

氏名	山本晃生
所属機関	東京大学 大学院工学系研究科 ・ 精密工学専攻 ・ 准教授
研究題目	次世代情報機器のための静電気力を用いた普通紙ハンドリング機構の研究

1. 研究の目的

本研究では、静電気力を用いて普通紙をハンドリングする薄型・軽量のデバイスの実現を目的とする。情報技術の発展に伴いペーパーレス時代が到来すると言われてきたが、紙の高い利便性・汎用性ゆえに紙は未だに広く利用されており、プリンタやスキャナなど紙を扱う情報機器に対する需要も依然として高い。こうした情報機器では摩擦ローラを用いて紙の搬送を行うのが一般的であるが、摩擦ローラに代えて静電気力で紙をハンドリングできれば、極めて小型・薄型な紙搬送機構が実現できる。

静電気力で紙を搬送する技術はこれまでも提案されてきたが、搬送できる紙の表面抵抗率に制約があり、情報機器に用いられる普通紙(PPC用紙)の搬送は困難であった。そこで本研究では、従来方式とは異なる「静電誘導駆動」の原理に基づく紙搬送技術を研究対象とする。本方式では、普通紙の搬送も可能と期待できるが、搬送力が小さいことから安定性に欠ける問題がある。より安定な搬送を実現するために、電極構造による駆動特性の違いを明らかにするとともに、軽量・薄型なデバイス実現のために、スクリーン印刷技術の適用による電極の製作を検討し、情報機器への適用の可能性を検討する。また、情報機器への応用に際しては、搬送対象とする紙の位置を検出する技術が重要となる。そこで、搬送用電極基板と紙との間の静電容量変化をもとに、デバイス上の紙位置をダイレクトに検出する紙位置センシング技術を開発することをめざす。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

2-1. 静電誘導による紙送り機構

本研究における紙送り機構の構成を図1に示す。主たる構成要素は、3相帯状電極群が内部に構成されたプラスチック基板である。電極群は、電極幅が数百 μm ~1mm程度の直線状電極を、電極幅の倍程度の配列ピッチで多数配列し、3相構造を成すように電気的に配線したものであり、その表面は絶縁膜により覆われている。3相電極に周波数が数十~数百Hz、電圧振幅が数百~1kVの3相正弦波電圧を印加すると、基板表面近傍に進行する正弦波状の電圧分布が形成される。電圧分布が生じている基板上に紙を配置すると、紙表面の導電性により紙表面には基板の電圧分布に対応した電荷分布が誘導される。電荷分布は電圧分布の進行に引きずられて同速度で移動するが、紙表面には電荷の移動を妨げる抵抗があるために、それにより紙に対して分布進行方向への静電気力が発生し、紙が基板上を移動する。紙と電極との間には、進行方向のみならず吸引方向(基板の法線方向)にも静電気力が発生し、基板と紙との間に摩擦力を生じる。この摩擦力を十分に低減することが安定な駆動には重要であり、本研究では基板上に微細なガラスビーズを少量散布することで、摩擦の低減を図っている。

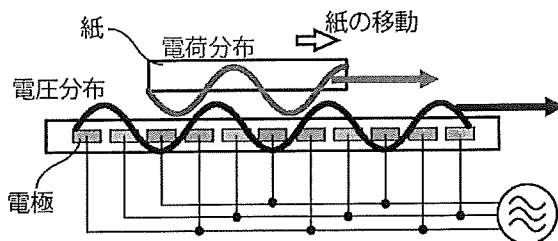


図1 静電誘導による紙送り機構(断面模式図)

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

2-2. 紙送り特性の検討

過去に提案されている静電紙送り技術では3相電極を用いた例が多く、本研究においても当初は上記の3相電極による構成を想定した。しかし、これは駆動装置構成や電極製作の簡便さによるものであり、性能の観点から選ばれたものではない。そこで、異なる電極相数を用いた場合の搬送特性を評価した。

