本アクチュエータをロボットに適用する際の有効性について議論する。

2. 静電アクチュエータの駆動原理

アーム駆動用に用いる静電フィルムアクチュエータは柔軟なFPC基板製の移動子、固定子フィルムで構成される。各フィルム内には電極幅100 μm の3相の帯状電極が200 μm ピッチで埋め込まれている。図1に一对の固定子、移動子からなる基本的な静電フィルムアクチュエータの概要図、図2に一对の移動子、固定子フィルムからなるアクチュエータの構造を示す。アクチュエータは2枚のフィルムの平行電極を対向させるように重ねて使用する。移動子と固定子の間には、フィルム間の摩擦低減のために直径20 μm のガラスビーズを散布し、フィルム間の空気

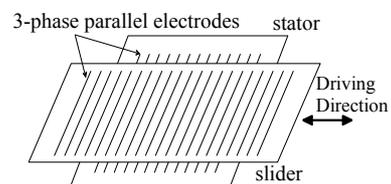


図1 静電フィルムアクチュエータの基本構成

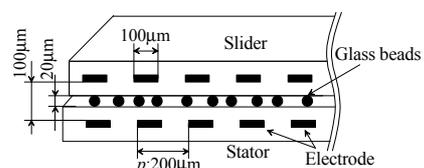


図2 アクチュエータの構造

* 東京大学大学院工学系研究科

絶縁破壊を防ぐためにシリコンオイル(SH200, 100cSt, 東レダウコーニング製)が満たされている。

駆動原理は 図3に示すように移動子と固定子の電極に3相電源を結線し, 3相交流電圧を印加することにより, 移動子と固定子には図中太線で示すような互いに逆方向に進行する電圧分布を励起させる。フィルム間には電位分布間の空間的な位相差に応じた静電電力が発生し, 移動子は固定子の表面上を電極の長さ方向と直角の方向に駆動する。本アクチュエータは同期モータであり, 移動子の移動速度 v は, 印加電圧の周波数 f , 電極ピッチ p を用いて次式で表される。

$$v=6pf \quad (1)$$

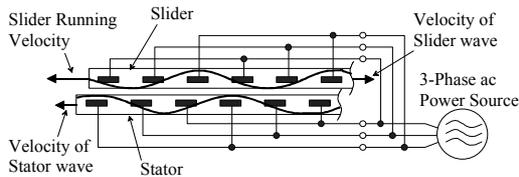


図3 駆動原理

3. 2 自由度ロボットアームへの適用

試作したロボットアームの全体写真を図4に示す。図5に構造の模式図を示す。アームの筐体は円筒状の亚克力製で, 機構は3つのリンクが回り対偶をなしている。アームの全長は500mm, 全体の重量は約320gである。アームは根本から上腕部, 前腕部, 最終リンクとする。図6に各関節の関節角を定義する。今回, 様々なアクチュエータの構成を検討するため, リンク1とリンク2内には異なる構成のアクチュエータを試作した。その構成と性能について述べる。

3. 1. 1 上腕部のアクチュエータの構成

上腕部に用いる静電アクチュエータの写真を図7に示す。フィルムサイズは移動子 $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 200\mu\text{m}$, 固定子 $160\text{mm} \times 80\text{mm} \times 200\mu\text{m}$, 重量は1枚あたりそれぞれ3.7g, 3.4gである。アクチュエータの配置方法は, 柔軟性を利用し, 筐体の内壁に沿わせて丸めた状態で配置する(図8)。筐体の内壁に沿わせることで, アクチュエータの移動子電極と固定子電極の重なる面積(有効電極面積)を大きくすることが可能となり, 推力を増大させることができる。さらに推力を得るために移動子と固定子の組を3セット積層している。また, 筐体内部のスペースには駆動用のベルトや電源供給用の配線を格納することが可能となり外見上シンプルとなる。上腕部の重さは約165gであり, 上腕部と前腕部のリンクの回転範囲はおおよそ ± 35 度である。

