複数物体を同時駆動可能な力覚提示装置 Proactive Desk II の開発

吉田　俊介　　野間　春生　　保坂　憲一
ATR メディア情報科学研究所
{shun, noma, hosaka}@atr.jp

要旨 ー 著者らは既に2自由度のリニア誘導モータ(LIM)を利用したデジタルデスク操作のための力覚提示装置 Proactive Desk を提案した．これは任意2次元方向に駆動する机上の物体をユーザが把持することで力覚を体験可能な装置であるが，同時に制御可能な物体はひとつに限られた．そこで本論文では，デジタルデスクにおける多人数での協調作業を目的とし，複数物体を同時駆動可能な新しい方式の LIM による力覚提示装置 Proactive Desk II を提案する．提案手法では机の下に配置された多数のコイルを独立に駆動させ，異なる強度の磁束を生成する．それらの集合として構成される磁界はある時刻において従来手法の LIM と等価な状態となるよう制御し，それらを局所的に発生させることで複数物体を駆動させる．

Development of the Proactive Desk II – A New Haptic Display to Drive Multiple Objects

Shunsuke YOSHIDA, Haruo NOMA, Kenichi HOSAKA
ATR, Media Information Science Laboratories

Abstract ー 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 object. For multi-user cooperative tasks, we propose a new-generation Proactive Desk II which can control multiple objects simultaneously, and describe a prototype system based on our approach using a new style LIM. 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.

1.　はじめに

現在のコンピュータとのインタラクション方法は，マウスやキーボードなどの入力装置を用い，出力装置であるディスプレイ上のウィンドウやアイコンを操作する方式が一般的である．これは，コンピュータからの出力である視覚情報を人が処理し，画面上のポインタを視覚的なフィードバックで操作しながら入力する，いわば視覚主体のインタラクションである．

これに対して，他の五感もメディアとして積極的にインタラクションに利用し，より豊かな操作環境を実現しようという試みが活発になってきている．例えば音声，すなわち聴覚情報は，マイクやスピーカなどの入出力装置の開発の容易さから古くより利用されてきたメディアである．さらに近年では，味覚，嗅覚，あるいは触覚や力覚の情報提示を目的とした装置の開発が盛んに進められている[1].

中でも，コンピュータとのインタラクションという側面から見た場合，力覚情報の利用は有効であると考えられる．コンピュータからの出力に力覚情報を付与することにより，人は触覚をフィードバックに利用することができるようになる．これによりボタンの位置を手探りで見つけたり，ガイドをなぞるように操作するなど，操作性の向上や，より直観的なインタラクション環境が構築できると期待される．

しかしながら既存の力覚提示装置の多くは，構造上の問題から同時に複数の力覚提示が行えず，複数人が同時に力覚を体験可能な装置は少ない．既に著者らが提案した，リニア誘導モータ(Linear induction

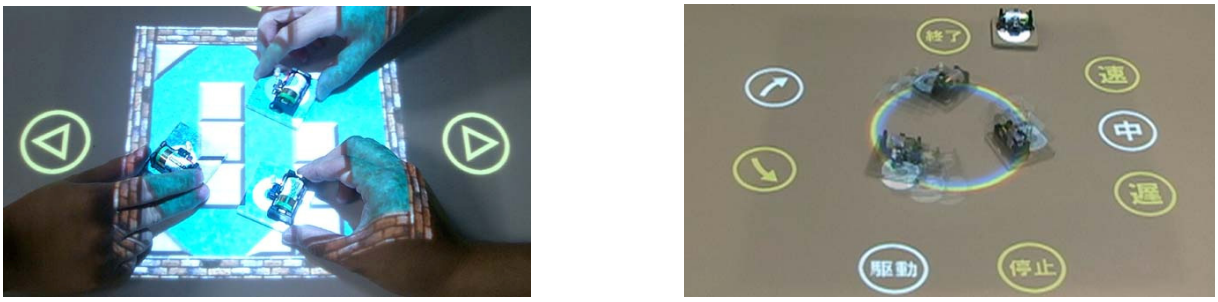

図1 Proactive Desk II の動作風景（左：迷路状の壁の体験，右：円上を回転させる制御）

motor, LIM)の原理を用いたデジタルデスクのための力覚提示装置 Proactive Desk[2]も，同時に提示可能なのは単一の力覚情報に限られた．

そこで本研究では，複数の異なる力覚情報を同時に提示可能な新しい構造の LIM を提案し，複数のユーザが同時に体験可能な新しい力覚提示装置 Proactive Desk II を実現する（図1）．

