

博士論文

平成 26(2014)年度

デジタルツールで手仕事を促進する Augmented Craft の研究

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

政策・メディア専攻

山岡 潤一

Copyrighted
by
Junichi Yamaoka
All rights reserved.
© Junichi Yamaoka, 2014

博士論文 2014 年度（平成 26 年度）

論文要旨

主 論 文 題 目：

デジタルツールで手仕事を促進する Augmented Craft の研究

（論文の要旨）

本研究ではペンやハサミ，粘土など，既存のアナログの創作ツールとデジタル技術を組み合わせることで，ユーザの“書く”や“切る”などの手仕事を補助・促進する Augmented Craft を提案する．

ユーザの入力と機械の出力が乖離することが多いデジタルファブリケーションに対し，本研究では手作業による創作中に機械が補助する．ユーザは素材との対話を伴う創作の中で，機械の補助より手作業を拡張し，従来の手作業では難しい表現や，ものづくりの発想を促す効果，スキル学習への応用が期待される．

本研究では Augmented Craft に基づき幾つかの創作ツールを開発した．NeonDough は，電子回路やセンサ，LED を内蔵したモジュールを含む，動的に色が変わる光る粘土である．モジュールに内蔵された電極間の抵抗値を計測し，各モジュールのフルカラーLED の色を変化させる．くっつけると色が混色され，伸ばすことでゆるやかに色が変わる．

enchanted scissors は，ハサミの導電性に着目し，導電性インクで描かれた線に刃先が触れることで抵抗値を検知し，ハサミの開閉が動的に制御されるハサミ型ツールである．ある範囲の制限の中で自由に形状表現を行うことで切り絵時の発想を促すなど，新たな体験を伴った表現が可能になる．

dePEND は，ボールペンのペン先の強磁性に着目し，通常のペンと紙を用いて手描きを支援する描画システムである．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．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．

これらのツールを実際にユーザが使用しながら作品を制作した結果，手作業とコンピュータによる補助を行き来しながら創作する様子が見られた．本稿では，システム設計や評価，展示での体験者のフィードバックを通して本研究の有用性や位置づけについてまとめる．

（キーワード）

創作支援，手仕事，クラフト，デジタルファブリケーション，インタフェース

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
山岡 潤一

Doctoral Thesis Academic Year 2014
SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

Title

A Study of Augmented Craft, Encouraging a Hand Craft using Digital Tools

Summary

In this research, we propose Augmented Craft, which supports and encourages users' handwork such as "writing" and "cutting" by combining digital technologies with analog creative tools such as pens, scissors, and clays.

It is expected such a complicated representation which is difficult in traditional hand craft, an effect that stimulates an idea of making, an application for learning skills.

We developed several creative tools of Augmented Craft. NeonDough is a glowing clay interface, which colors change dynamically. The device contains of modules with electrodes and LEDs. This interface can detect users' actions such as combining, tearing and stretching apart, and change its colors and brightness dynamically according to the clay states.

enchanted scissors is a digitally controlled scissors using conductivity of the scissors metal blades. The device reacts only when the blades come in contact with the line drawn in conductive ink, the user is able to predominantly control the lines design and the execution of each cut. And the user was able to add original arrangements within the painted area.

dePEND is an assist system of freehand drawing using a magnet and a machine. This system uses a ferromagnetic of a metal tip of a regular ballpoint pen. By using a computer to control the XY position of a magnet under the surface of the table, it implements, on paper, drawing methods utilized in computer graphics. And when user can save and copy the picture and copy and paste.

In user studies, users create their works using both of handiwork and support of computer. We describe a system design, an evaluation, a feedback of participants of exhibitions, and future works.

Keywords

Creative Support, Hand Work, Craft, Digital Fabrication, Interface

Graduate School of Media and Governance Keio University
Junichi Yamaoka

目次

第1章 序論	1
1.1 手仕事とは	2
1.2 手仕事における思考プロセス	2
1.3 デジタルファブリケーションの造形プロセス	5
1.4 Augmented Craft	6
1.5 本論文の構成	12
第2章 関連研究	14
2.1 デジタルドローイングに関する研究	15
2.2 発想を促すハードウェア・プロトタイピングツール	23
2.3 インタラクティブファブリケーション	29
2.4 本研究の位置づけ	33
第3章 色と形の表現を促す光る粘土 NeonDough	35
3.1 NeonDough の背景	36
3.2 関連研究	36
3.3 NeonDough の設計と実装	38
3.3.1 ハードウェアの設計	42
3.4 ユーザ評価	48
3.5 本章のまとめ	57
第4章 切り絵の発想を促すハサミ型ツール enchanted scissors	58
4.1 enchanted scissors の背景	59
4.2 関連研究	59
4.3 システム設計	62
4.3.1 ハードウェア設計	63
4.3.2 ソフトウェア設計	66
4.3.3 応用例	68
4.4 ユーザ評価	69
4.4.1 展示での体験者の様子	69
4.4.2 デバイスを用いた創作体験	71

4.4.3	システム評価と考察	89
4.5	まとめ	90
第 5 章	手描きを拡張する描画システム dePENd	92
5.1	dePENd の背景	93
5.2	関連研究	93
5.2.1	インタラクティブ・ファブリケーションに関する研究	93
5.2.2	磁力を用いたインタフェース研究	95
5.2.3	振動を用いた触覚提示技術	95
5.3	dePENd Ver.1 の設計と実装	99
5.3.1	ペン制御の設計	100
5.3.2	ペン座標認識の設計	101
5.3.3	基本機能	102
5.3.4	評価	107
5.4	dePENd Ver.2 の設計と実装	111
5.4.1	システム概要	112
5.4.2	動作原理	112
5.4.3	システム構成	115
5.4.4	システム評価	115
5.4.5	考察	118
5.4.6	応用	120
5.5	ユーザ評価	122
5.5.1	実験概要	122
5.5.2	各被験者の体験の様子	122
5.5.3	考察	136
5.6	まとめ	140
第 6 章	考察	146
第 7 章	結論	157
付録 A	空中像と 3D プリンタを用いた造形ツール MiragePrinter	160
A.1	はじめに	161
A.2	関連研究	162
A.3	システム設計	162
A.3.1	ハードウェア設計	163
A.3.2	ソフトウェア設計	164
A.4	評価	164

目次

A.5 まとめ	168
付録 B Morphing Cube	169
参考文献	173

図目次

1.1	手作業による造形プロセス	4
1.2	Interactive Fabrication	6
1.3	デジタルファブリケーションの造形プロセス	7
1.4	インタラクティブファブリケーションの造形プロセス	7
1.5	Augmented Craft の造形プロセス	9
1.6	NeonDough	10
1.7	enchanted scissors	10
1.8	dePENd	11
2.1	SketchPad	16
2.2	Pegasus	17
2.3	Roll Canvas	17
2.4	Sequential Graphics	18
2.5	ShadowDraw	19
2.6	I/O brush	19
2.7	FluidPaint	20
2.8	Digital Rubbing	21
2.9	COMP*PASS	21
2.10	PixelRoller	22
2.11	BitBrush	22
2.12	Hand-rewriting	23
2.13	MINDSTORMS	25
2.14	PicoCricket	26
2.15	ATOMS Express Toys	26
2.16	curlybot	26
2.17	Topobo	27
2.18	TSU.MI.KI	27
2.19	LittleBits	28
2.20	Shaper	30
2.21	Interactive Construction	31

2.22 Haptic Intelligentsia	31
2.23 Free D	32
2.24 Position-correcting tools for 2d digital fabrication	32
2.25 本研究の位置づけ	34
3.1 NeonDough	37
3.2 Soap	38
3.3 FuwaFuwa	39
3.4 Illuminating Clay	39
3.5 PLAY-DOH AS INTERFACE	39
3.6 Reed による粘土形状を認識する研究	40
3.7 Squishy Circuits	40
3.8 システム図	41
3.9 抵抗値計測の回路図	42
3.10 粘土の厚みと発光の明るさの関係	43
3.11 LED の埋め込みと明るさの実験	43
3.12 粘土内モジュール	44
3.13 バッテリー内蔵モジュール	44
3.14 粘土板型デバイス基板回路図	45
3.15 電極間の長さで抵抗値の関係	46
3.16 粘土を伸ばした際の発光の変化	47
3.17 パレット機能	48
3.18 ロック機能	49
3.19 NeonDough による作品例	50
3.20 体験の様子	50
3.21 いしかわ夢未来博での作品例	51
3.22 ワークショップコレクションでの作品例	52
3.23 作品例：さくらんぼ	53
3.24 造形の流れ	54
3.25 光る人形	55
3.26 作品例：にぎり寿司	56
3.27 造形の流れ	56
4.1 enchanted scissors	60
4.2 haptic scissors	61
4.3 Development of Tool-Type Devices for a Multifingered Haptic Interface Robot	61
4.4 空間型作業での選択・移動操作に適した道具型デバイス	62

4.5	Air-Hair	63
4.6	システム図	64
4.7	システム図（静電容量方式）	65
4.8	鉛筆の濃さと静電容量値の関係	66
4.9	単線通信の回路図	67
4.10	描画物の位置	67
4.11	アレンジを加える例	69
4.12	目を閉じた状態で切る様子	70
4.13	使用したテンプレート	71
4.14	体験者の切り絵	72
4.15	実験1で使用したテンプレート	73
4.16	1人目の被験者の切り絵	74
4.17	2人目の被験者の切り絵	75
4.18	3人目の被験者の切り絵	75
4.19	被験者1の体験時間と抵抗値の関係	76
4.20	被験者2の体験時間と抵抗値の関係	77
4.21	被験者3の体験時間と抵抗値の関係	77
4.22	実験2で用意した絵	78
4.23	S.H氏の切り絵	79
4.24	S.H氏の描画した絵	80
4.25	H.A氏の切り絵	81
4.26	H.A氏の描画した絵	81
4.27	A.O氏の切り絵	82
4.28	A.O氏の描画した絵	83
4.29	S.K氏の切り絵	83
4.30	S.K氏の描画した絵	84
4.31	M.O氏の切り絵	85
4.32	M.O氏の描画した絵	85
4.33	S.H氏の体験時間と抵抗値の関係	86
4.34	A.H氏の体験時間と抵抗値の関係	87
4.35	A.O氏の体験時間と抵抗値の関係	88
4.36	S.K氏の体験時間と抵抗値の関係	88
4.37	M.O氏の体験時間と抵抗値の関係	89
5.1	(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.	94
5.2	Suspended Pen on an XY Plotter	94

5.3	Center pivot pen plotter	95
5.4	Blind Self Portrait	96
5.5	Actuated Workbench	96
5.6	Kobito	97
5.7	FingerFlux	97
5.8	Phantom-DRAW	98
5.9	Traxion	98
5.10	dePENd Ver.1 システム図	99
5.11	磁石及びアクリル板のサイズ	100
5.12	赤外線／超音波検知ユニット, デジタルペン	101
5.13	直線描画機能	102
5.14	円描画機能	103
5.15	直線, 円描画機能を組み合わせた描画の様子	104
5.16	コピーアンドペースト機能	104
5.17	スケール変更機能	105
5.18	アレンジの追加 (a) 波線 (b) 破線	106
5.19	絵を少しずつ変更しアニメーションを制作する様子	107
5.20	(a) 通信機能 (b) 送信側 (b) 受信側	108
5.21	通信機能システム	108
5.22	ネオジム磁石の磁力と高さの関係	109
5.23	ペン先と磁石の距離と磁力の関係	110
5.24	dePENd2.0	112
5.25	デバイス設計	113
5.26	システム構成	113
5.27	多方向牽引力制御	114
5.28	ペンと紙を用いた 2 次元方向牽引力提示の実験結果	116
5.29	デバイスを空中で把持した時の 2 次元方向牽引力提示の実験結果	117
5.30	牽引力の大きさの調査実験結果	117
5.31	筆記用具の違いによる描画線の長さ	118
5.32	円や星などの入力データの描画	119
5.33	大きな紙に描画する様子	119
5.34	描画線補正機能	121
5.35	スタイラス入力を用いた GUI 操作提示	121
5.36	S.H 氏の作品 (1)	124
5.37	S.H 氏の作品 (2)	124
5.38	S.H 氏の dePENd を用いた作品 (1)	125

5.39 S.H 氏の dePENd を用いた作品 (2)	126
5.40 H.A 氏の作品	127
5.41 H.A 氏の dePENd を用いた作品 (1)	128
5.42 H.A 氏の dePENd を用いた作品 (2)	129
5.43 O.A 氏の作品	130
5.44 O.A 氏の dePENd を用いた作品	131
5.45 S.K 氏の作品	132
5.46 S.K 氏の dePENd を用いた作品	133
5.47 M.O 氏の作品	134
5.48 M.O 氏の dePENd を用いた作品	135
5.49 W.K 氏の作品	136
5.50 W.K 氏の dePENd を用いた作品	137
5.51 M.O 氏の体験時のペンとモータの動き	138
5.52 W.K 氏の体験時のペンとモータの動き	138
5.53 S.H 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係	140
5.54 S.H 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係	141
5.55 H.A 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係	141
5.56 H.A 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係	141
5.57 A.O 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係	142
5.58 A.O 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係	142
5.59 S.K 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係	142
5.60 S.K 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係	143
5.61 M.O 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係	143
5.62 M.O 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係	143
5.63 W.K 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係	144
5.64 W.K 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係	144
6.1 Augmented Craft ツールの特徴と機能	147
6.2 NeonDough の概念図	148
6.3 enchanted scissors の概念図	149
6.4 dePENd の概念図	150
A.1 本システムを使用した造形の様子	161
A.2 3D プリンタ内の空中像	162
A.3 システム設計	163
A.4 視野角の違いによる見え方の変化	165
A.5 ソフトウェア設計	166

図目次

A.6	実物体を用いた編集 (a) と造形 (b)	166
A.7	器に取っ手を付け足す様子：(上) 通常の器（中）取っ手を編集する（下）取っ手が追加された器	167
B.1	Morphing Cube	171
B.2	変形する様子	171
B.3	システム図	172
B.4	応用例	172

第1章

序論

1.1 手仕事とは

現在に至るまで我々人類は、自らの手によって様々なものを創作してきた。例えば粘土を捏ね、器を作ったり、ペンなどの筆記用具で絵を描いたり、木を加工して家を建てる、あるいは布を裁断、裁縫し服を作る。このような手作業による創作、手仕事 (Craft) は、文字通り機械によらず、手で行う作業のことを指す。

機械を用いない手作業による創作として、鉛筆、紙、粘土などの様々な画材や素材を用いた造形が挙げられる。これらは幼少期の頃から、遊びの一環として楽しみながら造形表現を学ぶツールとして、また美術教育ではその素材の持つ特性を理解しながら表現するために用いる道具として使用される。さらに芸術家は、五感を通して様々な素材と対話し、新たな表現手法を模索しながら、作品へと昇華させていく。McCullough は、陶芸作家特有の触覚的な素材との対話について言及している [5]。ろくろを用いて深めの器などを作る際、目で見えない部分は指先の感覚を頼りに形を作っていく。また安藤忠雄はコンクリート素材との対話の必要性について、素材との触れ合いから形を抽出し、自らのイメージを組み立ててゆくべきであると述べている [6]。このような芸術活動では、素材と五感を通して対話しながら形やイメージを固めていく。

また伝統的な工芸の分野でも古来より手作業によって生み出され、ろくろと粘土を用いた陶芸、漆器、竹細工、紙漉き、機織りなど様々あり、各地で伝承されている。一方で工業化に伴い、機械を人の作業の延長として用いることで、製品の生産性を向上させることが可能になってきた。しかし大量生産による製品は細部が粗悪になることがあったため、職人が素材を活かしながら制作するアーツ・アンド・クラフツ運動が行われてきた。このような手仕事と機械の関係はこれまでも議論されており、柳宗悦は、手が機械と異なる点は心と繋がれていることであり、これが品物に美しい性質を与える原因であると述べている [1]。また柏木博は、手仕事を生産論的な視点ではなく、メディアとしての手の重要性を考慮しながら議論すべきと述べている [7]。

さらに近年では3Dプリンタなどの工作機械によるデジタルファブリケーションの発展に伴い、個々人が精巧な造形物を制作する環境が整い始めている。しかし現在のデジタルファブリケーションのツールでは、人が造形プロセスに介入することができず、素材との対話による思考が少なくなっている。そのため人間の五感が伴う従来の手仕事を考慮しながら、機械を用いたものづくりとの関係や融合を議論する必要がある。

本研究では、手仕事の思考プロセスと機械を用いた造形プロセスを見ながら、両者の特徴を活かし、手仕事の延長としての新しいものづくりの在り方を考える。

1.2 手仕事における思考プロセス

機械を伴わない手仕事の思考プロセスの特徴として、対象となる素材との五感を通じた対話を繰り返しながら創作を行う点が挙げられる。

素材との対話の手段として、人は五感を用いて対象物に触れる。対象物の見た目、匂い、音、場所、そして自身の記憶や知識により対象物への触れ方が変化する。例えば彫刻家は、そのような

感覚を鋭くしながら素材に触れ造形していく。粘土に手で触れる際に押すやちぎる、捻るなど手の動かし方を変えることで、粘土の形状も動作に応じて変わっていく。創作者はそのような素材の形状の変化を受け取り、常に考えながら創作している [4]。絵画の例を挙げると、フランス・ベーコンは、キャンバスに絵の具を筆で振りかけて、現れたランダムな模様から発想して、具体的な絵を描き始めた [2]。

また創作する際には、対象物と成る素材だけではなく、その人の周囲の環境や状況も創作に影響を与える。印象派のバルビゾン派の画家たちは、チューブ型の絵の具の発明により屋外で絵を描くことが可能になった。しかし天候や日照の関係により素早く描く必要があり、細部をあえて省略する技法を身につけた。このように人は素材との対話の中で、素材の特性や変化を感じ、それに適した行為を思考しながら創作を繰り返す。

創造的な活動は遊びの中でも育まれる。ヴィゴツキーは人間の創造的行為は、幼児の遊びの中に全力をつくして現れており、遊びは促されなければならないと述べている [8]。例えば積み木は、「積む」「崩す」「並べる」などの行為により組み立てる。伊藤らは幼児の観察を通して、遊びを通じた積む行為から、間隔／幅・奥行き・高さ／重心／バランスを体感し、「平面」「立体」の概念を獲得しつつあったと指摘している [9]。つまり子供は積み木を単に積んでいく、あるいは立体物を作るという遊びを通して、積み木の性質を理解し、背後にある概念を獲得するのである。そして子供にとって概念の獲得は目的ではなく、表現を行うための手段であると言える。

ピアジェの提唱した構成主義 (Constructivism) [10] は、子供が既に持っている知識と相互作用しながら、構築し直すことで、新しい知識を増やす考え方である。創造的な知育玩具は、構成主義の視点で見ると、遊びながら獲得した素材の知識を用いて、素材同士を組み合わせながら創造的な活動をしていると考えられる。つまり創造的な知育玩具は、玩具を使った遊びを通して、素材の特性を理解し、創造的な表現ができる道具である。

また諏訪は、建築家の手描きスケッチを行うプロセスから、手作業によって起きるずれが「予期せぬ発見」となり、「新しいデザイン要求の創造」に繋がっていると言及している [11]。

このように人は創作する際に、(環境も含む) 素材からの情報を受け取り、次の動作を思考し、創作を行っている (図 1.1)。この行為の循環は、造形プロセスの中で絶えず繰り返されている。この循環を円滑にしているのは、素材と人との間にアフォーダンスの存在が関わっている。ギブソンが提唱したアフォーダンスには、その対象物が人の行為を促すか促さないことに関係なく、人が対象物に何らかの行為をした際に反応がある可能性が存在することを、両者の間にアフォーダンスが存在していると定義されている [3]。

人と素材とのアフォーダンスの形態は素材の性質により様々である。しかし粘土などのフィジカルな素材は、モニタ上のデータなどと異なり、人と同じ空間・時間に存在している。そのため人は対象物の形状の変化などを五感を用いて知覚することができる。

このように手仕事における造形プロセスでは、人と素材は時間的・空間的に一致しており、創造時に必要な対話の循環は円滑に行われていると考えられる。

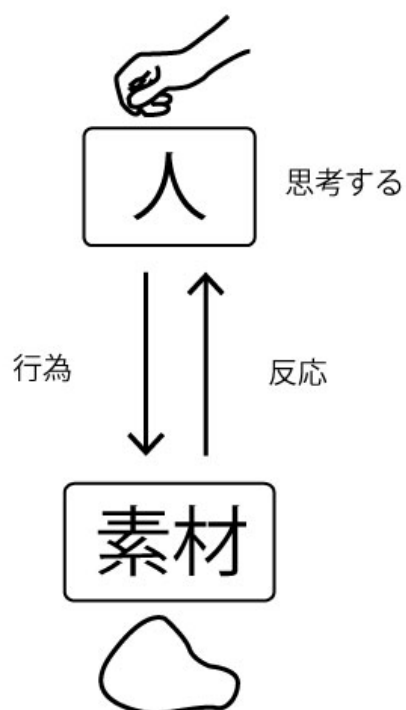


図 1.1: 手作業による造形プロセス

1.3 デジタルファブリケーションの造形プロセス

一方で近年では、3D プリンタやレーザーカッターなどのデジタルファブリケーションツールが普及し始めている。これらのツールは CNC 制御によって動作しており、従来の切削機などの工作機械とコンピュータを組み合わせることで、人の手作業では難しい造形をコンピュータによる数値制御によって実現している。そのため予め制作した完成品の形状データを入力することで、自動的に機械が人の代わりに複雑な造形を行う。さらにネットワークを介して個々の機械を繋げることで、形状データを共有したり、複数のマシンを連結させるなどして、個々のラピッドプロトタイピングを支援するパーソナル・ファブリケーションが注目されている [12]。このようなツールの一般的な造形プロセスは、図 1.3 のように行われる。まずユーザは CAD などの設計ソフトウェアを用いて、画面上でモデルデータを編集する。この段階では、従来のデジタルクリエーションのように時間的・空間的な乖離は少なく、思考を伴うインタラクティブな創作を行っている。しかしモデルデータを作成後、データを 3D プリンタなどの工作機械に転送すると、ユーザはプリンタの造形プロセスに介入することは出来ない。マシンによる造形中にモデリングし直すや、造形終了後に再度修正したデータを造形開始するなどの循環はあり得るが、時間的なずれが生じており、創作における即興性が失われている。

このような時間的・空間的な乖離を解消して、インタラクティブなデジタルファブリケーションを目指す試みが多く行われている。Willis らの提唱する Interactive Fabrication [13] (図 1.2) 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、人の作業を機械が支援して、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。例えば Shaper は CNC 制御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。Interactive Fabrication の考えのもとでは、図 1.4 のように人はデジタルデータだけではなく、素材にも相互作用を及ぼすことができ、人は手作業のような感覚でデジタルファブリケーションツールを使った創作を行うことができる。手作業のように全ての造形プロセスにおいて思考を伴う循環があるため、変化した素材から発想して新しい形を考えるきっかけになることが期待される。

一方でこれらは、人の作業と機械による作業を組み合わせ、人は機械による造形プロセスの中で思考を伴いながら介入することができるが、その多くはコンピュータ制御された工作機械をベースとして用いている。そのため入力デバイスと出力デバイスが乖離しているため、素材に直接触れることが出来ず、素材の持つ特性を触覚などの五感を伴いながら創作することは難しい。例えば Shaper では透明タッチスクリーンに触れることで樹脂を射出するので、樹脂に直接触れてはいない。Abstracting Craft では、デジタル環境下ではバーチャルリアリティ技術などを応用することで手作業のような感覚で創作する提案がなされている [5]。

