

dePENd：ボールペンの強磁性を利用した 手描き補助システム

山岡 潤一^{1,a)} 笥 康明^{2,b)}

受付日 2013年6月24日, 採録日 2014年1月8日

概要：本研究では、通常のペンと紙を用いて手描きを支援するシステム dePENd を提案する。本システムはボールペンのペン先の強磁性に着目した。机内部の磁石の位置を XY ステージとコンピュータで制御することで、筆記時のペンの動きを制御する。身近な道具を介した触覚的なガイドにより、ユーザの描画スキルの向上が期待される。アプリケーションとして、図形や直線の自動的な描画や、アレンジの追加、通信機能やコピーアンドペーストなどの機能を実装した。本稿では、システムの基本設計と実装およびアプリケーション、技術評価、今後の展望について述べる。

キーワード：創作活動支援、手描き、インタラクティブ・ファブリケーション

dePENd: Sketching Aid System Using the Ferromagnetism of a Ballpoint Pen

JUNICHI YAMAOKA^{1,a)} YASUAKI KAKEHI^{2,b)}

Received: June 24, 2013, Accepted: January 8, 2014

Abstract: This paper presents dePENd, a novel interactive system that assists sketching using regular pens and paper. Our system utilizes the ferromagnetic feature of the metal tip of a regular ballpoint pen. The computer controlling the X and Y positions of the magnet under the surface of the table provides entirely new drawing experiences. Haptic guides using regular tools are expected for rising drawing skills for users. For example, users can draw diagrams and pictures, add an arrangement, use a communication function and copy and re-draw function. In this paper, we describe the detail of design and implementations of the device along with applications, technical evaluation and future prospects.

Keywords: creativity supporting tools, sketching, interactive fabrication

1. はじめに

筆記具で紙に絵や文字を描く“手描き”は、われわれの日常的な営みである。手で描いたスケッチやメモは、手軽な表現手段であり、思考のための手段であるともいえる。その中で、コンピュータによる精度の保証や保存・複製可能性を取り込み、手描きとデジタルドローイングを融合し

ようとする取り組みが行われている。多くの取り組みが、ペンの動きを入力として取り込みデジタル画面内で描画・処理を行うという手法をとる中で、物理的な紙とペンの組合せを重視し、情報を動的に表示できる特殊な紙などを用いて直接的に描画を拡張あるいはサポートする試みも行われるようになってきた[19]。

このような背景のもと、従来の視覚的にガイドを与えるあるいはフィードバックする研究に対して、本研究では一般的な紙とペンの組合せを用いながら、触覚的なガイドによって手描きのスケッチを補助・拡張することを考える。関連するアプローチとして、Willis らの提唱する Interactive Fabrication [15] をあげる。これは、フィジカルな入出力を兼ね揃えた工作機械によるものづくりであり、

¹ 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University,
Fujisawa, Kanagawa 252-0882, Japan

² 慶應義塾大学環境情報学部
Faculty of Environment and Information, Keio University,
Fujisawa, Kanagawa 252-0882, Japan

a) yamajun@sfc.keio.ac.jp

b) ykakehi@sfc.keio.ac.jp

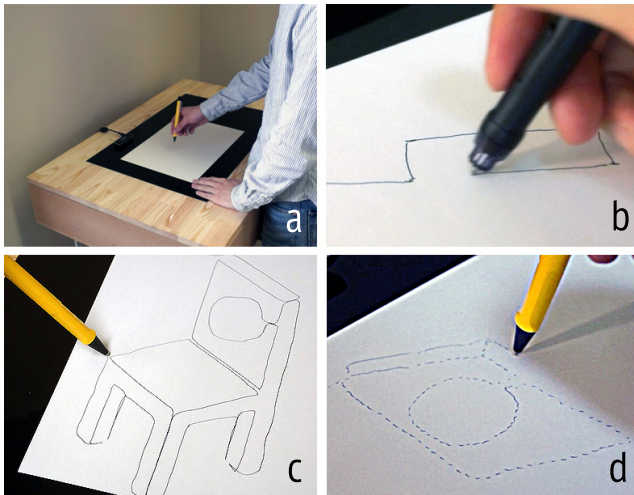


図 1 (a) dePENd: (b) ユーザは直線や (c) 図形を描画でき、(d) 描画行程中に自由に修正などを加えることができる

Fig. 1 (a) dePENd: (b) The system enables users to draw exact shapes such as lines, (c) diagrams, (d) and allows users to arrange pictures freely during the drawing process.

人の作業を機械が支援し、機械の作業に人が手を加えるという、相互関係の構築に特徴がある。本研究では、この Interactive Fabrication の概念をもとに、人の描画をコンピュータがアシストし、コンピュータによる描画に人が手を加えるという、描画補助システム dePENd (図 1) を提案する。具体的に、本システムでは、ボールペンの強磁性に着目し、机の下に配置された磁石の位置を制御することで、ボールペンを引きつけ、ペンの動きを制御する。

本システムでは、この触覚的なガイドにより、あらかじめコンピュータに入力した図形などを、ペンの動きに任せることで紙上に手で描くことができる。この際、ペンは物理的に固定されていないため、ユーザは磁力に逆って描かれる絵にアレンジを加えるなど、描画プロセスに介入したり変更したりすることが可能である。さらに、デジタルペンを用いて、ユーザの描画した絵をコンピュータに取り込み、紙の上に再度複製したり、スケールを変えたりするなど対話的な機能も実現する。

以下本稿では、このような機能を持つ手描き拡張システム dePENd の概要と設計・実装、システムおよびインタラクションの評価、まとめと今後の展望について述べていく。