2. 関連研究

2.1 デジタルデスクと力覚提示

デジタルデスクとは，従来のマウスとディスプレイを介したユーザとコンピュータとの関係を大きく変化させ，両者間の境界をより曖昧にさせるインタラクション環境である． 1991 年に Wellner が提案した最初のコンセプト[3]では，机の上にコンピュータからの出力を映像として投影し(Display)，マウスの代わりにユーザが自身の手やジェスチャで，画像であるアイコンや，机上の実物体を直接操作することで指示を出す(Control)．さらには，カメラ等を用いることで机上の書類の文字や物体の状態をデジタル化して入力する(Registration)，シームレスな入出力の操作環境となっている．ハードウェアや機能面での高度化を試みた様々な実現例が報告[4, 5]されているが，基本的な機能は上記の通りである．

デジタルデスクの利点としては，机を媒介としてユーザがコンピュータと直接的にインタラクションできることである．さらには，机を囲むようにユーザが集まることにより，協調して作業を行う場として利用しやすい点が挙げられる．過去の研究においても，大規模な都市設計のシミュレーションやタスク等のスケジュール調整などに用いられた例が多く見られる[6, 7]．

このような従来のデジタルデスク研究におけるコンピュータからの出力としては，主に映像と音によるものがほとんどであり，他の五感については積極的に利用されてはこなかった．本研究の目的は，五感の中でも特にコンピュータとのインタラクションに有効であると考えられる力覚をデジタルデスク環境に付加することにある．机上の物体の位置を制御したり，操作反力などの物理的な作用(Reaction)をコンピュータから提示することにより，ユーザは力覚を手がかりとしてより直観的な操作を行えると期待できる（図2）．

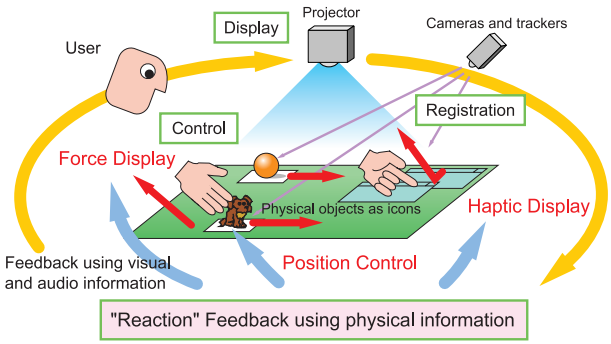

図2 デジタルデスク環境における力覚提示

2.2 協調作業環境のための力覚提示装置

既存の力覚提示装置を大まかに分類すると次のようになる．これらは，いずれも机上の実物体を物理的に位置制御し，それを把持したユーザにそれらの移動時の作用を力覚として与える仕組みである．

機械式 － 機械式のアームやワイヤが取り付けられた物体を机上で移動させる方式[8]．

永久磁石式 － 机上の物体に永久磁石を取り付け，盤面下で平面方向に移動できる永久磁石との吸引力により物体の位置制御をする方式[9]．

電磁石式 － 盤面下に電磁石を配置し，斥力と吸引力を使い，机上の永久磁石が取り付けられた物体の位置制御をする方式[10]．

LIM 式 － 盤面下の2自由度 LIM で進行磁界を発生し，机上の非磁性導体に推進力を生起させ，駆動させる方式[2]．

ここで，2次元的な机上の作業を対象とするデジタルデスク環境の構築を目的とした場合，機械式では作業環境が広くなるにつれ装置が大きくなるうえに，机上の空間を遮る物が多くなるためシームレスな作業環境を構築しがたい．その他の方式は見た目を従来のデジタルデスクと同等に保てる利点があるが，永久磁石式では盤面下の機構が常に物体を追従する必要があるために，原理上応答速度が問題となる．また，磁石の吸引力を使うため，さほど強い力は得られない．

電磁石式と LIM 式を比較した場合，電磁石式は物体の位置制御は容易であるが，得られる力覚は位置制御からの副次的なものとなる．また，永久磁石式と同様に出力の限界は大きい．これに対して，LIM 式では物体に推進力を直に生起させるため，位置制御は別途必要になるが，方向制御や強い力を継続して発生させることが容易である．

既開発の Proactive Desk は LIM 式による力覚提示装置である．映像投影スクリーンとしても用いられる机の下に，1自由度の LIM を2組配置し，机上に置かれた非磁性の導体（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．本装置ではその機構のほとんどが盤面下に隠されるために，操作時にユーザの視界を遮る物がなく，また単なる導体片に対して力を発生させることができることから，シームレスな操作感を損なうことが少ない．また，位置制御から副次的に力覚を提示する電磁石式などと異なり，力制御が直接行える本方式はユーザインタフェースである力覚提示装置として見た場合，より適していると考えられる．