本デバイス上では、電圧印加により紙が加速し、数十ミリ秒程度で定常速度に達する。この定常速度を評価指標とし、電極相数による性能差を評価した。実験に用いた電極は3相、4相、6相、8相の4種類であり、いずれもピッチと相数の積が3.6mmとなるよう設計した。たとえば、6相基板では電極ピッチは0.6mmである。これにより、電圧分布の波長は全ての基板で共通となり、また、同一周波数印加時の電位分布速度も共通となる。それぞれ相数に等しい数の高電圧アンプを用意し、 n 相電極に対しては、相間の位相が $360/n$ 度の n 相正弦波を印加した。

測定結果を図2に示す。搬送対象の紙はPPC普通紙であり、実験環境における表面抵抗率は約 $10^{11}\Omega$ であった。印加した正弦波の電圧振幅は $800V_{0p}$ である。図2の結果より、搬送特性は電極相数により大きく異なることがわかる。この性能の違いは、基板表面近傍に形成される電圧分布形状の違いに依存するものと考えられる。前述の原理説明では、電極表面には正弦波状の電圧分布が形成されると仮定しているが、導体の性質から同一電極上の電位は一定であるため、実際に形成される電圧分布は、図3に示すように歪んだ形状となるはずである。一般に静電搬送の発生力は印加電圧の2乗に比例することが知られていることから、図3の波形に含まれる基本波成分の振幅の2乗を考慮することで、搬送性能の差を説明できる可能性がある。基本波成分の振幅の2乗値を、実験で得られた最大搬送速度と合わせて図4に示す。両者の間には良い相関が見られ、基本波の振幅に着目することで搬送性能の違いを説明できる可能性が示唆された。同一振幅の正弦波を印加した場合における、各相数での基本波振幅を計算すると、3相、4相、6相の電極では基本波振幅に大きな差があり、それが搬送性能の差となって現れている。

一方で、6相以上の電極については、相数を増やしても基本波振幅に大きな差は生じない。実験結果において6相と8相に大きな差が見られないのは、このためと考えられる。実験では、装置の制約により8相までの電極を評価したが、この考察から6相を超える電極相数では、どれだけ電極相数を増やしても搬送性能の向上は見込めないと予測できる。実用的には、電極相数が増大すると駆動装置コストも増大するため、搬送に最も適した相数は6相と結論できる。

搬送性能に優れることが明らかとなった6相電極を用いて搬送力の評価も行った。搬送力評価の実験では、実験環境の違いから、評価時の紙の表面抵抗率は $10^{13}\Omega$ であった。静電紙送りにおける搬送力は紙の面積に比例するが、搬送力評価の実験に用いたB5サイズ(182[mm]x257[mm])の紙での搬送力は100mN(約10gf)前後であった。これは、紙の単位面積あたりに換算すると、おおよそ $0.2mN/cm^2$ である。

搬送性能に優れることが明らかとなった6相電極を用いて搬送力の評価も行った。搬送力評価の実験では、実験環境の違いから、評価時の紙の表面抵抗率は $10^{13}\Omega$ であった。静電紙送りにおける搬送力は紙の面積に比例するが、搬送力評価の実験に用いたB5サイズ(182[mm]x257[mm])の紙での搬送力は100mN(約10gf)前後であった。これは、紙の単位面積あたりに換算すると、おおよそ $0.2mN/cm^2$ である。

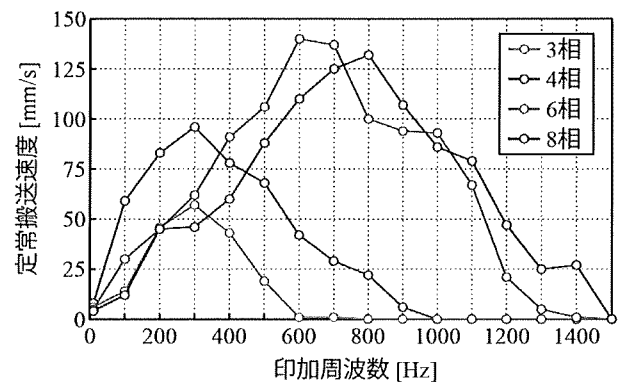


図2 各電極相数での搬送速度
([1]より日本語に改変)

