Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan the Eighth Annual Conference
日本バーチャルリアリティ学会第８回大会論文集(2003 年９月)

Proactive Desk の実装と応用
－流れる絵画「Sumi-Nagashi」の体験－

Implementation and Application of the Proactive Desk
– An Experience of a Streaming Picture of Sumi-Nagashi –

吉田俊介 [1)]，柿田充弘 [1)]，野間春生 [1)]，楜沢順 [1), 2)]，鉄谷信二 [1)]
Shunsuke YOSHIDA, Mitsuhiro KAKITA, Haruo NOMA, Jun KURUMISAWA and Nobuji TETSUTANI

1) ATR メディア情報科学研究所
(〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2, {shun, mitsu, noma, tetsutani}@atr.co.jp)
2) 千葉商科大学 政策情報学部
(〒272-8512 千葉県市川市国府台 1-3-1, kurumi@cuc.ac.jp)

Abstract: The Proactive Desk is a newly developed desk-style force feedback system which employs a mechanism of a linear induction motor. A translational force in any two-dimensional direction toward a nonmagnetic conductive metal plate on the desk is generated, and a position of the plate is electrically controlled by the computer in combination of position tracking system. When the user handles it as an interface, he/she can feel a virtual but real force from the digital world. This paper describes an implementation of the Proactive Desk through an application of digital art “Sumi-Nagashi”.
Key Words: *Haptic display, Force feedback, Digital art,Virtual reality.*

1. はじめに

Wellner により提案された Digital Desk[1]は，コンピュータにより生み出されるデジタルな世界を人が直観的に対話操作することが可能な環境の一例である．そこでは，利用者は自身の手や実物体を用いて直接コンピュータに指示を出し，情報を入力することができ，その計算結果は作業台として用いている机の上に映像として表示される．本研究は，デジタルな世界からの出力として現在一般的に用いられている映像や音声の他に，机上物体の位置制御や利用者への力覚の提示等の物理的な情報をさらに出力することが可能な環境 Proactive Desk を提案するものである．

本稿では Proactive Desk を用いた具体的な応用事例として，従来の視覚や聴覚にのみ訴えかけるデジタルアートに対し，身体的に知覚可能なデジタル絵画の作成環境「Sumi-Nagashi」を示し，その表現手法と共に Proactive Desk の実装について述べる．

2. 身体的に知覚可能な絵画「Sumi-Nagashi」

日本の伝統的な動きを持つ絵画である墨流しを題材としたこの作品では，デジタル絵画との視覚だけではなく触覚をも通じた対話環境を提供する（図１）．通常の描画用ソフトウェアがマウスやタブレットを使いディスプレイを見ながら絵を描くのに対し，「Sumi-Nagashi」ではコンピュータにて生成される絵を頭上のプロジェクタより机の上に投影し，利用者は筆型のデバイスを手に持ち，筆を使うかのように直接机上をなぞる．机上は一種のデジタルなキャンバスと定義されており，筆が動いた軌跡には色が置かれたとみなされ，それに応じてコンピュータグラフィックスも変化する．動的な絵画という作品とするために，キャンバスには色の層（カラーレイヤ）に加えて仮想的な流

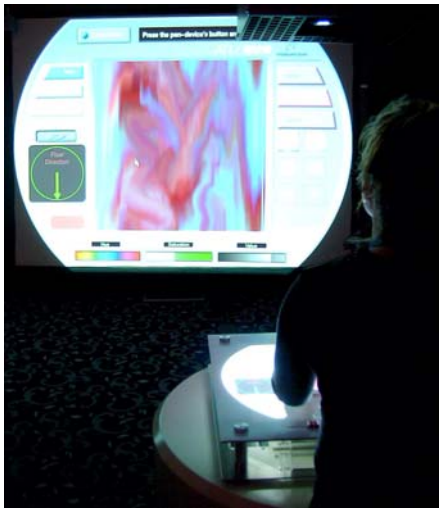

図１ 「Sumi-Nagashi」の体験風景
（正面の表示は観衆へのデモンストレーション用）

図２　描画時の視覚的な変化の例

れを持つ層（ストリーミングレイヤ）が定義されており，それにより描いたものが随時変化し続ける．ストリーミングレイヤの各場所における流れは利用者の行動により変化し，流れはカラーレイヤの色に反映される．利用者が新しい色をキャンバスに置いた時，付近のストリーミングレイヤの仮想的な流れによってその色は流される．そして，元のキャンバスの色と混ぜ合わさり，刻一刻と変化しつつ新しい絵が生み出される（図２）．

