

[招待論文] Proactive Desk: 触感覚を提示するデジタルデスク環境

野間 春生

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

E-mail: noma@atr.co.jp

あらまし GUI画面上での操作感覚の共有、特に手先への操作感を共有するための技術として、digital desk環境での力覚提示システムの研究について紹介する。ここでは、リニア誘導モータを用いて、投影されるデスクトップ画面を一切遮ることなく、スクリーンそのものが力覚提示装置として機能する Proactive Desk を実現した。本稿では Proactive Desk の試作一号機の構成の紹介とそのアプリケーション例について述べる。

キーワード デジタルデスク、フォースフィードバック、バーチャルリアリティ、ハプティックフィードバック

[Invited Paper] Proactive Desk: A Digital Desk with Haptic Feedback

Haruo Noma

ATR Media Information Science Labs., Hikari-dai 2-2-2, Keihanna, Kyoto, 619-0288, Japan

E-mail: noma@atr.co.jp

Abstract We have developed two dimensional haptic display using two linear induction motors for a digital desk. The haptic display can generate translational force for a metal plate in any direction on the desk. We intend to equip the force display into a typical digital desk. The system allows a user to interact with both virtual and real objects on a desk with a feeling of realistic sensation. In the paper, we introduce the first trial system and proposed some applications.

Keyword Digital desk, Force feedback, Virtual reality, Haptic feedback

1. はじめに

デジタル革命により情報のグローバル化が進み、地球規模で情報の発信と共有が可能となった。そして今や世代や地域、職業、文化、社会の枠を越えた多様性を認めあうコミュニケーションを実現するメディアが求められており、我々は Web の様な蓄積型の非同期コミュニケーションを用いて、互いの体験共有をする"体験 Web"を提案している^[1]。我々は特に、この体験 Web での体験の入出力部となる五感メディアの研究を進めている。五感メディアとは、ある人の体験を記録し、これを相手のメディアや相手自身の履歴に合わせて再生して、追体験させるための技術である。その一環として、本稿では GUI画面上での操作感覚の共有、特に手先への操作感を共有するための技術として、digital desk環境での力覚提示システムの研究について紹介する。ここでは、リニア誘導モータを用いて、投影されるデスクトップ画面を一切遮ることなく、スクリーンそのものが力覚提示装置として機能する Proactive Desk を実現した。

2. Digital Desk 研究の流れと ProactiveDesk

Wellner が 1991 年に提案した Digital Desk のコンセプト^[2]は、従来のマウスとモニタを介したユーザーと計算機の間接的な関係を大きく変化させた。図 1 に示すように、Digital Desk ではごく一般的な机の上にデスクトップを投影し(Visual Display)、マウスアイコンの代わりにユーザー自身の指先を用いて直接操作する(Control)。また、カメラ等を用いて書類や人形等の実物を電子化された情報としてデスクトップ環境に取込むことも可能とした(Registration)。これ以降、提案された多くの digital desk では上記の三つの機能を多様な手法で実現しているが、五感メディアとして本研究で目標とする digital desk には、第四の機能であるユーザーに操作反力を提示する機能(Reaction)が必要になる。これは従来の digital desk では困難であったデスクトップ環境からユーザー環境への物理的情報の流れを実現する。

上記の三機能までの典型的な digital desk の研究例としては、小池らの Enhanced Desk, Augmented Desk^[3]