2. 関連研究

2.1 デジタル技術を用いた手描き支援研究

これまでデジタル環境においてスケッチを支援したり、スキルの向上を促したりするための研究は数多く提案されてきた。SketchPad [13] は、ディスプレイとライトペンにより、フリーハンドの線を補正したり、図形の複製を提案したりして、ユーザの試行錯誤を促し、デザインの向上につなげた。またコンピュータを操作に用いるだけでなく、描

画した線や図形をコンピュータが認識し、提案する研究が行われてきた。Pegasus [4] は、手描きで描画した線を自動的に整形し補正するソフトウェアである。ShadowDraw [7] はユーザの描画したい絵を予測し、半透明のガイドとして表示することで、絵を描きやすくし、描画スキルの向上を目的としたソフトウェアである。

これらの研究は、デジタル画面による視覚情報を通して描画を支援するのに対して、本研究ではペンと紙を用いた手描きの体験の中で物理的にペンの位置を制御しながら、ユーザの身体動作を誘いながら描画支援を行う。

2.2 インタラクティブ・ファブリケーションに関する研究

近年、3D プリンタ、レーザカッタなどの工作機械をコンピュータにより自動化しながら、ネットワークを介して個々の機械をつなげることで、個人のラピッドプロトタイプングを支援するパーソナル・ファブリケーション [3] が注目されている。

このような流れの中で、本研究のシステムと似たアプローチを採用している研究としてあげられる Suspended Pen on an XY Plotter [9] は上部から下げたペンの位置を制御でき、また Center pivot pen plotter [2] は円弧状にペンを動かしながら描画を行う。これらは機械による自動的な描画であり、描画プロセスにおいて人が介入することはできない。

手作業とデジタル技術を組み合わせたものづくり Interactive Fabrication の研究として、Shaper [15] があげられる。Shaper は CNC 機械と透明タッチスクリーンを用いた立体物造形システムである。タッチスクリーンの任意の場所に触れることで、対応した場所にポリウレタン樹脂が噴出され、直感的に立体物を造形できる。また、Interactive Construction [10] は、レーザポインタとレーザカッタを用いた木材加工支援システムである。木板にレーザポインタで任意の図形をなぞると、コンピュータが手描きの線を精度の高い線に補完し、レーザカッタで切断し、精度の高いプロダクトを手描きで簡単に制作することができる。これらは従来の CAD などによる設計とは異なり、直感的な設計が可能であるが、実際の造形作業に対する入力直感性に関しては改良の余地があるともいえる。

入出力が一体となった造形支援の研究として Haptic Intelligentsia [6] があげられる。Haptic Intelligentsia は触覚インタフェース (Phantom Omni [12]) とグルーガンを用いた手持ちの 3D プリンティングマシンである。ユーザは触覚フィードバックを手がかりに、樹脂を噴射することで、あらかじめ入力されたデータを立体物として造形できる。Free D [17] は、専用のデバイスで木などをなぞることで、切削し立体物を造形できる手持ちのデジタルミリングマシンである。磁気センサと小型のミリングマシン、コンピュータが内蔵されたデバイスを用いることで、あらかじ

め入力した立体データの輪郭に沿って、ミリングマシンの先端が移動し、全体をなぞっていくことで立体物が完成する。これらは機械の動きをガイドとして用いることで、手作りのアレンジや途中で変更することが容易である点において本研究と共通する。

入出力が一体となり、かつ本研究と同様に紙への描画を支援する研究として DigitalRubbing [5] があげられる。このシステムでは紙を専用のペンでこすることで、下のディスプレイ上に映されたグラフィックを紙に写しとることができる。タブレットセンサとソレノイドの内蔵されたペンを用いることで、タブレットディスプレイ上に描画されている画像にペン先が接触すると、ペン型デバイスのペン先が押し出され、擦ることで紙にディスプレイと同じ絵を描くことができる。また、本研究と近い構成を持つ研究として、Blind Self Portrait [8] は、目を閉じた状態で、体験者のポートレートを自動描画できる作品である。ペンを握った手を台に置き、あらかじめ撮影した自分の写真データに沿って台を移動させることで、自動的に自分の顔の絵を描画する。これらは通常のプリンタなどと異なり、途中で変更できたり、アレンジを加えられたりするため、手作りの良さをデジタルファブリケーションに加えることができる。また佐久間らは、触覚提示装置 SPIDAR と筆を用いて、遠隔地のユーザに力覚を用いて書き方を教示するシステム [18] を提案している。これらに対し、本研究では、特殊なペン装置を新たに開発することなく、手描きを拡張し、さらにはインタラクティブな機能も付加できるという特徴を持つ。

2.3 磁力を用いたインタフェース研究

触覚ディスプレイやタンジブルインタフェースの研究では、磁力を利用してフィジカルな物体を動かしたり、ユーザの指に触覚を与えたりする試みがなされてきた。Actuated Workbench [11] や Proactive Desk II [16] はアレイ状に配置した電磁石を用いて、フィジカルな物体を制御し、コンピュータを直感的に操作するインタフェースである。Kobito [20] は磁石を配置し SPIDAR [1] の機構を用い、テーブル上の箱を移動させることで、ユーザとバーチャルクリーチャのインタラクションを可能にしている。FingerFlux [14] では投影されたスクリーンの下に電磁石を配置し、ユーザの操作に対する触覚的なフィードバックを提示している。小型の磁石を指やペンに装着することで、ユーザは場所に依りて、触覚を感じることができる。

これらのシステムに対して、本システムではペンの動きを磁力により制御し、ユーザのスケッチ支援に用いる。

3. dePEND の設計

本研究で提案する手書き拡張システム dePEND は、磁石の移動によりペンの動きを制御することで、通常のペンを

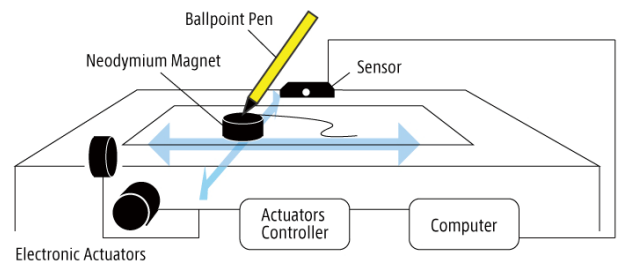


図 2 dePEND システム図

Fig. 2 Overview of the dePEND system.