3. 1. 2 前腕部のアクチュエータの構成

前腕部の移動子と固定子に用いるフィルムは同形状で, サイズは $20\text{mm} \times 80\text{mm} \times 200\mu\text{m}$, 重量は1枚あたり0.6gである(図9)。アクチュエータは移動子と固定子の5組を積層し, 図10に示すように生物の拮抗筋を模擬している。駆



図4 ロボットアームの全体写真

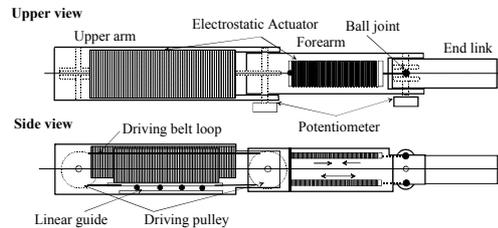


図5 ロボットアームの機構

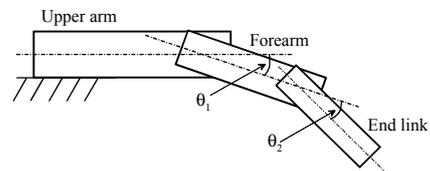


図6 各関節角の座標定義

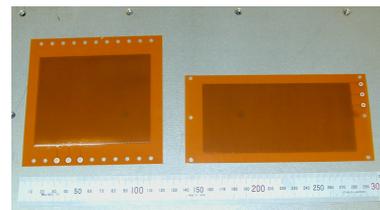


図7 上腕部に用いたフィルム
移動子 (左) 固定子 (右)

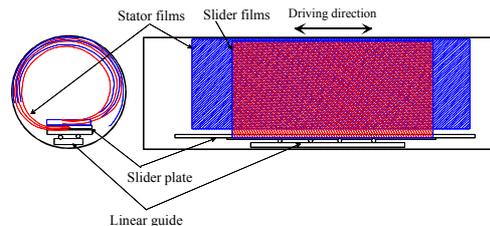


図8 曲げた状態で配置されたアクチュエータ

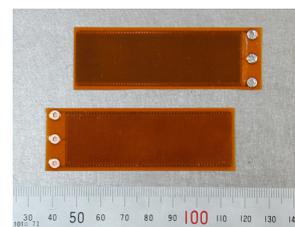


図9 前腕部に用いたフィルム

動時には 2つのアクチュエータは互いに逆方向の伸縮運動をする。アクチュエータは最終リンクに対して, 回転半径15mmの位置でボールジョイントを介して連結され,

トルクはアクチュエータの収縮時に得ている．アクチュエータの構成上，駆動時にはアクチュエータが伸縮するため有効電極面積は変動する． $\theta_2=0$ 度の状態で，2つのアクチュエータの有効電極面積は等しく 40cm^2 となり， $\theta_2=60$ 度の状態で，アクチュエータの有効電極面積は伸び側は 27cm^2 ，縮み側は 53cm^2 である．前腕部の重さは約 140g ，リンクの可動範囲は ± 60 度である．

3.2.1 上腕部のアクチュエータの推力

丸めた状態の積層形アクチュエータの推力は，積層数の増加に伴い，フィルム間の摩擦による損失が増加すると考えられる．そのため，積層数が1~3の3種類を用いて推力測定実験を行った．推力の測定方法は分銅を鉛直方向につり上げる方法を取り，推力と印加電圧の関係を調べた．なお，駆動速度は 3mm/s とした．図11に各積層数における有効電極面積 1cm^2 あたりに発生する推力と印加電圧の関係を示す．

図11から，積層数が増加しても単位面積あたりに発生する推力はあまり変化せず，摩擦による損失は少ないと考えられる．

試作機の上腕部は3層のアクチュエータを用いており，有効電極面積は駆動中一定で約 150cm^2 である．アクチュエータは，印加電圧が 1600V_{0-p} の時に約 23N の推力を発生する．回転軸には半径 15mm のプーリを介してトルクに変換するため，トルクは $34.5\text{N}\cdot\text{cm}$ となる．

3.2.2 前腕部のアクチュエータの推力

前腕部に用いるアクチュエータ単体の推力を測定した．実験では，有効電極面積が 30cm^2 ， 40cm^2 ， 50cm^2 ， 60cm^2 の時の推力を測定した．結果を図12に示す．結果から，推力は有効電極面積にほぼ比例するといえる．回転トルクは，機構上，回転軸の角度によって変動し， $\theta_2=0$ 度の位置で，印加電圧 1600V_{0-p} 時には約 $9\text{N}\cdot\text{cm}$ となる．