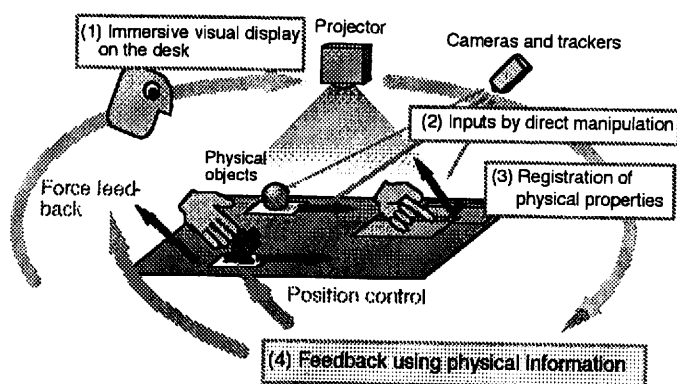


Fig1 The concept of a Digital Desk with haptic feedback

では赤外線カメラを用い、歴本の Smart Skin^[4]では静電容量変化によって机上の状態を検知するセンサーを開発し、高度なデスクトップ操作と実物体の形状や状況の取込み機能を実現させた。石井らは meta desk、I/OBulb、Urp、Senseable、Illusion clay^[5-7]と一連の digital desk 研究を進めている。これらではデスクトップ環境内で表示される情報を実物を介して手で操作し、都市計画や光学設計に利用している。

第四の機能であるデスクトップ環境から物理的な作用をユーザーや実物体にフィードバックさせる例として、Brederson は Virtual Haptic Workbench^[8]で PHANTom を利用して操作反力のみを提示するシステムを提案している。また、前述の石井らも PSyBench^[9]で、机の下に電磁石を取り付けた XY ステージを設け、机の上の物体の底部にも磁石を取り付け、これによってデスクトップ上の物体の動きに反映させる手法を、さらに Actuated Workbench^[10]ではリニアステッピングモータを用いた手法を提案した。前者のようにロボットアームを用いて digital desk 環境でユーザーに操作反力を与える方法では、作業環境が大きくなるに連れて装置が相当に巨大かつ複雑になり、digital desk の最大のメリットであるシームレスな操作感を損なう恐れがある。また、後者の XY ステージを用いる方法では、見た目は一般的な digital desk と変わらないが、磁石と電磁石の吸引力による力を用いており、物体は動かしてもユーザーへの触覚提示には発生力の面で不十分である。

そこで、我々は digital desk 環境そのものをモータとして直接並進力を発生させる誘導リニアモータ方式を用いた Proactive Desk 提案している。

3 Proactive Desk の構成

Proactive Desk の基本構造は 2 自由度のリニア誘導モータ(LIM: Linear Induction Motor)を力覚提示装置として採用し、これにフィードバック制御のための位置

計測装置を組み合わせている。以下に各構成要素について解説していく。

3.1 誘導リニアモータ

リニアモータは既存の回転モータの分類に対応して、リニア誘導モータ、リニア同期モータ、リニアパルスモータ、リニア DC モータに分類される^[11]。いずれも構造上は一次側と二次側の組み合わせで無限長の並進可動が可能な機構である。この中でも、特に LIM はコイル群を一次側とすると、二次側は単なる導体である。つまり机を一次側としてコイルを仕込めば、指先に金属片を取り付けておくだけで机上の指先に並進力を発生できる。他のリニアモータでは指先に永久磁石、又は、ケーブル付きコイルを装着して引き回す必要がある。

LIM は広く使われる回転型 AC モータを切り開き、直線上に引き延ばし、その上に二次側として導体板を置いた構造である。一次側のコイルは三相のコイルを複数並べたものであり、図 2 に示すように三相交流を印可するとコイルを並べた方向に進行磁界 B が生じる。すると二次導体板上にこの磁界の進行を妨げる方向に磁界を発生させる渦電流 i が励起される。この渦電流 i に対して進行磁界 B が作用して、フレミングの法則によって二次導体に並進力 F が生じる。従って、二次導体の力制御が簡単にできる反面、速度・位置制御には何らかのフィードバック制御が必要となる。また二次側が単なる導体板であり、大型化が容易で、単純な構造のため地下鉄やエレベータ等に広く実用化されている。

大平らは 2 機の LIM を組み合わせて X-Y ステージでの駆動へ利用した^[12]。構造は基本的には一次元の LIM と同じで、机の下に直交した二組のコイル群を並べ、机上に任意方向の合成進行磁界を発生させ、導