しかし先述のように、手仕事による創作時には、人は五感を用いて素材と触れながら造形しており、最終的なアウトプットで使用する素材に造形プロセスの間に触れないことは、触覚などの感覚を伴っていないため、その素材の特性についての理解や思考が少なくなってしまう。具体的には完成したプロダクトが粘土で出来ているのに、造形プロセスで粘土に触れない状況などであ

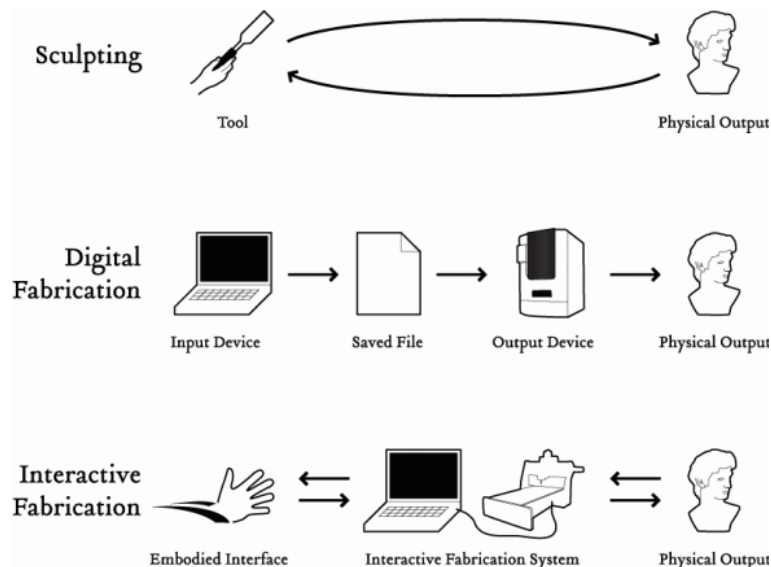


図 1.2: Interactive Fabrication

る。一方で、従来の粘土細工などの手作業による時間的・空間的に一致したインタラクティブな造形方法は、全ての造形プロセスにおいて五感を用いて、思考を伴いながら創作することができる。機械による作業は正確性を伴う。一方で手作業には偶発性から生まれる新たな発見によって、試行錯誤が生まれる。

デジタルデータと素材を組み合わせることで、素材と対話しながら創作できる環境を目指す。図 1.5 のようにデジタルデータと素材を一体化させることで、時間的・空間的な隔たりが無く、従来の手仕事のような感覚でコンピュータによる補助を受けながら創作することができる。

このような手仕事 (Craft) とデジタルツールの拡張性を組み合わせた新しいものづくり Augmented Craft を提案する。

1.4 Augmented Craft

Augmented Craft は人の手作業をコンピュータによって拡張する新しいものづくりの形を指す。従来のデジタルファブリケーションなどの創作支援で見られる、工作機械などのインタフェースを改良し手作業の様に使用できるアプローチと異なり、Augmented Craft は手作業による道具にコンピュータを見えない形で内蔵することで、手作業を拡張するアプローチである。例えば、紙に描画する場合、デジタルファブリケーションや Interactive Fabrication では、プロッターなどの機械を直感的に扱えるインタフェースを考えるのに対して、Augmented Craft ではペンと紙を用いた手描き中に見えない形でコンピュータが手描きを補助・拡張する。

このように、従来のファブリケーションにおけるインタフェースの考え方では少ない、素材との対話性を本研究では重要視している。既存の手作業による創作が持つ視覚や触覚など五感を通じた対話性を、コンピュータによって緩やかな制限を加えることで、手作業時の思考やスキル学

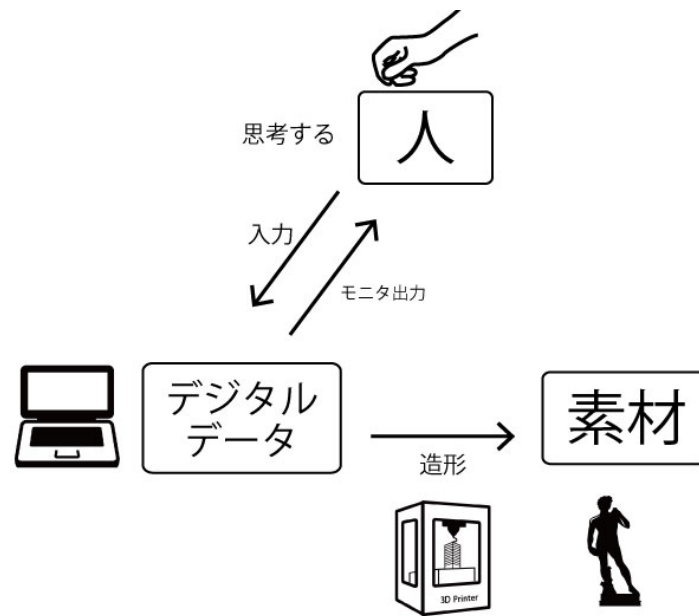


図 1.3: デジタルファブリケーションの造形プロセス

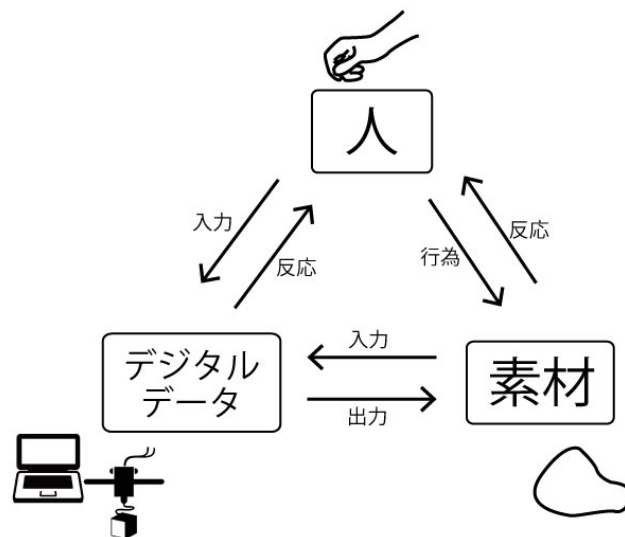


図 1.4: インタラクティブファブリケーションの造形プロセス

習を補助・拡張する。緩やかな制約とは、機械が提案する制約のことであり、例えば機械が創作のきっかけとしてユーザの手を誘導したり、新しい形を提案するなどの従来の素材との対話に足された機能のことを指す。この緩やかな制約がユーザの創作時の新しい思考を促すきっかけになると考えられる。また道具として用いる素材・画材は、普段馴染みのある、紙やペン、クレヨン、粘土などを取り入れる。これらの素材を使った日常的な作業の中で、機械が補助を行う。

本研究 Augmented Craft は下記のように定義される。

- ・デジタルデータと物理的な素材，道具，環境が一体化した創作手段である。
- ・ユーザの手の自然な振る舞い，感覚に対する制約が限りなく小さい。
- ・思考を促すために，緩やかな制約を加える。

図 1.5 のようにデジタルデータと素材を一体化させることで、時間的・空間的な隔たりが無く、従来の手仕事のような感覚でコンピュータによる補助を受けながら創作することができる。本研究は前提として、デジタルデータと物理的な素材道具環境が一体となった創作手段である。

さらに本ツールは通常の日常的に用いる物理的なツールとして扱うことができ、必要な時にコンピュータがユーザの行為を補助する。例えばペンは通常のペンとして使うことができるが、通常の手描きでは難しい描き方など必要な時に機械のアシストに切り替え、手描きを拡張する。

また一体化することで、ユーザの思考を促すために、ツールに対してゆるやかな制約を加える。例えば、機械が創作時の提案としてユーザのペンを誘導してくれたり、ユーザの考えていなかった新しい形を提案してくれるなど、機械が制約として提案してくれる。このゆるやかな制約が創作時の新しい思考を促すきっかけになると考える。

そこで本研究ではこの Augmented Craft の定義に基いて幾つかの創作ツールを提案する。通常の粘土にはない動的な色表現を伴った光る粘土細工 NeonDough、機械によって制限を加える事で切り絵時の発想のきっかけを促すハサミ型ツール enchanted scissors、コンピュータを組み合わせることで手描きを拡張する描画システム dePENd である。

NeonDough(図 1.6)

従来の色付き粘土などを用いた粘土造形は、柔軟な形状に対して色彩は静的である。動的に色の変わる粘土を用いることで色の変化から形を発想したり、造形した後に色を変更したりという造形プロセスを繰り返し、子どもに新たな思考が生まれ創造性の向上に繋がると期待される。そこで電子回路やセンサ、LED を内蔵したモジュールを含む、動的に色の変わる光る粘土 NeonDough を提案する。具体的にはモジュールに内蔵された電極間の抵抗値を計測し、各モジュールのフルカラー LED の色を変化させる。くっつけると色が混色され、伸ばすことでゆるやかに色に変化する。

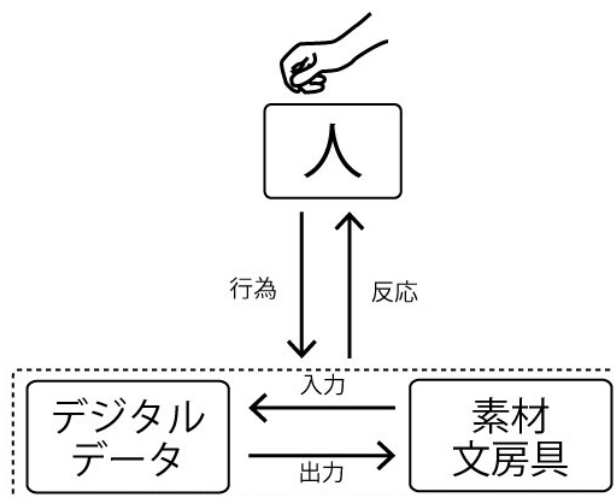


図 1.5: Augmented Craft の造形プロセス

enchanted scissors (図 1.7)

enchanted scissors は、身近な創作道具であるハサミに着目したファブリケーションツールである。従来のハサミの素材に着目し、導電性インクで描かれた線に刃先が触れることで抵抗値が変化し、それに応じてハサミの開閉が動的に制御される。これにより、ユーザからの入力とデバイスからのアウトプットが自然に繋がり、紙に描かれた線をより正確に切る、ある範囲の制限の中で自由に形状表現を行うことで切り絵時の発想を促すなど、新たな体験を伴った表現が可能になる。

dePENd (図 1.8)

dePENd は、通常のペンと紙を用いて手描きを支援する描画システムである。このシステムで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。

これらのツールを実装し、展示やワークショップを行うことで、実際にユーザが本ツール群を使用様子や手作業を拡張しながら作品を制作する様子を観察し、考察を行った。

本論文でまとめた成果は、従来のファブリケーションツールとは異なり、人間の手作業を拡張する新しい道具の創出に繋がる。その結果、アート表現や、デザイン、エンタテインメント、教育への応用が考えられる。



図 1.6: NeonDough



図 1.7: enchanted scissors

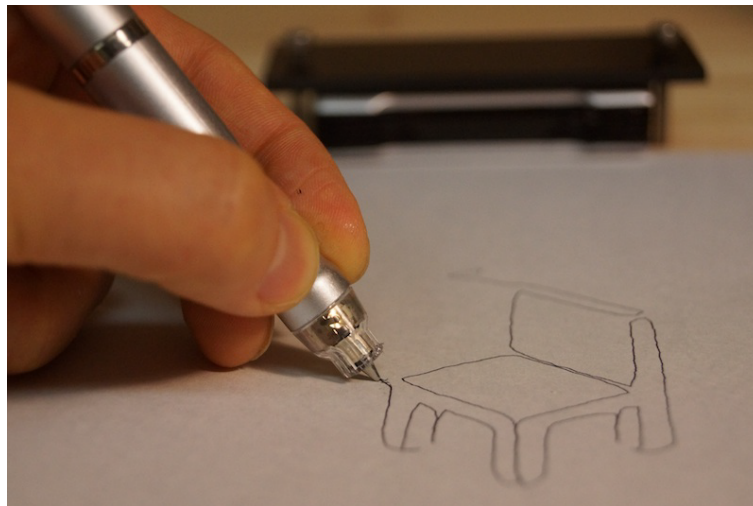


図 1.8: dePENd

本研究のビジョンは、従来の機械に造形を任せるものづくりとは異なる、お絵かきや工作など日常的に行われるクラフトを手作業と機械の補助によって拡張するものづくりのムーブメントへの接続である。デジタルデータとフィジカルな素材や文房具、環境が一体となった創作手段は、日常的にクラフトを行う人々や造形スキルを身につけたい子供たちが通常の手作業のクラフトでは無い思考を促したり、手作業の補助を行うことができる。

例えば机の上には普段から馴染みのあるペンやハサミ、クレヨン、画用紙などの文房具が置かれている。子供はそれら道具から創作の目的に応じてその都度選択し、描いたり工作する。これは通常のクラフトと同様であるが、Augmented Craft に基づいた環境下では、フィジカルなツールに機械が見えないように内蔵されているため、子供はコンピュータによる機能と手作業を切り替えながら創作していくことができる。例えば何を描いていいか思い浮かない場合に描くきっかけを提案してくれたり、データをダウンロードして機械によって描画した後フリーハンドで描き始めるなどである。ユーザは身近なツールとして扱うが、その後ろにはコンピュータが存在しており、必要な機能やゆるやかな制約を切り替えたり調整することができる。またその調整も将来的にはコンピュータがユーザの創作状況を判断して、半自動的に切り替えることも考えられる。またツールはコンピュータに接続されているため、ネットワークと繋がることで描き方をダウンロードするなど、従来の道具では実現できなかった様々な機能を付与することができる。

また通常の文房具や画材と同様に、ユーザはこれらのツールを組み合わせながら作品を創作していく。例えば導電性のインクのペンを使って紙に半自動的に絵を描画した後に、その線の枠内でアレンジを加えながら切るなど、ツール同士を組み合わせることで創作する。あるいはペンで描いたものをコンピュータが記録し、カッターなどの他のツールに送信することで、フリーハンドで同じものを切ることができるなどの応用が考えられる。

ツールがネットワークで繋がることで、個人だけではなく複数のユーザとの共同で創作するような環境が実現できる。例えば同じテーブル上では1人が制作したものを、他のユーザに送信し、

第1章 序論

描かれるものから発想して次の形を考えるなど、作る行為を通したコミュニケーションなどである。あるいはネットワークに接続することで、遠隔地のユーザに作り方を教えるなど、身近な道具を通したスキルの伝承や学習が可能になる。

その結果、ユーザの思考を誘発させることで、個々人の創作活動が活性化し、手作業の延長として日常の中で新しいものづくりを取り込むことができる。さらに造形スキル学習などの美術教育領域や創作活動を通じたりハビリテーションへの応用などへ繋がる。

一方でデジタルファブリケーション技術の普及を無視することはできない。本研究 Augmented Craft によるツールと 3D プリンタなどのファブリケーションツールの共存する創作環境を考える。精度の高い造形に関しては、3D プリンタなどの工作機械の方が長所である。しかし本概念は創作時の思考を促すという面でサポートし、例えばユーザが何かプロトタイプを制作する際に、初めに Augmented Craft のツールを使って試作を制作し、制作した後で工作機械を用いて造形し直すことも考えられる。あるいは Augmented Craft のツールを 3D プリンタなどのデジタルファブリケーションツールで制作・複製することが考えられる。例えば遠隔地にツールのデータを送信することで、その場で必要な人数分のツールを生成することができる。

このように Augmented Craft によるツールを用いた創作活動は、アート表現や、デザイン、エンタテインメント、教育への応用することができる。さらには今回提案した定義や考え方は、Augmented Craft に基づいて他のツールを設計する際に、設計・開発の指針に繋がることが期待される。

1.5 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章 序論

第2章 関連研究

第3章 色と形の表現を促す光る粘土 NeonDough

第4章 切り絵の発想を促すハサミ型ツール enchanted scissors

第5章 手描きを拡張する描画システム dePENd

第6章 考察

第7章 結論

付録 A 空中像と 3D プリンタを用いた造形ツール MiragePrinter

付録 B Morphing Cube

本論文では、2 章にてデジタルドローイングに関する研究、発想を促すハードウェア・プロトタイプリングツール、及びインタラクティブファブリケーションに関する研究についてまとめる。

3 章では、導電性粘土を用いて、通常の粘土にはない動的な色表現を伴った光る粘土細工 NeonDough に関してまとめる。

4 章では、ハサミが持つ導電性に着目して、コンピュータによって制限を加える事で切り絵時の発想のきっかけを促すハサミ型ツール enchanted scissors に関してまとめる。

第1章 序論

5章では、ボールペンの持つ強磁性に着目して、紙とペンによるドローイングとコンピュータを組み合わせることで手描きを拡張する描画システム dePENd に関してまとめる。

6章では、3-5章で述べた Augmented Craft ツール全体の考察を行う。

最後に7章で、全体の総括し、Augmented Craft に関する将来の展望について述べる。

以下、第2章より本論を進める。

第2章

関連研究

これまで人間の手作業を拡張する道具が数多く発明されてきた。身近な例として、釘を打つハンマーや、ネジを締めるトルクレンチなどの工具が挙げられる。これらは人の動きによる運動エネルギーを道具を介することで増幅し、通常の手による力以上の力で作業することができる。また電気などの燃料とモータなどの動力源を用いれば、少ないエネルギーを大幅に拡張・置換することができる。こうした手作業を拡張する・支援する道具には大きく二つの目的がある。一つは、道具・機械を用いて人の仕事を補助したり、単純労働を機械で置換することで、人が難しい作業を機械化するなど、人の労力を軽減することである。工作機械などを用いて手作業を拡張する方法については、後述の2.3 インタラクティブファブリケーションで述べたい。もう一つは、人の作業時の思考やスキルを拡張し、支援することである。

こうした道具の発達と共に、コンピュータが登場し創作活動も大きく変化してきた。特に HCI 領域では、ディスプレイなどの表示装置やマウス、デジタルペンなどの入力装置の開発により、従来のドローイングや映像技術では難しい表現が可能になった。またデジタルファブリケーションやプロトタイピングの分野でも、工作機械やハードウェアとコンピュータが繋がることで、より複雑な作業や操作が可能になった。本章では、デジタルドローイング、プロトタイピング、デジタルファブリケーション・インタラクティブファブリケーションに関する研究を引用しながら、従来の手作業との関連性を考慮しながら、人間の創造性を支援するデジタルクリエイションについて考えたい。

2.1 デジタルドローイングに関する研究

紙とペンを用いた手描きは我々に身近な創作行為であり、記録するためや思考のため、あるいは学習のために行う。また手描きの中でもドローイングはペンと紙などの筆記用具を用いた表現手段であり、デッサンやスケッチなど、描画を通してモチーフや環境の観察力を高め、ものの見方を学習するためにも用いられる。また目的に応じて画材を変え、様々な技法を使い分けながら描画する。手軽に行えるという点などから今日でも用いられるが、基本的には静的である。

一方でコンピュータやモニタなどの進歩によって、従来の静的なドローイングに対して、動的な表現が可能なデジタルドローイングに関する研究が提案されてきた。デジタル技術を用いたドローイング環境では、従来のアナログなドローイングで表現できない技法や、手作業では難しかった作業を簡易に行うことができる。

Sutherland の SketchPad [14] (図 2.1) は、デジタル技術によって従来のドローイングを拡張したシステムの最初の試みである。SketchPad 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、図形の複製やスケールの変更などが描画プロセスの中で行うことができる。これは現在普及しているイラストレータなどのドローイングソフトや CAD の基本概念の元になっており、ユーザの試行錯誤を促し、デザインの向上に繋がった。

またコンピュータを操作に用いるだけではなく、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 [15] (図 2.2) 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。線の角度や線同士の間隔が均等になるように補正したり、左右対称

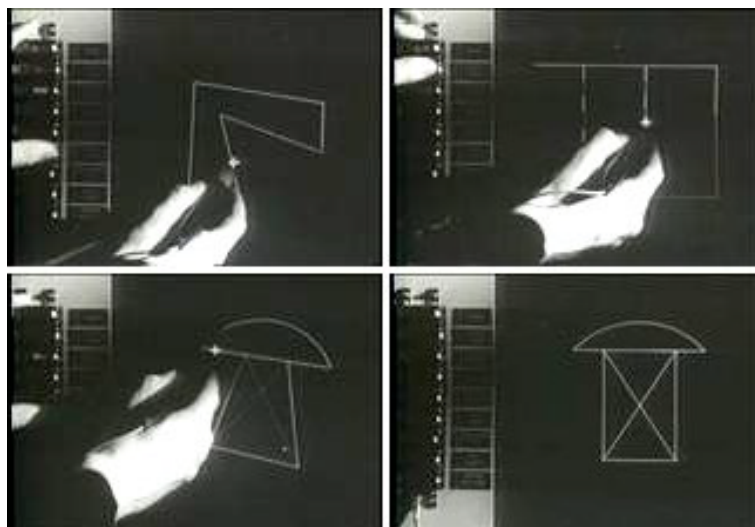


図 2.1: SketchPad

の図形などを簡単に描くことができる。

これらはマウスやデジタルペンを用いて入力した線のデータを、コンピュータが解析し補正を行うため、線の歪み、同じものを描画する、等間隔に描画などをフリーハンドで手軽にできる。一方で定規などの専用の筆記用具を用いることを除いて、通常のペンと紙を用いたフリーハンドのドローイングでは難しい。

またデジタル技術の持つ、動的な動きを取り入れた新しいドローイングの手法として、Roll Canvas [16] (図 2.3) は、回転するキャンバスを用いたドローイングソフトウェアである。画面内には上から下に回転し、循環するキャンバスが表示され、ユーザはそのキャンバスに線を描くことで、模様を描けたり、アニメーションを制作することができる。回転するキャンバスに絵を描くことで、主体的かつ偶然的に絵を描くことができる。

また Sequential Graphics [17] (図 2.4) は線の描画時の動きを記録し、積層することにより描画時の臨場感を再現することのできるペイントソフトウェアである。ユーザは時間的にループしながら描画されるキャンバスに線を描画することで、リアルタイムに動的な線を追加することができる。作者の手の動きを臨場感として絵に付与することができる。このソフトウェアでは、例えば火の燃える様子など普段絵では表現できないようなアニメーションを手描きで制作することが可能である。

これらは、従来の紙などを用いた静的なドローイングでは不可能な動的な動きの表現を可能にすることで、従来のドローイングでは無かった発想が生まれることが期待される。

また描画したいものの特徴を捉えながら描くなどのドローイングのスキルを向上させるための、デジタル・ドローイング環境も提案されている。

ShadowDraw [18] (図 2.5) 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ペンタブレットなどのディスプレイ上に表示することで、物の形を理解し、描画スキルを向上できるソフ

