日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会論文集(2005 年 9 月)

Proactive Desk II: 複数物体を駆動可能なリニア誘導モータ方式力覚提示装置の開発

Proactive Desk II: Development of a new multi-object haptic display using a linear induction motor

吉田俊介，野間春生，保坂憲一
Shunsuke YOSHIDA, Haruo NOMA and Kenichi HOSAKA

ATR メディア情報科学研究所
(〒619-0288 京都府「けいはんな学研都市」光台 2-2-2, {shun, noma, hosaka}@atr.jp)

Abstract: The Proactive Desk is a force feedback system using a 2 DoF linear induction motor (LIM) designed for ordinary desktop operations. The system provides two-dimensional force feedback on a desktop surface, but only for a single user. For multi-user cooperative tasks, we propose a new-generation Proactive Desk using a LIM and describe a prototype system based on our approach. The system employs a cluster of coils for synthesizing traveling magnetic fields underneath the desktop. These magnetic fields simulate a local region of the field created by our first-generation system, can drive multiple objects individually.

Key Words: *Force feedback, Haptic display, Linear induction motor, Interaction*

1. はじめに

指示と操作する対象とが物理的に同じ位置であることは，直観的な操作を行う上で重要であり，コンピュータとのインタラクションにおいてもこのような環境が実現されることにより操作性の向上が見込まれる．また，このような操作環境は場を共有しやすくなり，多人数が参加する協調的な作業の効率化も期待できる．しかしながら，Digital Desk[1]に代表されるこれらの研究は，物理的かつ身体を使った直接的な入力手段を備えながらも，コンピュータからの出力は映像や音声のみのものがほとんどであった．

これに対し著者らの開発した Proactive Desk[2]は，コンピュータからの出力として力覚をも提示可能とした対話操作環境である．映像投影用のスクリーンとなる机の下にリニア誘導モータ(LIM: Linear induction motor)を２組配置し，机上に置かれた非磁性体の導体（以下，フォーサと呼ぶ）に対して任意２次元方向の力を発生させることが可能である．これにより，フォーサを手にしたユーザに力覚情報を与えたり，実体化したアイコンとしてフォーサを使うことでより直接的な操作環境を実現した．

本研究では，単一の物体でしか力覚情報を提示できなかった従来手法に対し，同時に複数物体へ力を発生可能な新たな手法を提案する．これにより，多人数が同時に体験可能な力覚提示装置としての活用や，多数の机上物体を位置制御することでの表現力向上を試みる．

2. LIM による複数物体の個別駆動

2.1 従来の２自由度 LIM の動作原理

（１自由度の）LIM は一般的な回転誘導モータを切り開いた構造をしており，電力を１次元の運動に換える（図１）．LIM は磁束を発生させるコイル群からなる１次側の固定子と，力が生起される２次側の移動子（フォーサ）とで構成される．LIM は駆動させる軸方向に沿ってコイルを並べ，隣り合うコイルに流す交流電流に一定の位相差を持たせるように設計する．簡単には６個のコイルを１組とし，３相交流を見かけ上６相にしてそれぞれに与える方法が使える．これにより，時間とともに固定子上を移動する磁束の波（進行磁界）が形成される．フォーサは伝導体であり，磁束密度の変化により内部に渦電流が発生する．LIM は，この進行磁界と磁界内に置かれたフォーサの内部に生じる渦電流とが作用し，フレミング則に従って磁界の進行方向に力を発生させるものである．