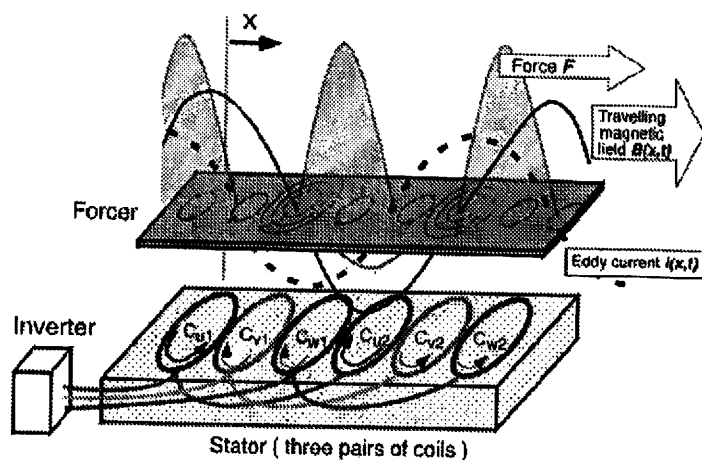


Fig 2 Operating principle of the LIM

体である二次側を自由に駆動させるというアイデアである。大平らはこの三次元 LIM を搬送ベルトコンベアの一部の経路切り替え部に応用したが、我々はこの二次元 LIM で力制御が可能である点と、二次側に相当する並進力生成部が単なる導体片である点に着目し、Proactive Desk として用いた。これによってデスクトップへのイメージの投影やユーザーの視野を遮るものは一切無しに、自由に指先や机上の物体に並進力を発生できるため、digital desk の特徴であるシームレスな操作感が全く損なわれない。

3.2 試作 2 自由度 LIM

試作機を図 3 に示す。設計は基本的に大平らの二次元 LIM を参考にした。ベースとなる一次側鉄心コアは楕形のけい素鋼板を積層した剣山のような構造で、並進力を発生するテーブル部分は 285x285mm である。コイルを設置するスロットは縦横に 9x9 個設けた。スロット間距離と幅は 15mm、深さは下コイル用に 60mm、上コイル用に 30mm とした。理想的にはコア上端直上に二次導体が接触するべきであるが、digital desk としてのイメージの投影面と一定量のギャップ確保のためにアクリル板をコア上に置いた。これによりギャップはアクリル樹脂を挟んで約 7mm とした。コア内部に配置する一次コイルは、200 回巻きコイルを用いた。これを直列に二個、さらにこれを三つ一組として二組を上下各スロット内に直交するよう配置する。コイルピッチは 3 スロット分で 45mm の 2 極モータとなる。

テーブル面で実際に力が生じる二次導体を我々は Force と呼んでいる。二次側に非磁性体と鉄板を重ねると磁束回路が閉じるために効率が向上するが、LIM ではコアが電磁石として鉄板を吸着するために保持機構無しには並進駆動できなくなる。従って効率よりも二次側の単純構造を優先して、Forcer にはアルミ板や

二組のコイルはそれぞれスター接続で、AC モータ用汎用インバータ(容量 2.4kW)を各軸独立に接続した。電源は三相 200V 交流を用いている。回転モータ用のインバータを転用しているため、現状ではコイルに印可する電圧と電流はインバータの制御に依存しており、外部からは印可する交流信号の周波数を操作し、これによって発生力を制御する。両インバータの出力は独立に制御可能であり、出力比によって並進力の発生方向を制御できる。最大出力は二次導体の形状や材質に大きく影響される。種類を変えながら試作機の特性を計測した結果では、厚さ 10mm、100x200mm の銅板を用いると 11N の並進力を発生できた^[11]。

コイル部分には数アンペアの電流が流れており、安全のために一次鉄心全体を覆うカバーを設けている。また、コイルの冷却のために、ファンによって強制空冷が必要である。

3.3 PSD を用いた位置計測

前述の様に LIM は一般的な AC モータと同様に並進力を発生する機能のみ有しており、力覚提示のためには反力制御と操作入力のためのユーザーの手先位置を計測する手段が必須である。ここでは、Forcer に赤外線 LED を取り付け、それを光学的に追従する手法を採用した。しかしながら、一般的な光点追跡に用いる CCD カメラベースの手法では計測の更新速度が 30Hz 程度しか確保できず、安定した力覚フィードバック制御が実現できない。そこでここでは数 KHz の応答速度で光点追跡可能な位置検出素子 PSD(Position Sensitive Detector)を用いた。PSD はカメラの形状をしているが、CCD とは根本的に異なり、2 次元方向に連続的にフォトトランジスタが配置されているため、PSD 素子上の光点の X,Y 方向の位置が電圧として出力される。Proactive Desk では図 4 に示すように、LIM の上にプロ

