

ロボット関節用静電クラッチの開発

- 高齢者を支援するシステム(機器)に関する研究 -

西嶋 隆 山本 晃生* 樋口 俊郎* 今井 智彦 稲葉 昭夫

Development of an Electrostatic Clutch for Robot Joints

- System Design to support Welfare for the Aged -

Takashi NISHIJIMA Akio Yamamoto Toshiro Higuchi Tomohiko IMAI Akio INABA

あらまし 回転型静電モータを静電クラッチとして機能させることを提案した。本研究では、静電クラッチのプロトタイプを試作し、印加電圧によって保持力を調整可能であることを示した。また、静電クラッチの駆動用電極を移動子の回転角度を検出するセンサ用電極として併用する内蔵型のエンコーダを実装した。実験では静電クラッチの保持力と印加電圧の関係を調べ、1600Vの印加電圧で約16N・cmのトルクを生成した。内蔵型位置センサは静電クラッチを保持した状態から外力によって滑らせたときの回転角度を検出することが可能であることが確認され、その最大誤差は約0.28度となった。

キーワード 静電気力, 静電アクチュエータ, 静電クラッチ, 民生用ロボット

1. 緒言

近年、民生用ロボットの開発研究が活発に行われており、将来、少子高齢化による労働力不足をロボット技術によって補うことが期待されている。ロボットが人の周辺で活動する場合、ロボットと人の衝突安全性の確保は重要な課題である。この課題に対して、ロボットの外装に衝撃緩衝素材を装備する研究^[1]や、ロボットマニピュレータにMIA(Mechanical Impedance Adjuster)と呼ばれる機械的インピーダンスを制御する機械要素の研究^[2]がなされている。

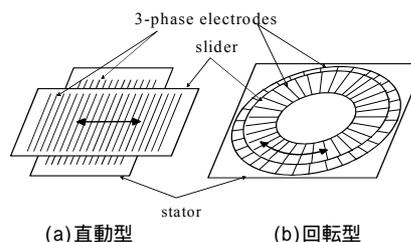
一方、筆者らはこれまでに、両電極交流駆動形静電モータ^[3]と呼ばれる静電モータを、ロボットに適用する研究を行っている。静電モータは軽量高出力、柔軟、ダイレクトドライブといった特徴を有しており、減速ギアを用いることなくロボットに組み込むことや、柔軟性をいかした配置が可能である。さらに、静電モータに内蔵型の位置センサ機能を付加することも可能である^[4]。

本研究では、ロボットの衝突安全のために、回転型の静電モータを保持トルクが制御可能な静電クラッチとしてロボットマニピュレータに適用することを提案する。今回は静電クラッチのプロトタイプを試作し、その保持トルクや静電クラッチのすべり角度を検出する内蔵型の静電容量式のエンコーダ性能について報告する。

2. 両電極交流駆動形静電モータ^[3]

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 μ m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。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 μ m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して動作させる。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气中で印加するとフィルム周辺の空気中で絶縁破壊が発生する。そこで、それを防ぐために絶縁液(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。



(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

2.2 スキュー電極^[5]

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平行に対向させた場合では、大きな推力リップルがあることが確認されている。そこで、推力リップルを低減する方法として、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^[5]。

今回も静電クラッチの保持トルクが移動子位置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た。

2.3 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 $v=v_0[\sin \omega_1 t, \sin(\omega_1 t-2\pi/3), \sin(\omega_1 t+2\pi/3)]$ 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^[6]。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 $\cos \omega_2 t$ と乗算し、 $v_e = \cos \omega_2 t v$ 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

今回試作した静電クラッチは回転型の静電モータと同じであり、クラッチを保持状態にする場合は、モータの駆動周波数 ω_1 をゼロにすることによって行う。

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。2.3節であらわした直動型モータにおけるピッチ p を回転型モータの回転ピッチ角 θ_p で表すと、 $\theta_p = 2\pi/600$ rad となり、印加電圧周波数 f で駆動した場合の回転角速度は $2\pi f/100$ rad/s となる。