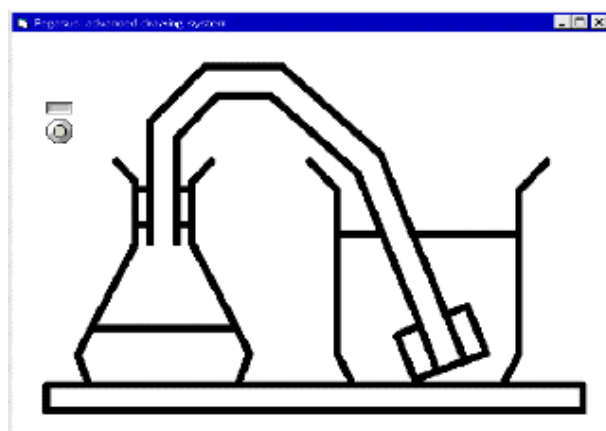


図 2.2: Pegasus



図 2.3: Roll Canvas

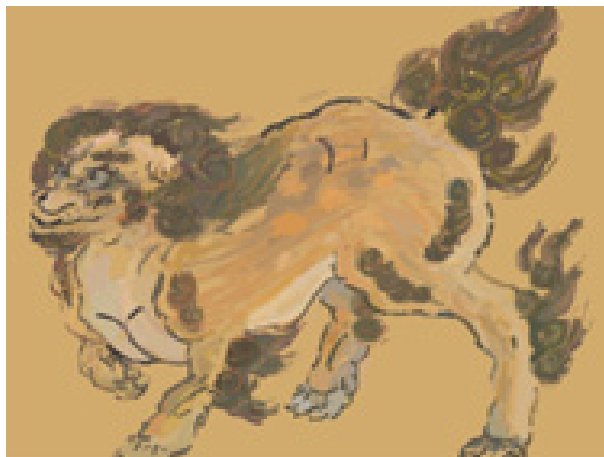


図 2.4: Sequential Graphics

トウェアである。画像データベースと、ユーザの描画中の絵を照合することで、描画されるであろう絵をガイドとして表示する。ユーザの ShadowDraw による訓練前後では、絵のスキルが向上する変化が見られた。これは画面上の視覚的なドローイング支援が、紙と鉛筆などを用いた物理的なドローイングの上達に繋がる可能性がある。

しかしこの研究は、コンピュータ上のドローイング環境を想定したものである。確かにデジタルならではの動的な表現は、従来のアナログな表現手法に比べ試行錯誤でき、アナログな表現手法には無い発想を促す。しかしこれらは、画面内の創作活動に留まっている。例えばモニタに表示する映像作品や静止画作品や、ブラウザ上のウェブ・サイト、また GIF 動画作品など、ディスプレイ上で表示することが最終的なアウトプットである表現に関しては、このような画面内での創作の方が適切である場合もある。画面のピクセルの位置、色を素材として扱い、直接対話しながら制作していくためである。

しかし最終的なアウトプットが紙媒体である場合は、紙とデジタルメディアの間に乖離が起きていると考えられる。例えば画面上の色と紙上の色が異なるため、色を確認するために何度も印刷する必要があったり、画面上のスケールと実際のスケールが異なるため、大きさが直感的にわからないことがある。また紙の質感や絵の具の色、道具の動かし方など、素材との対話による表現はデジタル環境にはないアナログな制作の特徴である。最終的なアウトプットが紙などのフィジカルなマテリアルである場合、紙とデジタル技術を組み合わせる必要がある。

紙や筆などのフィジカルな素材とデジタル技術を組み合わせて、手作業のドローイングを支援する研究や作品がこれまで数多く行われてきた。I/O brush [19] (図 2.6) は筆の中にカメラが内蔵された筆型デバイスである。ユーザは実空間にあるオブジェクトのテクスチャをキャプチャすることにより、そのテクスチャを画面上のバーチャルキャンバスで用いる色・パターンとして用い描画することができる。また目の瞬きをテクスチャとして用いるなど、動的なテクスチャを直感的にデジタルなドローイングに取り入れることができる。

IntuPaint [20] や FluidPaint [21] (図 2.6) は実際の水彩画などで使われる筆を使用し、プロジェ



図 2.5: ShadowDraw



図 2.6: I/O brush

クタ及び赤外線カメラが配置されたスクリーン上で、筆を用いたドローイングができる。これは従来のペン型デバイスに比べて、筆の持つ繊細な動きをデジタル環境での描画に反映することができる。これらはペン型デバイスよりも繊細な動きを取り入れるため、また直感性を向上させるためのメタファーとして、筆という従来用いられていたフィジカルツールを用いているが、出力媒体は画面上であり、従来のペンデバイス／ディスプレイの関係性とほぼ同一の環境である。

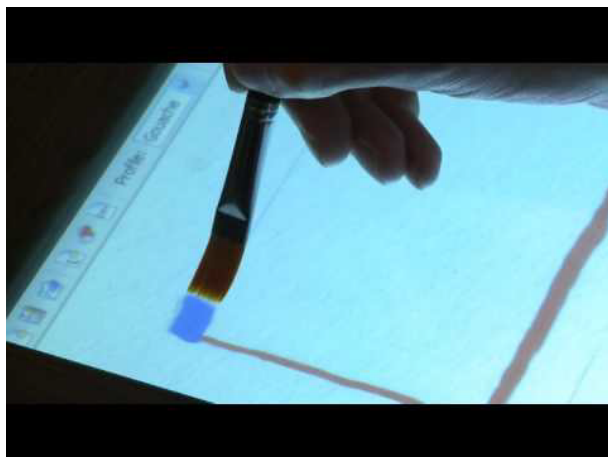


図 2.7: FluidPaint

Digital Rubbing [22] (図 2.8) 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 COMP*PASS [23] (図 2.9) は、コンパス型のデバイスを紙の上に置き、通常のコンパスと同じように円を描く動作をすることで、コンピュータの補正により円以外の四角や星などの予めインプットした図形を描画することができる。またデバイスを用いて、箱などの物の長さを量り取ることで、展開図を描画することができるため、紙を用いた立体的なファブリケーションにも用いることができる。

Digital Airbrush [24] は、位置をトラッキングするセンサが内蔵されたエアブラシである。ユーザは広いキャンバス地の上で、エアブラシ型デバイスを動かすことで、予めインプットしていた描画データを元に、位置に応じてノズルから塗料が噴出されて絵が描画される。

PixelRoller [25] (図 2.10) は、コンピュータ制御されたローラーブラシであり、壁などのキャンバスにローラー型デバイスを転がすことで、アレイ状に並んだインクが位置に応じて制御されることで、デジタル画像を描画することができる。BitBrush [26] (図 2.11) は、手持ちのインクジェットプリンタである。ペン型デバイスの先に、ピクセルアレイ状のインクが並んでおり、位置に応じてプログラムされた画像を描画することができる。

これらは、手持ち型のドローイングツールであるため、場所の制約が無く、広い面での描画が可能である。また手作業に寄る即興的な描画と、デジタル制御による描画を組み合わせながら描



図 2.8: Digital Rubbing

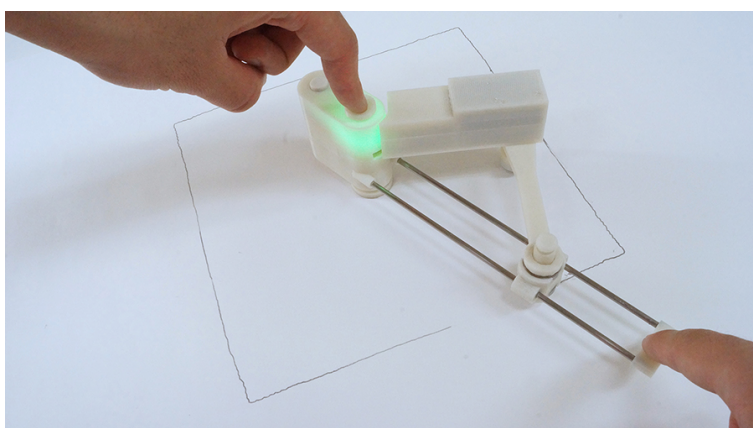


図 2.9: COMP*PASS

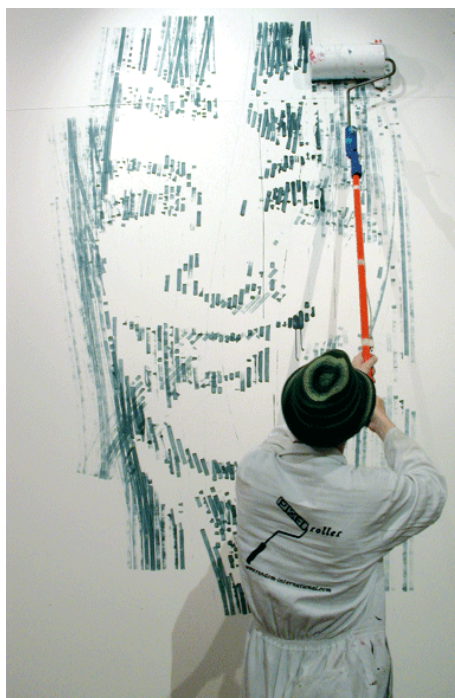


図 2.10: PixelRoller



図 2.11: BitBrush

画することができる。PixelRollerなどは実世界の座標とバーチャル画像の座標が対応しているため、予めインプットした絵を描画できるため、ユーザは描画する場所としない場所を選択しながら描画できる。一方でBitBrushなどは、プログラムされた画像を筆の模様として用いるため、ユーザの普段の即興的なドローイングの線に、デジタルな模様を付与することができる。

このような紙や筆を用いたフィジカルな描画にデジタルテクノロジーを組み合わせた研究は、最終的なアウトプットが紙媒体である場合に効果的である。例えば、紙の材質やインクの色などの素材の質感を見ながら正確さや復元性を持つデジタルドローイングを手作業に取り入れることができる。InDesign(Adobe)などのソフトウェアを用いてデータを作成し、完成したデータを紙媒体に印刷する場合は、色みが異なって再度印刷することがある。そのためデジタルとフィジカルを統合したドローイング環境は早さの面でも利点はある。

また紙を特殊な素材にすることで従来の紙を用いた手描きをデジタル技術の特性を取り入れて拡張する例として、Hand-rewriting [27] (図 2.12) が挙げられる。これは紫外線により変色する紙と、サーモクロミックインク、レーザ光と UV プロジェクタを用いたシステムである。これによりコピーアンドペーストや補正、消去などのデジタルドローイング特有の機能を、紙の上で実現している。

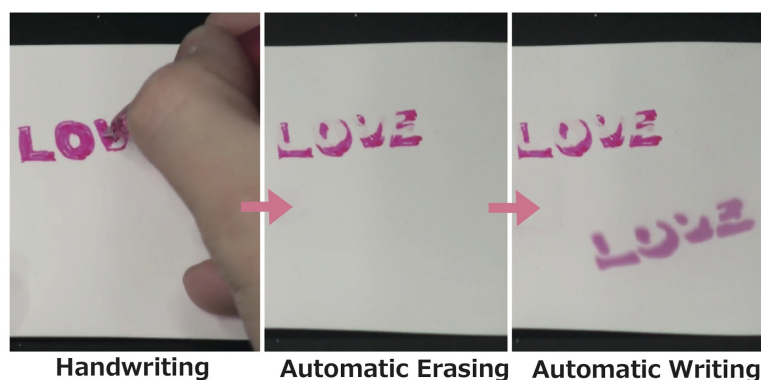


図 2.12: Hand-rewriting

2.2 発想を促すハードウェア・プロトタイピングツール

電子機器やガジェットなど電子回路を用いたハードウェアを簡単に実装するための道具としてハードウェア・プロトタイピングツールが注目されている。これはラピッドプロトタイピングなどとも呼ばれるが、従来専門的なスキルや知識が必要であった電子工作やプログラミングを簡易に制作できるモジュールを組み合わせることで、比較的簡単にハードウェアの実装ができる環境を実現している。

例えば Arduino [28] などのオープンソースハードウェアは、従来のワンチップマイコンをさらに簡単にプログラムできるシステムである。専用のソフトウェアを用いて、ハードウェアのデジ

タル・アナログピンの入出力をプログラムすることで、ハードウェアに繋げたセンサやアクチュエータを簡易に制御することができる。

これらは従来のデジタルな電子回路を取り入れたものづくりを、より直感的にかつ早くできることを目指している。さらに元々はプロトタイピング（試作）の名前の通り、完成品の前段階の試作品を実装するためのツールであった。しかし、アーティストなどの電子工作とは無縁だったユーザもこのような簡易に電子回路を扱えるツールを活用することで、本来のプロトタイピングツールの使い方を超えて、完成作品の回路として用いる例も増えている。

またこのようなプロトタイピングツールは、子供のための回路や機構を学びながらものづくりをするための学習環境としても利用される。教育全般にコンピュータを取り入れる思想として「コンストラクショニズム」が挙げられる。これは子供向けのプログラミング言語 Logo 言語を開発したシーモア・パパートの提唱した考え方であり、ピアジェの構成主義 (Constructivism) [29] の影響を多く受けている。構成主義とは、「人が、すでに持っている知識構造（シエマ）を通して外界と相互作用しながら、新しい知識を得て、新しい知識構造を構成する」という考え方である。つまり従来の知識を与え蓄積し続ける詰め込み式の教育方法に対し、児童がすでに持っている知識と相互作用しながら、構築をし直すことで、新たな知識が増えていく。この考え方を元に、パパートは構成主義を提唱し、学習のツールとして Logo を開発した。Logo はタートルと呼ばれるカーソルを基準として、回転角度や進行距離などの相対座標でプログラミングを行い、主に子供の思考能力の訓練を目的としている。具体的な学習プロセスとして、コンピュータで作品を制作したい「動機付け」があり、試行錯誤を繰り返しながらプログラミングすることで、論理的な思考の発達を促す。

このようなグラフィカルなプログラミング学習環境は、画面の中にあるオブジェクトをマウスやキーボードを用いて操作するため、ユーザと対象物の間に乖離があった。そのため知育玩具などフィジカルな道具にデジタル技術を取り入れ、コンピュータ教育に用いる研究が多くなされてきた。

また Resnick らは電子回路を内蔵した知育玩具を用いることで、従来子供には高度であると考えられてきたデジタル操作を理解し、新たな創作活動に繋がると提言している。 [30]

MINDSTORMS [31] (図 2.13) はモータ、センサ、などとレゴブロックを組み合わせ、プログラムを組むことで、ロボットや機械、対話システムを制作できる知育玩具である。これは 1980 年代のパパートを中心とした EPISTEMOLOGY AND LEARNING 研究所の Logo 言語を用いて LEGO からなる構造体を動かす、「LEGO-Logo」 [32] と呼ばれるプロジェクトが前身となっている。MINDSTORMS は、センサ、モータ、マイコンなどのハードウェアとソフトウェアから構成される。子供はロボットの動きをコンピュータ上でプログラミングし、赤外線ハードウェアに転送することで、簡単にブロックによる自作ロボットを制御できる。

PicoCricket [33] (図 2.14) は紙や布で作った制作物に、プログラムしたセンサやモータ、LED、スピーカが内蔵された部品を組み込むことで、様々な動的な作品を制作できるデジタル知育玩具である。MINDSTORM と同様にソフトウェア上でプログラミングを行うが、ブロックではなく、



図 2.13: MINDSTORMS

身の回りの素材から成る作品に組み込む点で異なる。

ATOMS Express Toys [34] (図 2.15) は様々なセンサやアクチュエータの内蔵された部品から成る知育玩具である。LEGO やぬいぐるみなどと組み合わせ iOS で制御することが出来、明るさや傾きによって車の速度を変えたり、音に反応して車の進む方向を変えるなどの制御を簡単に行うことができる。

これらのプロトタイピングツールは、従来の電子工作と比べ、センサやアクチュエータがブロックのようにモジュール化されているため、玩具を扱っているかのように電子回路を設計することができる。一方でそれを制御するためのプログラムは、画面上のソフトウェアを用いてプログラミングする。プログラミング環境は、ブロックのようなアイコンを繋げるようなビジュアルプログラミングを採用することが多いが、画面上と実世界の制作プロセスは乖離しているために、相互に行き来するには時間が掛かるなど直感性は高いとは言えない。

一方でコンピュータの画面上のソフトウェアを用いずに、ハードウェアそのものを用いてプログラミングするようなプロトタイピングツールも存在する。

curlybot [35] (図 2.16) は、ユーザの物理的な動きを記録し再現する教育用コンピュータ玩具である。ユーザが curlybot を掴み平面上で動かすことで、動いた軌跡を内蔵されたマイコンに記録し、デバイスが動き再現される。またペンアタッチメントを装着することで LOGO 言語におけるタートル・グラフィックスのような絵を紙に描画することができる。

Topobo [36] (図 2.17) は、複数のパーツからなる知育玩具で、各パーツに内蔵されたマイコンに関節の動きを記録することで歩行するキャラクタなどを自由につくることができる。これら



図 2.14: PicoCricket

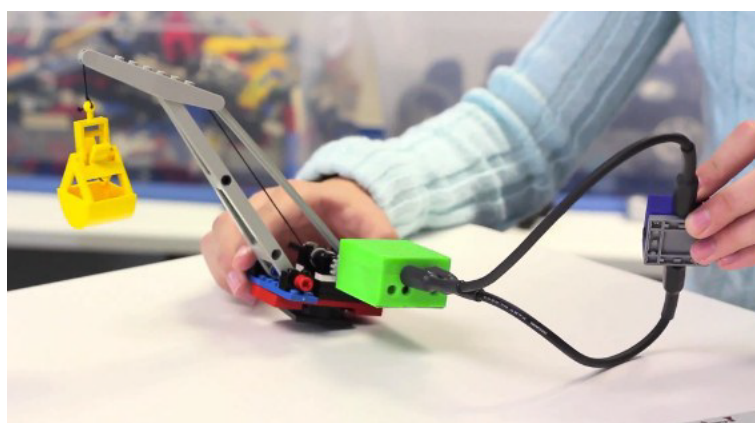


図 2.15: ATOMS Express Toys



図 2.16: curlybot

の知育玩具は、従来の積み木遊びなどのアナログ玩具に、コンピュータを介したインタラクションを加えることで、子供の創作活動への興味や好奇心の維持に繋がることが期待される。さらに Topobo を用いて歩行するロボットを制作する際には、少しずつ動きを試行錯誤しながら制作することが重要である。そのため、歩行のためのバランスや重心、部分と全体の関係など運動学的な物理原則の理解を促す。

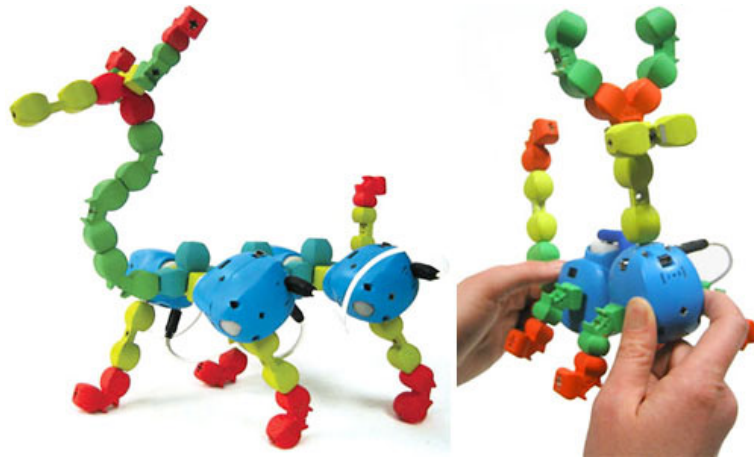


図 2.17: Topobo

TSU.MI.KI [37] (図 2.18) はセンサやアクチュエータ、LED の内蔵された積み木型のデバイスを接続することで仮想空間上のオブジェクトを操作できる。またデバイスが仮想空間上のオブジェクトの振る舞いに応じて、色が変わったり振動することで、仮想空間上の事象を実体を通して体験できる。



図 2.18: TSU.MI.KI

LittleBits [38] (図 2.19) はセンサやアクチュエータ、LED が内蔵されたブロック同士を接続することで、直感的に回路を設計することができるプロトタイピングツールである。各ブロックにはケーブルに繋がれた磁石が配置されており、正しい向きで接続できる構造になっている。回路

を直感的に制作した後、紙や粘土で作った箱や人形の中に入れることで、ハードウェアプロトタイピングが容易にできる。



図 2.19: LittleBits

このようなハードウェアを制作する際の試行錯誤を促すプロトタイピングツールは、本来のハードウェアの試作品を制作するという目的のみならず、試作品が実際の道具や作品などの完成品として使用できる。特に Makerムーブメント [39] における Maker と呼ばれる個人あるいはグループで色々な素材、機械を組み合わせて道具などを制作する DIY コミュニティでは、その直感性からこれらのプロトタイピングツールは作品制作に用いられる傾向にある。また子供が電子部品などを用いた試行錯誤のプロセスを通してメカニカルな機構や、電子工作の知識などハードウェア制作のスキルを獲得できると特徴することができる。

Arduino や MINDSTORMS などの登場により、複雑な電子工作およびプログラミング環境をパッケージ化することによって、アーティストなどのユーザ層も積極的に電子的なものづくりを行えるようになってきた。しかしこれらは、プログラミングする工程は画面上のソフトウェアを用い、センサやアクチュエータを用いた電子工作を行う工程は実空間であるため、ユーザの即興的な発想などを妨げている可能性がある。例えば、電子部品を使ったハードウェア制作の途中で、プログラムを変更する場合、一度ハードウェア制作の作業を中断し、ソフトウェア上のプログラムの変更作業に移る。このような空間的な行き来は、即興的に思いついたアイデアを実装する妨げになると考えられる。

一方で LittleBits や Topobo などのツールでは、プログラミング環境がハードウェアに内蔵されているため、ハードウェアとプログラムを制作するプロセスをインタラクティブに行き来しながら進めることができる。本研究でもこのように素材であるハードウェアとデジタルデータで構成されるプログラムが一体となり、ユーザは両者を同じ造形プロセスの中でインタラクティブに作り上げていく考え方を取り入れる。

また、これらはブロックなど固形の素材を用いているため、形状の自由度には制約があると言える。これに対し本研究では、NeonDough で用いるように粘土などの柔軟で多彩な表現が可能な素材を用いることで、各パーツの形状を変更したり、接続の自由度を持たせることができる。

2.3 インタラクティブファブリケーション

近年、3D プリンタやレーザーカッターなどコンピュータ制御された工作機械を、個人のラピッドプロトタイピングするためのツールとして活用するパーソナル・ファブリケーション [12] が注目されている。この背景には工作機械が安価にそして使いやすさが向上したことに加え、使い方のノウハウやハードウェアのオープンソース化などインターネットを介して共有されてきたことが挙げられる。これらは従来のマスプロダクション（大量生産）で見られる工場生産と異なり、各ユーザが自宅で自らが望む物を制作・出力可能であるという多品種少量生産の理念を持ち、従来の DIY (Do It Yourself) / DIWO (Do It With Others) の延長であると考えられる。そのためこれらは Makersムーブメントとも相まって、デジタルファブリケーションツールを用いた制作環境は注目されている。

さらにデジタル工作機械をインターネット上と実世界両方で繋ぐことで、データやノウハウ、思考を世界中のユーザと共有しながらものづくりを進めるソーシャルファブリケーションのように、多人数協調型のものづくりも取り組まれている [40]。離れた場所にある工作機械同士がネットワークを介して繋がっていれば、データを送ることで別の場所でも同じ製品を出力することができる。また別の場所にいるユーザがデータを改変して、別のユーザとシェアすることも可能である。

このようなデジタルファブリケーションツールを用いたコミュニティや環境が注目される中で、現在普及し実際に用いられるファブリケーションツールの造形方法には、設計プロセスと造形プロセスが乖離しているなど、まだ改良の余地がある。例えば現在一般的に用いられる 3D プリンタの制作プロセスでは、ユーザは CAD などのソフトウェアを用いて設計を行い、データ完成後、3D プリンタにデータを送り、プリンタは造形を行う。このような設計プロセスと造形プロセスの時間的・空間的な乖離は、ユーザの創作における即興性や素材に対する直感性を阻害する可能性がある。

そのような問題を解決するために、特に HCI 領域では、デジタルファブリケーションツールとユーザとのインタラクションについて議論されてきた。CHI2013 で行われたワークショップ ”FAB at CHI: Digital Fabrication Tools, Design, and Community” [41] では、パーソナルファブリケーションで議論されているようなネットワークを介したコミュニケーションやコラボレーション、教育、あるいは 2.2 章で述べたようなハードウェアプロトタイピングツールについても言及