次に，協調作業環境のためのデジタルデスクとして考察した場合，複数人が異なる力覚を得るためには，複数物体を同時に駆動させる必要がある．機械式と永久磁石式は構造上複数物体を駆動させること自体が難しく，電磁石式は先に述べたように比較的軽い物体の位置制御が出来るのみであり，強い力を得ることは困難である．一般的な2自由度 LIM を応用した既開発

装置も，その構造上単一の物体しか駆動できない．

そこで本研究では，従来の利点を保ちつつ複数物体の駆動が可能な新しい2自由度 LIM を提案し，複数人が同時利用可能な力覚提示装置を開発する．

3. 複数物体が駆動可能な LIM

3.1 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次元の運動に変換する（図3）．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(Stator)と，力が生起される2次側の移動子(Forcer, 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，一般的なインバータを用いて三相交流を発生させ，これを見かけ上6相にしてそれぞれに与える．これにより，時間とともに固定子上を移動する進行磁界 B が形成される．フォーサは非磁性の導体であり，磁束密度の変化により内部に渦電流 I が発生する．この進行磁界 B と磁界内に置かれたフォーサの内部に生じる渦電流 I とが作用し，フレミング則に従って磁界の進行方向にのみ力 F が発生する．

大平らが提案した2自由度 LIM[11]は，X，Y 軸用の1自由度 LIM2台を直交させて上下に配置した構造を持つ．図4にそれぞれの LIM にて生じる進行磁界の模式図を示す．

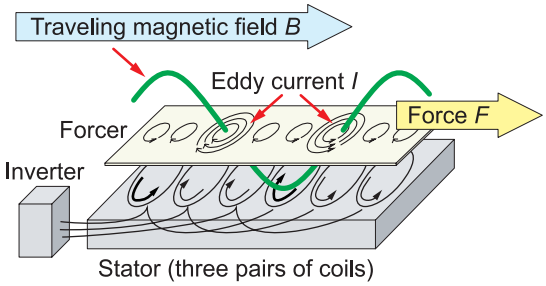

図3 1自由度 LIM の動作原理

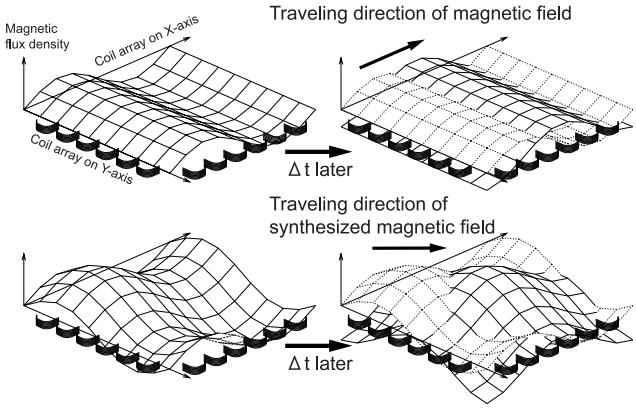

図4 LIM の進行磁界の模式図

図上段は1自由度 LIM の例であり，X 軸（紙面奥方向）に沿って並べたコイルに流す交流電流にそれぞれ位相差を与えると，平行した山と谷を持ち進行する磁界（平行波）がコイル群の上面に生じる．

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（結果的に磁束密度，すなわち波の振幅が変化）を調整することにより，重畳波の山と谷が進行する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組のインバータを用いて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ため，大型貨物の搬送経路の切り替えなどに利用されることが多い．しかしながらこれを力覚提示装置として用いる場合，

- 力が発生するフォーサまでの距離が上段と下段とで異なるため，両軸の LIM の推力発生効率に違いが出る[2]．
- 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導体には同一方向の力しか発生しない．また，盤面全体が発熱する．

などの問題があった．

3.2 提案手法

本提案手法は，固定子として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従来手法の LIM と等価な進行磁界を合成することを試みるものである．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．すなわち，M×N 個のコイルを碁盤目状に配置し，それらの磁束密度で合成される磁界が，ある時刻において結果的に図4上段のような1自由度 LIM と同様の平行波になるよう各コイルを制御する．さらに，この平行波を2次元的に回転させた状態を計算することにより，任意方向への進行磁界を作成する．