図5は試作したスキュー電極の模式図を示す。スキュー

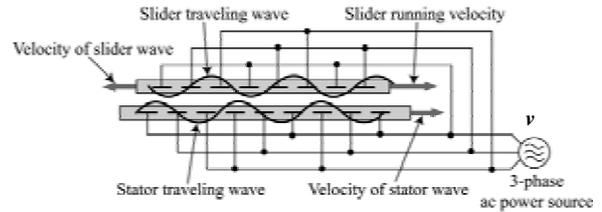


図2 駆動原理

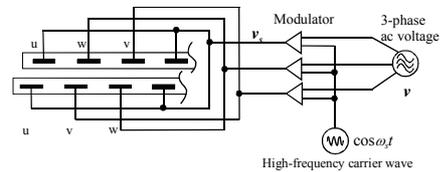


図3 変調駆動法

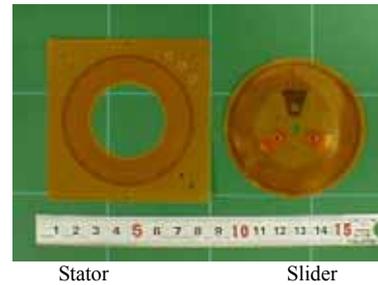


図4 静電クラッチ用静電フィルム

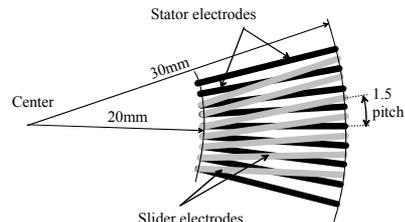


図5 スキュー電極の模式図

電極の配置は従来研究で推力リップルを低減するために最適な配置とした^[5]。移動子電極は固定子電極が完全に放射状に配置されているのに対し、固定子電極に対して傾いており、電極の長さ方向に渡って、固定子電極に対し1.5ピッチ分ずれて交差している。固定子電極と移動子電極の三相電極が対向する部分の内径と外径はそれぞれ40mm, 60mmである。

3.2 静電クラッチの組み立て

図6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。

静電モータの推力は固定子・移動子フィルムの対向する電極面積に比例するため、固定子・移動子フィルムを複数層積層することで推力を増大することができる。今回は、移動子フィルム10枚、固定子フィルム11枚を積層した。固定子フィルムの内径側の隙間と移動子フィルムの外側の隙間にはスペーサとして厚さ200μmのポリイミドフィルムを挟み、固定子・移動子フィルムの給電は積層する際に電極のランド間に導電性ゴムのリングを挿入

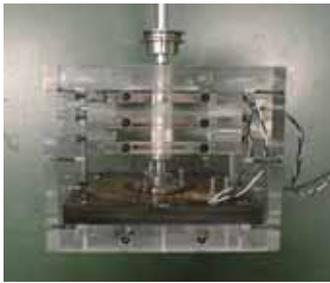


図6 静電クラッチ

し、ねじの締め付けによって行った。移動子フィルムは回転するため、給電は回転軸に取り付けられたブラシにより行った。フレーム内の移動子・固定子フィルムは絶縁液(フロリナートFC77 3M製)に浸した。

4. クラッチ内蔵型位置センサ

クラッチが保持トルクを上回る外力を受けた場合、クラッチはトルクリミッタとして機能するが、回転前の角度に復帰するためには、回転した角度を検出する必要がある。移動子の移動を検出する方法として、従来の研究において静電モータ駆動用電極を位置センサ用の電極として併用する方法が考案されており^[7]、今回もこの方式を用いてクラッチの回転角度を検出する内蔵型の位置センサを構成した。