用いながら、コンピュータで指定された図形や絵の描画を可能にする。具体的には、机型装置の上に紙を置き、通常のボールペンを乗せることで、ボールペンのペン先がコンピュータ制御された磁石の動きにより操作され、半自動で図形を描画する。図 2 は本システムの構成図である。

具体的には、製図などで必要な丸や直線や、コンピュータにインプットした図形データなどを手描きで描画できる。さらに大きな特徴として、普通のボールペンを用いるため、描画の工程途中で介入し、自由に変更やアレンジを加えることができる。

同様にペンの動きをコンピュータによって制御する方法として、Phantom Omni [12] はアクチュエータを内蔵したアームを使用し、SPIDAR [1] はモータとテグスを用いることで制御する。嵯峨らのシステム [21] では、PHANToM Desktop とセンサを用いて、ユーザの文字を書く学習の支援を提案している。これらは触覚提示や物理的なペンの制御には適しているものの、ペンを握った手に装置を装着する必要があるため、ユーザの能動的な動きに関しては制約を与える可能性がある。一方で、本システムは、テーブル内部に装置を埋め込むために、やや大規模な構成となるという短所はかかえるものの、ペン先が強磁性である普通のボールペンを用いることができ、ペンを握る位置や傾きに制限がなく、普段と同様の状況でペンを操ることができるというメリットがある。さらに、本研究の大きな特徴として、ペンを物理的に固定しないため、機械による半自動的な描画と手描きによる描画を自由に行き来することができ、機械による描画中に人が自由に介入し、アレンジを加えるなどのインタラクションが可能である。

3.1 ペン制御の設計

本システムはボールペン、磁石、電動アクチュエータ、制御コントローラからなる机型装置と制御用プログラムの内蔵されたコンピュータから構成される。磁石の位置を XY 軸電動アクチュエータにより制御することで、吸着したボールペンのペン先の位置をコンピュータ制御により移動することができる。

本研究では筆記用具としてボールペンを用いる。一般的なボールペンのペン先の材料はニッケルを含むステンレス

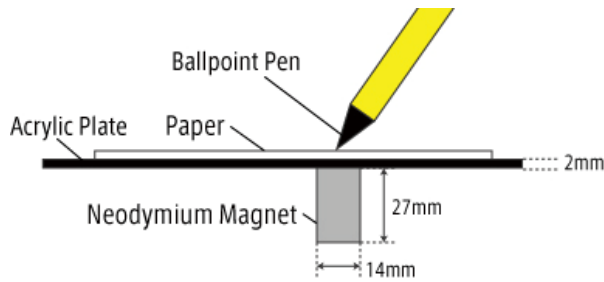


図3 磁石およびアクリル板のサイズ

Fig. 3 Size of magnets and acrylic boards.

銅であり、強磁性を有する。そのため、磁石を用いることで、ペン先を誘導することができる。

磁石には、磁束密度が高く、強い磁性を持つネオジム磁石を使用した。ネオジム磁石の形状は丸型で、大きさは直径 14 mm 高さ 30 mm である (図 3)。磁気特性は表面磁束密度が約 450 mT, 吸着力が約 12 kgf である。形状を丸型にすることで、ペン先の位置を磁石中心に近づけることができる。またフェライト磁石より磁力が強いため、ペン先と磁石の間に板や紙を配置しても吸着する。なお、今回の実装ではテーブル面には厚さ 1 mm のアクリル板を用いた。

電動アクチュエータには、タイミングベルト駆動の電動アクチュエータ (オリエンタルモーター製, EZ limo EZSII) を 2 台 XY 軸として使用した。可動ストロークは X 軸 500 mm Y 軸 300 mm, 分解能は 0.01 mm, 最高速度は 60 mm/s, 最大推力は 43 N である。移動するテーブル上にネオジム磁石を配置することで、磁石の位置を X 軸 500 mm Y 軸 300 mm の範囲で自由に移動することができる。

ステッピングモータの制御には、マイコン (AT-MEGA328P) を使用した。マイコンと制御用コンピュータをシリアル通信で接続し、制御プログラムからモータの回転方向と速度の値をマイコンにリアルタイムに送信し制御する。送信する値はあらかじめプログラムに入力されている値か、デジタルペンを用いた際に入力した値を用いる。今回は試作機のため、制御用コントローラとコンピュータを配置したが、将来的には制御用コントローラのみでモータの制御を行う。

ボールペンの動きの制御に関する値は、制御用コンピュータ内のソフトウェアで計算される。具体的にはソフトウェア内で、描きたい図形データを機型装置内のモータの回転方向と速度のデータに変換する。変換したデータを機型装置内の制御コントローラに送信することで、電動アクチュエータを制御し、描きたい図形を描画する。