第2章 関連研究

されており、より直感的なデジタルファブリケーションのためのインタフェースおよびツールについて取り上げていた。

従来のデジタルファブリケーションツールに見られる時間的・空間的な乖離を解消し、手作業とデジタル技術を組み合わせたインタラクティブなものづくり Interactive Fabrication[13] が Willis らにより提唱されている。これはデジタル工作機械の造形プロセスに人が介入できる、あるいは人の作業を機械が補助するという理念を元にしたものづくりの形である。

インタラクティブファブリケーションの理念に基づいた研究として Shaper [13] (図 2.20) が挙げられる。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。

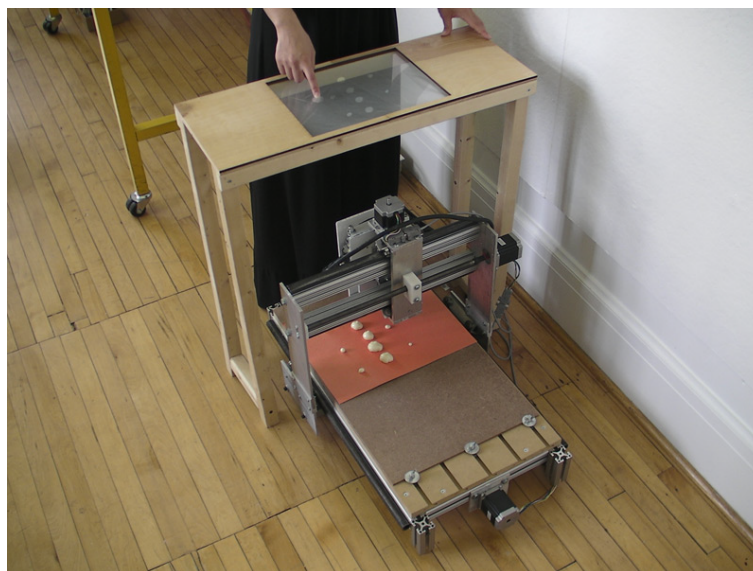


図 2.20: Shaper

また、Interactive Construction [42] (図 2.21) は、レーザーポインタとレーザーカッターを用いた木材加工支援システムである。木板にレーザー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、レーザーカッターで切断し、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言える。

入出力が一体となった造形支援の研究として Haptic Intelligentsia [43] (図 2.22) が挙げられる。Haptic Intelligentsia は触覚インタフェース (Phantom Omni [44]) 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、予め入力されたデータを立体物として造形できる。

Free D [45] (図 2.23) 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

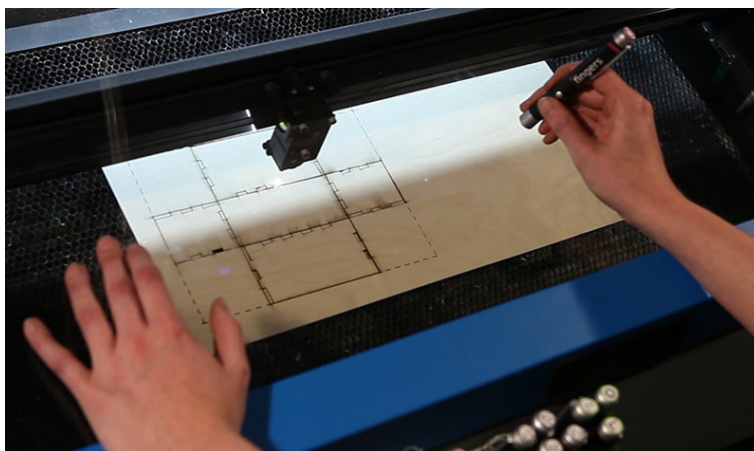


図 2.21: Interactive Construction

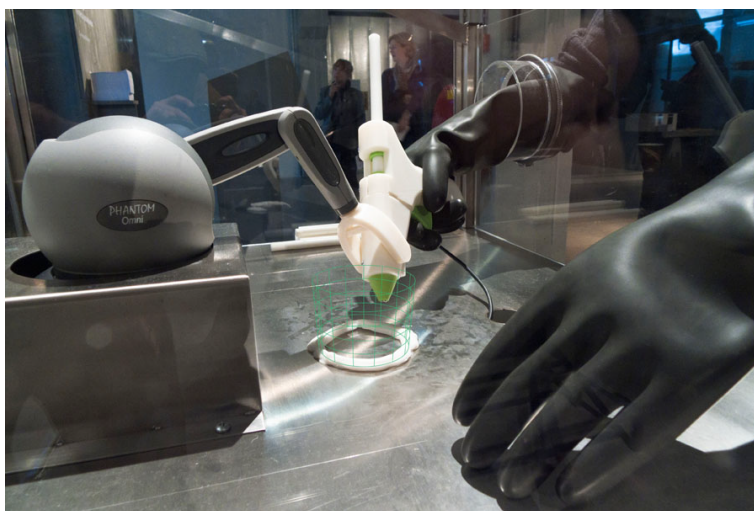


図 2.22: Haptic Intelligentsia

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、予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。



図 2.23: Free D

Position-correcting tools for 2d digital fabrication [46] (図 2.24) は、画面上のガイドを頼りに大まかな形に木板などの上に置いた装置を動かすことで、機械が補正しながら切ることを補助するツールである。木板などに付けたマーカを機械が認識して補正を行っている。



図 2.24: Position-correcting tools for 2d digital fabrication

これらは3Dプリンタやレーザカッター、ミリングマシンなどのデジタルファブリケーションツールによる造形プロセスの中に人が介入することで、人の作業を機械が補助したり、機械の作業に人が直感的に作用するなどのインタラクティブな造形ツールである。従来のデジタルファブリケーションツールにはなかった、機械とユーザの相互作用によって、直感性や即興性を担保し

ながら、かつデジタルの持つ精度や復元性などを取り入れたものづくりを可能にしている。一方で、このような造形ツールは工作機械が素材を加工するため、ユーザと出力に用いる素材との対話が少ないという問題がある。

2.4 本研究の位置づけ

本研究はデジタル技術を用いることで、人間の手作業によるものづくりを拡張する Augmented Craft を提案する。これは従来のデジタルファブリケーションやインタラクティブファブリケーションと異なり、人間が日常的に行う手作業による行為、“描く”や“切る”、“塑造する”といった五感を用いて素材との対話を伴う創作活動を拡張することができる。

図 2.25 は本研究の位置づけを示している。図の横軸は、右方向がフィジカルな素材を操作するための入力デバイス、左方向はバーチャルな情報を操作するための入力デバイスである。図の縦軸は、上方向は最終的な出力媒体がフィジカルな素材を指し、下方向は出力媒体がモニタ上で出力されるバーチャルな素材である。Skechpad などのデジタル環境のドローイングソフトウェアは、出力媒体がバーチャルな素材であり、入力デバイスが画面上での作業を想定しているため、入出力が一体となっている。一方でデジタルファブリケーションは入力デバイスが画面上での作業を想定しているのに対して、物理的な素材を用いて出力するため、入出力が乖離している。Interactive Fabrication はデジタルファブリケーションツールより入出力の一致度は高いものの、入力デバイスと出力デバイスが乖離している場合がある。Augmented Craft は、コンピュータと物理的な素材の入出力を一致させ、ユーザが素材と直接対話しながら制作できるものづくり環境である。

本研究では、この Augmented Craft の概念に基づき、幾つかのプロトタイプを開発した。“塑造する”行為を拡張する NeonDough, “描く”行為を拡張する dePENd, “切る”行為を拡張する enchanted scissors である。本稿では、それぞれのプロトタイプツールの設計、実装、アプリケーション、評価や体験の様子を述べるとともに、Augmented Craft がデジタルファブリケーションと従来の手作業に与える影響や効果を議論しながら、今後のものづくり環境について述べる。

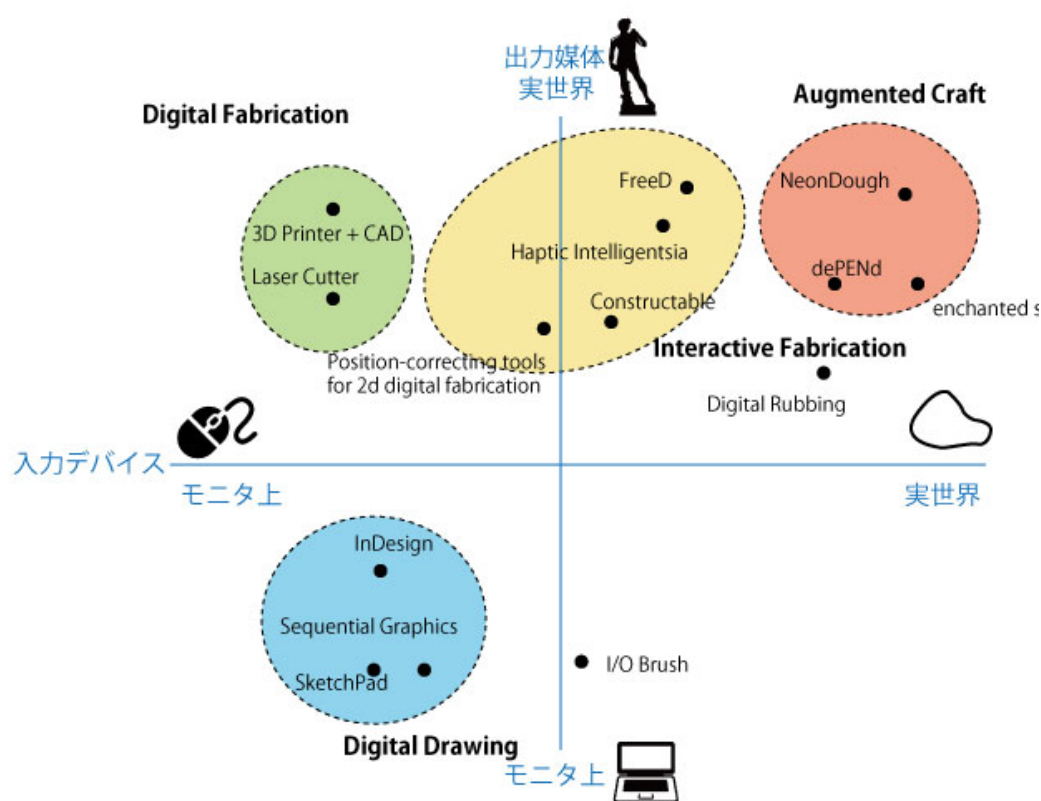


図 2.25: 本研究の位置づけ

第3章

色と形の表現を促す光る粘土 NeonDough

3.1 NeonDough の背景

粘土は子どもを中心に、造形をするための手段として、さらには造形を楽しみながら学ぶツールとして広く親しまれている。造形スキルや表現スキルの獲得のために粘土がよく用いられる理由として、粘土という素材の持つ柔軟性や可塑性が、ダイナミックに形を考えながら表現を構成するという体験につながるという点が挙げられる。これにより、予め設定された明確な完成形を目指して制作するというスタイルだけではなく、その都度考えながら絶えず形を変えて造形することができる。

粘土の持つ様々な可塑性の理解のために、その色に着目した。色付き粘土など、粘土と色は親和性が高い。しかし粘土は形と色で構成されるが、形状の変化と色の変化は対応していない。本研究では、粘土への対話を促すために、手の操作によって動的に色が変わる粘土の実現を目指す。

本研究では、形の変化により色をダイナミックに変化できる仕組みを考案し、利用者の立体的な造形を促す光る粘土 NeonDough を提案する。具体的には、NeonDough は、粘土そのものを素材とし、内部に電子回路を内蔵することでダイナミックに色が変わる、光る粘土である (図 3.1)。

手の操作により、粘土の形状が変化するたびに色が変わることで、好奇心を刺激し造形を促すことが期待される。この好奇心を刺激する遊びは、可塑性の理解に繋がる。

また動的で可逆性のある色表現は、色の変化から形を発想したり、造形した後に色を変更したりという通常の粘土とは異なる表現が可能である。本研究は、他にも色を固定するロック機能や明滅機能、粘土に対して細かい動的な色付けが出来る機能などを開発した。

そのような機能を駆使した造形プロセスを試行錯誤することにより子どもに新たな思考が生まれ、作品を制作するきっかけ作りや思い通りの作品ができるなど創造力の向上が期待される。通常の粘土とデジタル粘土との造形の違いを子供の造形プロセスから分析する。

また本研究では、発光色以外にもアクチュエータによる動きやスピーカーによる音など、他のアプリケーションの基礎実験も行った。これらの機能と通常の粘土を用いた造形との違いについても言及する。

本章では、NeonDough の関連研究、システム設計、実装、および展示・ワークショップでの体験の様子を通しての結果と考察について述べる。

3.2 関連研究

柔軟な素材を用いたインタフェースの関連研究として、Soap [47](図 3.2) は柔らかいカバーと赤外線センサの内蔵されたデバイスである。これは、カバーを変形させることで画面内のファイル操作などを行うことができる。

FuwaFuwa [48](図 3.3) はクッションなどの柔軟な日用品を利用したインタフェースで、押した時の圧力変化や位置を計測でき、映像操作などを直感的に行うことができる。素材自体が柔軟であるため、直感的にデジタル情報を操作するインタフェースとしての有用性はあるが、単体のデバイスでの利用が多く、複数のデバイスをつなげたりちぎったりという操作はインタラクション



図 3.1: NeonDough



図 3.2: Soap

に用いられていない。

本研究と同様に粘土に着目したインタフェース研究としては、Illuminating Clay [49](図 3.4) が挙げられる。これは、天井に設置されたレーザスキャナによって粘土の形状を認識し、等高線などを上部のプロジェクタより投影する。PLAY-DOH AS INTERFACE[50] (図 3.5) はカラー粘土の形状を上部のカメラでリアルタイムに撮影し、粘土の大きさによって動画の再生速度を変更できる粘土インタフェースである。また、Reed の研究 [51](図 3.6) では磁気型モーションキャプチャを利用し、粘土の内部に複数のマーカを分散させることによって、粘土の形状を解析する。これらのシステムでは、直感的な操作を提供できるものの、カメラなどのセンサを粘土の外側に配置する必要があるため、手の遮蔽や、装置の大規模化などの問題を抱えている。これに対し、本研究では粘土の導電性に着目し、状態の認識を行う。Squishy Circuits [52] (図 3.7) も同じく導電性粘土と絶縁性粘土を用いたインタフェースであるが、これは子供でも電子回路の仕組みを理解することを目的とした教材／知育玩具であるのに対して、筆者らの研究は光る粘土を用いた粘土細工を行うために、導電性粘土の特性を粘土の形状や接触・分離などの状態を認識するために用いる。

3.3 NeonDough の設計と実装

本研究で提案する NeonDough は、違う色に光る粘土同士をくっつけ、伸ばすことで色の混色、対応するスイッチに粘土を接触することで明滅を行い、粘土の形状のみならず色や発光パターンを組み立てることを可能にする。具体的には、例えば赤色と緑色に発光する粘土をくっつけると、

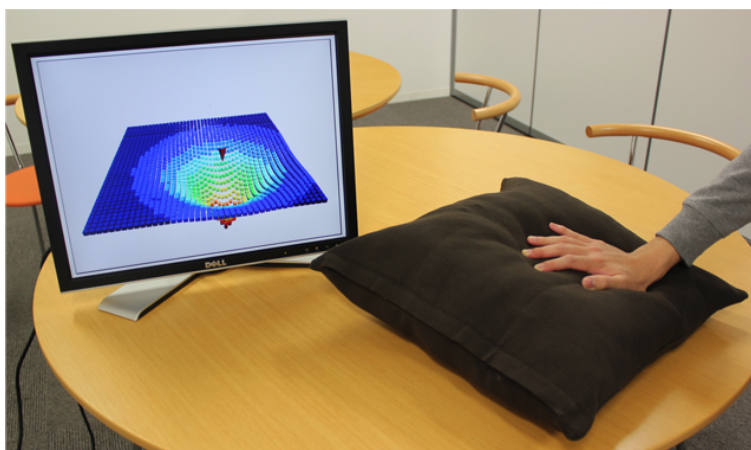


図 3.3: FuwaFuwa

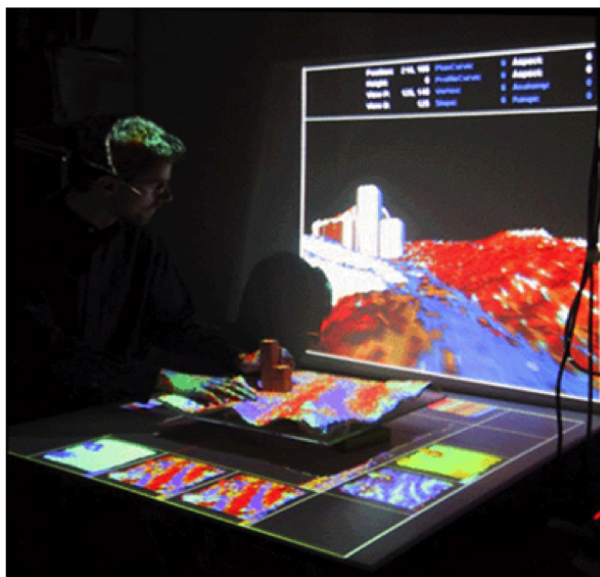


図 3.4: Illuminating Clay



図 3.5: PLAY-DOH AS INTERFACE



図 3.6: Reed による粘土形状を認識する研究

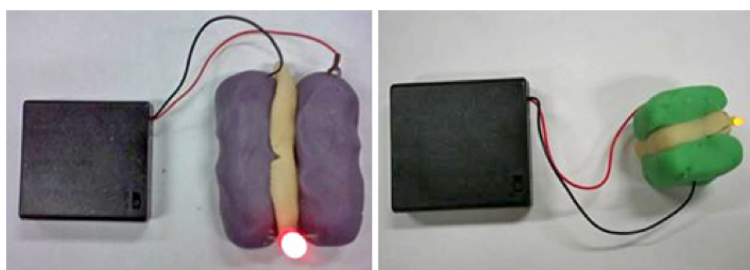


図 3.7: Squishy Circuits

第3章 色と形の表現を促す光る粘土 NeonDough

橙色の粘土が生成され、伸ばしていくと緩やかに元の原色に戻っていき、完全に分離すると元の色に戻る。さらに、このような基本インタラクションに加えて、本システムでは、好みの色に変更できるパレット機能、混ぜた色を分離後も粘土に留めておくロック機能や、LED に明滅発光パターンを付与する機能を切り替える粘土板型デバイスを用意し、細かい色や発光パターンの制御を支援する。これらの操作や機能を用いて、色の動的な変化から発想を得た造形や、造形後の色の変更などを行うことができる。

本システムは導電性粘土、LED・センサ類を内蔵したモジュール、およびそれらのモジュールを接続するための粘土板型デバイスから構成される（図3.8）。モジュールを内蔵した導電性粘土同士を接続することで、モジュール内の電極間に電気が流れ、抵抗値の変化によって電極間の距離を推定し、粘土同士の接続／分離や、粘土の伸び具合を取得することができる。抵抗値の変化をモジュール内のフルカラーLEDの配色に割り当て、加法混色による色の変更を行う。各モジュールは光の三原色（赤色／緑色／青色）のいずれかに発光し、別の粘土と接触すると相手の色が混色され、モジュールの電極間の距離により混色の程度が変化する。通常の色付き粘土も同様に異なる色同士による混色であるため、体験者にとって直感的である。

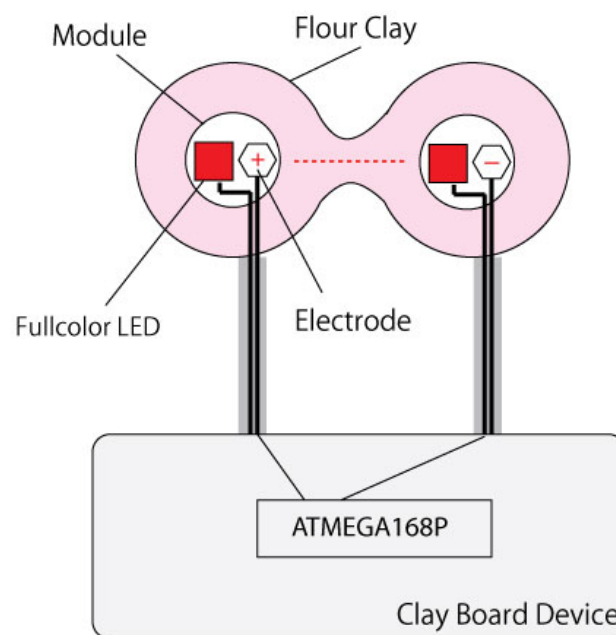


図 3.8: システム図

また表現を拡張するための機能として、パレット機能、ロック機能、明滅機能の3種類がある。粘土板型デバイスに配置されたスイッチに粘土を接触させることにより、瞬時に好みの色に変更できたり、色にロック機能や明滅機能を適応することができる。

3.3.1 ハードウェアの設計

ハードウェアの基本的な構造は、一般的な分圧回路によって実現されている（図 3.9）。一方の抵抗を導電性粘土とすることで、電圧が変化するため粘土内の電極間の抵抗値を計測することができる。

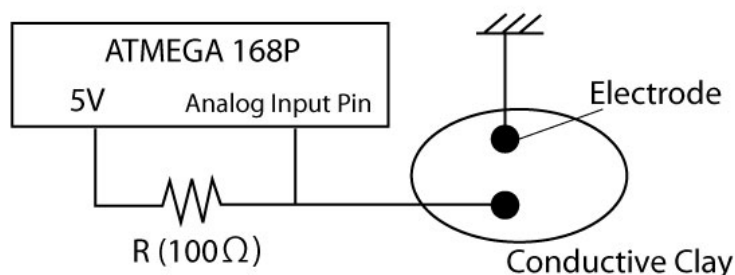


図 3.9: 抵抗値計測の回路図

本研究で用いる導電性粘土は、一般的に馴染みのある小麦粘土を用いた。小麦粘土は成分に塩と水が含まれているため、高い導電性を持ち、抵抗値によって粘土同士の接触などを検出することができる。さらに内部に LED などを入れた際、光を拡散させ粘土全体が発光しているように見えることが特徴である。また小麦粘土は一般的に市販されており、原材料が小麦粉や水など安全な素材からできており、子どもにも安心して使用することができる。なお、NeonDough で用いる小麦粘土は市販されているものではなく、SquishyCircuits の Web サイト [53] で公開されているレシピを元に制作した粘土を使用している。通常の粘土よりも水の配分を多くしているため、柔らかく造形しやすい固さである。また通常の小麦粘土よりも高い導電性があることが特徴であり、人体の電気抵抗率より導電性粘土の電気抵抗率が低いため、手が触れている状態でも安定したインタラクションが可能になる。小麦粘土は密閉された容器から出した際、約 2 時間の時間変化と共に表面が乾燥するが、表面に水分を与えることで元の柔らかい状態に戻ることができる。