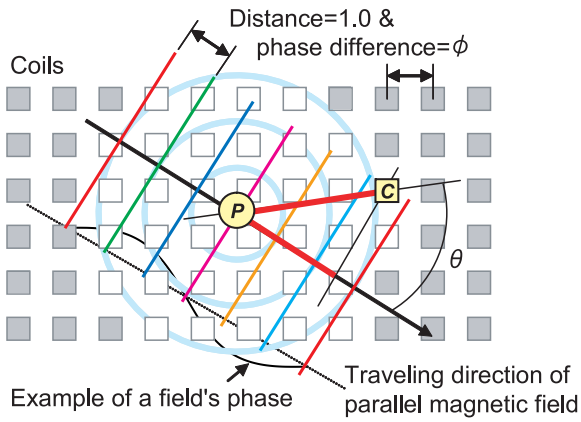

図5 各コイルの基準位相点からの位相差

図5に示すように，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(= 2π)になる場合，

$$\phi = 2\pi / n$$

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 $d \cdot \phi$ 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仮想的なコイル(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ω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．

$$\omega = d \cdot \phi = \|C - P\| \cdot \cos\theta \cdot \phi$$

各コイルに基準位相点に与えるべき交流電流と同じ周波数，かつ位相差ωを保つ交流電流を与えることにより，コイル群から任意方向へ進行する磁界が結果的に形成される．これにより，最終的にそれに沿う方向の力がフォーサに生起する．

さらに複数の小領域ごとに異なる力を発生させるために，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独自に決定する．

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 $2w$ の方形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，

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

の条件を満たすコイルが，k 番目の領域を構成するコイルとして駆動すべきコイルとなる．

あるいは，基準位相点からコイルまでの直線距離を計算し，特定の距離内にあるコイルのみを駆動させるような，円形領域を設定すればよい．図5中の白色のコイルが，円形領域によって駆動すると判定されたコイルの例である．

3.3 動作検証

本提案手法により力が生起可能であることを実験により確認する．まず基準位相点をあるコイル上に定め，45 度方向に並ぶコアをひとつのアンプに直列に接続する．これにより，45 度方向のコイルの列で同強度の磁束が発生する．このコイル列を複数個作り，各アンプで生成する交流電流に一定の位相差を持たせることで，45 度方向に並ぶコイル列に垂直な方向の進行磁界ができあがる．そして磁界内にフォーサを置き，発生した力をフォースゲージ(イマダ社 DPS-5)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．フォースゲージは台に固定し，フォーサと糸で接続した状態で磁界を生成し，フォースゲージにて計測される値を読み取った．

コイルへの交流電流は 135V の電圧を PWM 方式により印加することで作成した．交流電流の周波数は 10Hz 刻みに 20~50Hz とし，電流実効値が 0.5~1.5A になるように PWM 制御し，その際の出力を計測した．進行磁界の1周期は斜め 45 度にコイル6列分であり，位相差φは π/3[rad]であった．図6に実験結果を示す．

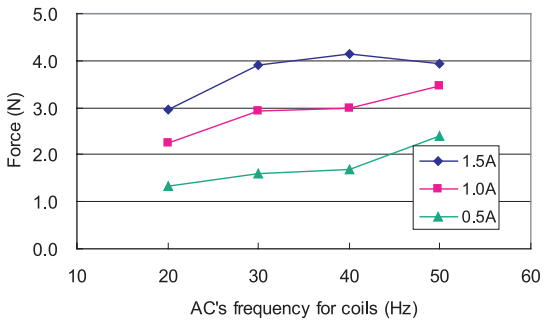

図6 電流実効値と力の関係

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．その減少はコイル温度上昇 10

度に対して 0.14N ほどであった．今回は試作機であるため簡単な強制空冷しか実装していないが，この結果より，十分な冷却手段が必要となる場面もあると考えられる．

4. Proactive Desk II の試作

4.1 固定子側の構成

提案手法による LIM を用いて試作した，複数物体へ同時に異なる力を発生させることが可能な力覚提示装置 Proactive Desk II の実現方法について述べる．

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7）．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可能である．

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．この天板は白色で，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(40Hz)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(1Mbps)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．