3.2 ペン座標認識の設計

通常のボールペンの代わりにペン先の座標が取得できるデジタルペンを用いることで、ペンを置いた場所から描き始めたり、描いた絵を複製したりできるなどインタラク

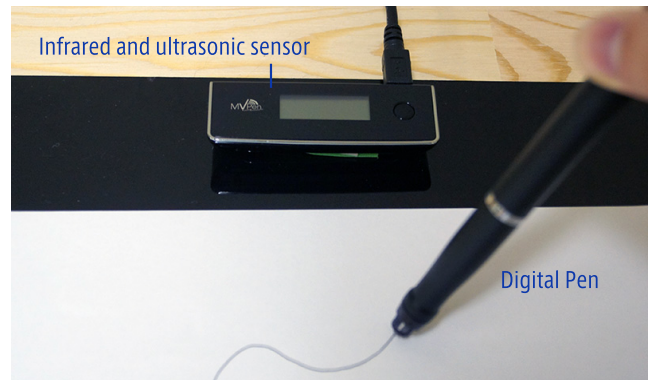


図4 赤外線/超音波検知ユニット, デジタルペン

Fig. 4 Infrared and ultrasonic sensors and Digital Pen.

ティブな操作が可能である。

本提案は、インタラクションが可能なバージョンとして、MVPen Technologies Ltd 製 MVP-1 を用いた装置も設計・実装した。テーブルの上に、赤外線/超音波検知ユニット (MVP-1 に付属) を置くことで、紙の上でのペンの位置および、ペン先の紙への接触イベントを検出することができる (図 4)。

このペンの位置情報を、磁石の位置制御座標系に変換し、ペンの動きに磁石の動きを連動させるインタラクションを起こす。具体的には、後述のように描き始めの位置の指定や、ユーザの描画した形状を記録することに用いることができる。

3.3 基本機能

本研究では、インタラクティブ性のあるラピッドプロトタイプングのために、基本となる図形の描画、あらかじめインプットした絵の描画、さらに描いた絵を複製する機能を開発した。ユーザは、日常的に行う手描きと基本機能を自由に切り替えながら描画することができる。

3.3.1 入力したデータの描画

あらかじめコンピュータに入力したデータを描画する機能である。通常のボールペンを用い、描画を開始する原点にペンを置くことで、ペンの移動経路の位置情報が記録された図形データをもとに磁石が動作し自動的に絵を描画する。通常のボールペンを用いる際には描かれる絵が一筆書きという制限があるが、デジタルペンを使用することでユーザの描き始めたい場所の指定が可能である。現在の実装では数種類の図形パターンを用意しており、ユーザはキー入力により切り替える。データを自動的に紙の上に描くということ自体は先行研究でも可能であるが、dePENd のハードウェア構成のもとではデータの描かれる手順を実際にペンに手を添えながら体感できる。

3.3.2 直感的な図形の描画

dePENd では描画の過程で、ペンを用いてインタラクティブにコンピュータに指示を与えることができる。この

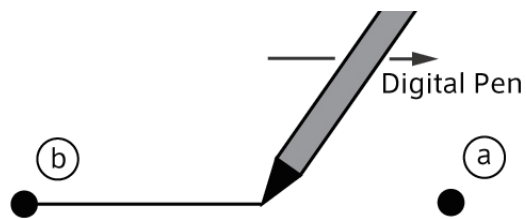


図 5 直線描画機能
Fig. 5 The line drawing function.

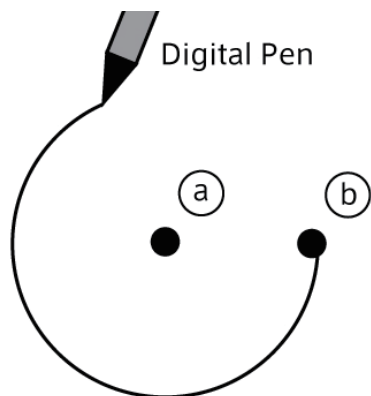


図 6 円描画機能
Fig. 6 The circle drawing function.

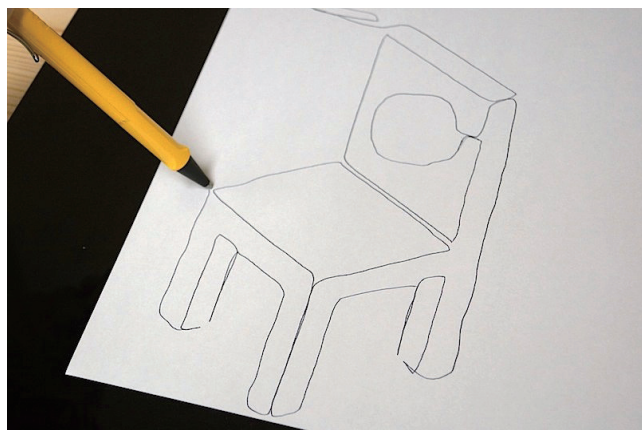


図 7 直線，円描画機能を組み合わせた描画の様子
Fig. 7 Users can combine the functions of drawing circles and lines.

ような機能として，描画の基本となる円や直線などの図形を描画する機能を実装した．通常，円や直線などを手描きする際には，コンパスや定規が必要である．これらの道具の代わりに，一定方向や円状に磁石を移動させることで，手描きで正確な図形を 1 つの装置で描画することができる．

ユーザはデジタルペンを用いることで任意の長さや直径，位置に図形を描画することが可能である．たとえば直線を描画する際には，紙上の任意の 2 点を描画することで，2 点間を通る正確な直線を描画できる．具体的には直線描画機能を選択後，図 5 (a) の場所にデジタルペンで点を描画し，2 点目である図 5 (b) の場所に点を描画した直後，磁石がペン先に移動し，1 点目の位置までペン先を移動させ直

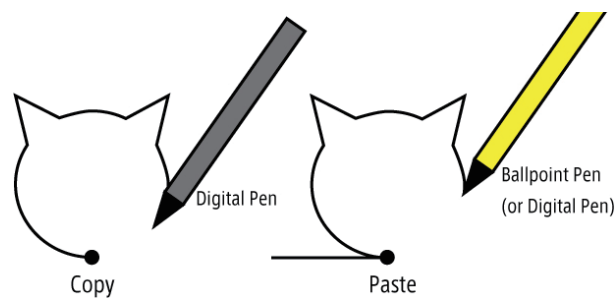


図 8 コピーアンドペースト機能
Fig. 8 The copy-and-re-draw function.