モジュールの埋め込み深さと LED の明るさについて調査した。小麦粘土に白色にしたフルカラー LED を内蔵したモジュールを入れ、粘土の厚みを 1~5cm の範囲で 1cm 間隔で変え、明るさの変化を調べた。本実験では色彩輝度計 (KONICA MINOLTA 製 CS-100A) を粘土から 86cm 離れたところから計測し、照明条件は蛍光灯の室内照明下で行った。また参考として内蔵モジュールの LED の明るさは 9100 cd/m^2 であった。図 3.10 は粘土の厚みを変更した際の明るさの変化であり、図 3.11 は実際に計測したグラフである。実験の結果、1cm~5cm の範囲で $1080 \sim 25.6 \text{ cd/m}^2$ の変化があった。導電性粘土内電極間の抵抗値は粘土同士の接触や分離などの認識に用いられる。粘土内に配置するモジュールはフルカラー LED、抵抗値を計測する電極、および粘土板型デバイスに繋げるためのケーブルからなる。各モジュールのサイズは約 1cm 角で、電極部分は、抵抗値に影響の少ない小型のキャップ付きナットを使用し、食塩水の電気分解による腐食した際に交換しやすいものを用いた（図 3.12）。またフルカラー LED は粘土内部での発光の減衰を抑え

第3章 色と形の表現を促す光る粘土 NeonDough

るため、高輝度なチップフルカラー LED（日亜化学工業製，NSSM009BT）を用いた。さらに減衰を抑えるために，LED の先端に発光ロッド（新興プラスチック製 SK ロッド）を付けることで，小麦粘土内の LED の発光を粘土内部の広範囲に拡散させることができる。

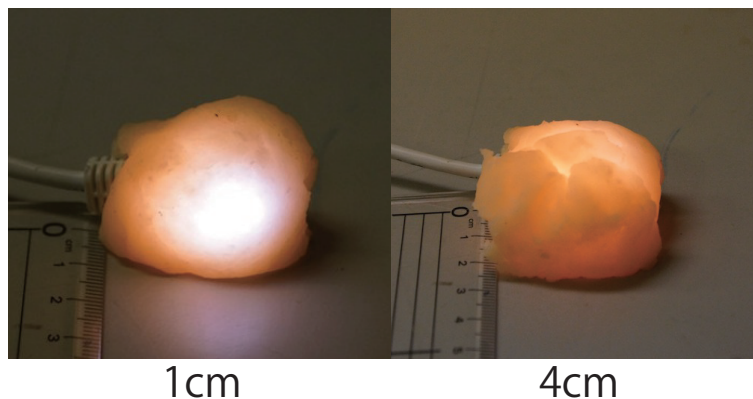


図 3.10: 粘土の厚みと発光の明るさの関係

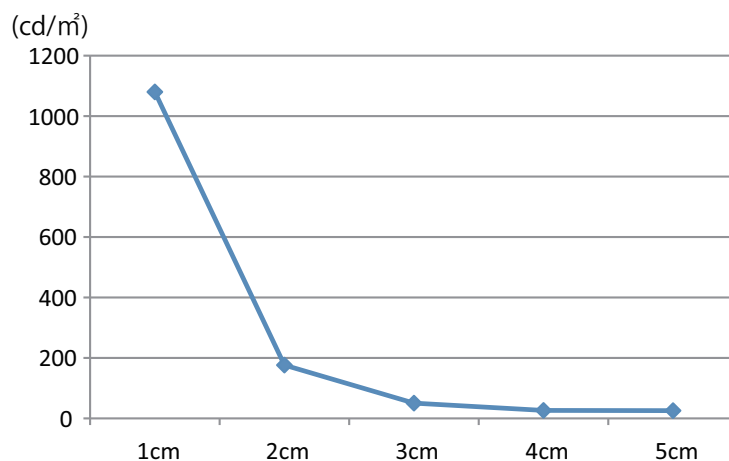


図 3.11: LED の埋め込みと明るさの実験

また粘土板型デバイスとモジュールの間に接続されているケーブルに関しては，モジュールの色の変更のためのインタラクション時にはシステム上必要であるが，時に造形の妨げになったり，造形後の移動等に支障が生じる場合がある。そこでモジュール内にマイコン，バッテリーを内蔵することで，ケーブルを着脱可能にする構造を開発した（図 3.13）。これにより造形後に作品を移動する際，また造形中の細かい作業の際にケーブルを外すことができる。色を変更する際は，粘土板型デバイスにケーブルを接続することで色の変更を行う。

接触などを検出するため，粘土内に配置された複数のモジュールから任意の 2 つの極間の抵抗値を計測する。その際，同時に計測すると電極同士が干渉するため，トランジスタを用いて高速



図 3.12: 粘土内モジュール

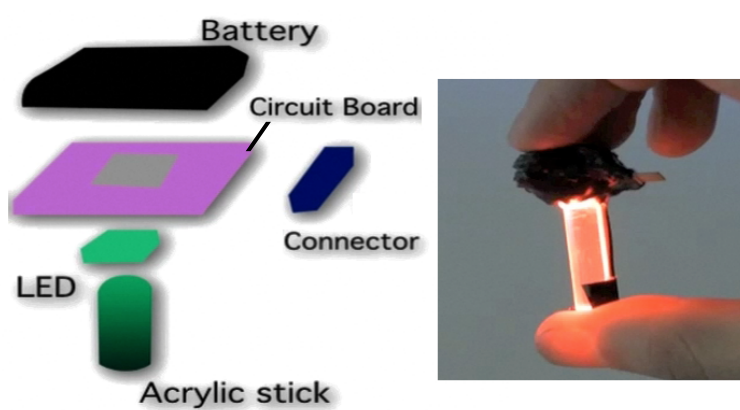


図 3.13: バッテリー内蔵モジュール

スイッチングを行い計測している．各モジュール内の電極は，粘土板型デバイス内基板の2つのスイッチング用トランジスタに接続される．図3.14に一つのモジュールに対するデバイス内回路を示す．各トランジスタはVCCとGNDに接続されており，マイコンのデジタル出力からベースに通電し高速スイッチングすることで，モジュール内の電極をVCCとGNDに切り替える．またスイッチング回路のVCCは分圧回路の一部である．任意の2つのモジュールの電極をVCCとGNDにすることで，導電性粘土内の電圧の変化をマイコン内の8bitのA/Dコンバータで測定する．これにより粘土内の全ての電極間のそれぞれの距離を計測することができる．

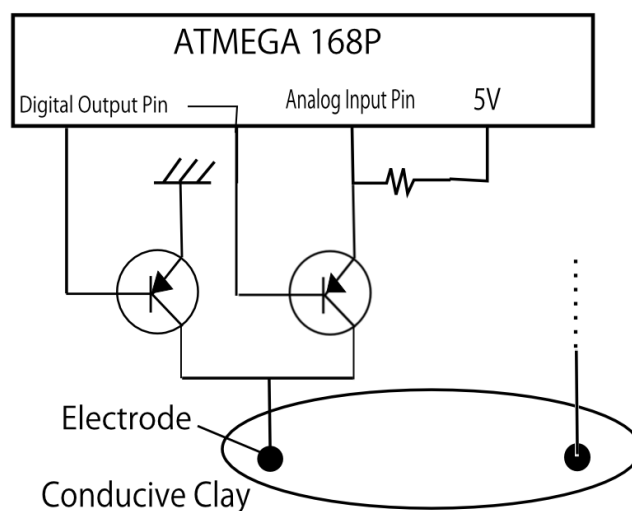


図 3.14: 粘土板型デバイス基板回路図

粘土同士の接続や伸び方による色の変化量は，粘土板型デバイス内マイコン内のソフトウェアにて算出される．デバイス内の分圧回路，スイッチング回路により任意の2点の電極間の抵抗値より得られた距離を元に，配色の制御を行う．

粘土内の2極間の抵抗値 $R(\Omega)$ は式 (1) で示される [54]．粘土の電気抵抗率を $\rho(\Omega \text{ cm})$ ，2 極間の距離を $L(\text{cm})$ ，電極の表面積を $A(\text{cm}^2)$ をそれぞれ表す．

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

本研究では，常に粘土内に配置されるような小型の電極を用いることで電極の表面積が一定となり，電極間の距離の変化のみを計測することができる．

また本研究で使用する小麦粘土を用いて，電極間の抵抗値と長さの関係を実験によって明らかにした．実験では本システムで使用したモジュール内電極とマイコンを用い，シリアル通信によりコンピュータに抵抗値を送信し計測した．電極間の粘土の太さは約 3cm と一定にし，長さを変更し計測した．図 3.15 に 1 試行の実験結果のグラフを示す．この試行では粘土の長さ 1cm～21cm

に対して約 250～500 Ω の変化が確認できた。

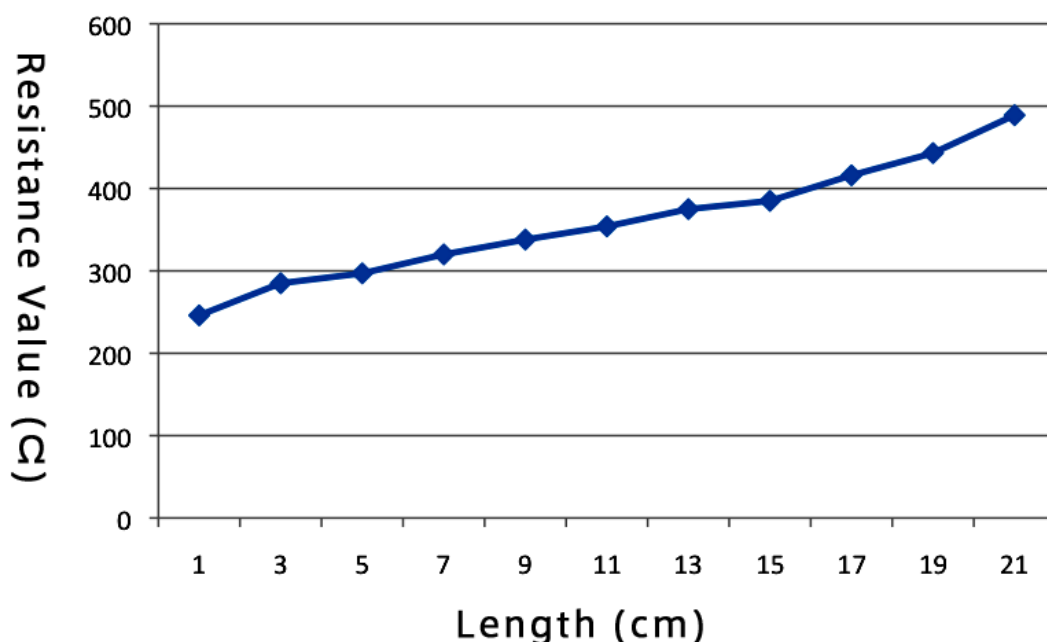


図 3.15: 電極間の長さと抵抗値の関係

NeonDough では抵抗値の変化によって色の制御を行う。予め各粘土に対していずれかの原色（赤／青／緑）が割り当てられている。粘土同士を接触させることで任意の2つの電極間の抵抗値が計測される。接触時、割り当てられた色が接触した粘土の色と違う場合、それぞれの粘土に2色の中間色を混色として割り当てる。この混色の割り当ては加法混色に基づいて決まる。また単なる中間色ではなく、電極間の距離に応じて変化する抵抗値から、混色の混ざり具合を制御できる。電極間の距離が近いと接続した粘土の色が多く混合され、距離が離れている場合、元の原色に戻る（図 3.16）。

予め割り当てられた色はパレット機能を用いることで変更可能である。図 3.17 のようにパレットを模した粘土板型デバイス上に5色（赤／紫／青／緑／黄）のスイッチを配置している。粘土を色のスイッチに触れることで瞬時に対応した色を割り当てることができる。粘土の接触による色の変更が難しい子どもでも直感的に色の変更でき、また造形後に色の変更を行うことができる。また、さらなる表現を拡張するための機能としてロック機能と明滅機能を用いる。ロック機能は生成した色を保持する機能である。図 3.18 のように通常は分離すると元の原色に戻るが、ロック機能を適応すると混色や中間色で保持される。明滅機能は LED の点灯と消灯を交互に切り替える機能である。

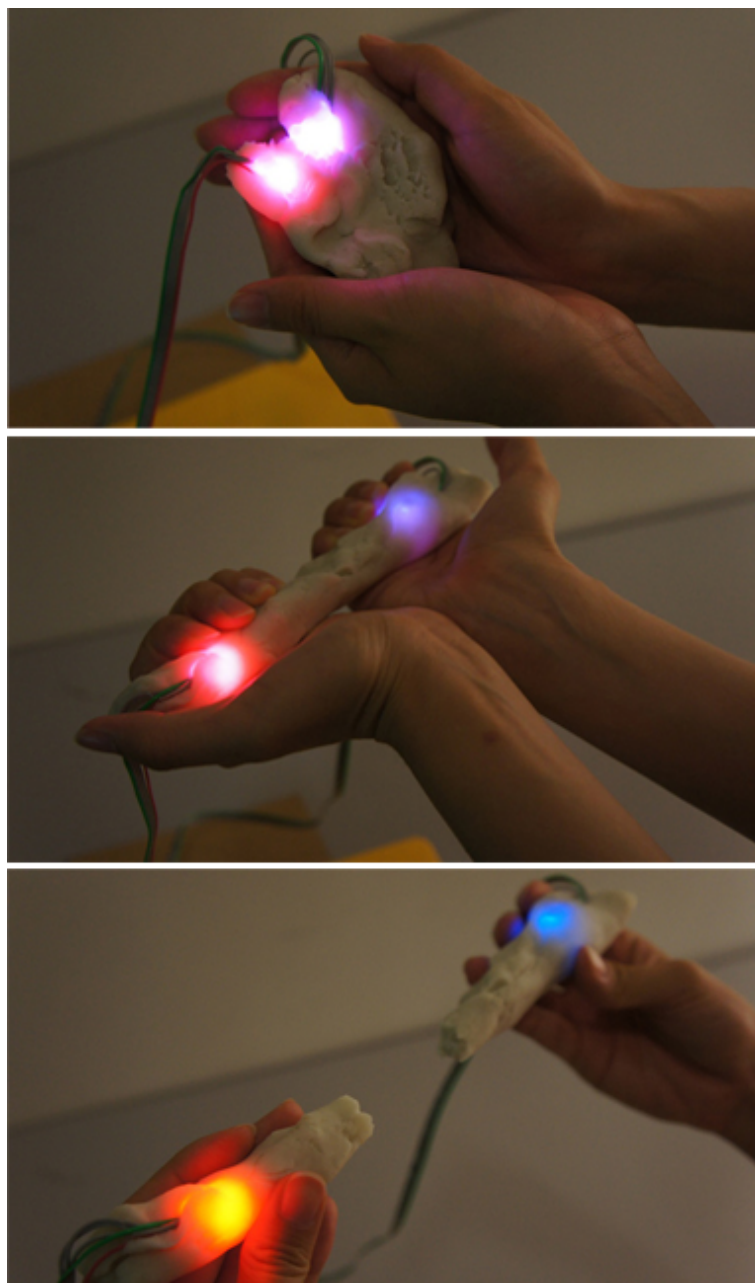


図 3.16: 粘土を伸ばした際の発光の変化



図 3.17: パレット機能

3.4 ユーザ評価

上述のような設計で NeonDough システムを実際に実装し、いくつかの粘土細工を制作した。図 3.19 に、筆者らが制作した作品例を示す。これは、複数のモジュールを用いて色の混色を行い、さらに明滅機能を用いた例である。このように NeonDough は制御可能なフルカラー LED と粘土の形状を認識する技術を用いることで、通常の粘土遊びにはない色の表現が可能である。またそれら独自の発色パターンから着想を得て、表現した作品を生み出すことができる。

本システムに対する子どもを中心としたユーザの反応を確認するために、いしかわ夢未来博（2011 年 10 月 28, 29 日 石川県産業展示館）にてデモ展示、第 8 回 CANVAS ワークショップコレクション（2012 年 2 月 25, 26 日 慶應義塾大学 日吉キャンパス）にてワークショップを行った（図 3.20）。

いしかわ夢未来博での展示では、ブースにおけるデモ展示の形式を採り、子どもを中心とした来場者に対してはシステムの使い方等を簡単に説明するのみで、特に作品を作ることを促したり、体験時間の制約などを設けることもしなかった。来場者の様子として、光る粘土をくっつけ色が変わるというインタラクションに驚いたり、積極的に色を変えて楽しむ姿が多く見られ、中には図 3.21 のように具体的な造形を行われるケースもあった。

体験の後にアンケートによる意見聴取を行ったところ、“NeonDough を使った粘土遊びは楽しかったですか”という問いに対し 5 段階評価（5. とても楽しかった 4. まあまあ楽しかった 3. どちらでもない 2. あまり楽しくなかった 1. 全然楽しくなかった）では回答数 17, 平均 4.7, 分散 0.34 という結果であった。また、普段の粘土遊びとの差を調査した所、“普段の粘土遊びと比べて楽しかったですか”という問いに対し 5 段階評価（5. とても楽しかった 4. まあまあ楽しかった 3. どちら

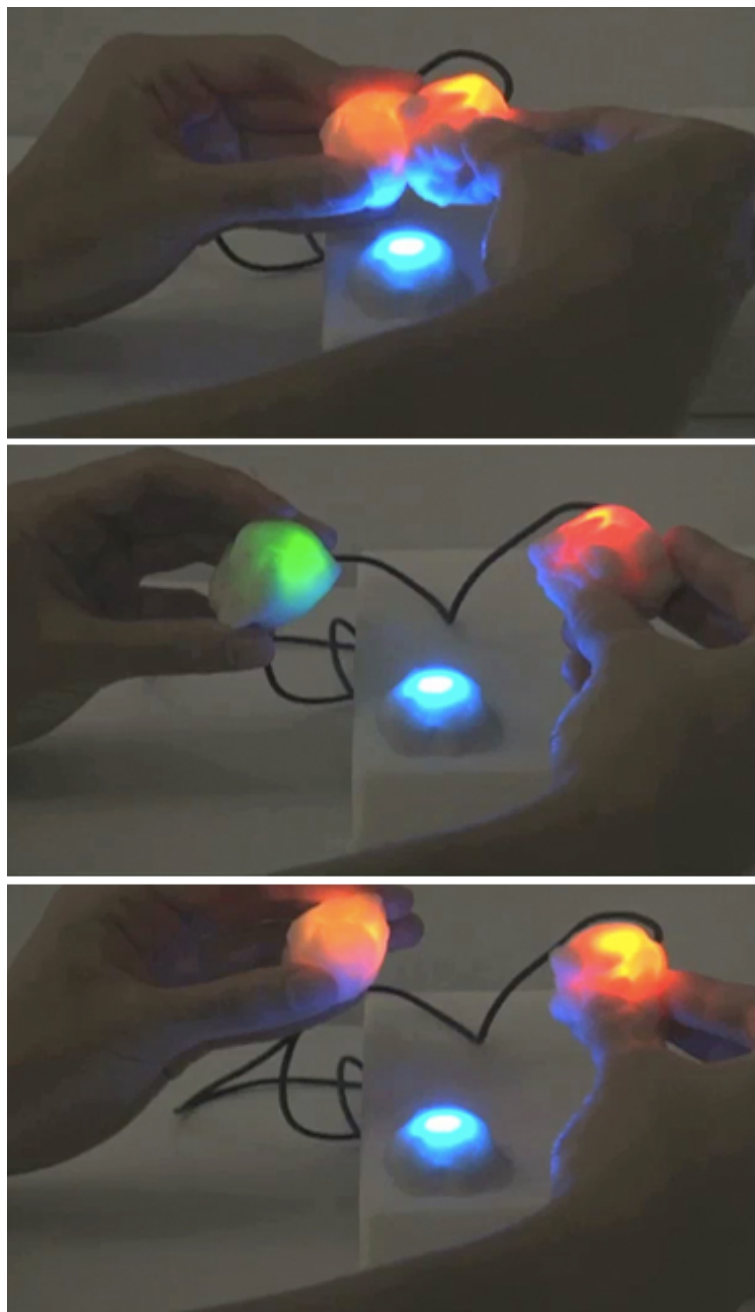


図 3.18: ロック機能



図 3.19: NeonDough による作品例



図 3.20: 体験の様子

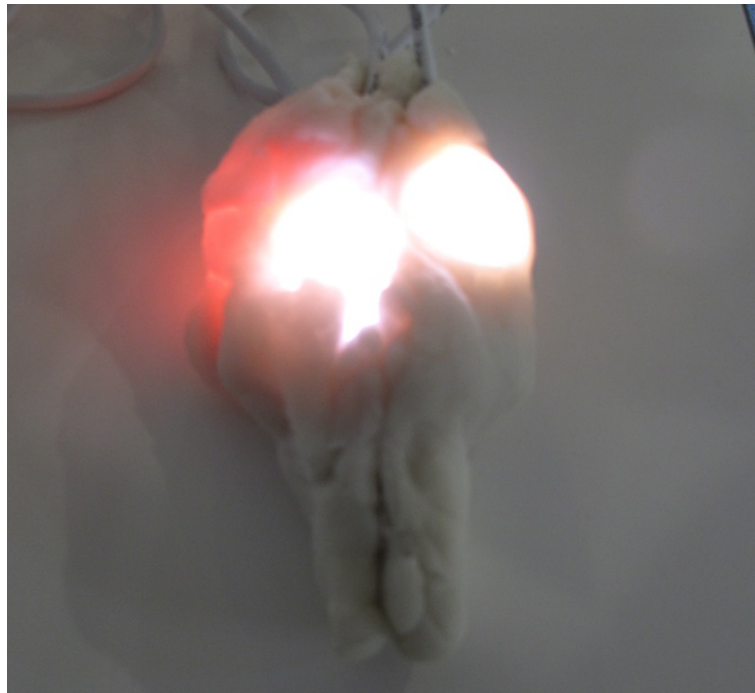


図 3.21: いしかわ夢未来博での作品例

らでもない 2. あまり楽しくなかった 1. 全然楽しくなかった) で回答数 17, 平均 4.58, 分散 0.38 という結果であった。

また、システムに対する自由記述欄からは、光で色の変化を表現することが普段の粘土遊びと違って面白い、光る場所を考えながら作れることが面白いなどの意見を多く得られた。また、混色を学習できるのが良いという意見も多く聞かれ、実際に粘土をくっつけて離すことで色が混ざったり明滅することを楽しむ姿が見られた。

後者の CANVAS ワークショップコレクションでは、子どもの来場者に対して NeonDough を用いて造形作品を作ってもらうことを主眼とし、制作のためのテーブルと座席を用意し、その過程を観察した。一人当たりの体験時間は全体で 10 分とし、1 分でデバイスの説明、8 分で粘土造形、1 分で完成／作品の写真撮影という流れで行った。実際の粘土制作を考えると、より長い時間の制作が必要とされる場合もあるが、来場者数と、ある程度の試行錯誤が可能な時間を考慮してタイムスケジュールを設定した。また、今回はルールを簡単化するためにロック機能や明滅機能は用いずに制作を行った。

事前に体験者には、粘土同士をくっつけることで色を混ぜることができること、パレット型デバイスの上に置くことで、その中の好きな色を選べることなど、システムの使い方の教示を行った。体験者は約 350 人で年齢層は未就学児から小学生まで様々であり、多くの作品が完成した(図 3.22)。以下、その中の数名の NeonDough 造形プロセスから、色と形が相互に影響を与えていたことが示唆される場面の例を挙げる。



図 3.22: ワークショップコレクションでの作品例

色を決めてから形を決める

まず、造形中の粘土の接触による色の変化によって形を変更した例を、体験者2人の作品を通して述べる。前者は小学校低学年の女子で、混色のみのデバイスを用いて、さくらんぼを制作した（図 3.23）。はじめ、彼女は具体的な造形物を決める前に、3分ほど粘土同士の接触を繰り返していたが、途中で青と赤の2つの粘土の塊の間を、細い棒状の粘土で接続し全体をオレンジ色にした。この見た目から発想を得て、2つの塊を実、細い棒状の粘土を枝と見立てることで、さくらんぼを造形し始めた。枝の細かい造形を行った後、さらに緑色の粘土を接触し、全体の色を明るいオレンジ色に変化させ調整を行い始めた。数回、オレンジ色と明るいオレンジ色のどちらが適切かを見比べ、最終的に青と赤の混色のオレンジ色に変更し完成した。図 3.24 は彼女の造形の詳細な過程である。彼女は粘土同士の接触時に変化した色とその形から発想し、具体的に制作するものを決めたと推測される。また造形中に、全体の色を確認するため、数回調整のための混色を行っていたのは特徴的な行動である。