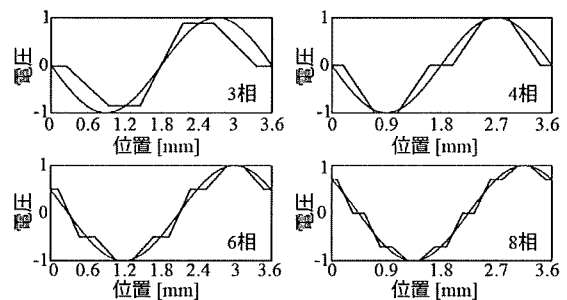


図3 理想の電圧分布(青)と想定される分布(赤)
([1]より日本語に改変)

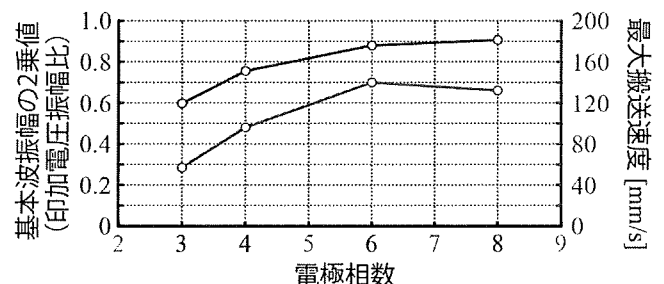


図4 基本波振幅(の2乗)と最大搬送速度の関係
([1]より日本語に改変)

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

2-3. ハンディスキャナへの適用

上記の搬送力で情報機器への応用が可能かどうかを検証するため、市販のハンディスキャナ(手でスキャンする装置であり搬送機構を持たない)に静電紙送り機構を組み合わせて、自動紙送りの実験を行った。評価には3つの機種(機種 A:3R システム製, 3R-HSAP800WIFI, 機種 B:アイリスオーヤマ製 HSC-A4, 機種 C:サンワサプライ製 PSC-5U)を利用した。利用した電極は電極ピッチ 0.6mm の 6 相電極であり、紙のサイズは 220[mm]×160[mm]である。各ハンディスキャナに紙を送り込むのに必要な力を事前に計測したところ、それぞれ、5 [gf] (機種 A), 6 [gf] (機種 B), 8 [gf] (機種 C)であった。

図 5 に示すように搬送用基板の上にスキャナを設置し、静電気力による紙送りを試みたところ、機種 A と B では搬送が可能であったが、機種 C では搬送が行えないことが確認された。最も安定な搬送状態が得られた機種 A を用いてスキャン実験を行った結果を図 6 に示す。スキャナとの接触状態によっては搬送中に紙が回転してしまう場合も確認されたが、条件を整えば、スキャナ下で紙を自動搬送して正しくスキャンすることが可能であり、ハンディスキャナへの応用可能性を確認することができた。

前項の実験も含め上述の実験に用いた電極基板は、いずれも硬質プリント基板である。搬送用の電極基板は、PET 等のプラスチックシート上に印刷形成することで柔軟に構成することも可能であり、そうした柔軟電極を利用することで、図 7 に示すようにコンパクトに収納可能な自動送り機構を実現できる可能性がある。そこで、スクリーン印刷による薄型柔軟な電極作成を試みた。作成した柔軟電極基板の一例を図 8 に示す。ハンディスキャナとの統合については未だ十分な結果が得られていないが、電極基板の柔軟性および電極単体での紙搬送は確認できており、今後、ハンディスキャナなどの情報機器との統合についても検討を行いたい。