4.1 原理

内蔵型位置センサの構成図を図7に示す。基本構成の静電モータ回路に入力トランスを介して高周波数の三相交流電圧(センサ信号)を駆動電圧に重畳し、出力トランスを介してセンサ信号を検出する。静電モータの三相電極で構成される静電容量は、移動子の位置に伴って変動するので、検出されるセンサ信号もまた、移動子位置で変化する。したがって、出力トランスの信号から移動子位置を検出できる。センサ信号の三相交流電圧 $v_s = v_s [\sin(\omega_s t), \sin(\omega_s t - 2\pi/3), \sin(\omega_s t + 2\pi/3)]$ を印加した時、回路に流れる電流 $i_s = [i_{us}, i_{vs}, i_{ws}]$ は次式で示される。

$$i_s = \frac{d}{dt}(Cv_s) \quad (1)$$

ここに、 C は静電モータの三端子間における 3×3 の静電容量行列である。静電容量行列の i 行、 j 列の要素 C_{ij} は電極 j に1Vの電圧を印加し、その他の電極を設置したとき

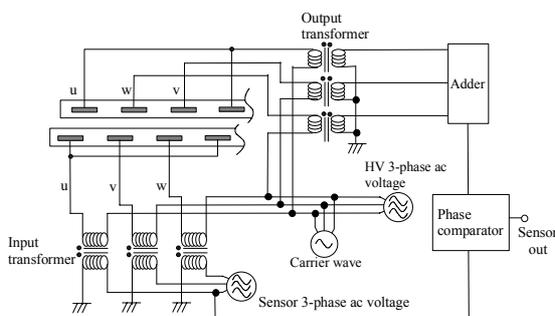


図7 内蔵型センサの概要図

に電極 i に誘導される電荷を示す。また、静電容量行列は対称行列となる。各容量係数は、電極の対称性を考慮すると移動子の電極が3ピッチ移動する毎に同じ値を示すと考えられる。したがって、計算の簡便のために移動子の回転角3ピッチ分を 2π とする電気角 θ_e を導入する。ここで、移動子回転角 θ とその電気角による表記である θ_e との関係は次式で示される。

$$\frac{2\pi}{3\theta_p} \theta = \theta_e \quad (2)$$

以上から、静電容量行列は次のように簡略化して表すことができる。

$$C = \begin{bmatrix} C_0 + C_2 \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & C_1 + C_2 \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ C_1 + C_2 \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & C_0 + C_2 \cos(\theta_e) \\ C_1 + C_2 \cos(\theta_e) & C_1 + C_2 \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 C_0, C_1, C_2 はモータの大きさや形状によって決まる定数である。センサ回路に流れる電流 i_s は式(1),(3)を計算すると以下ようになる。

$$i_s = \begin{bmatrix} i_{us} \\ i_{vs} \\ i_{ws} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cos(\omega_s t) + \beta \cos(\omega_s t - \theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \alpha \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) + \beta \cos(\omega_s t - \theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \alpha \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) + \beta \cos(\omega_s t - \theta_e) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 α, β は C_0, C_1, C_2 、センサ信号の電圧 v_s 、トランスによって形成されるインダクタンス L によって決まる定数である。

式(4)における各相の電流は第1項目と第2項目の和で表され、第2項には、移動子位置 θ_e の情報が含まれている。各相の電流は移動子の移動に伴って、位相と振幅が変動する。また、各相の第1項目を i_{u1}, i_{v1}, i_{w1} とし、第2項目を i_{u2}, i_{v2}, i_{w2} とすると、 i_{u1}, i_{v1}, i_{w1} と i_{u2}, i_{v2}, i_{w2} はそれぞれ、長さが等しく、かつ3相の位相が 120 度ずつずれているため、

$$i_{u1} + i_{v1} + i_{w1} = 0 \quad (5)$$

$$i_{u2} + i_{v2} + i_{w2} = 0 \quad (6)$$

であり、各相の電流の和は

$$i_{us} + i_{vs} + i_{ws} = 0 \quad (7)$$

となる。つまり、三相の電流を加算するとゼロとなり、単純に加算しただけでは、移動子の位置情報を得ることができない。この電流の加算の様子を図8のフェーザ図に示す。このため、移動子の位置情報を得る方法として、各相の電流の振幅を規格化してから加算する、すなわち、各位相の電流の位相成分のみを加算し、加算後の位相情報を得る(図9)。各電流振幅を規格化した後に加算して得