4. ロボットアームの制御

4.1 ステップ応答

各関節角を制御するフィードバック制御系を構成し，ステップ応答を測定した．本アクチュエータはモータ組み込み式の静電容量型位置センサを併用して無脱調制御が可能である^[5]が，今回は単に印加電圧の周波数を制御し，移動子の速度を制御する方式をとった．

制御システムはDSPボードDS1104 (dSPACE.Inc.製)とMATLABシステム(MathWorks.Inc.製)を用いた．図13に制御系のブロック図を示す．検出された各関節の角度は，目標値と比較し，偏差をPDコントローラに送る．PDコントローラの出力によって3相交流信号の周波数を変化させる．3相交流信号はアンプで1000倍し，アクチュエータに印加される．アクチュエータの脱調を防ぐために，周波数リミッタをPDコントローラと3相発信器の間に設け最大 41.7Hz (移動子速度 50mm/s)とした．上腕部，前腕部とも同じ制御系を用いた．

図14及び図15はそれぞれ上腕と前腕の回転動作のステ

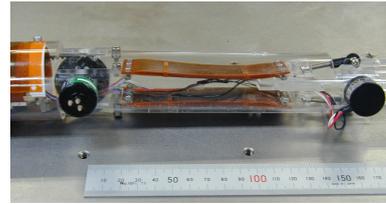


図10 拮抗筋を模擬した前腕部のアクチュエータ

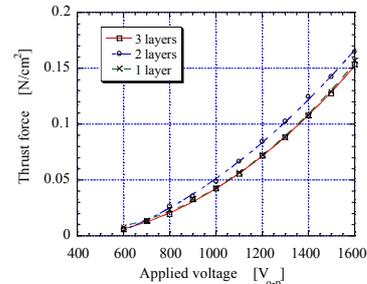


図11 積層数による推力と印加電圧の関係 (上腕部)

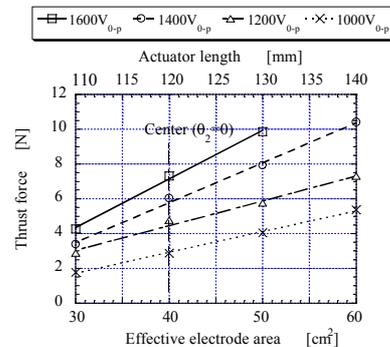


図12 有効電極面積と推力の関係 (前腕部)

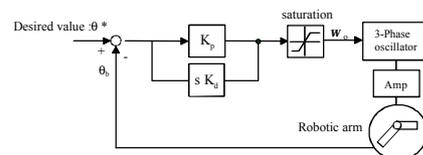


図13 アームの制御系 (前腕部，上腕部)

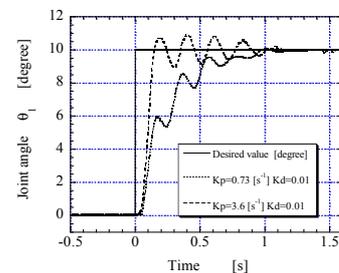


図14 ステップ応答 (上腕部)

ップ応答を示す．各関節は初期位置 ($\theta_1=\theta_2=0$ 度) から目標値 ($\theta_1=\theta_2=10$ 度) へ駆動している．実験は無負荷の状態状態で駆動電圧は 1kV とした．

前腕部のステップ応答は，目標値に 0.5 秒以下で追従することが可能であることがわかる．一方，上腕部のステ

ップ応答は上腕部と比較して振動的であることが認められる。この原因は、上腕部は前腕部が負荷となることや、ドライビングベルトの撓みやロボット構造の剛性によるものと考えられる。

4.2 ダイレクトティーチング

試作したロボットアームを用いてダイレクトティーチングによるプレイバック動作を行った。本アクチュエータはダイレクトドライブであり減速ギアを有していないため、アクチュエータに電力を供給していない状態では動作が自由である特徴がある。そのため、アーム動作のティーチングが容易である。