大平らが提案した２自由度 LIM[3]は，X，Y 軸用の１自

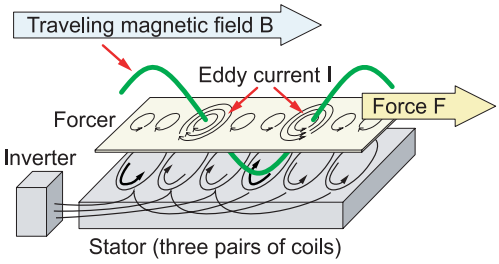

図１　１自由度 LIM の駆動原理

由度 LIM 2 台を直交させて上下に配置した構造を持つ．図２にそれぞれの LIM にて生じる進行磁界の模式図を示す．

図上段の１自由度 LIM では，X 軸（紙面奥方向）に沿って並べたコイルに位相差を与えて交流電流を流すと，図のような平行する進行磁界（平行波）ができる．

一方，大平らの提案手法による２自由度 LIM では，結果的に１自由度 LIM の平行波が直交し，重畳してできる下段のような波となる．各軸を担当する LIM に与える電流量（結果的に波の振幅が変化）を調整することにより，重畳波の進行方向が任意の向きへと変わる．例えば，上段の図は下段の図の Y 軸（紙面手前方向）の電流量が０の状態だと見なすこともできる．

大平らの手法は，２組の交流電流を制御するだけで任意方向へ力を生成でき，ハードウェア構造も簡単であるという利点がある一方，

- 力が発生する盤面までの距離が上段と下段で異なるため，両軸の LIM の性能が等しくならない．
- 盤面全体に一様な進行磁界が発生するため，磁界内に置かれた複数の磁性体には同一の力しか発生しない．

などの問題があった．

そこで本研究では，複数物体の個別駆動が可能な２自由度 LIM を提案し，試作を行う．

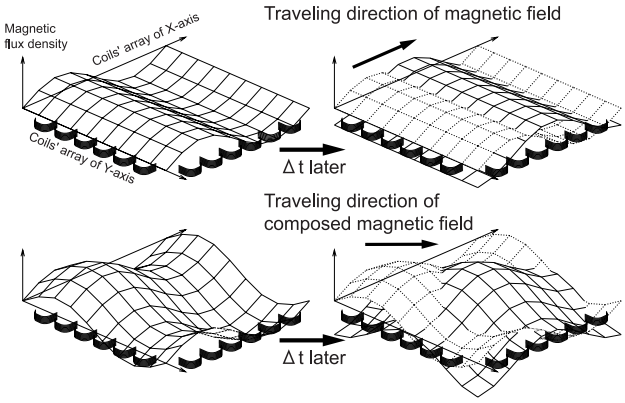

図２　LIM の進行磁界の模式図

2.2 提案手法

個別に任意密度の磁束を発生可能なコイルを複数用意し，シミュレーションによってソフトウェア的に既存の２自由度 LIM と等価な進行磁界を合成することを試みる．また進行磁界を発生させる領域を限定することにより，小領域ごとに個別の力を発生させる．

本提案手法では，M×N 個のコイルを碁盤目状に配置し，それらで生成される磁束の分布が，図２上段のような１自由度 LIM と同様の平行波となるような状態を作り出す．さらに，この平行波を２次元的に回転させることにより，任意方向への進行磁界を作成する．

便宜的に隣接するコイル間の距離が１である X-Y 座標系をコイル上の平面に考え，ある基準となる点から各軸方向に i, j 個離れたコイル C の座標を $C = (i, j)$ と標記する．

例えば，隣接するコイル $C_a = (i, j)$ と $C_b = (i+1, j)$ の距離は，

$$\|C_b - C_a\| = \sqrt{(i+1-i)^2 + (j-j)^2} = 1$$

となる．

前節で述べたように，１自由度 LIM のような平行波を作るためには，隣接するコイルに流す交流電流に一定の位相差を持たせる必要がある．そこで，この隣接するコイル間に流すべき交流電流の位相差を ϕ とする．すなわち，交流電流の位相差が n 個目毎に０（$=2\pi$）になる場合，

$$\varphi = 2\pi / n$$

である．これをコイル上の X-Y 座標系で考えれば，隣接するコイル間の距離は１であるので，距離 d 離れたコイル間の位相差は $d\phi$ である．したがって，各コイル間の位相差は，進行軸へ投影した座標系での距離を求めればよいことになる．

すなわち，基準となる位相を持つ点（基準位相点）P を考えれば，任意の座標にあるコイル C の P との位相差 ϕ は，磁界の進行方向を示す軸と C–P がなす角を θ と置くと，以下の式より求まる（図３）．

$$\phi = \|C - P\| \cdot \varphi \cdot \cos\theta$$

各コイルには，基準位相点に与えるべき交流電流と同じ周波数，かつこの位相差を保つ交流電流を与えることにより進行磁界を生成でき，結果的にそれに沿う方向の力が生起する．