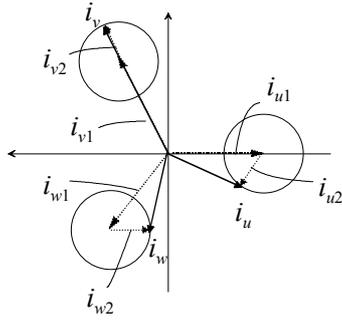


図8 電流の加算の様子

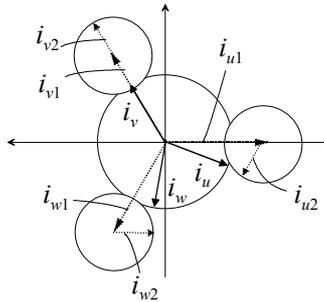


図9 振幅を規格化された電流様子

られる電流の位相は、センサ信号の三相交流電圧の位相に対して、移動子位置 θ_e が1周期（3ピッチ分の回転）毎に、360度回転するベクトルとなる。したがって、これらの位相を比較することで回転角度を得ることができる。

4.2 センサ回路の試作

・静電容量行列の測定

センサ回路を構成するにあたり、試作した静電クラッチの三端子によって構成される静電容量行列を求めた。

静電容量行列の各要素はインピーダンスアナライザを用いて測定することができる。静電クラッチをインピーダンスアナライザに接続した模式図を図10に示す。ここで、インピーダンスアナライザに接続した静電モータの三端子に印加する電圧とそのときに流れる電流をそれぞれ $v_a=[v_{ua}, v_{va}, v_{wa}]$ 、 $i_a=[i_{ua}, i_{va}, i_{wa}]$ とする。

容量係数行列の対角成分を求める場合は、図10(a)に示すようにひとつの端子のみを測定器のH端子に、他の端子を測定器のL端子に接続する。この場合、モータの三端子電圧 v_a は次のようになる。

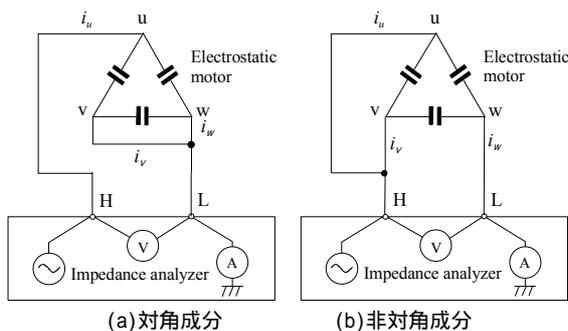


図10 容量係数の測定方法

$$v_a = v_m R^t \tag{8}$$

ただし、 v_m はインピーダンス測定器の電圧印加端子（H端子）の電圧、 R はインピーダンス測定器のH端子に接続する端子を1、それ以外を0で示した行ベクトルである。例えば図10(a)の場合では $R=[1,0,0]$ となる。この時、インピーダンス測定器のL端子に流れる電流 i_m は、 i_a を用いて次式で表せる。

$$i_m = R i_a \tag{9}$$

したがって測定されるインピーダンス Z は、

$$Z = \frac{v_m}{i_m} = \frac{1}{R(j\omega_m C)R^t} \tag{10}$$

となる。ここに ω_m は v_m の角周波数である。図10(a)の結線では、測定されるインピーダンス Z は式(11)となるため、これにより、対角成分 C_{11} の値を得ることができる。

$$Z = \frac{1}{j\omega_m C_{11}} \tag{11}$$

次に、非対角成分を求める場合の結線方法を図10(b)に示す。この場合の R ベクトルは $R=[1,1,0]$ であり、インピーダンスは式(10)より、 C が対称行列であることを考慮して

$$Z = \frac{1}{j\omega(C_{11}+C_{12}+C_{21}+C_{22})} = \frac{1}{j\omega(C_{11}+2C_{12}+C_{22})} \tag{12}$$