後者は、小学校低学年の男子で、混色のみのデバイスを用いて、ロボットを制作した。開始後、彼はモジュールの入っていない粘土でロボットを造形していた。大まかな形ができた後、造形した人形にモジュールを埋め込むことで着色を行った。具体的には緑に光るモジュールを入れることで、体の中心が緑色のロボットを制作した。その後、彼は別の赤色に光る粘土からなる頭のパーツを作り、接触させることで、色がオレンジ色に変化させた。彼は、これを“合体”と呼び、数回の接触／非接触を繰り返しながら、最終的に粘土同士を接着し合体したロボットを完成させた。このように、NeonDough の特徴を理解し、各パーツの形と色を作ってから、混ぜ合わせる過程を楽しむ光景は他の体験者にも多く見られた。

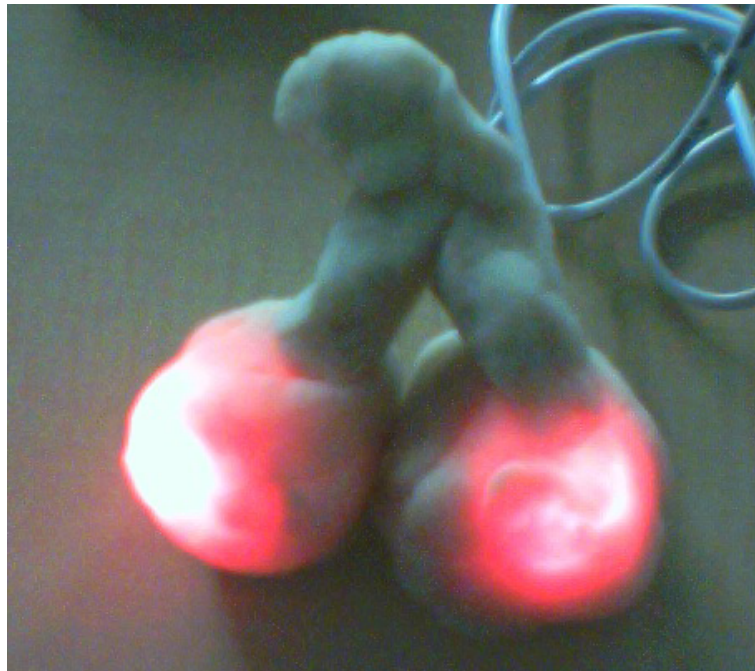


図 3.23: 作品例：さくらんぼ

形を決めてから色を決める

次に、パレット型デバイスを用いた際に多く見られた、ある程度造形した後で色を変更する作例を、体験者2人の作品を通して述べる。

前者は小学校低学年の男子で、パレット型デバイスを用いて光る人形を制作した(図3.25)。彼は光るモジュールを内蔵した粘土の塊から、人形を造形した。その後、パレット型デバイスの各色のスイッチに赤・黄・緑・青・紫の順に順番に接触させて実際に人形の色を変えることで、どの色が造形物に適しているかを試行した。最終的に彼は青色を選択し完成とした。

後者は小学校低学年の男児で、パレット型デバイスを用いてカエルを制作した。彼ははじめの3分程、制作したい具体的な造形物が決まらず、手に持った粘土の色を変更したりしていた。作りたい形が決まらない彼に対し、我々は「(造形物の色は)何色がいい。」と問いかけたが、彼は「(色は)後で決めればいい。」と返答した。結局、彼は最初に選択した緑色を用いてカエルを造形し、最終的に色の変更は行わなかったが、制作途中での色の変更自由度を理解したことで、形の決定を優先するという姿勢が窺われた。

また、ここでは、はじめに作るものを決めていたため、色の動的な変化により思い通りの造形が行えなかった作例を述べる。小学校低学年の男子は、混色のみのデバイスを用いて握り寿司を造形した(図3.26)。彼は赤／青／緑の原色で光る粘土を用いて、3色の握り寿司を造形し、さらに粘土で皿を作り、その上に並べようとした。しかし皿に3つの寿司を並べた際、全ての寿司

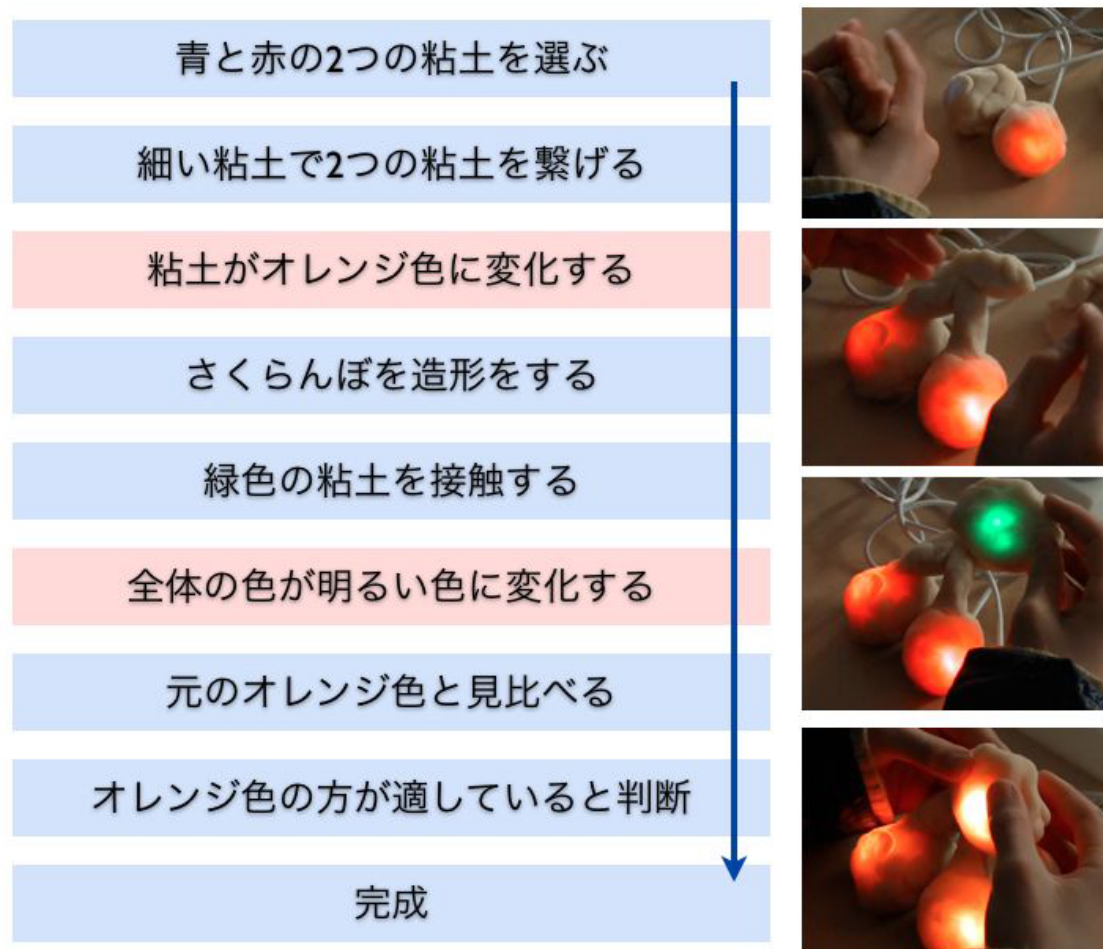


図 3.24: 造形の流れ

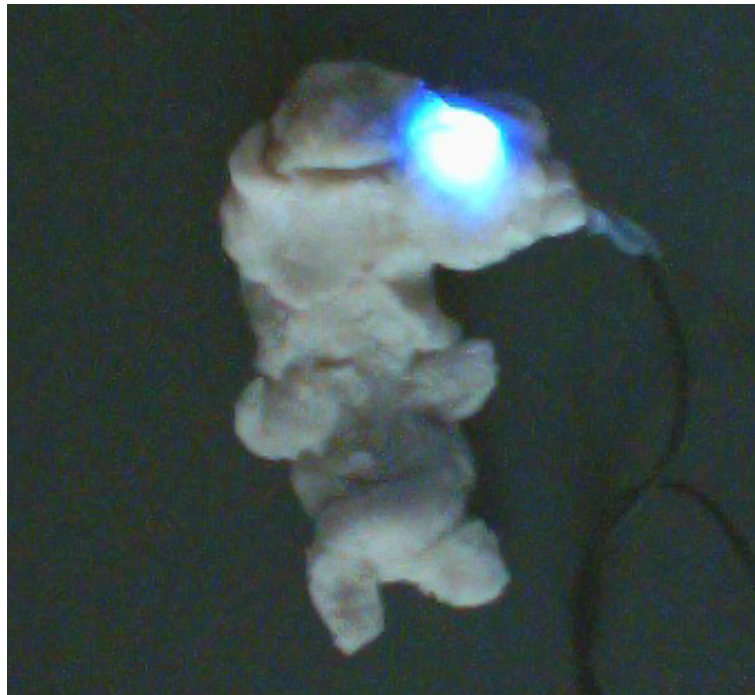


図 3.25: 光る人形

が粘土の皿を介して通電し同じ色に変更された。彼は元の色に戻すため、数回皿から外す動作を行ったが、最終的には寿司を皿に載せた状態の同色で完成とした。図 3.27 は彼の造形の詳細な過程である。

形状変化による色の変更ははじめの方では表現の動機付けとして効果的であるが、最終的な仕上げの段階では色と形を独立してコントロールできないことが逆に不都合を生じさせる場合もある。今回のワークショップではルールを簡単化するために、色を固定するロック機能を用いなかったが、このような機能を直感的に扱えるようにすることが今後の課題である。

考察

これらの子どもたちの作品を通して、色の変化から発想を得て形を変化させる様子や、形から最適な色を選択する様子が多く見られた。これらは色から形、形から色の一方的な影響の付与ではなく、例えばさくらんぼを造形していた子どもの例のように、造形の過程で何度も形と色の変更が行われる様子が見てとれた。造形物に対してどの色が最適かということや、変更された色に対してどのような形が最適かなど、色／形の関係性を交互に考えることにより、新たな気づきが生まれ、今回示したような多くの特徴的な作品につながったと推測される。

また、NeonDough では粘土同士を接続した際、加法混色によって色変更される。しかし今回行ったワークショップなどでは、その法則を理解していない体験者も、粘土同士やパレット上での接触を繰り返すことで目当ての色を決定していく様子が見られた。またその過程で、色が混ざ

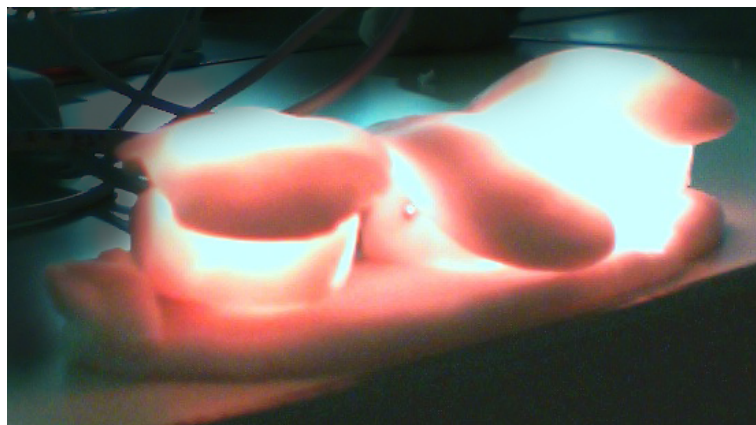


図 3.26: 作品例：にぎり寿司

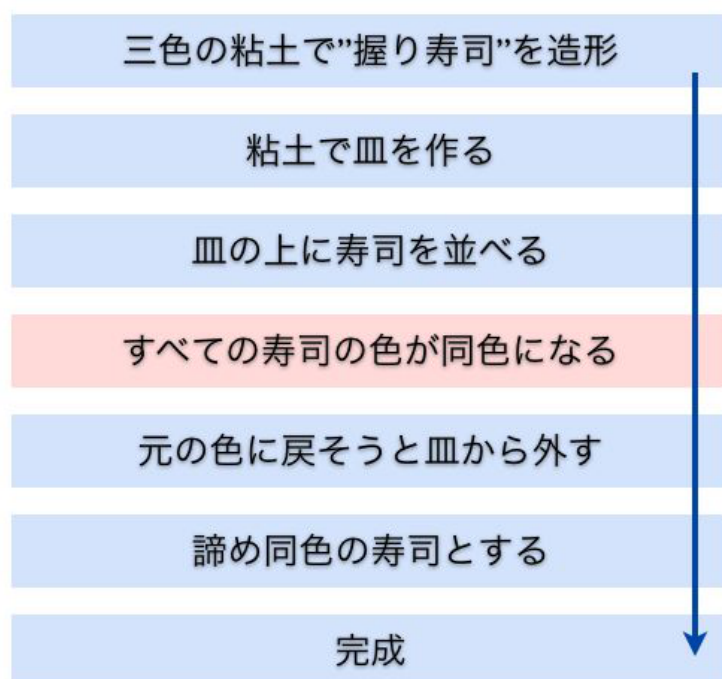


図 3.27: 造形の流れ

る法則に関して興味を示す意見も聞かれた。一方、粘土同士の距離によって混色の度合いをコントロールできる機能に関しては、展示における大人の来場者の中には、粘土を長く伸ばして色を変化させるなどの様子が見られたが、ワークショップに参加した子どもの制作の中では、意図的に電極の距離を調整して、混色度合いを変化させる様子はほとんど見られなかった。今回は、体験時間が短かったこともあり、その効果は明らかではないが、今後 NeonDough を混色に関する教育ツールとして応用していくことも考えられる。

また、最終的な調整で期待しない色の変化があった場合、造形の妨げになる例も確認された。創作の発想段階と、仕上げ段階を切り分けて、操作方法を検討する必要性も明らかになった。

3.5 本章のまとめ

本章では、モジュールを導電性粘土に埋め込んだ、光る粘土細工 NeonDough について述べた。デモ展示やワークショップの来場者の様子から、創作の中で色を動的に変化させることで、色と形が相互に気付きを与えることが示唆された。

今後の課題として、複雑な色の操作方法の追加や改善が挙げられる。これまで実装したロック機能や明滅などの機能をより直感的に行うための方法を考えたい。今回提案した NeonDough は、粘土をくっつける／ちぎる／伸ばすという行為を電極間の抵抗値によって読み取ったが、にぎる／押す／触れるなども検出可能である。それらを統合したモジュールを用いることで、複雑な操作を直感的に実現できると考えられる。

また従来の機能の他に時間軸を取り入れた機能を検討している。ある色からある色へ段階的に変化するなど今まで以上に動的な色の制御を行えたり、また複数の粘土の色を消灯／点灯を交互に切り替えることによって、残像効果を利用したアニメーション表現ができるのではないかと考えられる。

今回用いた粘土の形状を認識するセンシング技術や発光パターン生成などを利用し、今後はコンピュータグラフィックスにおけるキャラクタ操作などの他のアプリケーションへの応用を検討している。

第4章

切り絵の発想を促すハサミ型ツール enchanted scissors

4.1 enchanted scissors の背景

“切る”という行為は、創作活動において重要な動作である。主に素材などを切る際には、ハサミやカッターなどの道具を用いて切断する。子供の創作活動においては、ハサミを用いて紙や糸などの素材を切り、パーツを作り、それぞれを接合するような工作や、切り絵などの切ることによって具体的な形状を切り出す創作活動がある。

初心者は、通常ハサミを用いて切り絵を行う際に、切りすぎてしまったり、細かい部分を切ることが難しい場合がある。また切る際に何を切ったらよいか分からないという場合もある。

そのため切り方の教示や切る際の発想のきっかけを、通常ハサミを使った切る行為の中で促すことで、このような問題を解決したい。

そこでハサミの開閉をコンピュータを用いて制御することで、触覚的に切り方を教示しながら、切ることを補助するハサミ型デバイス enchanted scissors を提案する (図 4.1)。

本デバイスは、ハサミの刃の持つ導電性に着目して、ハサミの刃が導電性塗料で描画された線に触れることで、ハサミの開閉を制御する。ハサミの持ち手には、刃の開閉を制御するモータが内蔵されており、刃先が導電性のインクや鉛筆で描かれた線に触れると刃先が開閉し、線の上を切れたり、避けながら切ることができる。また切ることの出来る範囲を触覚的に提示することで、切るときの発想を促す。

また制限された範囲内を切るという行為は、新しい創作手法に繋がることが期待される。例えば予め描画された枠内の中で、ユーザが自由にアレンジを加えながら切ることで、手作業と機械の補助を組み合わせた切り絵を行うことができる。

また中の手紙を傷つけずに封筒を切ることや、雑誌の写真を切り抜くなど日常的なハサミを使用した切る行為を補助する応用が考えられる。本研究で用いるハサミは通常使用するものであるため、ユーザは直感的に使用方法を理解することができ、日常での切る行為の中で必要な時に機械による補助を切り替えることができる。

本章では、このような通常ハサミを用いて切る行為を補助するハサミ型ツール enchanted scissors のシステム設計・実装、システムおよびユーザ体験の評価、まとめと今後の展望について述べる。

4.2 関連研究

これまでも切る行為をコンピュータにより拡張・補助する研究が行われてきた。

例えば2章で挙げた Position-correcting tools for 2d digital fabrication [46] は電動ノコギリを、Interactive Construction [42] ではレーザーカッターを用いて、素材を切断する際の精度を上げている。このような電氣的に制御し、正確に図形を切断できる工作機械を用いたツールは大型であったり、ユーザの細かい操作が反映されないことがある。

また COMP*PASS [23] は、図形を描画することを目的としているが、鉛筆の代わりに向きが回転するカッターを装着することで、紙を切ることができる。



図 4.1: enchanted scissors

これらは特殊なデバイスを機械的に制御することで、ユーザの入力を補正しながら切断するシステムである。一方で本研究で提案する enchanted scissors は、通常のハサミを用いた日常的な切る行為の中で、見えない形で機械が切り方を補助する。

また同様にハサミの形状を活かして、触覚提示技術などを用いてユーザの切る行為を支援するインタフェース研究が行われている。

haptic scissors[65] (図 4.2) は外科手術のシミュレーションを行うためのハサミ型触覚提示装置である。ハサミの回転角度と移動座標をセンサが検出し、刃の先につけたモータが動作し擬似的な切る触感を提示する。また画面上には仮想の人体繊維モデルが描画されており、ハサミの動きに対応してバーチャルなモデルを切断することができる。外科手術など練習を繰り返し練習できるため、ユーザのスキル向上に繋がる。

また遠藤らの研究 [80] (図 4.3) では、複数の関節を持つロボットハンドの指先に、ハサミなどを装着することで、ユーザに触覚提示を行う方法を提案している。このようなロボットハンドを利用した触覚提示は、ユーザは普段用いる道具をそのまま使用することができ、またハサミ以外のツールを簡単に付け替えながら使用することが可能である。

木村らはナイフやピンセット型の触覚提示デバイスを開発している [81] (図 4.4)。デバイス内部に位置を検出する磁気センサ、小型スピーカー、触覚提示のための振動モータやドラムブレーキが内蔵されており、画面上の仮想物体に触れることでユーザに触覚を提示する。また先端部を

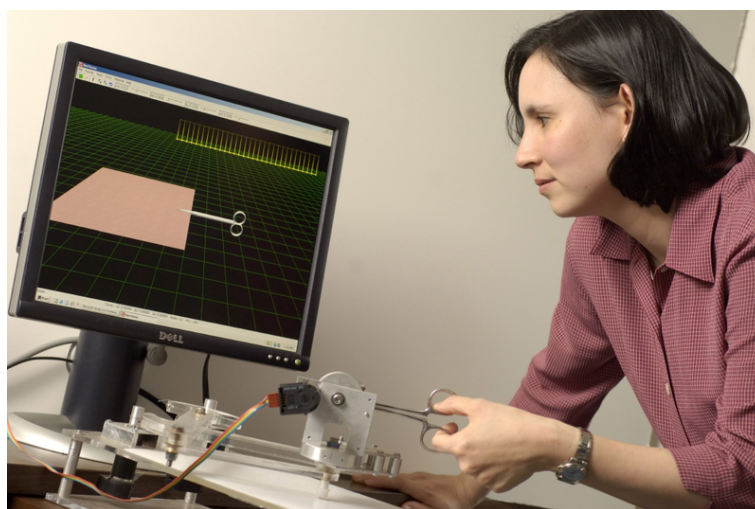


図 4.2: haptic scissors

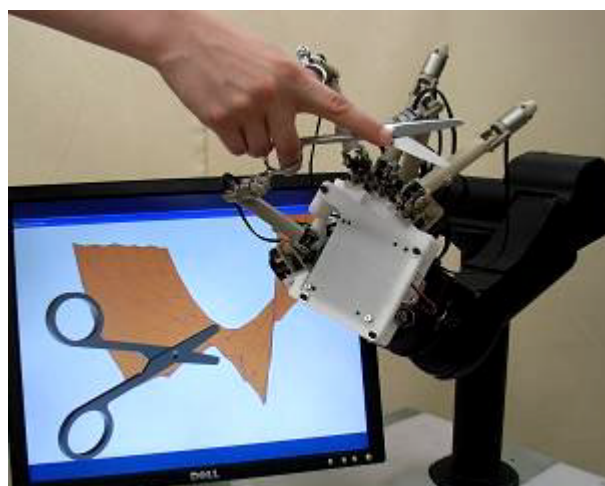


図 4.3: Development of Tool-Type Devices for a Multifingered Haptic Interface Robot

着脱し交換することで、様々な機能を切り替えることができる。



図 4.4: 空間型作業での選択・移動操作に適した道具型デバイス

Air-Hair[66] (図 4.5) は、美容師が髪を切る練習を仮想的に行うことができるシミュレーションシステムである。ユーザはマネキンの頭部の周囲でハサミデバイスを使って切る動作を行うことで、画面上のバーチャル人体モデルの髪を切ることができる。さらにリアリティのある触感を提示するため、ハサミ型装置の回転部に内蔵したモータの負荷を調整することで、髪を実際に切った様な触感をユーザに提示することができる。通常、美容師の初心者が髪を切る場合は、何度も行ふことは難しく、怪我などの事故を伴うことがあるが、Air-Hair を用いることで安全に髪を切る練習を何度も行ふことができる。

これらはハサミ型デバイスを用いてユーザの切る行為を支援しているものの、装置自体は通常のハサミではないため直接物理的な物体を切るはできない。enchanted scissors は通常のハサミにコンピュータを内蔵することで、日常的な切る行為の中で機械が補助を行うことを目的としている。ユーザは通常のハサミと同様の使い方で、機械による補助を伴う切り絵ができるため、創作活動における新しい切り方に繋がることや初心者の細部を切り過ぎるなどの問題点を解決することができる。

4.3 システム設計

enchanted scissors はハサミの開閉をコンピュータを用いて制御することで、ユーザの切る行為を補助するハサミ型デバイスである。本デバイスは、通常のハサミを用いているため、ユーザは使用方法を直感的に理解しながら、通常の切る行為の中で機械の補助を受けながら切ることができる。