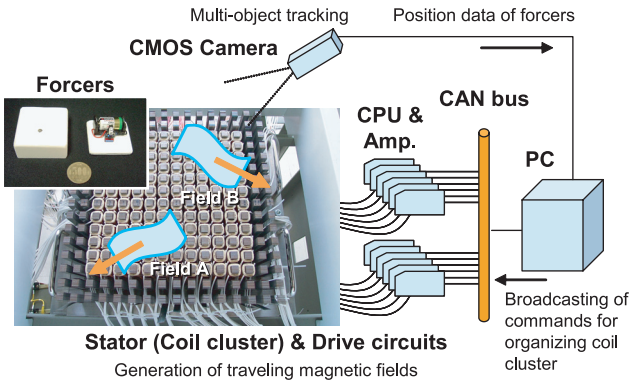

図7 試作機のシステム構成

4.2 コイル群の制御

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（本実装においては最大4枚）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，出力の方向，強度，現時刻における中心座標での交流電流の基準位相）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コイルを制御する駆動回路は CPU(H8S，20MHz)を備え，その情報を受け取ると 3.2 節にて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否かを判断する．そして必要であれば，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 は一定周期でトリガとなる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なる．各コイルは個々に独立して磁束密度を変化させるだけであるが，結果的にコイル群で発生される合成磁界が任意方向へ進行する磁界の波となる．

4.3 駆動回路における電流位相の計算

各駆動回路における交流電流位相の計算の流れを図8にて示す．例えば，PC から 80Hz でトリガである制御信号を発行し，コイルに与える交流電流が 30Hz である場合を考える．30Hz の交流電流は1周期変化するのに 33.3msec 要する．これはすなわち，トリガが送信されてくる間隔(12.5msec)において，0.38(=12.5/33.3)周期分ずつ位相が変化することを意味する．

本実装では交流電流を電圧の PWM により生成するため，30Hz の交流電流を1周期作成するための PWM 波形となる各時刻の電圧値を適当な解像度 N（例えば 33.3msec を1万段階）であらかじめ用意しておく．これにより，任意位相 α [rad]から始まる交流電流を作成するためには，PWM 波形テーブルの $N\times\alpha/2\pi$ の箇所から始め，0.38 周期分再生すればよいことになる．

さらに力の強さを制御するため，PWM 波形テーブルのパルス幅を全体的に調整できるように定義する．例えば，基準となる波形テーブルを最大の出力が得られるものだとした場合，半分の出力を得る PWM 波形には各パルス幅を 50%にしたものを用いる．

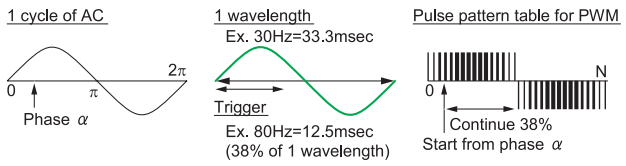

図8 電流位相に関する計算の概念図

4.4 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．

本試作機では実装の簡便さから，フォーサ側にバッ

テリ駆動する赤外 LED を取り付け，この光点を画像処理にて検出し追跡する方式を採用した．ただし，一般的な CCD カメラと PC を用いた画像処理ではフレームレート(30Hz)での処理が限界である．そこで追跡系として，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)を用いた．本試作機では，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ている．

物体追跡は，図9に示す初期探索と光点追跡のアルゴリズム[12]をカメラ側に実装した．

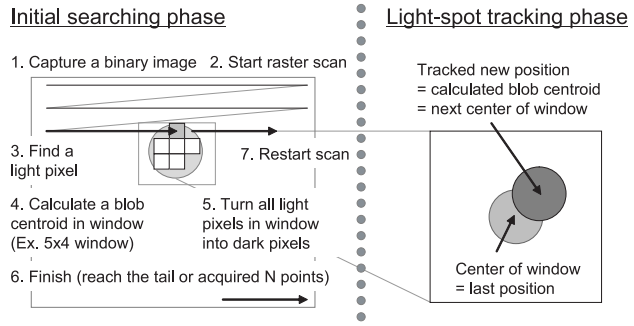

図9　初期探索および光点追跡アルゴリズム

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した二値画像より必要な個数の光点を検出し，その座標を次の追跡アルゴリズムの初期位置として利用する．

光点追跡では高速化のために前時刻の座標周辺の小領域（窓領域）のみを撮影し，現時刻の座標を求める．求められた座標は PC へと送信され，さらに次時刻の窓領域の中心座標として用いる．

なお，フォーサには初期探索時に見つかった順に ID が与えられる．フォーサの物理的な大きさの制約上，光点同士は重なることはないという仮定により，ある程度の個体識別が可能である．途中で光点を見失った際には初期探索を行い，適切な ID が割り当てられる．また，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．ここで全体の探索領域は 320mm×320mm 程度，窓領域は 20mm×20mm 程度の領域を撮影した際の画素数である．