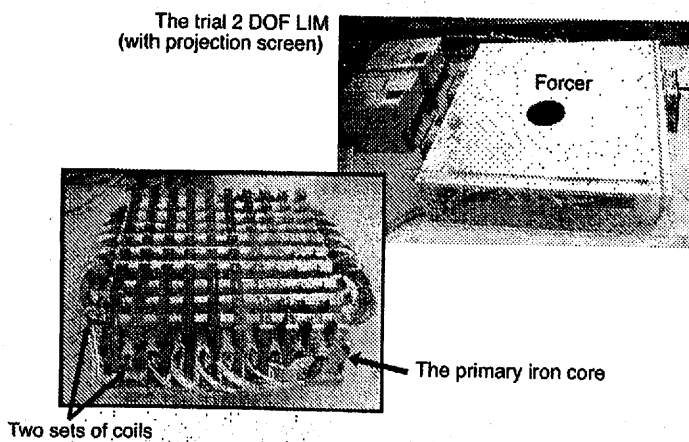


Fig. 3 The first trial

銅板を用いる。

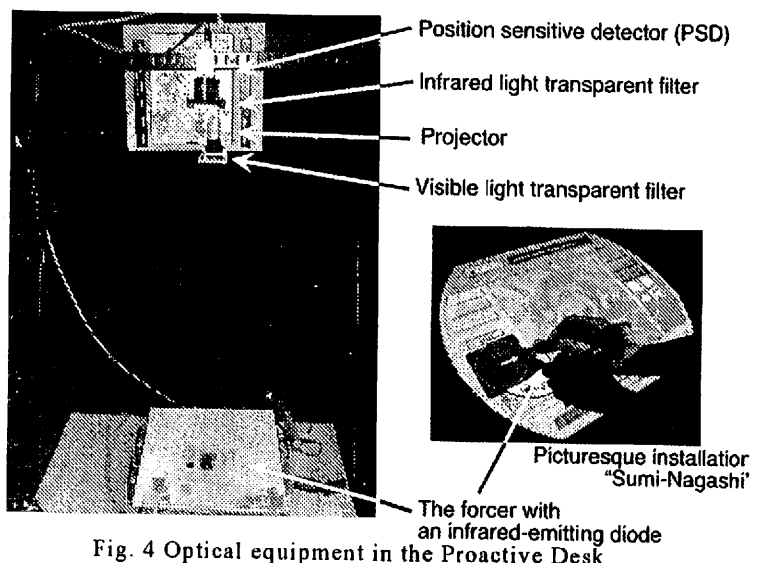
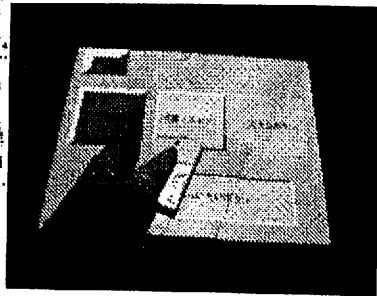
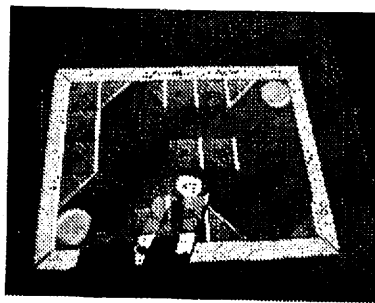


