

ロボット関節用静電クラッチのインピーダンス制御

西嶋 隆 山本晃生* 樋口俊郎* 稲葉 昭夫

Impedance Control of Electrostatic Clutch for Robotic Joints

Takashi NISHIJIMA Akio YAMAMOTO Toshiro HIGUCHI Akio INABA

あらまし ロボットマニピュレータの衝突安全性の確保のために、回転型静電モータを用いて、様々な機械的インピーダンスを実現する静電クラッチを開発した。従来研究において本静電クラッチは、保持力を印加電圧によって制御可能であり、過大な外力を空転することで逃がすことが可能なことや、静電気力を発生する駆動用電極を用いたビルトインエンコーダによって空転時の回転角度を検出できることが確認されている。本研究では、回転型静電モータを用いた静電クラッチを軸トルク情報から回転位置制御することで、様々な機械的インピーダンスを実現可能となった。同時にビルトインエンコーダを用いて静電モータ駆動時の回転角度の検出を試みたので報告する。

キーワード 静電気力、静電アクチュエータ、静電クラッチ、衝突安全性

1. 緒言

民生用ロボットの開発において、ロボットマニピュレータと人との衝突安全性の確保は重要な課題である。この課題は、ロボットマニピュレータに、適切な機械的インピーダンスを付加する方法で対処することができる。この方法は大きく二つに分類でき、一つは、ロボットマニピュレータにはね・ダンパ系の機械要素を直接取り付ける受動的な方法^[1]、もう一つは、各種センサ情報からアクチュエータを駆動し、ばね・ダンパ要素が付加されたように制御する、能動的な方法が知られている。前者は、計算機が不要で、衝突等による急峻な入力に対する応答が優れているといえるが、機械的特性は機械要素によって決定する。後者は機械的特性を計算機によって変更可能である点や機械要素が必要でない点が長所であるが、計算の時間が必要で急峻な入力に適切な応答ができなくなる短所がある。

受動的な方法という観点から筆者らは、従来、両電極交流駆動形静電モータ^[2]をロボットマニピュレータのクラッチとして応用することを提案した。この静電クラッチは保持力を印加電圧で制御可能で、外力が最大保持力を超えると受動的にクラッチが空回りし、過大な外力を逃がす機能がある。また、このクラッチはビルトインエンコーダを構成可能で、静電気力を発生する駆動電極を用いて、回転角度を検出可能であることが確認されている^[3]。

本研究では、さらにこの静電クラッチの回転軸トルク情報から回転位置制御するインピーダンス補償器を設け、

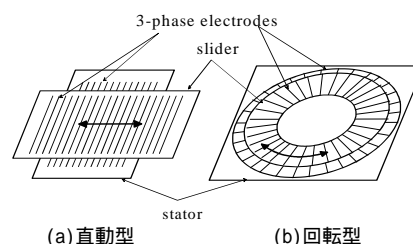
回転軸に様々な機械的特性を実現した。また、静電モータ駆動時の回転角度をビルトインエンコーダによって検出することを試みたので報告する。

2. 両電極交流駆動形静電モータ

2.1 基本構成

図1に両電極交流駆動形静電モータ(以下、静電モータ)の基本構成を示す。静電モータの基本構成はFPC(Flexible Printed Circuit)基板フィルムからなる一対の移動子・固定子フィルムで構成される。それぞれのフィルムの厚さは約200 μm であり、内部には帯状の三相平行電極が埋め込まれている。フィルム素材はポリイミド、電極は銅素材としている。

図1(a)は直動型モータの基本構成であり、図1(b)は帯状の電極を放射状に配置することにより、回転型とした基本構成である。駆動時は移動子・固定子を重ね合わせて用いるが、フィルム間の摩擦低減のために直径20 μm のガラスビーズやプラスチックビーズをフィルム間ギャップに散布する。静電モータの発生推力は印加電圧の2乗に比例しており、通常1kV程度以上の電圧で駆動するが、そのような高電圧を空気中で印加するとフィルム周辺の空気で絶縁破壊が発生する。そこで、それを防ぐために絶