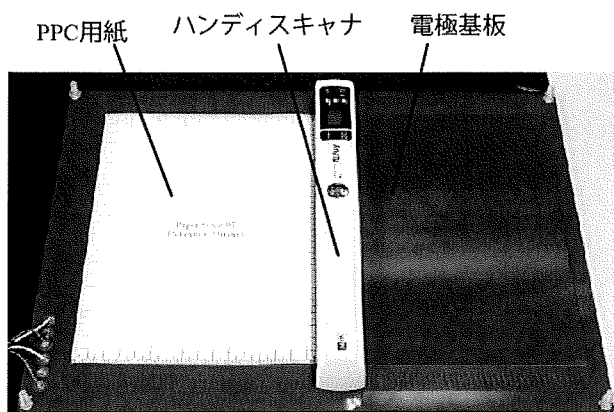


図 5 ハンディスキャナと静電搬送の組み合わせ
([2]より日本語に改変)

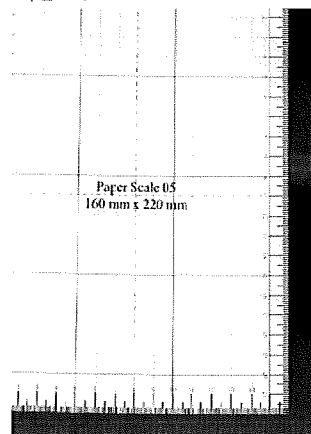


図 6 スキャン結果 [2]

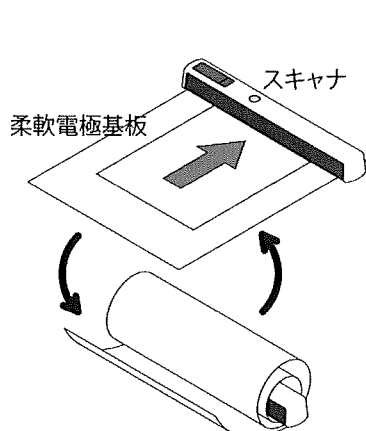


図 7 巻取式搬送電極のコンセプト
([2]より日本語に改変)

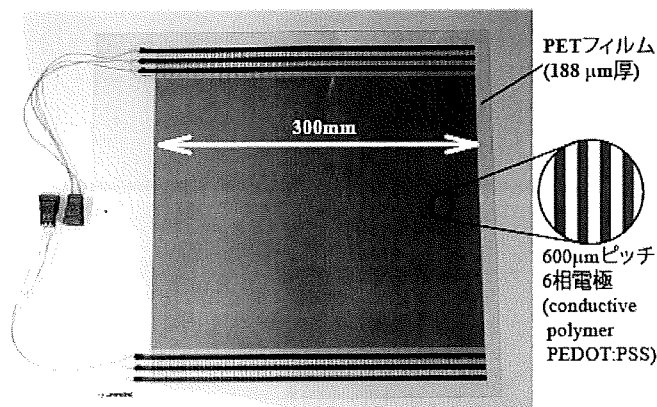


図 8 PET フィルムをベースとした柔軟搬送電極

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

2-4. 搬送電極上での位置検出

ハンディスキャナは内部に小型のローラがあり、紙とハンディスキャナの相対位置をローラの回転を通じて計測する構造になっている。前項で述べたハンディスキャナに紙を送り込むのに必要な力は、概ねローラを回転するために必要な力であるため、紙の位置検出を別の手段で行い、スキャナからローラを取り除くことができれば、より容易にスキャナとの統合が実現できる可能性がある。また、スキャナ以外の情報機器に本搬送技術を適用する場合においても、紙の位置検出は重要な技術であることから、搬送電極上でダイレクトに(=付加的な機械部品を設けずに)紙位置を検出する方法を検討した。

本研究の紙位置検出の基本的な概念は、搬送電極と紙との間に生ずる静電容量を計測することで、紙の位置を検出しようとするものである。第一の方式として、搬送用の高電圧信号に、トランスを介して高周波数のセンサ用信号を重畳し、電極間を流れる高周波数電流(=静電容量に対応)を別のトランスを介して検出する方式を検討した。その結果、紙の位置に対応した出力を得ることはできたが、問題点として、紙の材質やサイズによって出力が大きく異なることを確認した。また、紙と電極基板の間のギャップや、搬送電圧を発生させる高電圧アンプの動作状態によっても出力が変動するという問題点が明らかとなった。これらの問題点をふまえて提案した方式を図9に示す(ここでは、実験が容易な3相電極を対象としている)。図9の方式では搬送電極を二領域に分割し、二つの領域で計測した静電容量を比較することで、紙の材質・サイズ、さらにはギャップに依存しない位置推定を行う。また、駆動電圧を短時間ごとにオン・オフを繰り返しながら印加するバースト駆動と呼ばれる方式で電圧印加し、紙を間欠的に搬送しながら駆動信号オフの間に静電容量検出用の高周波数信号を流すことで、搬送用の電圧印加との間で起こる干渉を取り除いている。