アクチュエータに電圧を印加していない状態では、上腕部と前腕部の摩擦トルクはそれぞれ2.1N/cm, 2.4N/cmであり、非常に少ない。

ティーチング内容はPick and Placeタスクとした。タスクの手順は以下のとおりである(図16)。

1. アーム先端に取り付けられたフックで下段に置かれているブロックを吊り上げる。
2. 上段の棚を回避しつつ、ブロックを上段の棚へ運ぶ。
3. ブロックを上段の棚に載せ、フックを外す。
4. 初期位置にアームを戻す。

ティーチング時は、2つの間接に取り付けられたポテンショメータ出力の値を時系列で記憶する。データのサンプリング周期は0.1秒とした。

プレイバック時の様子を図17に示す。ティーチング時とプレイバック時の各関節角度を図18示す。図18に示すように再現性良く作業をおこなうことが可能であった。

5. まとめ

以下に試作したロボットアームによって示された、静電フィルムアクチュエータの特徴をまとめる。

1. 薄型、柔軟であり、変形した状態で駆動できるため、狭い場所に組み込むことが可能である。
2. 非常に軽量であるため、シリアルリンク機構において負荷が軽減される。
3. 減速機が要らないため、アクチュエータ自身のバックラッシュがなく構造が単純である。
4. 電圧を供給していない状態において、アクチュエータは外力によって自由に動かすことが可能である。
5. 大きな外力がアクチュエータに加わっても、アクチュエータが破壊されることが無い。

5番目の項目は、民生用ロボットなどのように人間に接する用途で使われる場合に要求される項目であるといえる。

今後は柔軟な静電フィルムアクチュエータを用いたエンドエフェクタの開発などを行う予定である。

文献

[1] Cynthia Breazeal and Brian Scassellati, "Robots that imitate humans", Trends in Cognitive Sciences, Volume 6, Issue 11, 1 November 2002, pp. 481-487

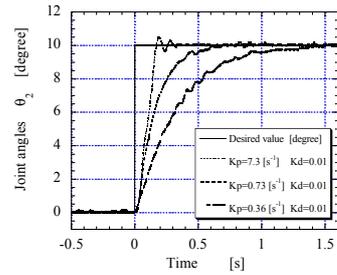


図15 ステップ応答(前腕部)

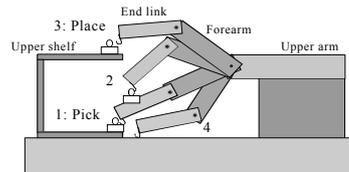


図16 Pick and Place taskの手順

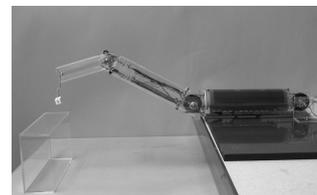


図17 プレイバック中の様子

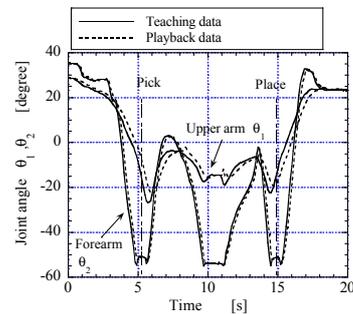


図18 各関節角の変化
(ティーチングしたデータと実際の出力)

[2] 柴田崇徳, “人とロボットの身体的インタラクションを通じた主観的価値の創造? アザラシ型メンタルコミットロボットの研究開発?”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.200-203,2000.

[3] 新野俊樹, 樋口俊郎, 柄川索 “交流駆動両電極形静電モータ”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp97-102, 1997

[4] 西嶋隆, 山本晃生, 樋口俊郎, 稲葉昭夫 “柔軟な構造を有する静電フィルムアクチュエータの開発 - 推力特性評価 - ”, 精密工学会誌, Vol.69, No.3, pp443-447, 2003

[5] A.Yamamoto, T.Niino, and T.Higuchi, “Servo Control of High-Power Electrostatic Linear Motor” in *Proceedings of the ICMT'99*, 1999,pp.274-279