(a)直動型 (b)回転型
図1 静電モータの基本構成

* 東京大学大学院工学系研究科

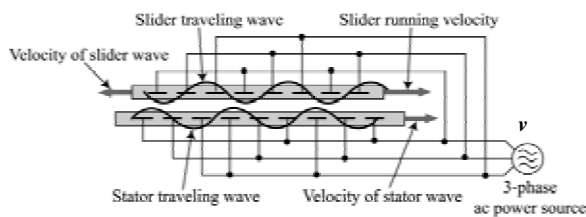


図2 駆動原理

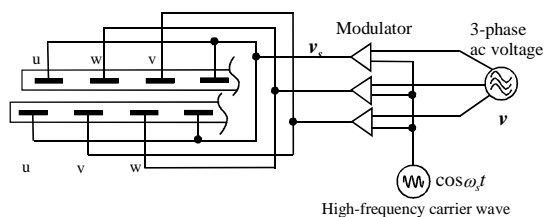


図3 変調駆動法

縁液(フロリナートFC-77 3M製,またはシリコンオイル)に浸した状態で使用する。

2.2 スキュー電極^[4]

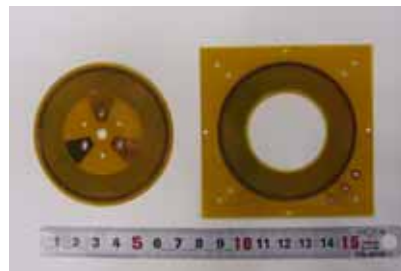
本静電モータは、移動子・固定子フィルム内の平行電極を互いに完全に平行に対向させた場合には、大きな推力リプルがあることが確認されている。そこで、推力リプルを低減する方法として、電極を斜めに配置するスキュー電極を用いる方法が考案されており、その最適な配置方法が解明されている^[4]。

本静電クラッチでは保持トルクが回転角度によって変動することを防ぐためにスキュー電極を用いている。

2.3 静電モータの駆動原理

図2に静電モータへの電源の結線方法を示す。静電モータは三相交流電源 $v = v_0 [\sin \omega_d t, \sin(\omega_d t - 2\pi/3), \sin(\omega_d t + 2\pi/3)]$ で駆動し、同図に示すように、移動子フィルムと固定子フィルムの帯状平行電極に対し、互いに逆順となるように結線する。三相交流電圧 v を印加すると、移動子・固定子フィルムには図中太線で示すような電位分布が励起され、それらは互いに逆方向に速度 $3pf$ で移動する。ここに p は電極ピッチ、 f は印加電圧周波数である。これら二つの電位分布には互いの空間的な位相差に応じた静電気力が働き、同期状態においては常に一定の位相差が保たれるように移動子が移動する。すなわち、二つの電位分布の相対速度がゼロに保たれるため、移動子は電位分布の速度の2倍の速度 $6pf$ で移動する。

基本的な駆動原理は前述したとおりであるが、モータを低速駆動もしくは停止保持する場合(印加電圧周波数が非常に低い場合)に推力が低下することが確認されている。そこで、これを解決する方法として、変調駆動法と呼ばれる駆動方法が考案されている^[5]。変調駆動法の模式図を図3に示す。変調駆動法では、駆動電圧の三相交流電圧を高周波数の搬送波 $\cos \omega_c t$ と乗算し、 $v_c = \cos \omega_c t v$ としてアクチュエータに印加する。この駆動方法では、通常の駆動方式と比べると、同一振幅時の発生推力が搬送波の実効値の2乗である1/2倍にまで低下するが、低速駆



Stator Slider
図4 静電クラッチ用静電フィルム



図5 静電クラッチの写真

動時や停止保持時の推力低下を回避することができる。本研究のように、静電モータをクラッチとして機能させるには、停止保持時の推力を保つ必要があるため、変調駆動法を用いる。

3. 静電クラッチ

3.1 固定子・移動子フィルム

図4に試作した静電クラッチの固定子・移動子フィルムの写真を示す。放射状に配置した電極は600本であり、電極間の中心からなす角度は0.6度、電極幅が中心からなす角度は0.3度である。各フィルムのドーナツ型の電極部分の内径と外形はそれぞれ40mm,60mmである。

3.2 試作機の製作

図5は、静電クラッチの写真を示す。静電クラッチのフレームはアクリル樹脂で試作した。フレームのサイズは幅92mm、奥行き92mm、高さ73mmである。

静電クラッチの回転軸には、ひずみゲージを貼り付け、クラッチ軸のトルク情報を得る。

今回、回転子フィルム10枚、固定子フィルム11枚を積層し推力を増大させた。移動子フィルムへの給電は回転軸にブラシを設け行った。また、ケース内には絶縁液(フロリナートFC77 3M製)を入れ、各フィルムは絶縁液に浸している。