となる。すなわち、図11(b)の結線においては $C_{11}+2C_{12}+C_{22}$ の値が得られ、すでに求めた対角成分の値を用いて、非対角成分 C_{12} を求めることができる。

測定では、移動子の回転角度を回転ステージによって1/6度ずつ回転させながら測定した。結果を図11に示す。得られた結果から、各容量係数は θ_e に対してフーリエ級数で近似できると考えられ、各成分をFFTによって同定

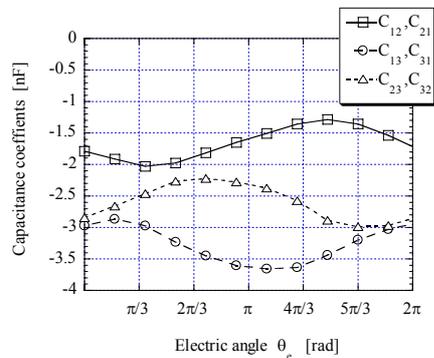
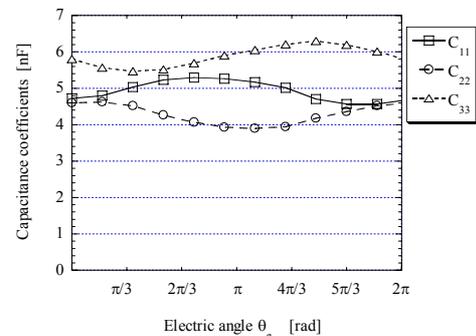


図11 容量係数

した．各成分を以下に示す．単位はnFである．

$$C_{11}=4.94+0.38\cos(\theta_e-2\pi/3)$$

$$C_{22}=4.23+0.37\cos(\theta_e)$$

$$C_{33}=5.88+0.39\cos(\theta_e+2\pi/3)$$

$$C_{12}=C_{21}=-1.65+0.35\cos(\theta_e+2\pi/3)$$

$$C_{13}=C_{31}=-3.27+0.40\cos(\theta_e)$$

$$C_{23}=C_{32}=-2.60+0.39\cos(\theta_e-2\pi/3)$$

結果を式(3)におけるモデルと比較すると、式(3)の C_0, C_1, C_3 の値が完全に同じとなっていない．これはモデルでは三相電極配置が理想的に対称に配置されているとしているが、実際は三相電極は完全に対称ではなく、駆動に寄与しない電極基板上の集合線などによる静電容量などによるものであると考えられる．

・センサ回路

本センサ回路では、入力トランス、出力トランスにスイッチング電源用フェライトコア(PQ40/40コア,TDK製)を用い、入力トランスの1次、2次巻き数を43ターン(約8mH)、出力トランスの1次、2次巻き数を9ターン(約390μH)とした．センサ用の三相交流電圧の周波数は218kHzとした．

図12、図13に、出力トランスからの信号の処理方法を示す．まず、図12に示すように、出力トランスの三相の出力をコンパレータによって矩形波に変換し振幅を規格化する．これらを加算器で加算し、センサ信号の周波数帯のバンドパスフィルタで波形を整え、再びコンパレータによって矩形波に変換する．この矩形波とセンサ用の三相交流電圧のいずれか一つの信号(リファレンス信号)をコンパレータによって矩形波に変換した波形の位相と比較することで移動子の位置を検出する．位相比較器