基本的に初期探索は光点を見失った際にのみ行われる．最大の分解能である 512×512 を選択したとしても処理時間は高々180msec 程度である．ここで，初期探索は光点追跡のための前処理として光点位置を大まかに捉えることが目的のため，低解像度を選択したとしても問題はない．分解能を 2.5mm(320mm/128)程度とした場合の処理時間は 10msec 程度であり，十分実時間での利用が可能であると言える．

次に光点追跡の処理時間を見ると，16×16 の窓領域では4点追跡を行ったとしても 1kHz 以上の比較的高い更新速度が得られることがわかる．こちらの解像度は最終的な位置情報に関係するため，高い分解能を得たい場合は 32×32 の解像度を選べばよい．その場合でも数百 Hz の更新速度は得られており，その程度で実時間処理が可能であることがわかる．

表1　追跡系の処理時間

Initial searching phase					Light-spot tracking phase			
	Search area	512x512	256x256	128x128		Window area	32x32	16x16
Detection	1 point	177.492	42.677	10.363	Tracking	1 point	0.663 (1508)	0.173 (5780)
	2 points	177.857	42.588	10.456		2 points	1.319 (758)	0.345 (2899)
	3 points	179.459	42.888	10.496		3 points	1.974 (507)	0.515 (1942)
	4 points	188.716	43.607	11.020		4 points	2.658 (376)	0.692 (1445)

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

5.　実験による動作検証

5.1　出力方向制御に関する実験

本試作機により，フォーサに対して任意方向へ移動する力が発生可能であることを実験により確認する．

実験に用いたフォーサは 50mm 角で 5mm 厚のアルミ板であり，フォーサの上部中央に赤外 LED を取り付けてある（重量計 39.3g）．先に述べたように力を発生させるために必要な情報は，磁界を発生させる領域の中心座標，力の方向，強度，領域中心にあるとする仮想的なコイルの発生時刻における交流電流位相である．この実験では，発生領域の中心位置として LED を追跡した座標，すなわちフォーサの中心位置を用いた．力の強度は最大の出力を要求する値を使う．

実験は 0~45 度までの出力方向を期待する信号を8段階で PC からバスにブロードキャストすることで与え，その際の出力方向を計測する．ここで出力方向とは，コイル群中央付近に配置されたフォーサを糸で台と固定し，その傾きを計測したものである．本実装においては，計算の簡略化と通信量の削減を目的として，送信する角度情報は1周を1バイトで表現した形式，つまり 360 度を 256 分割した値を用いている．すなわち，入力信号は 0~45 度に対応する 0~32 の値を4刻みで変化させたものになる．

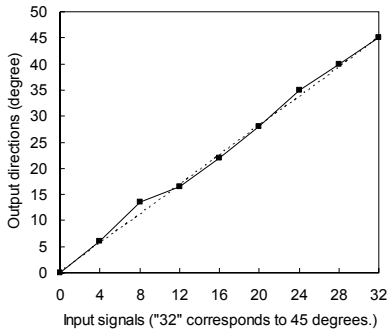

図 10　方向に関する指示と出力結果の関係

図 10 に結果を示す．横軸が 0~45 度に対応する 0~32 の入力信号値であり，縦軸が出力の方向を示す．なお，出力の角度は0度の信号を与えた際の出力方向を基準の0度方向としたものである．また，図中には入力信号に対する理想的な出力方向となる値が破線で示してある．

この実験結果より，出力したい任意方向に対応する信号を与えることにより，希望する方向への出力制御が可能であることを確認できた．

5.2　出力強度制御に関する実験

次に，フォーサに対して任意強度の力が発生できることを確認する．

実験は 5.1 節で用いたフォーサに加え，50mm 角 3mm 厚のものも用いた．出力の計測は，固定したフォースゲージとフォーサとを棒で接続し，フォースゲージで計測された値を読み取った．フォーサの位置には上記の実験と同じく LED が取り付けられ，フォーサの周辺にのみ磁界を発生させる．出力方向は一定に保ち，出力強度の信号のみを変化させて実験を行った．

強度も方向の指定と同じく1バイトで表現する実装となっているため，理想的には256段階の指定が可能である．ただし実装の都合上，利用できる PWM による電圧制御用のテーブル数が 128 個に制限されたため，今回は 128 段階(0~127)で指定することとした．実験では，入力信号として 0~127 の値を8刻みで与えた．すなわち，0は出力が無く，127 で最強の出力が得られることを期待している．