Fig. 4 Optical equipment in the Proactive Desk

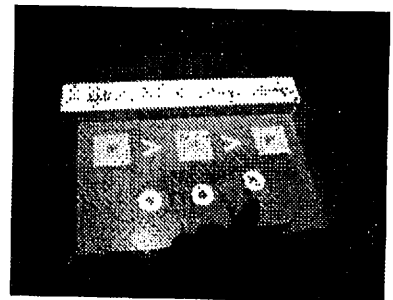
ジェクタとともに PSD を配置している。PSD は可視光



a) 3D button



b) Virtual path (maze)



c) Mass display

Fig. 5 Applications of the Proactive Desk

線から赤外光までの広い領域に反応するため、LED とデスクトップ上の映像を分別せねばならない、そこで、プロジェクターの投影レンズに可視光のみを透過するフィルターをとりつけ、さらに PSD のレンズには赤外光のみを透過するフィルターを取り付けている。

4. Proactive Desk の応用

Proactive Desk を用いた GUI への応用例を図 5 に示す。図 5a では GUI 部品のボタンへ触覚情報を付加している。ボタンは赤、黄、緑と、視覚的に操作の重要性、あるいは、危険性を提示している。しかし視覚情報のみではユーザーは無意識のうちに誤って危険なボタンを押すこともあり得る。そこで、これに対して触覚情報によって現実にボタンの押し難さを提示する。ここではボタンを押すべく、ボタンに指先を移動させようとすると、ボタンの重要度に合わせて物理的にボタンエリアの外に指先を押し出そうとする力を発生させる。

図 5b は迷路を指先の感覚で迎える UI の例を示している。迷路の壁に指先が接触した場合に、先のボタン同様に押し戻す方向に力を発生させている。これは GUI 環境でマウスアイコンを動かすべき方向をユーザーに提示できるため、触覚ヘルプ等へ利用できる。

図 5c はドラッグしているアイコンの質量を慣性力として提示している。対象アイコンのサイズ等の特性を質量になぞらえ、ドラッグしたときの感触によってそのサイズなどの GUI では表示しきれない情報を提示できる。

5 まとめ

2次元 LIM を用いた触覚を伴う digital desk 環境である Proactive Desk とそのアプリケーションを紹介した。試作 1 号機では技術的に小型化、冷却、独立複数点制御の問題がまだ残っている。しかし、いずれも次期試作機において改良を進める目処が立っている。

謝辞 本研究は通信・放送機構の研究委託“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。

文献

- [1] 鉄谷、野間、柳田、他、“体験 Web と五感メディア”、情報処理学会研究報告、2000-HI-98, pp.19-24, 2002.
- [2] Wellner, "The Digital Desk calculator: Tangible manipulation on a desk top display", Proc. of ACM UIST '91, pp. 27-34, 1991.
- [3] Koike, Sato and Kobayashi, "Integrating paper and digital information on Enhanced Desk: a method for realtime finger tracking on an augmented desk system", ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 8, No. 4, pp. 307-322, 2001.
- [4] Rekimoto, "SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces." Proc. of ACM CHI '02, pp. 113 - 120, 2002.
- [5] Ullmer and Ishii, "Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces", IBM Systems Journal, 39 (3&4), pp. 915-931, 2000.
- [6] Patten, Ishii, Hines and Pangaro, "Senseable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces", Proc. of ACM CHI'01, pp. 253-260, 2001.
- [7] Piper, Ratt and Ishii, "Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis". Proc. of ACM CHI'02, pp. 355 - 362, 2002.
- [8] Brederson, Ikits, Johnson, and Hansen, "The Visual Haptic Workbench", Fifth PHANTOM Users Group Workshop '00, pp. 46-49, 2000.
- [9] Brave, Ishii and Dahley, "Tangible interfaces for remote collaboration and communication", Proc. of ACM CSCW '98, pp. 169 - 178, 1998.
- [10] Pangaro, Maynes, and Ishii, "The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces", Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology '02, 181-190, 2002.
- [11] 海老原, "活発化するリニアモータ、アクチュエータの産業用利用—その背景と利用現況—", 機械設計, Vol. 39, No. 18, pp. 26-30, 1995.
- [12] 大平、川西, "2 方向リニア誘導モータの実験的検討", 計測自動制御学会論文集, Vol. 19, No.2, pp.74-79, 1983.
- [13] Noma, Yanagida, Tetsutani, "Development of a New Force Display System for a Digital Desk Using a 2-DOF Linear Induction Motor", Proc. of IEEE Virtual Reality '03, pp.217-224, 2003.