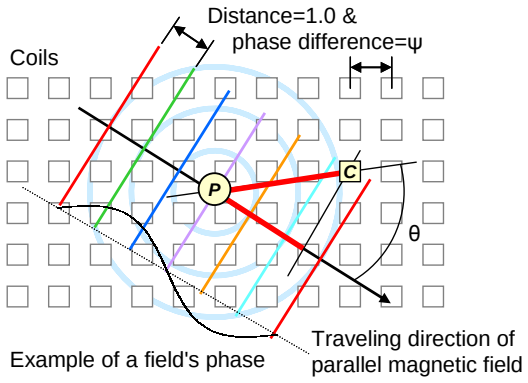

図３　各コイルの基準位相点からの位相差

複数の小領域ごとに力を発生させるためには，発生させる領域ごとに基準位相点を定義し，各コイルが基準位相点からの距離を基に，どの領域に属するかを決定する．

例えば，任意の座標にある k 番目の基準位相点 P_k から進行方向の前後に半周期分，幅方向に距離 $2w$ の領域にあるコイルの組で進行磁界を生成すると定義すれば，

$$C = \{(x, y) | x \in M, y \in N\}$$

として任意の座標にあるコイルを表せば，

$$d = \|C - P_k\|$$
$$\begin{cases} |d\cos\theta| \le 3\varphi \\ |d\sin\theta| \le w \end{cases}$$

の条件を満たすコイルが駆動すべきコイルになる．

2.3 動作検証

本提案手法により力が生起でき，その強さを制御できることを実験により確認した．

基準位相点をあるコイル上に定め，45 度方向に進行磁界を発生させ続けた際の力をフォースゲージにて計測した．計測に使用したフォーサは 150mm 角 5mm 厚のアルミ板である．

実験はコイルに与える交流電流の周波数を 10Hz 刻みに 20~50Hz とし，電流実効値が 0.5~1.5A になるようにフィードバック制御を行い，その際の力を計測した．進行磁界の 1 周期は斜め 45 度に 6 個分であり，位相差 ϕ は $\pi/3$[rad] であった．図 4 に実験結果を示す．

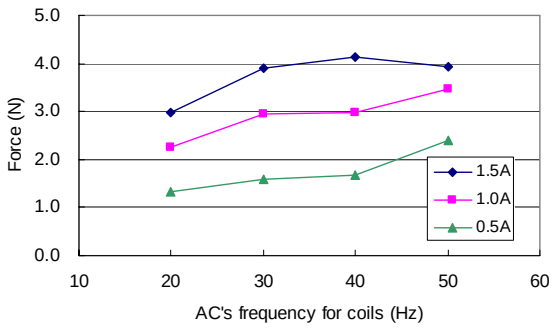

図 4　電流実効値と力の関係

図より，各コイルに与える交流電流の周波数を上げるにつれて力が増すことが確認できる．ただし，実効値に 1.5A を指定した際は 50Hz を超えるあたりから電流が流れにくくなり，設定した 1.5A の実効値に達しなかった．そのため，力も減少している．また，他の電流実効値の場合についても図に掲載された周波数よりも高い付近で計測を行うと，力が減少する結果となった．これにより，使用に適した周波数があると考えられる．

また電流実効値について見ると，その変化に応じて力も変化していることから，電流実効値による力の強さの制御が可能であることがわかる．

なお，コイルの温度が上昇するにつれて力が減少することも確認された．その減少は 10 度のコイル温度上昇に対して 0.14N ほどであった．今回は試作機であるので冷却装置を備えていないが，場合によっては十分な冷却手段も必要となると考えられる．