出力の制御は 3.3 節の結果を踏まえ，各コイルへ与える交流電流量を調整することにより行う．本実装では，交流電流の周波数を最も大きな出力が得られた 40Hz に固定し，実効値で 1.5A になる PWM 制御用の電圧波形を最大出力の波形としてまず定義した．入力信号として 127 が得られた際にはこの波形から交流電流が作成される．他の入力信号に対する波形はこの波形を基にあらかじめ作成される．例えば，半分の出力を期待する 64 用の波形は，127 用の波形の各電圧パルスの幅をそれぞれ半分にした波形を用い，75%の出力を期待する 96 用の波形ではパルス幅がそれぞれ 127 用の波形の 75%になる．

図 11 に各信号につき出力値を3回ずつ計測した結果の平均値を示す．横軸は入力した信号値を，縦軸は出力強度を表す．

図より，入力信号値 16 以下では出力が得られず，そこから127までほぼ線形に出力が上昇する傾向が確認できた．また文献[2]の実験結果と同様に，フォーサの厚みによる出力の違いが確認できた．

信号値が 16 以下で出力がほとんど得られない原因は，LIM により発生する推進力に対して，フォーサの自重とテフロン板との静止摩擦力が勝っているためだと考えられる．すなわち，この実験に用いたフォーサらを移動させるためには，少なくとも 16 以上の信号を与える必要があることになる．また，88 を越える付近の信号値から，期待する線形な出力変化に対してやや減少していく傾向が読み取れる．これは1次側のコイルのインピーダンスにより，一定以上の電流がコイルに流れにくくなっているためだと考えられる．この傾向は 3.3 節の結果とも一致する．

この実験結果より，出力したい強度に対応する信号を与えることにより，任意強度の出力が得られることが確認できた．より性質のよい出力を得るには，本実験結果の出力特性をテーブルか関数として持ち，それに対応する信号値を与えるか，線形変化していて比較的性質の良い付近の PWM 電圧波形を基準にし，128 段階に内挿して波形テーブルを作成し直せばよい．

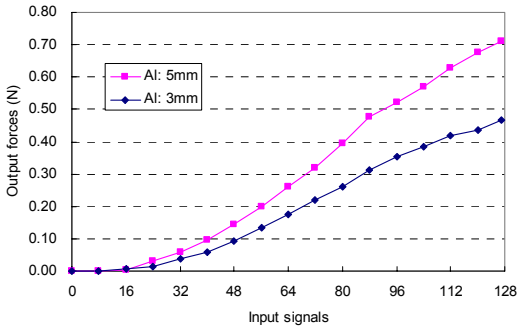

図 11　入力信号と出力強度の関係

5.3　アプリケーションによる個別物体駆動の例示

最後に，複数の領域で異なる力が発生できることを簡単なアプリケーションを構築して確認した．

まず，フォーサが適当な経路を移動するような制御が可能なアプリケーションを作成した．具体的には，各時刻におけるフォーサがいるべき座標を制御用 PC 上でデータ列として用意し，カメラから得られる現時刻のフォーサの座標値と，次時刻にいるべき座標値との比較から PID 制御によりフォーサに与えるべき力の方向と強度を計算する．次に PC は求められた力を対象となるフォーサの付近にのみ発生させるよう，必要な磁界の中心座標と方向，強度，電流の基準位相などの値をひとまとめにして逐次ブロードキャストする．

図 12 にふたつのフォーサが決められた経路上を個別に移動する様子を示す．図はふたつのフォーサが左右から互いがぶつかるほどの位置まで移動した後に離れ，上下にすれ違うようにして移動し，また左右から接触するという動きを繰り返している場面である．磁界が発生している領域はフォーサのサイズとほぼ同じ円形の領域であり，図では発生領域と力の方向と強度を可視化したものをプロジェクタにより重畳している．計算の更新速度は 400Hz であり，計算結果のブロードキャストも2領域分同時にこの速度で行っている．これらの動きの観察により，小領域のみで進行磁界を発生させる本方式によって，複数物体の個別駆動および，位置制御が可能であることが確認できた．