このような視覚的なデジタル絵画の流れの体験に加え，触覚的な体験を利用者に与えるために Proactive Desk をデジタルキャンバスとして構築した．これにより，コンピュータにより計算される描画結果としての仮想的な力が，利用者が持つ筆型のデバイスに物理的な力として伝わる．例えば，色や筆の大きさには仮想的な重さの属性が与えられており，キャンバスに存在する色の境界や暗い色を通り抜けるたびに触感としてその変化を感じることができ，また，ストリーミングレイヤにより定義されている仮想的な流れを感じることができる．すなわち，利用者はデジタルな筆やキャンバスの触感を通じて，絵画の持つ視覚的な色の感触を身体的に体験することができる．これにより，絵画における触感の存在がいかに創造的な作業にとって重要であったか，絵を描くものに対して再認識を促す．

3.　Proactive Desk

既存の描画用ソフトウェアでは，実際の筆やブラシの機能を模した道具を用意し，マウスやタブレットを使いながらディスプレイ上にて作業を進める．しかしそれらは実在の道具の物質的な感触を表現するものではなく，デジタルアーティストらは頭の中でその感触を補完しつつ作業を進めなければならない．また，様々な作業の結果の出力には視覚的な表示装置を用いるため，筆とキャンバスのような入出力装置が一体となった関係にはない．「Sumi-Nagashi」では，実際の物体からの自然かつより直観的な応答に近いものとして，デジタルなキャンバスを用い，力を利用者の手先に返すことを試みる．

提案する Proactive Desk とは，デジタルな世界との物理的なインタラクションを行うためのシステムである（図３）．概念の基となった Digiral Desk では，机上に置かれた物体をカメラや位置センサなどを用いて取得，解析し，デジタル化して情報をコンピュータに取り込む．入力情報はコンピュータにて処理され，その結果は頭上に設置されたプロジェクタから机上へ投影される映像として実世界に出力される．Proactive Desk ではこれに物理的な情報の出力チャネルを付加する．

物理情報を提示するための仕組みとして，我々はリニア誘導モータ(LIM: Linear Induction Motor)を用いた．図４に１次元の LIM の基本的な動作原理を示す．本システムでは大平らにより提案されている２組の LIM のコアを直交するように配置する方式[2]により，机の下に２自由度を持つ LIM を構築し，机上の非磁性体の導体（以下，Forcer と呼ぶ）に対して２次元任意方向に駆動させる力を発生させる．Forcer に生じる力はその面積や厚さに依存する[3]が，本試作機では 200mm×100mm，10mm 厚の銅板にて最大 11N 程度の力を計測することができた．

さらに，Proactive Desk ではこれを入出力装置として用いるために，Forcer を追跡しフィードバック処理を行う．Forcer には LED が取り付けられ，この光を頭上に配置した位置検出素子(PSD: Position Sensitive Detector)にて検出する．これにより，机上の任意地点への Forcer の位置制御や，特定箇所における任意量の力の発生などの制御を行う．なお，机上へはプロジェクタにより映像も投影されるため，LED には赤外線光を発するものを用い，PSD 側に可視光カット，プロジェクタ側に赤外線光カットフィルタを取り付けた．また利用者は Forcer を手にすることにより力という物理的な情報をデジタルな世界から得ることが可能である．