3. Proactive Desk II の試作

3.1 固定子側の構成

本試作機の 1 次側固定子に配置されているコイルは，櫛形のケイ素鋼板を積層した鉄芯（10mm 角，100mm 高）をコアとして，0.26mm 径の絶縁銅線が 1520 回巻きにされたもの（直流抵抗値は約 28Ω）である．これが，碁盤目状に 10mm 間隔で 12×12，計 144 本配置されている．すなわち，本試作機にて磁界の生成される領域，換言すれば力が生じる領域は，最大で 230mm×230mm となる（図 5）．なお，この領域を拡大させるためには，単純にコイルの配置数を増せばよいため，作業領域としての面積拡大は容易であると言える．この上には天板として 2mm 厚のテフロン板が敷かれ，さらにその上にフォーサが置かれる．この天板が，映像表示用のスクリーン面兼，ユーザとのインタラクション領域として利用される．なおここでのフォーサには，非磁性体の導体であり，推力対質量比の点で効率のよいアルミ板を用いる[2]．

コイルの磁束密度を独立して変化させるために，各コイルには定電圧(135V)の PWM 方式により交流電流を生起可能な駆動回路を接続する．各駆動回路は CAN(Controller Area Network)プロトコルを用いるバスに接続し，さらに駆動回路群を制御するための指令を発行するコンピュータ(OS: RTLinux)をバス上に配置した．

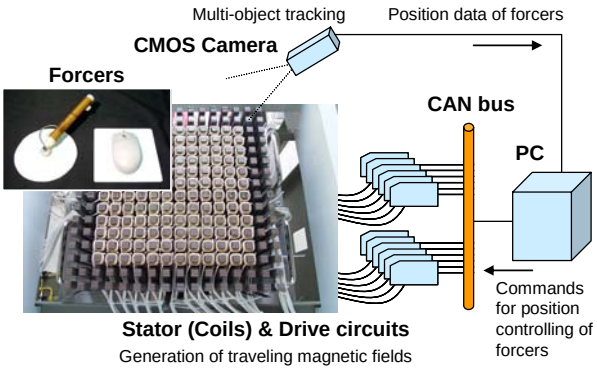

図 5　試作機のシステム構成

3.2 コイルの制御

PC は位置制御あるいは力覚提示に関するシミュレーションを行う．管理しているフォーサの数だけ力を生起させるのに必要な情報（進行磁界を発生させる領域の中心座標，方向，強さ，中心座標での現時刻における基準となる交流電流の位相など）を計算し，その後情報をバスへと流す．

バスに接続された各駆動回路はその情報を受け取り，前章で記した条件式に基づいて自分が磁束を発生させるべきかを判断する．そして発生させる必要がある場合は，自分が管理するコイルへ流す交流電流の位相を，提案手法に基づいて決定する．さらに PC は一定周期ごとに制御信号を送信しており，各駆動回路はその信号を受け取ると同時に計算結果の位相から交流電流を流すことにより，結果的

に任意方向の進行磁界が発生する．

3.3 複数物体の追跡

LIM は力を生成する機能を備えるのみであり，これをインタフェースとして用いるためには，盤上のフォーサを追跡し，その位置に応じて力の方向や大きさを適切にフィードバック制御する機能が必要となる．また，複数物体の同時駆動には，複数物体の同時追跡も必要となるうえに，比較的高速な処理が求められる．

本試作機では，フォーサ側にはバッテリ駆動する赤外 LED を取り付け，この光点を画像処理により検出しこれを追跡する．ただし，一般的な CCD カメラと PC を用いた画像処理では，30Hz のフレームレートによる処理が限界である．そこで，カメラ側にプログラマブルな DSP が搭載され，画素単位で撮像が取得可能な高速 CMOS カメラ (AKAtech 社 iMVS-155)を追跡系に用いた．光点検出，および追跡処理をカメラ側で行い，位置情報のみを PC 側へ送信することにより，比較的高速な位置追跡を実現した．