4. 静電クラッチのインピーダンス制御

従来の静電クラッチは、ある角度で静止しており、過

大な外力が加わると受動的に回転軸が空回りすることで、過負荷による大きな力を逃し、空回りの角度を同時に検出するものであった。今回は静電クラッチを能動的に回転型アクチュエータとして用い、軸トルクを検出して様々な機械的インピーダンスを出力軸に実現する。なお、外力によるトルクが静電モータの生成する最大トルクを上回る場合は、従来のように受動的に空回りする。

4.1 制御方法

回転型静電モータを用いて、基本的なインピーダンス補償器を実装した。図6に装置全体のブロック図を示す。以下にその流れを示す。

静電モータの回転軸に取り付けられたひずみゲージから軸トルク τ を検出する。検出したトルクから所望の機械的インピーダンスを得るような回転角度 θ をインピーダンス補償器によって計算する。計算した値から静電モータの駆動信号を生成し、高電圧アンプで電圧を増幅して静電モータに印加する。

静電モータの変調駆動電圧は $1.5kV_{0,p}$ に固定し、変調駆動の搬送周波数は $100Hz$ とした。制御系と静電モータの駆動信号生成はMATLAB Simulinkシステム(Math-Works)とDSPシステム(DS1104,dSPACE)を用いて構成した。静電モータ駆動用の高電圧アンプにはAS-123(NF Corp)を用いた。

4.2 実験

4.2.1 インピーダンス制御

出力軸の特性はインピーダンス補償器の各パラメータで設定でき、ここではインピーダンス補償器の固有振動数 $\omega_n=1[sec]$ 、減衰比 $\zeta=0.1, 0.7, 1.0$ と設定した。実験方法は、静電モータ軸の固定プリー(直径68mm)に柔軟なワイヤロープを巻き、ロープの先に約80gの錘を取り付け、ステップ状の入力になるように、錘の自重による負荷を与えた。モータ軸の回転角度は回転軸にポテンシオメータ(JT-22-320-500 COPAL ELECTRONICS)を設けて測定した。図7(a)~(c)に各減衰比での、インピーダンス補償器からの目標値と実際の静電モータの回転角度を示す。結果から、減衰固有振動数や減衰の様子から設定したインピーダンス特性が得られていることが確認できる。

4.2.2 ビルトインエンコーダによる回転位置検出

従来のビルトインエンコーダは、静止中のクラッチを外力によって回転させたときの回転角度検出が可能であることが確認されている。今回は回転型静電モータが能動的に回転しているときの回転角度を同様の手法で検出できるか実験した。

実験ではインピーダンス補償器の減衰比 $\zeta=0.2$ 振動数 $\omega_n=1.0$ とし、外力(手動)によって回転軸を捻り、軸を離す時の挙動を測定した。図8には、そのときのインピーダンス補償器からの目標値とビルトインエンコーダの出力の結果を示す。

結果からビルトインエンコーダの出力から回転位置を検出可能であることが確認できた。しかしながら、実験

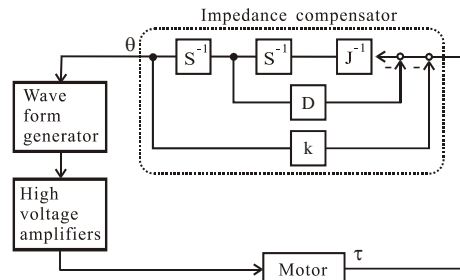
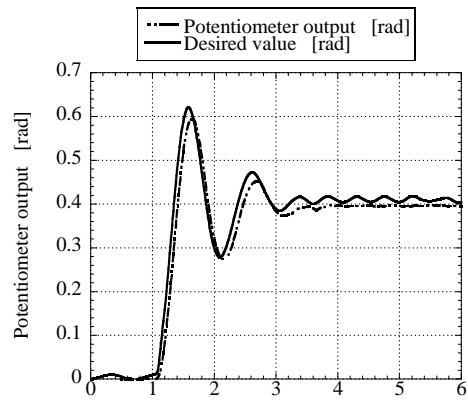
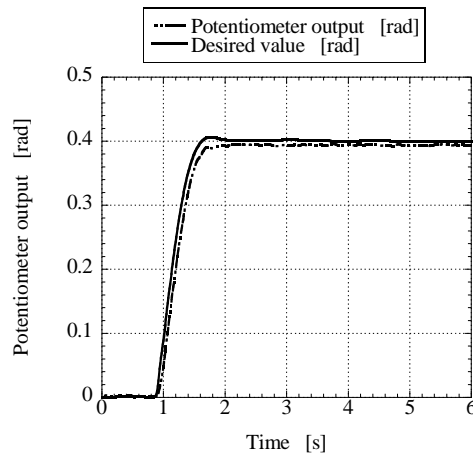