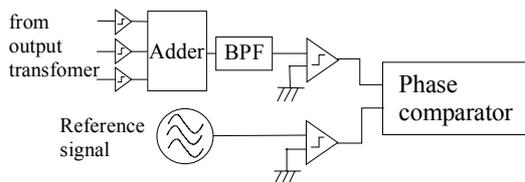


図12 センサ信号とリファレンス信号の矩形波の生成

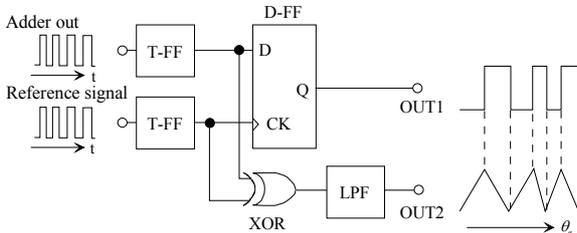


図13 位相比較器

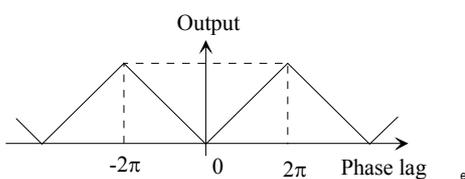


図14 センサの出力信号

13)では、まず、それぞれの信号をT-FFによって2分周することでデューティ比を正確に50%に整える．これは、加算器からの信号に歪があるため、それを矩形波にした信号のデューティ比が正確に50%では無いからである．その後これらの排他的論理和をとり、位相比較を行う．排他的論理和の出力をローパスフィルタ(カットオフ周波数20kHz, 8次)に通した後の信号は、図14のように θ_e の位相が $-2\pi \sim 0$ と、 $0 \sim 2\pi$ で同じ値をとるため、これらを区別するために、D-FFによって二つのパルスの位相関係を検出する．この回路では、センサ信号とリファレンス信号を2分周しているため、出力は θ_e に対して 2π (3ピッチ分の回転)ではなく、 4π (6ピッチ分の回転)毎に繰り返す．このOUT1とOUT2の出力をマイクロコンピュータなどを用いて処理することにより、回転角に対して連続的に出力を得ることができるエンコーダ回路を得ることができる．

5. 実験

5.1 静電クラッチの保持トルク測定

試作したクラッチの保持トルクを測定した．測定方法は、クラッチの回転軸に取り付けたプーリーに紐を巻き、毎秒3.6度の回転速度になるようにXステージを用いて紐を引き、紐の張力を微小荷重ロードセル(LVS-2KA,共和電業)によって測定し、静電クラッチのトルクを得た．測定条件としてクラッチの駆動印加電圧を800V~1600V、変調駆動の搬送波 ω_c を100Hzとした．測定では、クラッチの滑りが生じた瞬間に紐の張力が急激に減少するため、センサ出力は時間に対して、のこぎり状の波形を示す．図15はのこぎり状波形の最大点をサンプルしたもので、静電クラッチの最大保持力を示している．

結果から、本静電クラッチでは、駆動電圧に応じて保持トルクを調整することが可能であり、変調駆動による印加電圧が1600V_{0-p}の時に約16N・cmのトルクを発生することが確認された．また、時間が経過してもトルクが減少することなくほぼ一定に保たれることが確認された．

さらに大きな保持トルクが必要な場合は、移動子・固定子フィルムの積層数を増やすことによって対応可能であると考えられる．

5.1 静電クラッチの回転角度検出

静電クラッチ内蔵型のエンコーダの実験を行った．実験では最初に、静電クラッチの駆動電圧を0Vの状態に、クラッチを手動で回転させた状態での出力を測定した．結果を図16に示す．グラフ横軸は時間、縦軸はセンサ出力を示す．4.2節で述べたように、センサ出力の三角波形の谷から谷の間隔は放射状電極6ピッチ分の角度(=6×0.6度)の回転を示している．本実験では、回転角速度は手動であるため正確には一定ではないが、クラッチを保持しておらず回転が滑らかであるため、瞬間的にはほぼ一定であると考えられる．この仮定のもとに考察すると、センサ出力は回転角度に対してほぼ線形であり、最大誤