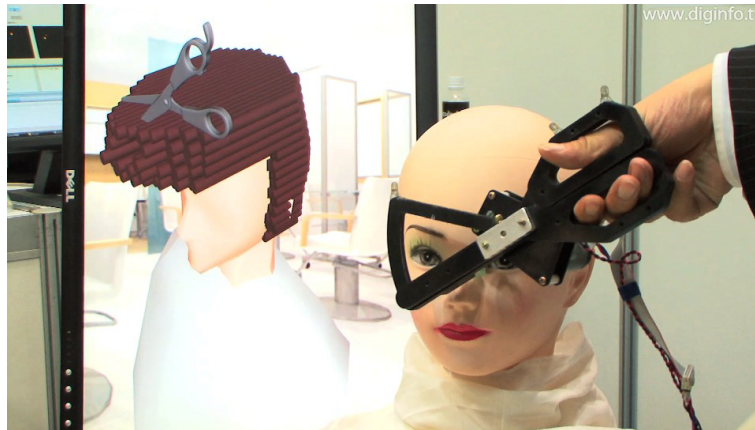


図 4.5: Air-Hair

ユーザは予め導電性インクで描画された紙を持ち、線の上にハサミを重ねた時のみハサミの刃を閉じることができるため、描画線のみを切ることができる。これによって決められた枠の中でアレンジを加えながら切ることができるため、切るときの発想のきっかけに繋がることが期待される。またプログラムを変更することで描画線を避けるように切ることも可能である。これは紙を切るスキルの向上に繋がる。

4.3.1 ハードウェア設計

本研究では、ハサミの金属製刃先の持つ導電性に着目した。通常のハサミの刃は、ステンレス製などであることが多く、特性として導電性を持つ。また紙に書かれる描画線は導電性インクを用いた。そのため、デバイスの刃先が導電性インクで書かれた線に接触すると、刃先が開閉し、ユーザは適切に線を切ることができる。

本デバイスは、通常のハサミ、開閉制御用サーボモータ、マイクロコンピュータ (Arduino) で構成される (図 4.6)。ハサミの刃先が紙に描画された導電性インクに接触すると、コンピュータが刃先とクリップの間の通電を検出する。通電の検出後、ハサミに内蔵されたサーボモータがストッパーの開閉を行い、刃の開閉を制御する。本デバイスで使用したサーボモータは GWS サーボ S11H/2BBMG/JR タイプであり、トルクが 4.8V 時 6.4kg であるため、ユーザが強く握った際にも持ち手を開いた状態に保つことができる。

本システムでは、クリップと刃先の間の導電性インクの抵抗値の変化をセンシングし、刃先と描画線の通電を検知している。マイクロコンピュータ (ATmega328P) に接続されたクリップを、導電性インクの線に繋げ、刃先が線に接触することで閉回路となり通電を検出する。刃が線に接触した際、マイクロコンピュータが電極間の抵抗値を検出し、デバイスに内蔵されたサーボモータを 90 度回転させストッパーを出し、持ち手の開閉を制御する。

また本システムにて用いる導電性インクは、墨や柔らかい鉛筆、導電性インクなど導電性のある筆記用具で描かれる。鉛筆の抵抗値は柔らかさに応じて変化する。175mm の長さとした場合、

2B の鉛筆は抵抗値が約 $6\ \Omega$ ，HB は約 $19\ \Omega$ ，H は $25\ \Omega$ である [82]．本デバイスではより通電を検出しやすいように 2B 以上の柔らかさの鉛筆を使用する．また導電性インクとしては Bare Paint (Bare Conductive) を使用する．Bare Paint の抵抗値は，塗った面積が $20\text{mm}\times 15\text{mm}$ で抵抗値が $46\ \Omega$ ， $70\text{mm}\times 3\text{mm}$ で $431\ \Omega$ ，また $130\text{mm}\times 3\text{mm}$ で $560\ \Omega$ である．線が細く長くなると抵抗値は高くなる．使うインクに応じて抵抗値が変化するため，使用前に反応するしきい値を設定する必要がある．

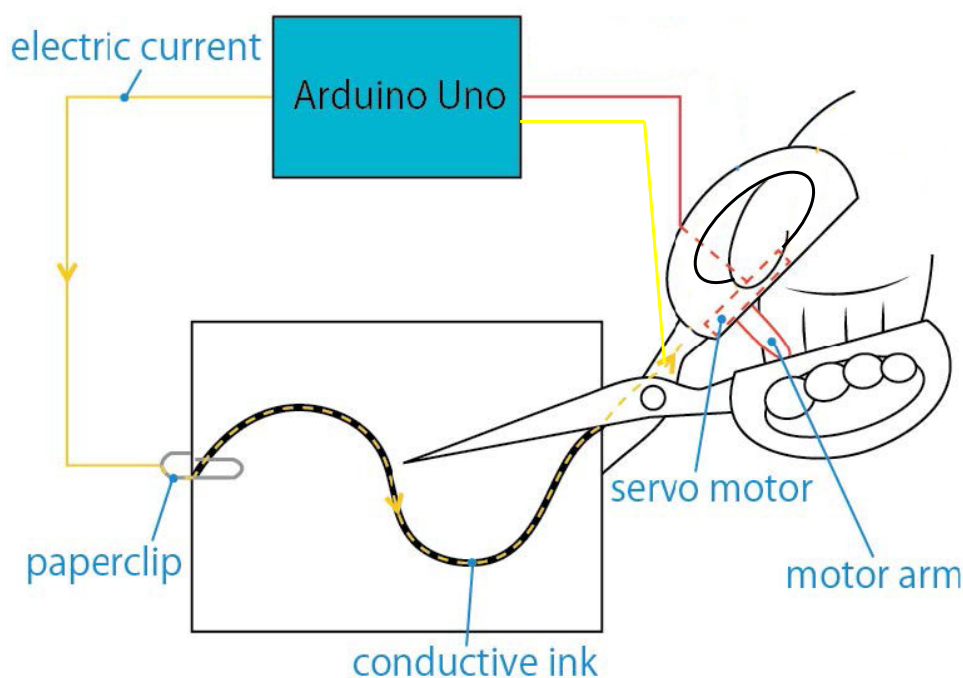


図 4.6: システム図

静電容量によるセンシング方法

刃先と描画線の通電の検出方法として，抵抗値方式の他に静電容量方式を用いたセンシング方法も考えられる．この場合は図 4.7 のように，持ち手には導電性テープが付けられ，テープと刃を接続する．刃が描画線に接触した際，電流は紙の表面からユーザが持っている持ち手へ流れる．ユーザは間接的に導電線をデバイスを通して線に触れる状態となり，タッチセンサと同様の原理により，静電容量の変化を検知して刃先と描画線の接触をセンシングする．静電容量の変化によるセンシングは，少ない電流でも検出可能であるという特徴がある．また後述するケーブルが不要となる単線通信方式の場合には，閉回路が必須である抵抗値方式ではなく静電容量方式を使用する必要がある．一方で，環境・人体の違いにより静電容量値の変化を考慮し，モータを動作させる静電容量値のしきい値を使用する都度キャリブレーションする必要がある．また人体が描画線に

直接触れた際にも、反応するという問題もある。

最適な接触を検知する静電容量値のしきい値を設定するために、鉛筆の濃さと静電容量の値の関係について計測した。実験では1MΩの抵抗をマイクロコントローラの5Vに接続しA/Dコンバータにより計測した。500msごとに値を計測し、5秒間の計測結果を平均して値を算出した。クリップが描画線に接触していない状態では、静電容量値は22(アナログ・デジタル変換値, 0~5Vを1024段階で表示)であった。図4.8は結果を表している。濃さがFの時は約25を示し、10Bの時は125を示した。この検出結果を参考に、鉛筆の濃さを変えるときは反応するしきい値を設定する必要がある。

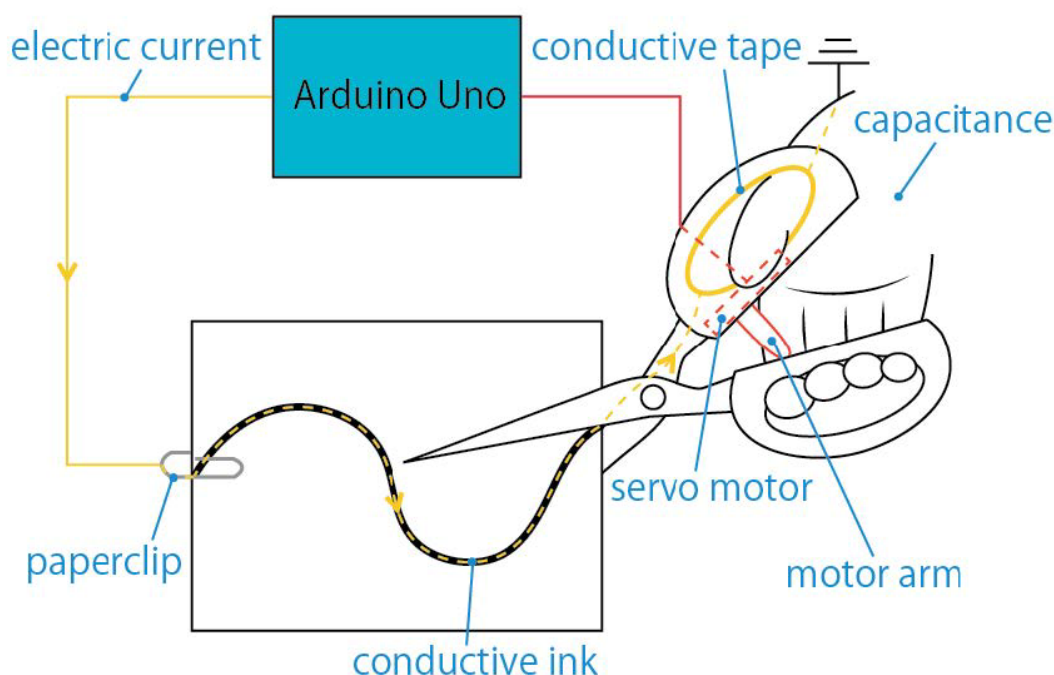


図 4.7: システム図（静電容量方式）

単線通信技術を用いた無線化

抵抗値検出方式、静電容量値検出方式は両者ともにハサミとクリップをマイクロコンピュータを介して接続する必要があった。これは抵抗値検出方式の場合は、ハサミの刃とマイクロコンピュータ、クリップ、導電性インクが一つの回路として成り立った時に接触を検出できるためである。また静電容量検出方式では、ハサミの開閉制御のモータとセンシング用のマイクロコンピュータを接続する必要がある。このようなケーブルの存在は、ユーザの自由な創作活動を妨げる要因になりうる。

Table 1: Capacitance Detection Level by Arduino with Different Lead Densities

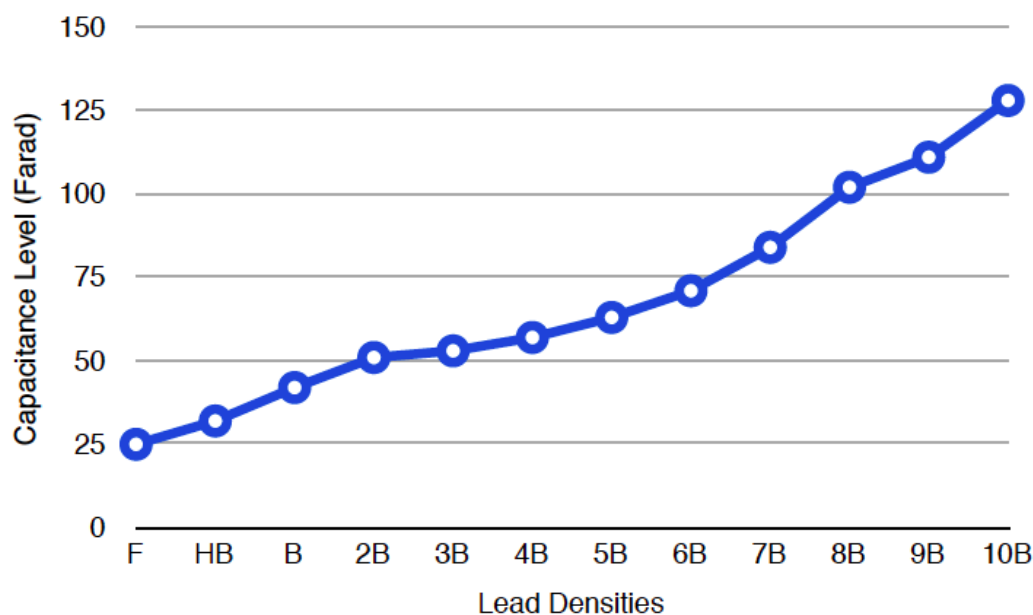


図 4.8: 鉛筆の濃さと静電容量値の関係

そこでクリップとハサミの刃の間のみで通信可能な単線通信方式を開発し、ハサミ型デバイスの無線化を行った。具体的には、図 4.9 のようにクリップ側にアース接続されたマイクロコンピュータと送信機、ハサミ型デバイス側にはマイクロコンピュータと受信機が内蔵されている。ハサミを持った際、ユーザの人体を介してアースが共有され、かつ送信機と受信機の上に導電性インクが存在する場合、接触を検出することができる。送信機では、マイクロコンピュータから 136KHz の矩形波をローパスフィルタを用いて、正弦波にし単線を介して受信機に送信する。単線上では、直流の信号を送ることができないため、交流信号にすることで通信可能にしている。これは Amplitude Keying と呼ばれる通信技術である。受信機側では、バンドパスフィルタを用いて信号を増幅し、送信機から信号が送られてきた際に、導電性インクを介して接触したことを検知している。また信号は 136KHz の周波数で、モールス信号のようにタイミングを変えることで情報を送信することも可能である。送信する信号を切り替えることができるため、例えば線の種類に応じて信号を変え、デバイスの切り易さを変えるなどの応用が考えられる。これによってクリップとデバイス間のケーブルが不要となり、操作時の煩わしさが軽減される。

4.3.2 ソフトウェア設計

今回の実装では 2 つのモードを設定した。一つは、描画線の外側を切る機能であり、ユーザは線の隣あるいは内側のみ切ることができる。刃先が線に触れた場合、サーボモータが取り付けら

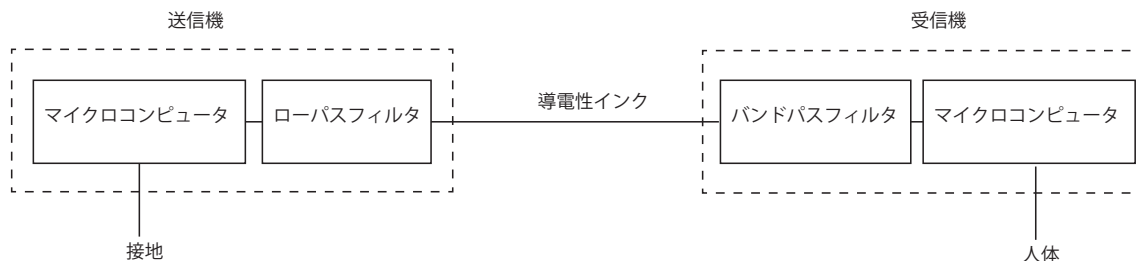


図 4.9: 単線通信の回路図

れたストッパーが作動し、持ち手を閉じることができなくなる。クリップを付けるため、導電性インクで描画された描画物は紙の端にある必要がある（図 4.10a）。

二つ目のプログラムは、導電性インクで描かれた線の上のみ切ることのできる機能である。線に刃先が触れた際、ストッパーは元の位置に戻り、ユーザはハサミを閉じることができる。他のプログラムと同様に、描画物はクリップに接するため紙の端にある必要がある。加えて、ユーザが切り始める際に描画線に触れなければならないため、描画物の一部は紙の端に接している必要がある（図 4.10b）。

両方のプログラムは、コンピュータがクリップと刃先間の描画線の抵抗値および静電容量値を検出し、予め設定されたしきい値を超えた場合にストッパーの角度を通常の 0 度から刃が閉じない状態にする 90 度に設定するか、あるいは刃が閉じない状態である 90 度から開閉が自由になる 0 度に制御する。この機能の切り替えはアプリケーションにより異なるため、ユーザはスイッチなどを用いて切り替えることができる。

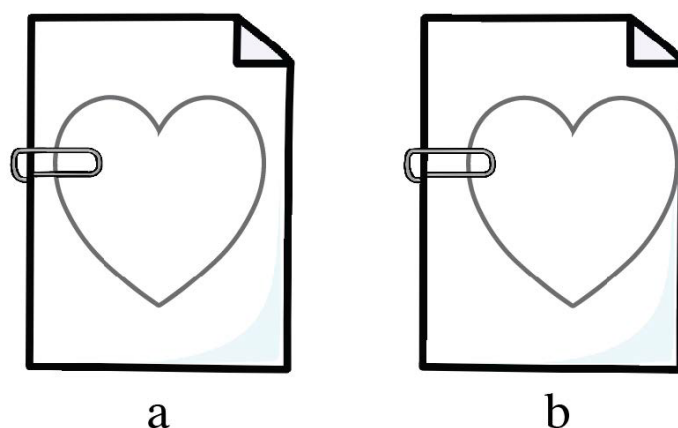


図 4.10: 描画物の位置

4.3.3 応用例

enchanted scissors を用いて、日常的なハサミを使った切る行為をサポートする応用例を後述する。

切り絵などの創造支援

通常のハサミを用いた切り絵は、紙の範囲内で自由に好きな形に切り取ることができる。一方で本デバイスを用いることで、描画した線の範囲内できるという制限を持たせながら切り絵を行う。これにより複数の描画線から最適な線を選択しながら切ったり、太めの線の中でアレンジを加えながら切るなど、通常の切り絵とは異なる切り方を体験できたり、切る際のきっかけを誘発するような効果があると考えられる。

具体的には、導電性インクで描かれた線の太さを変えることで、ユーザは異なる切り方を行うことができる。例えば細く複数枝分かれしている線などは、ユーザは線を選択しながら切ることによって形を決めていく。一方で太い線や領域では、ユーザは導電性インクで描かれた領域の中で、直線やジグザグ、曲線などのアレンジを加えながら切ることができる。例えば図 4.11 のように、左にあるテンプレート（黒い導電性インクで描画された 3cm の太さの円）から、ライオンやパンダなど色々なバリエーションの切り絵が完成する。

例えば自分あるいは他の人が描画した線、あるいはドローイングソフトウェアを用いて描画した線を導電性インクで印刷した紙を用いて、決められた枠内でアレンジを加えながら切り絵を行うことができる。

ハサミを用いた切り方の練習

本デバイスを用いることで、正しい切り方を学ぶ練習を行うことができる。ハサミを用いて切る経験が少ない子供などが、触覚的な提示を頼りに切り絵をすることで、切る練習ができ切り方のスキル向上に繋がることが考えられる。具体的には予め描画された線に沿って切ることによって、曲線の切り方や細かい箇所の正しい切り方などを触覚的に理解しながら切り進めることができる。描画された線という視覚的なガイドだけではなく、切ってはいけない箇所でハサミが強制的に閉じなくなる触覚的なガイドによる教示ができる。

日常的な切る行為の補助

本来の目的である創作支援とは異なるが、本システムは日常的なハサミを用いた切る行為を補助することができる。

例えば本デバイスは目を閉じた状態でも線の上を切ることができる（図 4.12）。視覚情報が無い状態でも、正しい方向を示す触覚的なガイドを頼りに切ることができる。そのため視覚障害者

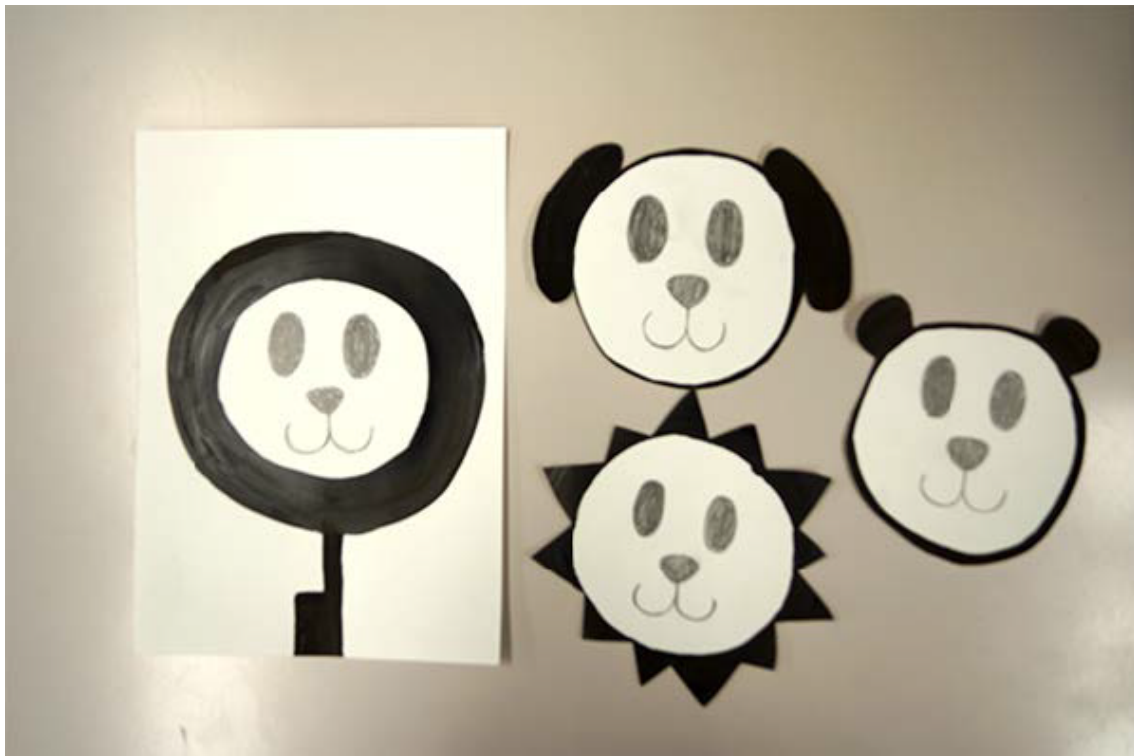


図 4.11: アレンジを加える例

が正しく触覚的なガイドを便りに、線の上を切るといった支援方法が考えられる。

また日常的な場面として、本デバイスは予め描画された領域を避けるように切ることができるため、封筒に入った手紙を傷つけずに切ることができる。これはクリップを導電性インクで塗られた内部の手紙の端に付けることで、封筒の上からハサミの刃をインク付近に近づけると、近接を検出して刃を閉じなくする。この場合は静電容量式のセンシング方法を使用し、センシングの感度を上げるために使用する抵抗を $1\text{M } \Omega$ 程度の高いものに変更する必要がある。

4.4 ユーザ評価

4.4.1 展示での体験者の様子

enchanted scissors は幾つかのイベントなどで展示を行い、体験者の本デバイスを用いた切る体験を通じて、従来の切り方と比較してどのような有用性があるのかについての議論を行った。

まず「Habilis 身体×物質×情報のシンカする関係」(ITOKI Tokyo Innovation Center SYNQA, 2013.3.15) で展示を行い、体験者の様子を観察した。展示では、新聞や雑誌、ポストカードなどを用いて、日常的な場面の中での切る行為を補助するような体験を提供した。具体的には雑誌の人物や製品の写真などの輪郭を導電性インクで予めなぞるあるいは体験者になぞってもらい、デバイスを用いて切り抜く体験をしてもらった。



図 4.12: 目を閉じた状態で切る様子

体験者の1人は、保育士であり日常的にペーパークラフトを行っていた。彼女は普段から切り慣れてはいたが、細かい場所を切る際に、本デバイスが線の外側を切りすぎるのを防ぐ様子が見られた。