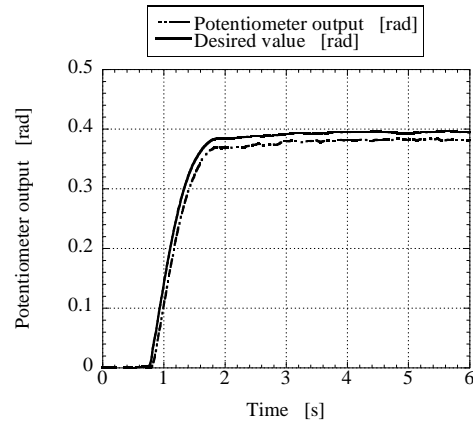
図6 装置全体のブロック図



(a) $\zeta=0.1$



(b) $\zeta=0.7$



(c) $\zeta=1.0$

図7 静電クラッチの出力特性

中に静電モータを駆動する高電圧電源からの電気ノイズがビルトインエンコーダの信号処理回路に影響を与え、検出位置に大きなドリフトが度々発生することが確認された。この対策として、ビルトインエンコーダ回路を構成するフィルタ回路やセンサ電流検出用トランスの設計を考察する必要があると考えられる。

5. まとめ

回転型静電モータを用いて、様々な機械的インピーダンスを実現することが可能な静電クラッチを開発した。試作した静電クラッチを用いて、様々な機械的特性を得ることが可能であることが確認された。ビルトインエンコーダを用いて回転角度の検出を試みたところ、回転位置は検出可能であることが確認されたが、駆動電圧の電気ノイズが原因と考えられる検出角度の大きなドリフトが確認された。ビルトインエンコーダの角度検出をより安定させるためには、エンコーダ回路の設計を考察する必要があると考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、機械設備購入のために補助金を頂いた日本自転車振興会に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 森田寿郎, 菅野重樹: メカニカルインピーダンス調節機構による関節制御 - 機構の提案とロボット指への適用 -, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp.131-136 (1996)
- [2] 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, pp.97-102, (1997)

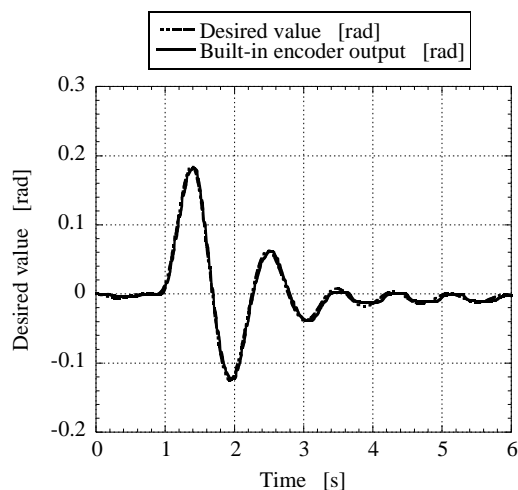


図8 インピーダンス制御したクラッチ軸出力と内蔵型エンコーダによる回転角度検出

- [3] 西嶋隆, 山本晃生, 樋口俊郎, 今井智彦, 稲葉昭夫: ロボット関節用静電クラッチの開発, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告第6号, pp.45-50, (2005)
- [4] 山本晃生, 新野俊樹, 坂高寿, 樋口俊郎: 電極の傾斜配置による静電モータの性能改善に関する解析, 電気学会論文誌D, Vol.117-D, No.3, pp.373-378 (1997)
- [5] 新野俊樹, 山本晃生, 樋口俊郎: 交流駆動両電極形静電モータの変調駆動, 電気学会論文誌, Vol.11, No.11, pp.1287-1291 (1998)