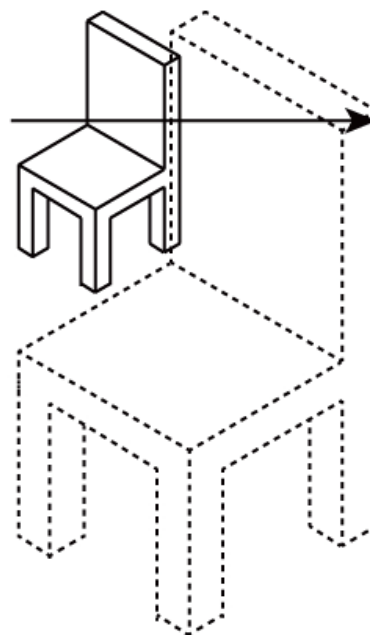


図 9 スケール変更機能
Fig. 9 The scaling function.

線を描画する．直線の長さは，2 点間の距離を変更することで自由に変更できる．これを繰り返すことで三角形や四角形など様々な図形を描画することが可能である．

円の描画も同様に任意の 2 点を描画して行う．円描画機能を選択した後，デジタルペンで 1 点目図 6 (a) を円の中心として描画し，2 点目図 6 (b) を円の半径の設定として描画することで自動的に真円を描画する．図 7 はこれらの機能を組み合わせて描画した椅子の絵である．

3.3.3 コピーアンドペースト機能

直線や円などの正確な線を描画に加え，通常の手描きにデジタル技術を加えた新しい表現のための機能として，デジタルペンを用いて，描いた絵を複製するコピーアンドペースト機能を用意した (図 8)．

ユーザが絵を描画する際の紙にペン先を置いてから離すまでの移動座標をコンピュータに記録することで，再び任意の場所にペン先を置くと，ペン先の位置に磁石が移動し，記録した絵を自動的に描画することができる．

これは，先行研究同様に同じ絵を紙の上に複製できると

いうメリットに加えて、後述するように、同じ絵をベースにして手で少しずつアレンジを加えるなど dePENd ならではの描画体験を提供する際の基本となる機能である。通常は手描きで同じ絵を描くことは難しいが、本システムでは同じ絵を描画できるため、群集を表現したり、少しずつ変えたりすることでスケッチの試行錯誤が可能である。またスケッチの熟達者のペンの動きを記録し、ガイドとして使用することで、ユーザの描画スキルの向上が期待される。

3.3.4 スケール変更機能

スケール変更機能は描画した図形の大きさなどを自由に変更できる機能である。デジタルペンで直線や円描画機能、フリーハンドで描画したプロセスを記録した後、スケール機能に切り替え、図 9 のように矢印を描画する。コンピュータがスケール変更後の図形座標を計算し、ユーザは紙を代え、ボールペンを原点に置くことで、大きさの変更された絵を自動的に描画できる。矢印の大きさを変更することで、図形の大きさを変更でき、また矢印の方向を変えることで、反転なども表現できる。

4. 応用例

本システムの機能を用いることで、描画スキル習得や新たな表現への応用が期待される例として描画物のアレンジの追加や、遠隔地のユーザとの描画共有について述べる。

4.1 アレンジの追加

本研究の特徴的な表現として、コンピュータによる描画に手描きによって修正や変更などのアレンジを加えることができる。ペンと磁石が物理的に固定されていないため、磁石の動きによるガイドに抵抗し、ボールペンを少し動かすことで、体験者のアレンジを付与した絵を描画できる。具体的には、図形の描画中に、任意の直線を点線や波線に変更することができる(図 10)。また、同様のアレンジとして、3色ボールペンなどを用いて、描画の途中で色を変

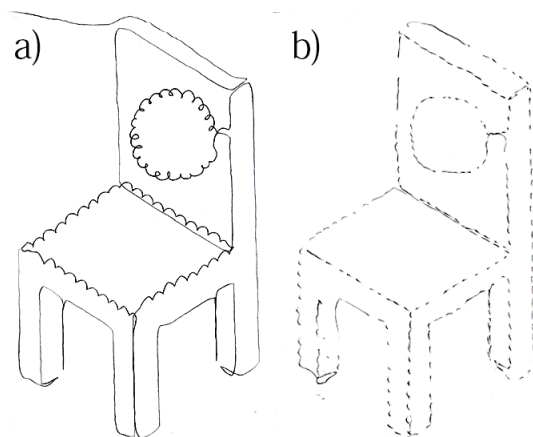


図 10 アレンジの追加. (a) 波線, (b) 破線

Fig. 10 Adding an Arrangement: (a) wavy lines, (b) dotted lines.