測定結果を図10に示す。図10では異なる2種の紙に対して位置計測を行っており、検出される容量変化(=ロックインアンプ出力)は紙の種類により異なっているが、2領域の比率から推定される位置は紙の種類に依存しないことが確認できる。現在のところ、装置の浮遊容量の影響などにより、必ずしも毎回安定な計測ができるわけではないが、搬送と位置計測を両立する基本的な原理は実証することができた。今後は、計測の安定化や、ハンディスキャナ等の情報機器との統合について検討を進めたい。

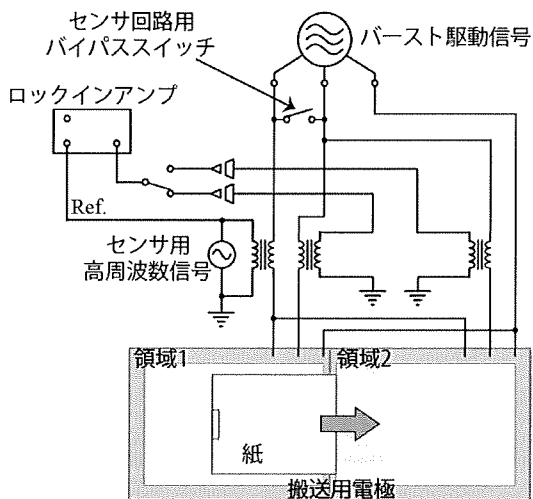


図9 搬送電極上での位置検出
([3]より一部改変)

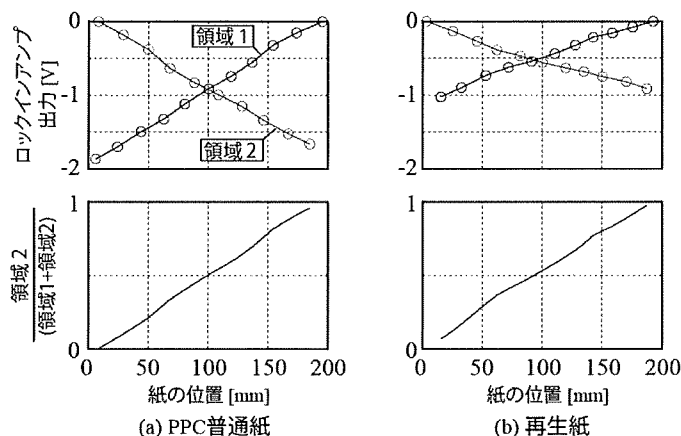


図10 計測結果(異なる2種の紙での計測)
([3]より一部改変)

[1] 鈴木, トラム, 山本, 2013 年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 145-146 (2013/9)

[2] 鈴木, 山本, 樋口, 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 116-117 (2013/5)

[3] 山本, 鈴木, 日本機械学会第 14 回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, pp. 145-146 (2014/4)