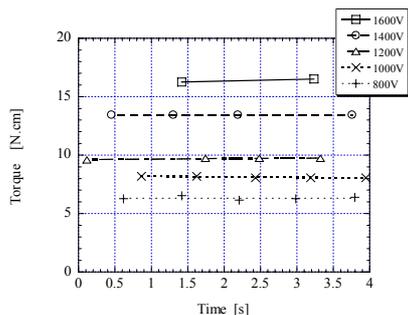


図15 各印加電圧時における保持トルクと時間の関係

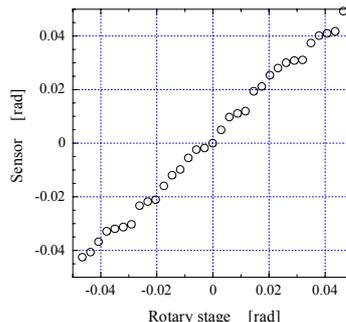


図18 センサ出力（印加電圧1000V時）

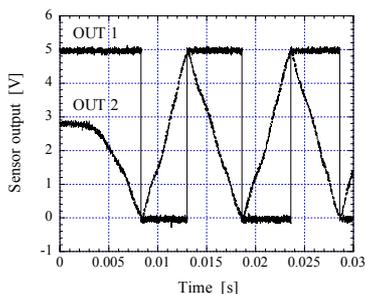


図16 手動回転によるセンサ出力（印加電圧0V時）

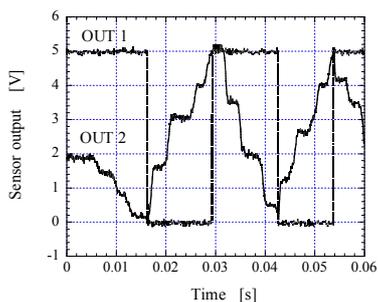


図17 手動回転によるセンサ出力（印加電圧1000V時）

差は約0.23度と見積もることができた。

次に、変調駆動電圧 $1000V_{0-p}$ とし、クラッチを保持した状態(駆動電圧周波数は0Hz、変調波の周波数を100Hz)で、手動で静電クラッチを脱調させた場合のセンサ出力を図17に示す。回転動作は、停止と滑りが小刻みに起きるため、出力は駆動電圧がゼロの場合と比べて直線的でないことが確認できる。この状態でのセンサ性能を調べるために、同一駆動電圧条件で、静電クラッチの回転軸を回転ステージのダイヤルゲージによって1/6度(0.0029 rad)ずつ回転させながらセンサ出力を測定した。図18に回転ステージの読みに対するセンサ出力の関係を示す。横軸に回転ステージによる回転角、縦軸にセンサ出力から回転角度を計算した値を示す。センサ出力は回転ステージの読みに対し、最大誤差は約0.28度となった。

6. まとめ

回転型の静電モータを用いて、静電クラッチとして機能させることを提案した。静電クラッチの駆動用電極をセンサ用電極として併用する内蔵型位置センサについて

述べ、試作した静電クラッチの性能を評価した。実験では、静電クラッチの保持トルクを印加電圧によって調整することが可能であり、1600Vの変調駆動電圧時に約16N・cmの保持トルクが得られた。内蔵型位置センサは、静電クラッチの回転角度を検出可能であることが確認され、1000Vの印加電圧で保持した状態で脱調した時の角度検出では、回転ステージの読みに対して最大誤差が約0.28度となった。

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, 鈴木雄一郎, 川崎毅彦, 菅野重樹: 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.102-109(1998)
- [2] 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)
- [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, pp.97-102, (1997)
- [4] A.Yamamoto, T.Niino, T.Higuchi: Servo Control of High-Power Electrostatic Linear Motor, Proc. ICMT'99, pp.274-279, 1999
- [5] A.Yamamoto, T.Niino, T.Ban, T.Higuchi: Performance Improvement of Electrostatic Actuators by Skewing Electrodes, Proc. IEEE IAS 31st Annual meeting, pp.1980-1985(1996)
- [6] 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)
- [7] A.Yamamoto, H.Yasui, T.Nishijima, T.Higuchi: Electrostatic Linear Servo Motor with Built-in Position Sensor for Vacuum Environment, Proc. ISIS'2003 CDROM(2003)