更することもできる。何度も同じペンの動きを繰り返す中で、様々な形や色のアレンジを試すことができ、表現の模索につながると考えられる。

また、このような同じ動きにより同じ絵を複数回描画する過程で、毎回少しずつ形の変化を加えることで、連続したアニメーションを制作することができる(図 11)。

4.2 遠隔地のユーザとの描画共有

dePENd を複数台用いると、複数人で協調的に描画を行うことができる。たとえば、あるユーザのペンの動きを他

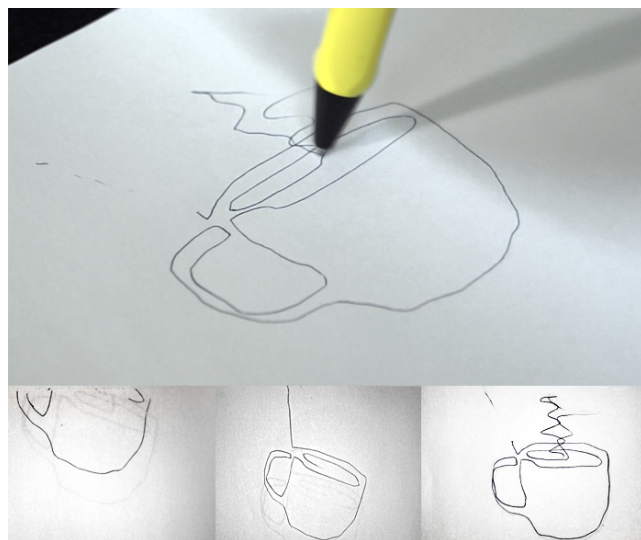


図 11 絵を少しずつ変更しアニメーションを制作する様子

Fig. 11 Users can add animation by moving some of the shapes in the picture.

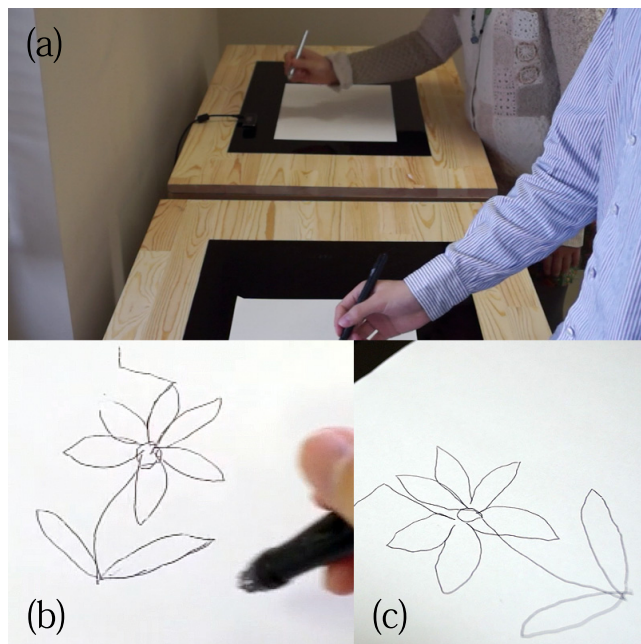


図 12 (a) 通信機能, (b) 送信側, (c) 受信側

Fig. 12 (a) The communication function: (b) the sender (c) the receiver.

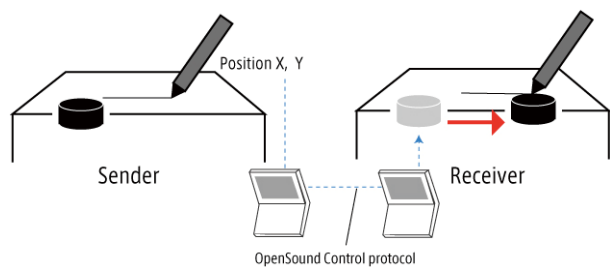


図 13 通信機能システム

Fig. 13 The communication function system.

のユーザのペンに直接伝えることで、先生が生徒に書き順を教えるなどの教育への応用も考えられる。

複数台のデバイスと通信することで、多人数で描画できる通信機能を実装した。送信側がデジタルペンで紙に図形を描画すると、他方の受信側のペンが送信側と同じ動きをリアルタイムに再現し、同じ絵を描画できる (図 12)。デバイス間の通信は OSC 通信を用い、受信側と送信側の切替はスイッチにより変更する。送信側の入力デジタルペンである必要があるが、受信側のペンは通常のボールペンで描画できるが、その場合の描き始めはボールペンのペン先を原点に置く必要がある (図 13)。

5. システム評価と考察

本研究は OpenResearchForum2012 (東京ミッドタウン, 2012 年 11 月 22-23 日) などにてデモ展示を行い、来場者からの反応を得た。以下、実装したシステムの性能とともに、ユーザの反応についてまとめる。

本研究で用いるデバイスの性能について述べる。本デバイスの装置サイズおよび描画可能サイズは、アクチュエータの大きさに依存する。今回は、縦 300 mm, 横 500 mm と縦 150 mm, 横 150 mm の 2 種類の大きさのデバイスを実装した。体験者の様子から、長い直線や大きい円を描画することは手描きでは難しかったため、大きなストロークのデバイスは有用であるという意見があった。またモバイル型デバイスなど小型化する場合は、小型の電動アクチュエータを用いることで実現できる。

本システムを用いたユーザの描画速度は、アクチュエータの移動速度に委ねられる。そこでアクチュエータがその最高速度である 60 mm/s で動く際に、ユーザがペンを支えながら絵を描画できるかに関して簡単な調査を行った。5 名の被験者 (男性 2 名, 女性 3 名, 平均年齢 24.2 歳) に対して、アクチュエータの最高速度で磁石を動かしながら、紙の上に円の形状を描画できるか試したところ、すべての体験者がペンを磁石から外すことなく、円形の描画を完了させた。この際の円は直径 23 cm とした。このことから、アクチュエータの最高速度を、描画の最高速度として用いることとした。一方で、たとえばコピーアンドペースト機能において、デジタルペンの軌跡を記録 (コピー) する際

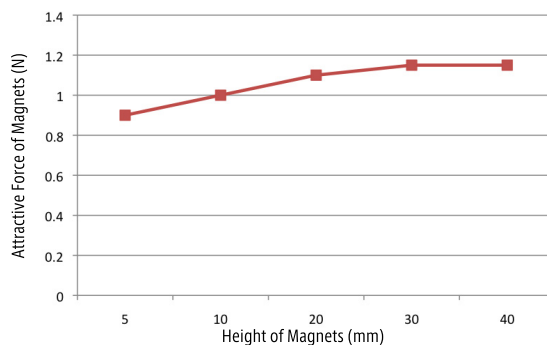


図 14 ネオジム磁石の磁力と高さの関係

Fig. 14 Relations between the attractive force and the height of the neodymium magnets.