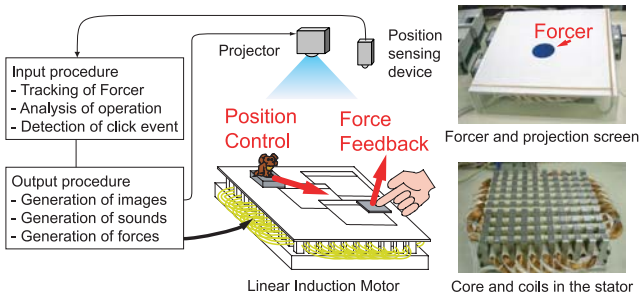

図３　Proactive Desk の概要

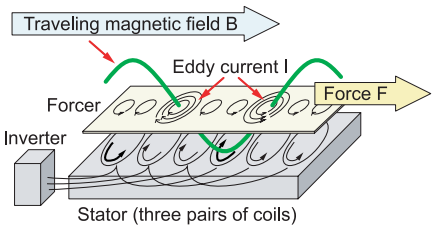

図４　リニア誘導モータ(LIM)の動作原理

１次元の LIM の動作原理は一般的な三相交流モータと同じである．１次側には３組で対となるコイルが動作方向に対して複数個並べ，これに三相交流が印加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２次側となる導体内には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．この渦電流に対して進行磁界が作用し，フレミング則に従い２次側の導体に並進力 F が生じる．

「Sumi-Nagashi」では Forcer 上に筆型のグリップを持つ装置を取り付け，入力インタフェースとして用いている．Forcer はキャンバスと同一の色に塗られ，図５に示すように，マウスの代わりとして利用できるようグリップ部にボタンが配置されている．ボタンを押した際にはパルス的な明滅が生成される．PSD は数 kHz でもサンプリング可能なアナログデバイスであり，これをトリガとして検出することによりクリック操作を実現する．

Proactive Desk における力覚提示の仕組みの特徴として，利用者に見えるのは Forcer だけであり，ほぼその構造をキャンバスである机の下に隠蔽することが可能な点が挙げられる．これは，頭上から投影されるコンピュータの映像を阻害するものが少ないことを意味し，利用者は通常のタブレットを扱うかのように机上での操作が行える．さらに LIM を用いる利点として，強力な力をキャンバス全体にわたる広い範囲に容易に発生させることが可能な点が挙げられる．結果として，Digital Desk に要求されるような２次元での作業が，磁気的な吸引力による机上物体の位置制御装置[4]や，機械的なリンク機構による他の力覚提示装置[5]らと比較してより簡単に行うことが可能である．

4.　「Sumi-Nagashi」における絵と力の表現

「Sumi-Nagashi」のデジタルなキャンバスには図６に示すような２つのレイヤが定義されている．利用者による筆型デバイスのドラッグ操作により置かれていく色はカラーレイヤ上に加えられる．カラーレイヤ上の色はストリーミングレイヤによって定義される仮想的な流れに沿って徐々に運ばれていく．ストリーミングレイヤは２次元速度ベクトルの場として表現されており，場所によって異なり，逐次変化するものである．

描画用の筆としては３種類の機能が用意されている．単純に色を置く筆のほかに，キャンバス上に既に置かれている未乾燥の絵の具をあたかも塗り広げるかのような筆と，ストリーミングレイヤの流れの一部をせきとめたり加速させたりするように変化させる筆が用意されている．これらの筆の種類の他にも，大きさや色は，利用者が自由に変更することが可能である．

これらの描画が行われる際，キャンバスに視覚的な変化だけが生じるのではなく，利用者が持つ筆型のデバイスに対してキャンバスからの物理的な触覚の情報として力が加わる．ここで，利用者が受ける流れは「慣性」，「流体抵抗」，「摩擦抵抗」をモデル化した３種類の仮想的な力の合力として定義されている（図７）．

慣性は選択中の色の「重さ」と筆の大きさにより決定する仮想的な重さの量と，筆の移動により計算される加速度に比例し，進行方向に逆らう力として定義される．ここで，各色の「重さ」とは，明度を基準とした心理的な色の印象を基に，輝度値に変換した際に白色が最も軽く，黒色が最も重い量となるように定義した．描画により筆の下の絵が変化した場合，例えば徐々に暗い色に変化する場合はそれに応じて慣性力も変化する．

流体抵抗は流れから筆が受ける力である．ストリーミングレイヤ上の筆の接地している領域を対象として速度ベクトルの総和平均を求め，それと筆の接地面積との積により，流れの向きと大きさを決定する．これは結果的にカラーレイヤの色が流れていく方向へ押し流すかのようにデバイスへ働く力となる．