物体追跡は，図 6 に示す初期探索と光点追跡のアルゴリズム[4]をカメラ側に実装することにより実現される．

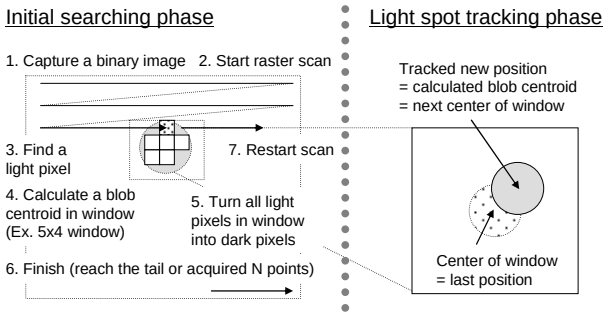

図６　初期探索および光点追跡アルゴリズム

初期探索は光点追跡の前段階として，あるいは一部の光点を見失った際に適時行う．具体的には盤面全体を探索領域として撮影された二値画像より，必要な個数の光点を検出する．検出された光点の座標は次の追跡アルゴリズムの初期座標として利用する．

光点追跡は前時刻の座標周辺の小領域のみを撮影し，現時刻の座標を求める．これは追跡処理が十分高速であとするならば，Δt の時間内に光点が Δd しか移動しないため，前時刻の座標を中心として高々 $2\Delta d$ 角超の窓領域を処理すればよいことによる．求められた座標は PC への送信された後，次時刻の窓領域の中心座標として用いる．

なおフォーサには，マウス操作を模倣するためのボタンも取り付けられている．ユーザがボタンを押すと LED の光量が数倍になるように設計し，光点追跡時に見かけの面積を計算することでクリック操作を検出する．

実装した追跡系の処理時間を表 1 にまとめる．ここで探索領域とは 320mm×320mm 程度，窓領域とは 20mm×20mm 程度の領域を撮影した時の画素数である．この表より，16pixel×16pixel の窓領域では 4 点追跡を行った場合でも数 kHz の比較的高い更新速度が得られることがわかる．

表１　追跡系の処理時間

Initial searching phase				
	Search area	512x512	256x256	128x128
Detection	1 point	177.492	42.677	10.363
	2 points	177.857	42.588	10.456
	3 points	179.459	42.888	10.496
	4 points	188.716	43.607	11.020

Light spot tracking phase			
	Window area	32x32	16x16
Tracking	1 point	0.663 (1508)	0.173 (5780)
	2 points	1.319 (758)	0.345 (2899)
	3 points	1.974 (507)	0.515 (1942)
	4 points	2.658 (376)	0.692 (1445)

Unit: msec (Values inside brackets are converted one into frequency. Unit: Hz)

4. おわりに

複数物体の駆動が可能な 2 自由度 LIM の実現方法を提案した．また試作機により最大 4N 程度の力を発生でき，コイルに与える交流電流の実効値を指定することで力の強さを制御できることを確認した．

LIM を利用した Proactive Desk は，他の機械アーム式装置[5]と比較して投影される映像を遮るものが少なく，電磁石の吸引力を利用した方式[6]と比較しても机上の物体に強い力を与えることができるという点でより有利である．本提案により実現された Proactive Desk II では，同様の利点を兼ね備えた上で複数物体の駆動を可能にした．

今後は，より詳細な試作装置の特性計測や，本装置を用いた具体的なアプリケーションの提案をする予定である．特に，Proactive Desk II により実現した複数物体を用いた協調作業環境の構築を試みたい．

謝辞　本研究は情報通信研究機構の研究委託“超高速ネットワーク社会に向けた新しいインタラクションメディアの研究開発”により実施した．

参考文献

[1] Wellner, P., The DigitalDesk Calculator: Tangible manipulation on a desk top display. ACM UIST ’91, pp.27-34, 1991.

[2] Noma et al.: The Proactive Desk: A New Haptic Display System for a Digital Desk Using a 2-DOF Linear Induction Motor, Presence, Vol. 12, No. 2, pp.146-153, 2004.

[3] 大平膺一，川西利昌：２方向リニア誘導モータの実験的検討，計測自動制御学論, Vol.19, No.2, pp.74-79, 1983.

[4] 灘谷演，石井抱：実時間メガピクセルモーションキャプチャとそのジェスチャー認識への応用，日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会, 3A19, 2002.

[5] SensAble Technologies, Inc., PHANToM, http://www.sensable.com/, 1996-2005.

[6] Pangaro, G., Aminzade, D.M., and Ishii, H., The actuated workbench. ACM UIST ’02, pp.181-190, 2002.