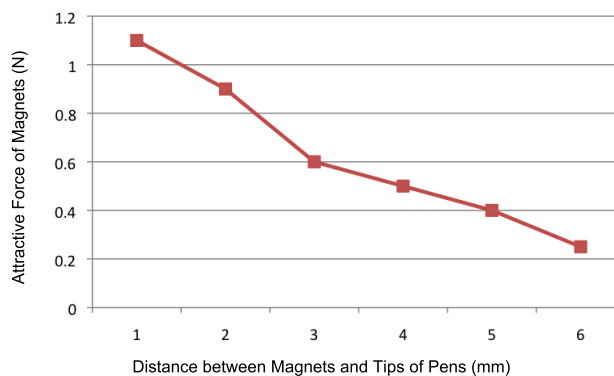


図 15 ペン先と磁石の距離と磁力の関係

Fig. 15 Relations between the attractive force and the distance of the tips of pens and the magnets.

に 60 mm/s 以上の速度でペンを移動させた場合には、その箇所は再生 (ペースト) 時に本アクチュエータでその速度を表現することができないため、最高速度を超える箇所は 60 mm/s に自動的に修正されるようにした。

また、本研究で用いたネオジム磁石のペン先に対する吸引力を計測した。ばね秤に通常のボールペンを装着し、ネオジム磁石の高さ方向の大きさを変えながら、その引力を測定した。実験では、ペン先を磁石に完全に接触した状態から牽引し、吸引力を計測した。その結果、図 14 のように高さ 5 mm~30 mm で 0.9 N~1.15 N の引力の変化があった。高さ 30 mm 以上は大きな変化が見られないため、今回の実装ではネオジム磁石のサイズは高さ 30 mm とした。

また、磁石とペン先の間の板の厚さを決めるため、ペン先と磁石との距離に対する磁石の吸引力を計測した。磁石とペン先のアクリル板の厚さを 1 mm 間隔で変更しながら、ばね秤を用いて引力を測定したところ、図 15 のように板の厚さ 1 mm~6 mm で 1.1 N~0.25 N の変化があった。今回の実装では 1 mm のアクリル板を使用した。また本システムで用いる磁力は 0.6 N である。

また、上記のとおり本研究では超音波および赤外線センサにより位置を取得するタイプのデジタルペンを入力に用いた。今回実装の簡単のため、用いたデジタルペンの認識

範囲は縦 210 mm, 横 297 mm であったが, 本来はアクチュエータの可動範囲をすべてカバーするセンサを用いることが望ましい。これに関しては, 今後他のペン位置センシング手法を含めて, 適切な手法を検討していく。

次に, 今回の実装システムの限界や課題に関して議論する。

本システムは磁石とペンが完全に固定せずに磁力による引力を利用するために, 磁石とペンの間に“遊び”が生じ, 図形データとのずれが生じる。ずれの量は, 磁石の表面積に依存するところが多い。これらのことより, 本システムで図形データを再現する際には, プロッタと比較して誤差となる線のブレが生じやすい。このずれに関する定量的な評価を含めて今後検討していく。

またユーザが筆圧を強めた際にペン先と磁石が外れてしまうことがしばしば見られ, 現状の実装ではユーザが加えることのできる筆圧に限界があるといえる。一方で, 前述のとおり, 本システムで用いる磁石の磁力 0.6 N のもとでは, ユーザはある程度ペンを主体的に動かせる自由度があり, システムがユーザをゆるやかにアシストしたり, ユーザがアレンジを加えたるするうえではこの構成は有効であるともいえる。今後は, ユーザが加えることのできる筆圧を定量的に測る仕組みを確立し, ユーザの自由度と描画の正確さのトレードオフの中で, アプリケーションに応じて適した強度の磁石を選定することが必要になる。また, 磁石の直径の小ささを保ったまま磁力を効率良く伝える工夫や, 磁石の配置方法, さらにブレを補正するための磁石位置制御アルゴリズムの検討なども今後の課題となる。

また, 今回のシステムで描画できる図形は, 一筆描きに限られる。描画する線の間を空ける場合は, ユーザは磁石からデジタルペンを外し, 新しい場所にペン先を載せる必要がある。一筆描きの制約を取り除くためには, 磁石に XY 軸に加え Z 軸方向のアクチュエータを取り付け, 磁力の強弱で線の太さを変える方法などがあげられる。さらに Digital Rubbing [5] などで用いられる技術と同様に, ソレノイドなどのアクチュエータを内蔵したペンを用い, ペン先を出し入れすることで, 開きのある線の描画が可能である。一方で, ペンの機構が複雑になり, サイズが大きくなるなどの問題点も考慮する必要がある。

体験者の様子から, 磁石の強さに対してどれくらいの筆圧を掛ければよいか分からず, 磁石の動きについていけない様子が見られた。体験前にペンを軽く握ることを教示することで, 適切な筆圧を覚えることができていた。またペン先が磁石から離れてしまった際, 磁石の現在の位置が分からず戸惑う様子が見られた。これに対しては, デジタルペンを一定時間同じ位置で止めておくと, その位置に磁石が寄ってくるなどの機能面の工夫が必要となる。