摩擦抵抗はキャンバス上の色を基準に定義される力である．具体的には筆の進行方向前方に存在するカラーレイヤ上の色の重さ（慣性と同様に定義）の変化を基に計算される．進行方向前方の対象領域から求められる標本偏差に比例した大きさを力の進行を妨げる力として定義し，方向は進行方向と逆方向とする．標本偏差は色の変化が少ない部位では小さく，変化が大きい部位では大きくなるため，進行方向に対するキャンバスの色変化に応じた一種の摩擦抵抗値として機能する．

これらの合力を提示することにより，利用者が著しく色が変化する領域内で筆を走らせたり，速い流れの中を進むように動かす時，その場所のキャンバスの特性に応じた感触を得ることを可能とした（図８）．

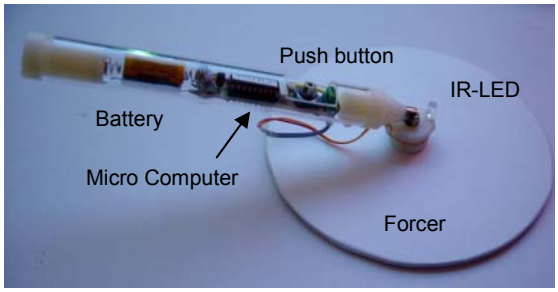

図５　ペン型グリップを伴う Forcer

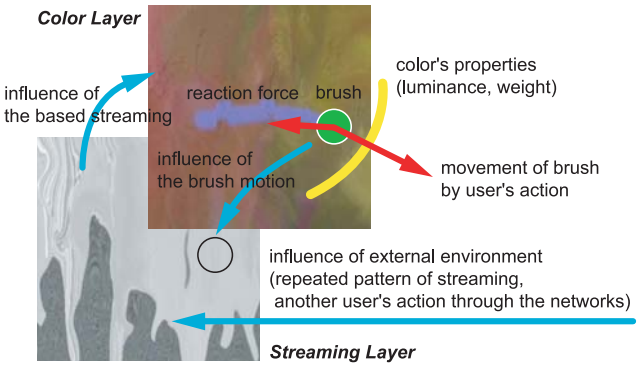

図６　キャンバスの内部構造

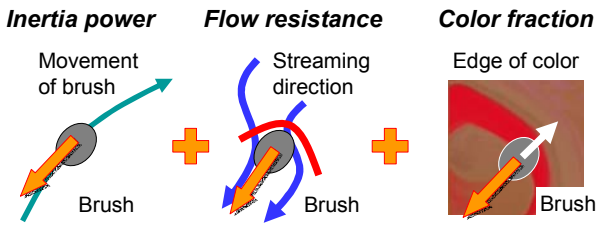

図７　定義した力の概念図

5. 「Sumi-Nagashi」のコンセプト

最先端の技術を好み用いるアーティストたちにとっては，現代においてコンピュータを彼らの道具として選択することは自然な傾向であるとも言える．しかし現状での表現の形は，視覚と聴覚の感覚チャネルに訴えかけるものが主流であることが多く，その結果として，創造に必要とされる作家の身体性という重要な要素の活用が疎かになる傾向があった．

芸術における身体の重要性は，芸術に関わるすべての人，特に作家は強く認識するところであった．自らが関わる素材と道具とを体で会話し深く感じるところから人を魅了する芸術は誕生するという[6]. いわゆるデジタルアーティストはそういった体感を，現実世界に存在しない道具を用いて，あたかも実在し，触っているかのように自らの想像力により無理やり補完することで得てきた．すなわちこれはごく限られた生命体としてのリソースのみを用い，全てのリソースを用いてきた従来の芸術分野と同等の仕事をしなければならない状態に置かれていたと言える．これがデジタルアートやメディアアートに他の芸術分野と比較して，多角的な創造性に限界があるように感じられ，まるで人間の存在が必要無いように感じられる原因のひとつでもある．しかしながらこれをもってこの分野に将来性が無いと言う事は早計であり，単にそのための道具が未熟なだけである．