3. 研究の結論、今後の課題

3-1. 結論

本研究では、静電誘導を用いた静電紙送り技術について研究を行い、以下の結論を得た。

- 多相電極と多相正弦波電圧を組み合わせた静電紙送り機構では、電極の相数が搬送性能に影響し、6相以上の電極を用いた際に特に良い性能が得られる。コストとの兼ね合いからは電極相数としては6相を利用することが望ましい。
- 6相電極を利用した静電紙送り機構の搬送力は、実験した装置において 0.2mN/cm^2 程度であった。
- ハンディスキャナと静電紙送り機構を組み合わせた試作装置において、紙を静電力で自動搬送してスキャンを行えることを実証した。ただし、一部のスキャナでは、内部のローラを回すために必要な搬送力が得られなかった。将来的には、ローラレスとすることが望ましく、そのためには、ローラに依存しない位置検出手法が必要である。
- 前項に対応し、搬送用の電極基板上でダイレクトに紙位置を検出する手法を提案した。単純な静電容量計測では、紙の材質や高電圧アンプの動作によって出力が変動する、という問題点を明らかとし、その解決策として、搬送用電極を複数領域に分割し、領域間の静電容量変化を比較する手法を提案した。実験により、紙の搬送を行いながら紙位置を推定可能であることを示した。

3-2. 今後の課題

上記のとおり、本研究では静電紙送り機構の情報機器との統合の可能性を示し、また、性能向上のための基礎技術・知見を得たが、将来的には、ここで得られた様々な知見を統合していくことが必要である。特に、柔軟電極の各種実験への適用、紙位置検出技術とハンディスキャナの統合、などが今後の主要課題として挙げられる。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

近年、モバイルデバイスの高機能化が進み、一部では紙の利用は減りつつあるが、紙の持つ高い利便性ゆえに依然として紙は幅広く使われており、スキャナ、プリンタなどといった紙を扱う情報機器への需要も高い。本研究の成果を活用することで、将来的には、コンパクトで可搬性に優れた情報機器の実現が期待できる。また、紙の搬送技術は、スキャナ・プリンタなどの情報機器だけでなく、幅広い分野で活用されている(たとえば、印刷機、自動改札など)ことから、そうした幅広い分野への波及効果も期待できる。さらに、本技術は紙だけでなく様々なシート素材の搬送にも拡張できると考えられる。シート素材のハンドリングは製造現場において重要な技術であり、将来的には、本研究の知見がそうした分野にも貢献できる可能性がある。

4. 2. 学術的価値

本研究では、静電誘導による紙送り技術に関して、電極相数と搬送性能の関係を検証し、従来多く用いられている3相電極よりも6相電極が優れた性能を得られることを実験的に明らかとし、その要因についての考察を示した。また、搬送電極上でダイレクトに位置を検出する位置センシング方式を考案し、紙の材質等によらず、安定に位置検出を行えることを示した。従来の静電アクチュエータの研究においても本研究と同様に駆動用電極に高周波数信号を重畳し位置検出を行う研究があるが、本研究においては、電極分割による検出、バースト駆動の併用など、従来に無いコンセプトを複数提示した。こうした一連の点に本研究の学術的な価値があると考えられる。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

- [1] 天野, 山本, 「普通紙の静電誘導搬送におけるカメラ画像を用いた位置制御」, 2012年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 981-982 (2012/3)
- [2] 鈴木, 山本, 「静電誘導式普通紙搬送における紙位置検出の試み」, 2012年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 983-984 (2012/3)
- [3] T. Tram, A. Maeda, A. Yamamoto, "Effect of Traveling Voltage Wavelength on Electrostatic Induction Actuators Driving Performance", Proceedings of 2013 JSPE Spring Conference, pp. 1105-1106 (2013/3)
- [4] 鈴木, 山本, 樋口, 「ハンディスキャナへの静電紙送り技術適用の検討」, 第25回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 116-117 (2013/5)
- [5] 鈴木, トラム, 山本, 「静電誘導式紙送りにおける電極相数の影響」, 2013年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 145-146 (2013/9)
- [6] 鈴木, 山本, 「静電誘導式シート搬送における複数電極領域を用いたシート位置検出手法の検討」, 2014年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 213-214 (2014/3)
- [7] A. Yamamoto and J. Suzuki, "Position Estimation in Singly-Fed Electrostatic Actuation Systems by Superposing Sensing Signals", Applied Mechanics and Materials, Vols. 541-542, pp. 1487-1491 (2014/3)
- [8] 山本, 鈴木, 「バースト駆動を利用した静電誘導アクチュエータのビルトイン位置検出」, 日本機械学会第14回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, pp. 145-146 (2014/4)