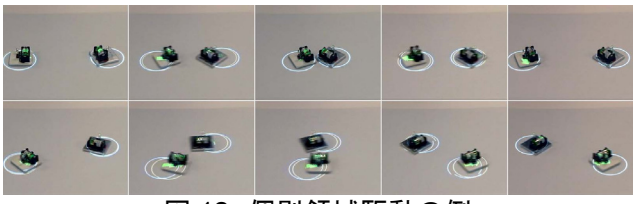

図 12　個別領域駆動の例

1章に示した図1は，迷路状の壁を体験可能なアプリケーションと，円上を回転するフォーサをインタラクティブに制御できるアプリケーションの例である．図1左は複数のユーザ（本試作では最大4人）が各自フォーサを手にし，コンピュータグラフィクスで描かれた迷路の壁から受ける反発力を体感している．各フォーサの光点座標を基に壁との接触判定を行い，接触時には適切な反発の方向とめり込み度合いからの反発力を計算して，フォーサ付近にのみ進行磁界を発生させる制御を行っている．制御は 400Hz の間隔で行っており，狭い壁の間でフォーサから手を離すと壁の間でバウンドする様子などが確認できる．図1右は3つのフォーサが円形の経路上を回転しており，もうひとつのフォーサを表示されているアイコン上に置くことで，回転の方向や速度を変化させている．

Proactive Desk II は，デジタルデスク上での作業を想定した，新しい多人数が同時に利用可能な力覚提示装置である．これにより，力覚を伴う協調作業環境を構築することが可能になる．例えば，教育の場面において滑車の働きを子供たちが学ぶ場合，滑車や重りに見立てたフォーサを手で操作し，実際に動きの変化をグループで体感しながら現象を学習することができる．あるいは他の情報技術と組み合わせることにより，遠隔地間や蓄積された環境での力覚共有も可能である．例えば景観シミュレーションにおいて，立体物を載せたフォーサを操作してその動きを記録したり配信することにより，コンピュータグラフィクスではなく実物を使い検討することができる．また，遠方にいる他者に指示を与えたい場合，一方が操作する両地点で同期して動作するフォーサを手に取り，もう一方も操作するだけで力覚を共有して作業することが可能になる．

6.　おわりに

本論文では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量を調節することで力の強度を制御できることを確認した．さらに，提案 LIM とその制御機構を組み合わせ，複数人が同時に異なる力覚を得ることが可能な力覚提示装置 Proactive Desk II を開発した．実験により，最大4枚までのフォーサを制御可能なことを確認し，力の方向と強度を個別に指定できることを確認した．

複数人への力覚同時提示は，場を共有して作業を行うような，協調作業環境を構築するためには重要な要素となりうる．一般的な協調作業環境では，参加者がテーブルを囲み，その上に投影された映像や実物体のアイコンを操作することでインタラクションを行うことが多い．これに力覚提示装置を組み合わせることにより，机上に置かれた複数の実物体を実体化したアイコンとして利用したり，手にした際の操作反力などを提示することができるようになるため，より多くの情報提示が可能になると期待できる．

本システムにより従来手法では困難であった多人数が同時に体験可能な協調作業のための力覚提示装置としての活用や，多数物体の位置制御により表現力の向上が可能となった．

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る．

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] 柳田，兪，川戸，野間，吉田，鉄谷，“プロジェクション型ディスプレイによる匂いの局所提示．” インタラクション 2004, pp. 19-20, 2004.

[2] Noma, H., Yoshida, S., Yanagida, Y., Tetsutani, N., “The Proactive Desk: A New Haptic Display System for a Digital Desk Using a 2-DOF Linear Induction Motor.” Presence, Vol.13, No.2, pp.146-153, 2004.

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

[4] Koike, H., Sato, Y., Kobayashi, Y., “Integrating paper and digital information on Enhanced Desk: a method for real-time finger tracking on an augmented desk system.” ACM Trans. on Computer-Human Interaction, Vol. 8, No. 4, pp. 307-322, 2001.

[5] Rekimoto, J., “SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces.” ACM CHI ’02, pp. 113-120, 2002.

[6] Joseph, E.B., Ishii, H., Underkoffler, J., Piper, B., Yeung, L., “Urban Simulation and the Luminous Planning Table: Bridging the Gap between the Digital and the Tangible.” Journal of Planning Education and Research, Vol. 21 pp.195-202, 2001.

[7] Jacob, R.J.K., Ishii, H., Pangaro, G., Patten, J., “A Tangible Interface for Organizing Information Using a Grid.” ACM CHI ’02, pp. 339-346, 2002.

[8] Brederson, J.D., Ikits, M., Johnson, C.R., Hansen, C.D., “The Visual Haptic Workbench.” Fifth PHANToM Users Group Workshop ’00, pp.46-49, 2000.

[9] Brave, S., Ishii, H., Dahley, A., “Tangible interfaces for remote collaboration and communication.” ACM CSCW ’98, pp. 169-178, 1998.

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

[11] 大平，川西，“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.

[12] 灘谷，石井，“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.