我々は，芸術作業における身体性，視覚と脳の生理的な関係をもっと研究し，合理的な知覚の拡張を進めるべきである．この「Sumi-Nagashi」はデジタルアートの世界に身体性を取り込むためのひとつの試みであり，視覚と触覚の調和により生まれる新しい芸術の可能性を例示するものである．画家が絵の具の粘性や，キャンバスと絵の具の接着具合を微妙な触覚によって正確に把握し，必要な効果を構築していくのと同じ次元でのデジタルならではの身体性の拡張こそが本研究の最終的な目的である．

6. おわりに

Digital Desk の概念は, コンピュータの中で帰結していたデジタルな世界と我々のいる物理的な世界との障壁を取り除くひとつの力となった．机に置かれた実世界の物体の性質（個数，形，大きさ，色，文字など）はコンピュータの世界に取り込まれ，机上に表示されたアイコンはマウスの代わりに指で直接操作することができた．しかしながら，このシステムでは利用者に対して映像という形でしか情報を提供することができなかった．これは視覚的なインタラクションの輪は閉じているのに対し，物理的なインタラクションの輪は実世界から仮想世界への入力，一方向のみに制限されていたと言える．

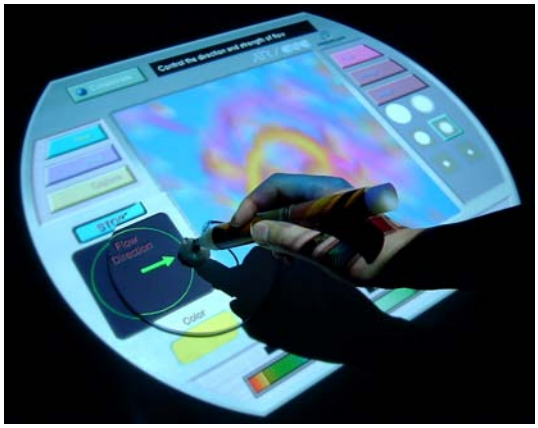

図 8 「Sumi-Nagashi」の操作画面

Proactive Desk は完結した物理的なインタラクションの輪を Digital Desk の概念にもたらすための解のひとつである．例えば既存の GUI へ応用し，致命的な結果を引き起こすボタンに対してはボタンに進入しづらい力を発生させ，奨励するような操作に対してはそちらへ誘導する力を発生させることにより視覚に加えた物理的な操作支援を行うことが可能である．また Forcer を位置制御させるための仕組みを実装していることにより，例えば机上に投影された地図上を Forcer に配置した車の模型が移動して道順を示すといった，コンピュータグラフィックスではなく，実物を用いた視覚的な情報提示なども可能となる．力覚のフィードバックを描画用ソフトウェアや CAD などに取り入れることにより，利用者は筆や定規といった実在する他のツールの模擬的な物を使えるだけではなく，刻一刻と形が変化する定規やある一定の法則に基づき描画中の軌跡が変化していく筆など仮想的なツールを使うことも可能となる．さらに, 机自身が利用者のまたは他人の行動を記録, 蓄積し，再生することにより，時間や場所に束縛されず自分や他人の感覚を共有できる装置となるだろう．「Sumi-Nagashi」は仮想的な触覚情報をデジタル描画ソフトウェアに取り込んだ例であり，デジタルアーティストに新しい表現手法を提案するものである．

今後は展示等を通じた多くの人々への体験の提供を行い, 本システムの有効性を検討したい. また, Proactive Desk の力覚提示性能を向上させることにより，より豊かなデジタル世界からの表現手法を模索する．

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．

参考文献

[1] P. Wellner : The Digital Desk Calculator: Tangible Manipulation on a Desk Top Display, ACM UIST ’91, pp.27-33, 1991.
[2] 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.
[3] H. Noma, Y. Yanagida, and N. Tetsutani : The Proactive Desk: A New Force Display System for a Digital Desk Using a 2-DOF Linear Induction Motor, IEEE VR2003, pp.217-224 , 2003.
[4] G. Pangaro, D. M. Aminzade, and H. Ishii : The actuated workbench, ACM UIST '02, pp.181-190, 2002.
[5] SensAble Technologies, Inc. : PHANTOM, http://www.sensable.com/, 1996-2003.
[6] S. Zeki : Inner Vision: An Exploration of Art and the Brain, Oxford University Press, 2000.