6. まとめと今後の展望

本稿では, ボールペンの強磁性に着目して, 手描きとデジタル技術を組み合わせた手描き補助システム dePENd の提案について述べた。電動アクチュエータと磁石を用いることで, ユーザのペンの動きを動的に制御することができる。またデジタルペンを入力インタフェースとして用いることで, コピーアンドペーストやスケール変更など様々な機能を実現した。

今後は体験者の反応をもとに, 描画のための新しいインタラクションを模索したい。たとえば, 描画中の機能の切替えを, より直感的に行う方法として, ユーザの筆圧をセンシングし, 筆圧の強いときは機械によるアシストを止め, 筆圧が弱いときは機械による自動筆記に切り替える方法である。またインタラクティブ性のある触覚的なガイドを提示するためには, ユーザの描きたい絵を予測し, ガイドを切り替えながら提示し描画できる機能などが必要である。

本研究はコンピュータにより人間の手描きをサポートする提案であり, 将来的には, たとえばカットなど本システムと同様に強磁性のある文房具を用いることで, 切るや彫るなどを補助する, 新しいファブリケーションにつながる事が期待される。

謝辞 本研究は JST CREST「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」領域「局所性・指向性制御に基づく多人数調和型情報提示技術の構築と実践」による助成を受けた。

参考文献

- [1] 田村理乃, 村山 淳, 平田幸広ほか: タブレット PC のための力覚インタフェース SPIDAR-tablet の張力計算方法の開発とその評価, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.13, No.4, pp.283-290 (2011).
- [2] Bynoe, D.: Drawing Machine, available from <http://dbynoe.blogspot.ca/2012/09/drawing-machine.html>.
- [3] Gershensfeld, N.: *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop—from Personal Computers to Personal Fabrication*, Basic Books, Inc. (2007).
- [4] Igarashi, T., Kawachiya, S., Tanaka, H. and Matsuoka, S.: Pegasus: A drawing system for rapid geometric design, *CHI '98*, pp.24-25, ACM (1998).
- [5] Kim, H., Kim, S., Lee, B., et al.: Digital rubbing: Playful and intuitive interaction technique for transferring a graphic image onto paper with pen-based computing, *CHI EA '08*, pp.2337-2342, ACM (2008).
- [6] Lee, J.: Haptic Intelligentsia, available from <http://studiohomunculus.com/portfolio/haptic-intelligentsia-humanprototyping-machine>.
- [7] Lee, Y.J., Zitnick, C.L. and Cohen, M.F.: Shadowdraw: Real-time user guidance for freehand drawing, *ACM Trans. Graph.*, pp.27:1-27:10, ACM (2011).
- [8] McDonald, K.A.: Blind Self Portrait, *The 3rd Annual NYCR Interactive Show* (2012).
- [9] Moon, H.: Suspended Pen on an XY Plotter: The Draw-

- ing Machine, available from <http://unanything.com/>.
- [10] Mueller, S., Lopes, P. and Baudisch, P.: Interactive construction: Interactive fabrication of functional mechanical devices, *UIST '12*, pp.599–606, ACM (2012).
 - [11] Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D. and Ishii, H.: The actuated workbench: Computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces, *UIST '02*, pp.181–190, ACM (2002).
 - [12] Sensable: PHANTOM Omni, available from <http://www.sensable.com/haptic-phantom-omni.htm>.
 - [13] Sutherland, I.E.: Sketchpad: A man-machine graphical communication system, *AFIPS '63*, pp.329–346, ACM (1963).
 - [14] Weiss, M., Wacharamanotham, C., Voelker, S. and Borchers, J.: Fingerflux: Near-surface haptic feedback on tabletops, *UIST '11*, pp.615–620, ACM (2011).
 - [15] Willis, K.D., Xu, C., Wu, K.J., Levin, G. and Gross, M.D.: Interactive fabrication: New interfaces for digital fabrication, *TEI '11*, pp.69–72, ACM (2011).
 - [16] Yoshida, S., Noma, H. and Hosaka, K.: Proactive desk ii: Development of a new multi-object haptic display using a linear induction motor, *IEEE VR 2006* (2006).
 - [17] Zoran, A. and Paradiso, J.A.: Freed: A freehand digital sculpting tool, *CHI '13*, pp.2613–2616, ACM (2013).
 - [18] 佐久間正泰, 正守 晋, 原田哲也ほか: SPIDAR による遠隔書道教示システム, 電子情報通信学会技術研究報告 MVE, pp.27–32 (1999).
 - [19] Hashida, T., Nishimura, K. and Naemura, T.: Hand-rewriting: Automatic Rewriting like Natural Handwriting, *ACM ITS 2012*, pp.153–162, ACM (2012).
 - [20] 青木孝文, 三武裕玄, 浅野一行, 栗山貴嗣, 遠山 喬, 長谷川晶一, 佐藤 誠: 実世界で存在感を持つバーチャルクリーチャの実現 Kobito – Virtual Brownies, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.2, pp.313–322 (2006).
 - [21] 嵯峨 智, 川上直樹ほか: 力覚を用いた教示方法に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会論文集, pp.229–232 (2004).



山岡 潤一 (学生会員)

1988 年生。現在, 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程在学中。日本学術振興会特別研究員 (DC1)。創造活動支援技術, バーチャルリアリティ等に関する研究に従事。



筧 康明

2007 年東京大学大学院学際情報学府博士課程修了。科学技術振興機構さがけ研究員を経て, 2008 年慶應義塾大学環境情報学部専任講師, 2011 年より同准教授, 現在に至る。実世界情報環境デザイン, メディアアート等に関する研究に従事。博士 (学際情報学)。