またある体験者は痙攣の症状があるため、普段は上手くハサミを使えないことが多かった。しかし本デバイスを握って切ることで、少ない力で紙を切ることができていた。これはハサミの柄の状態を元に戻す際、モータの力を利用して戻っているために、通常ハサミと比較して力を入れる必要が無いためであると考えられる。彼は自分のような障害のある人に本デバイスは有用であるとコメントしていた。

また他の数人の体験者は目を閉じるか、あるいは紙を裏返しにして、視覚情報なしに切れるか試していた。慎重に試していた体験者はきちんと切れる傾向にあった一方で、少し早めに切っていた体験者は、1～5mm程度切り過ぎるなどの失敗が見られた。

またディスカバリーラボ ISHIKAWA2014(石川県産業展示館1号館, 2014.11.8-9)では、体験者に予め用意したテンプレートをアレンジを加えながら切る体験を行ってもらった。用意したテンプレートは図4.13のように、2Bの鉛筆で四角い黒枠と切り始めとクリップを付けるための細い線を描画したものである。体験者にはこの黒枠内で自由にアレンジを加えながら切り絵をしてもらった。また顔を描くことで髪型をデザインしながら切ることを促した。

体験者は、図4.14のように丸めや三角形の髪型、また体験者の知人の髪型などに紙を切っていた。体験者の多くは、黒い枠内でアレンジを加えながら切る様子が見られた。また紙を切り始める前に、刃先を線に接触させて、モータによるストッパーの開閉を繰り返しながら、切れる場所を確認する様子が見られた。

また被験者の1人は、一度紙を最後まで切り落とした後で、細かい切り込みを入れながら形の調整を行っていた。また紙を裏返しにした状態で、黒い線の通りに切れるか確かめている体験者

がいた。実際に輪郭通りに切ることができており、彼女は、描画線を外れると瞬時にストッパーが出てくるので、割りと正確に線の端を切ることができたと述べていた。

しかし体験の結果、全体的にバリエーションの少ない切り方となった。今回使用したテンプレートが変化の少なさの要因とも考えられるが、普段からハサミを使いこなしているユーザや、ものづくり自体に馴染みのある体験者に使用してもらう必要があると考えた。

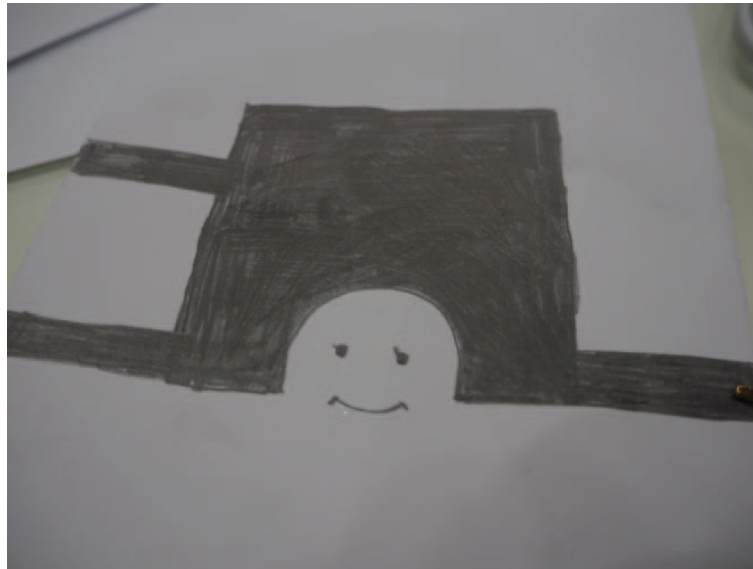


図 4.13: 使用したテンプレート

4.4.2 デバイスを用いた創作体験

本デバイスを用いた創作体験を通して、通常の切り絵と異なる創作手法や思考、コンピュータを効果的に取り入れた制作課程などを観察するために、普段からものづくりを行っているユーザに体験してもらった。

本実験では2つの実験を用意した。本実験では予め描画された絵を切るため、ドローイングソフトウェアで描画した絵と、第三者が描画した絵を用意し、双方の切り方に対する影響を調査した。

前者は導電性インクで黒い枠の模様が描画されたテンプレートを用意し、体験者はその枠内で自由にアレンジを加えながら切り絵を行う。後者は、前の被験者が描画した絵を使用し切り絵を行う。絵を切り抜いた後、導電性インクを用いて次の被験者に切り抜いてもらう絵を描画してもらった。

被験者は、普段から紙や絵の具などのアナログな素材とドローイングソフトなどのデジタルな環境を組み合わせながらものづくりを行っている20～27才の女性である。被験者数は前者が3名、後者が5名である。どちらの実験も体験後に約10分のインタビューを行った。またデバイスを用いて紙を切る際に、クリップとハサミの刃の間の導電性インクの抵抗値をコンピュータにログとして記録した。

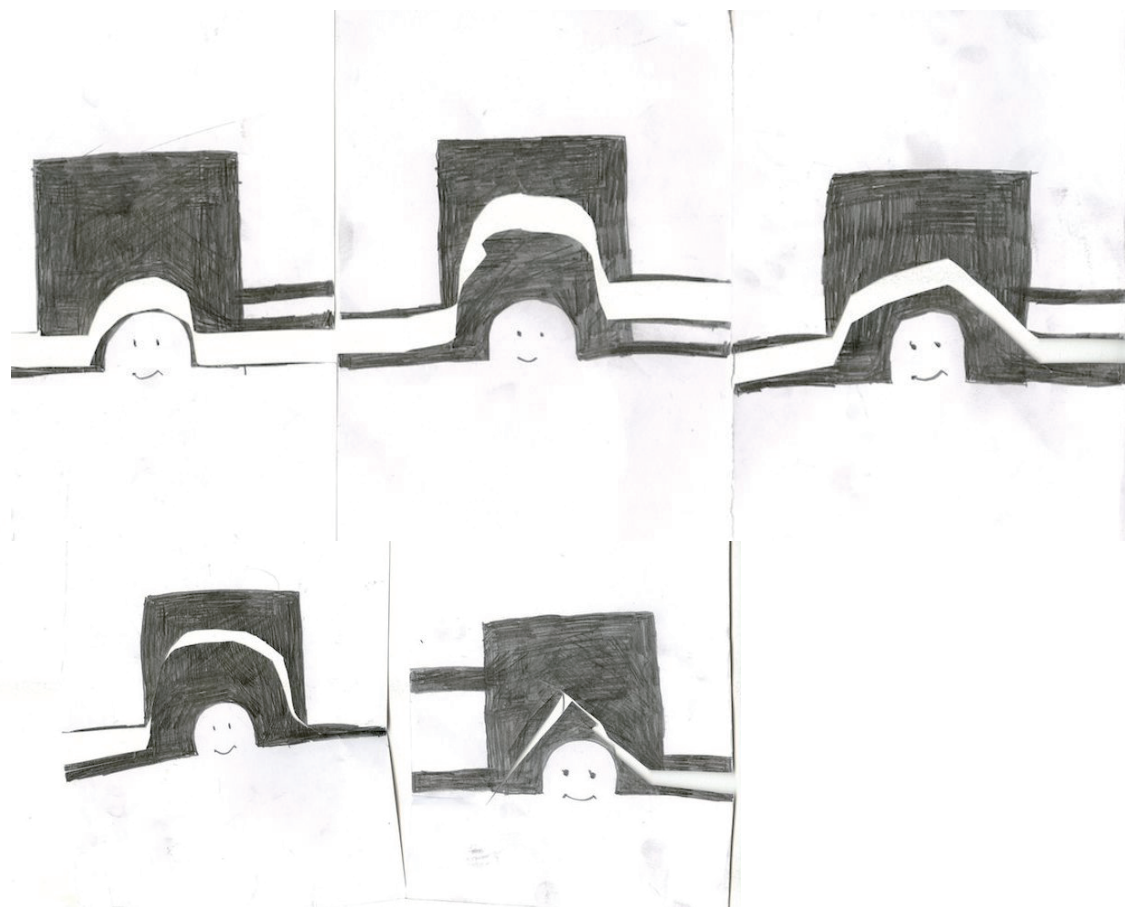


図 4.14: 体験者の切り絵

それぞれの実験の体験者の制作プロセスから本デバイスの有用性や制限について考察したい。

実験1：テンプレートをを用いた切り絵

体験者には、図 4.15 のような導電性インクで太いドーナツ型の模様が描画されたテンプレートを使用し、その枠内で自由にアレンジを加えながら動物の形に切り出してもらった。枠の直径は 100mm、線の太さは 25mm とした。また中心には動物の顔を配置した。使用した図形は予めドローイングソフトウェア (Illustrator) で描画し、プリンターで出力後、枠内を導電性インクで塗りつぶした。体験者は、クリップを描画線の端に取り付け、デバイスを用いて円を一周しながら切る間にアレンジを加えながら動物の形にしていく。

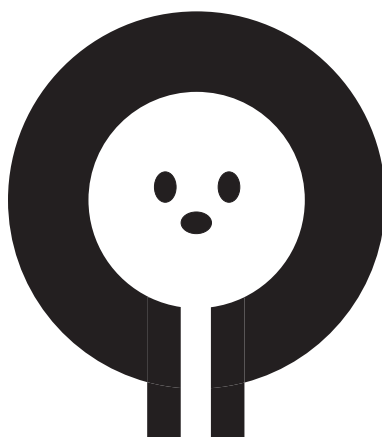


図 4.15: 実験1 で使用したテンプレート

体験の様子

被験者の1人は、図 4.16 のようなライオンの形に切り取った。まず左上からハサミを入れていき、黒い枠内にギザギザに切り取っていった。初めは開閉が制御されるなどハサミの使い方が難しい場面があったが、後半は慣れていきスムーズに切れていた。普段は白紙を切ったり描いたりするなど自由な創作を行うが、制限内でできる事を考えながら行う楽しさがあるとコメントしていた。

2人目の被験者は、図 4.17 のように外側の黒い枠と中の部分を綺麗に分けながら切っていた。枠内を自由に切るだけでは、通常のハサミで切ることと近く、機械によって切り方が制御されているので輪郭に沿って線を切ったほうが面白そうだと考えた。初めに左外側から切っていたが、中を先に繰り抜いたほうが切りやすいと考え、内側を切り抜いた後で外側をハサミの開閉制御を上手く使いながら切り進めていた。線から離すと開閉のストッパーが掛かってしまうので、若干切る際に阻害されたとコメントしていた。

3人目の被験者は、図 4.18 のように黒い枠内で花の形に切り抜いた。彼女は特に中央の顔から

連想されるというよりは、即興で思いついた形を切っていた。途中で紙を折りながらハサミを紙に入れやすくするなどの工夫をしたり、クリップの位置を切りやすい場所に変えたりしていた。またハサミの刃が境界線に来た時に、ストッパーがかかるのであまり集中せずに楽に切ることができたと述べていた。実際に何度も境界線に刃を当て、機械による開閉を用いながら切っていた。

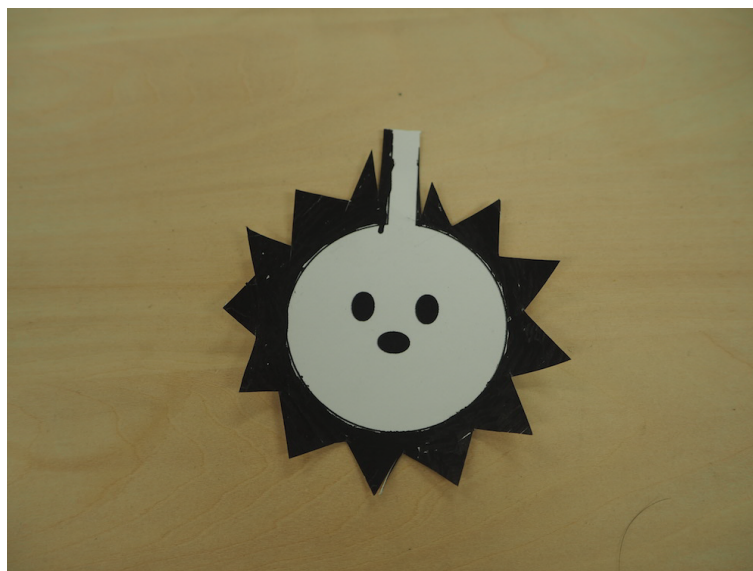


図 4.16: 1 人目の被験者の切り絵

実験1の考察

各被験者の体験時の時間と抵抗値の関係を示した図が図 4.19、図 4.20、図 4.21 である。縦軸は刃とクリップ間の線の抵抗値をマイコンの A/D コンバータで変換された値（0～1024 段階）である。抵抗値が上がるということは、ハサミの刃が描画線に触れ、ハサミを閉じることのできる状態である。

図 4.19 の被験者は、約 2 分半でライオンの形に紙を切り抜いていた。図 4.20 の被験者は、約 3 分半で綺麗に黒い枠の輪郭線を切り抜いていた。ハサミの開閉制御を用いながら輪郭を切り取る様子がみられた。また図 4.21 の被験者は、約 5 分で花の形を切り抜いていた。この被験者もハサミの刃が境界線に触れた際に、開閉が制御されることが、切る際に集中することを軽減してくれたと述べていた。

実験の結果、本デバイスを用いて導電性インクで描画された範囲以外の白い余白部分を切る被験者はあまりいなかった。切ることのできる範囲外を出ようとするとき、ハサミの開閉が制御されるため、線の枠を外れることはほぼ無く、また輪郭に沿って切り抜くなどの行動が見られた。

枠内でアレンジを加えながら切る被験者はいたが、中央の顔を意識しながら切っていた被験者は一名のみであった。

一方で黒い丸いドーナツ状の形状から発想して花の形状を思い付くなどの発想は見られた。普

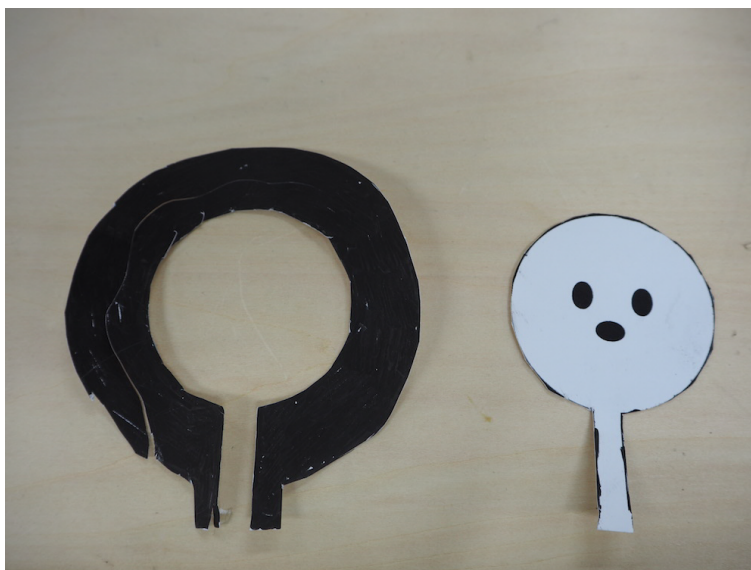


図 4.17: 2 人目の被験者の切り絵

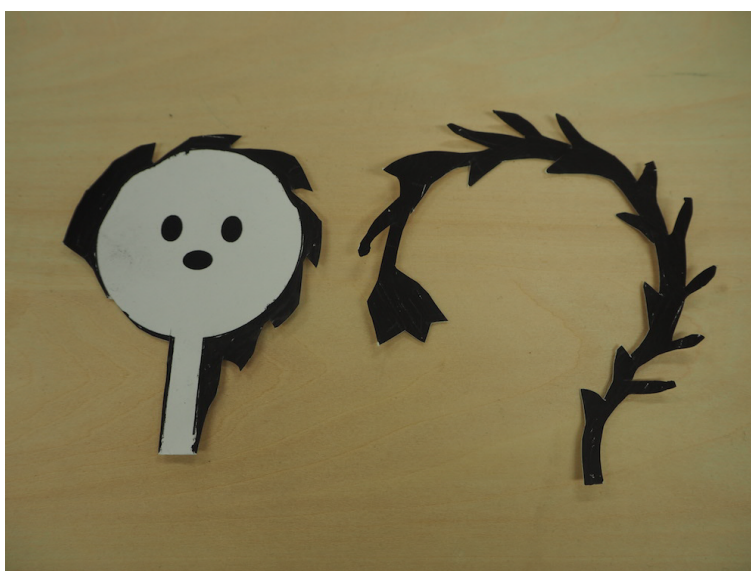
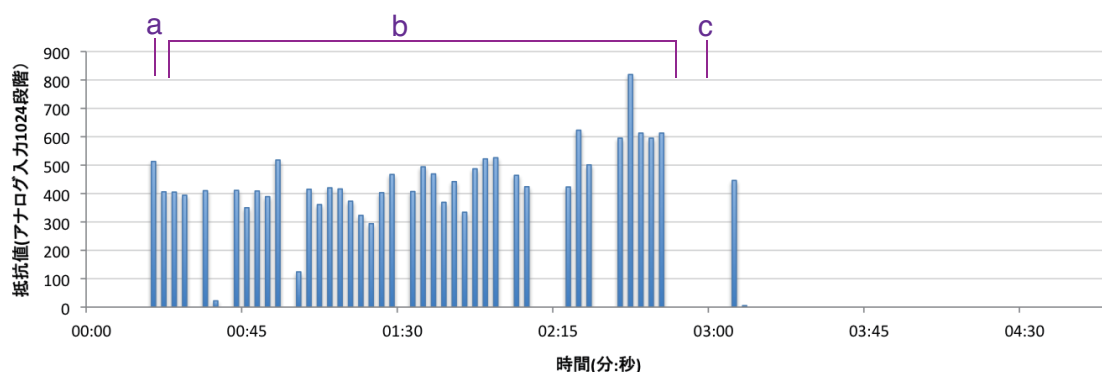


図 4.18: 3 人目の被験者の切り絵

段ものづくりに慣れているユーザにとって、具体的な形のテンプレートよりも抽象的な模様の範囲内を切り抜くようなテンプレートの方が自らのイメージを反映させやすい可能性がある。

また本実験で使用したテンプレートは、コンピュータ上のソフトウェアで予め描画された絵であるため、実験2の被験者が行った別の被験者が描画した絵を切ることと比べ、他者が描いた絵を切ることに対する抵抗感についての発言は少なかった。

また描画線と余白の境界線で切れなくなることは正確に切ろうと集中する必要性が無くなるので、切りたい形のみを考えながら切ることができるという意見があった。一方で開閉用のモータの大きさが切る行為を阻害する場面や、ハサミを空中に上げた時に開閉用のストッパーが掛かってしまいストレスになるという意見もあったため、改善する必要がある。



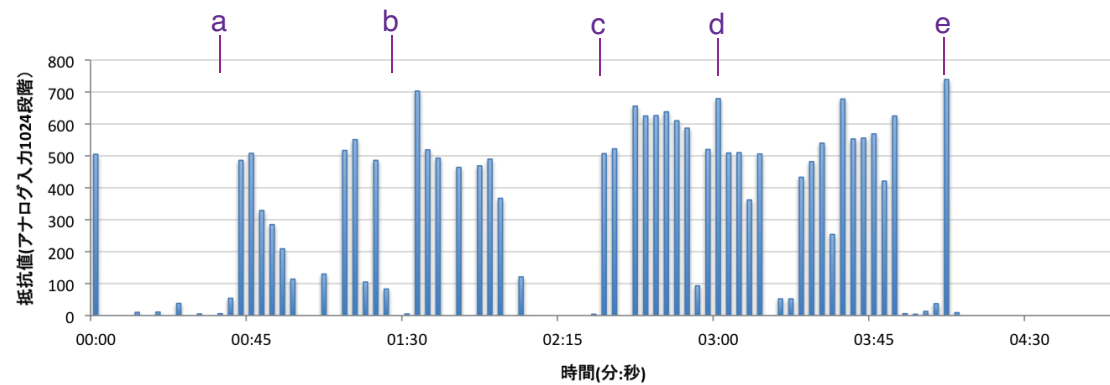
- (a) 左上より切り始める
- (b) ゴザゴザと模様を切る
- (c) 切り終える

図 4.19: 被験者 1 の体験時間と抵抗値の関係

実験2：切り絵を通した連作体験

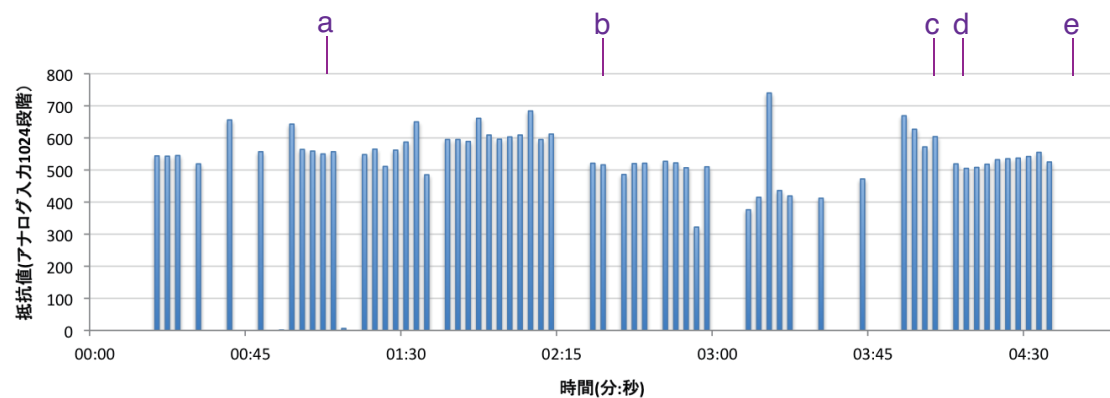
本実験では、前の被験者が描画した絵を使用しながら切り絵を行った。複数の線からなる選択肢やアレンジを加えながら切れる黒い枠などを含んだ前の被験者の絵をデバイスを用いて自由に切り抜いてもらう。クリップを付ける位置や切り方などは制限せずに行った。絵を切り抜いた後、A4の画用紙に導電性インクを用いて次の被験者に切り抜いてもらう絵を描画してもらった。描画する絵は、被験者が切り抜いた体験を元に、選択肢や黒い枠などを含むように描画してもらう。デバイスを用いて切る体験を行った後で、切るための絵を描画することで、切りにくかった線や場所を改善しながら絵を描画するのではないかと考えた。普段ものづくりに馴染みのある被験者のユーザ評価手法は、Amit らの研究 [83] で用いられている手法である。

また最初の被験者は事前に絵を用意しておく必要が有るため、筆者が制作した。図 4.22 のように、ライオンをモチーフとし、顔の周りを幾何学的な三角形を多く配置することで、線を選択しながら切ることを促す。ライオンの鬣をデザインしながら切ることができる絵にした。また三角



- (a) 紙の左外側より輪郭線の外側を切り始める。紙にハサミを接触させてモータの動きを確認する
- (b) 左内側より切り始める
- (c) 切りにくかったため右内側より切り始める
- (d) 内側を切り落とす。
- (e) 外側も切り落とす

図 4.20: 被験者 2 の体験時間と抵抗値の関係



- (a) ハサミを紙に当てながらどのように切るかを考え、右側より切り始める
- (b) 白い部分にあたった際にストッパーが何度か開閉する
- (c) もう一度右側開始位置に戻し、花の形に切り取っていく。
- (d) クリップを左側から右側に付け替える
- (e) 切り終える

図 4.21: 被験者 3 の体験時間と抵抗値の関係

形の中を塗りつぶした場所を幾つか用意することで、枠内でアレンジを加えながら切れるようにした。

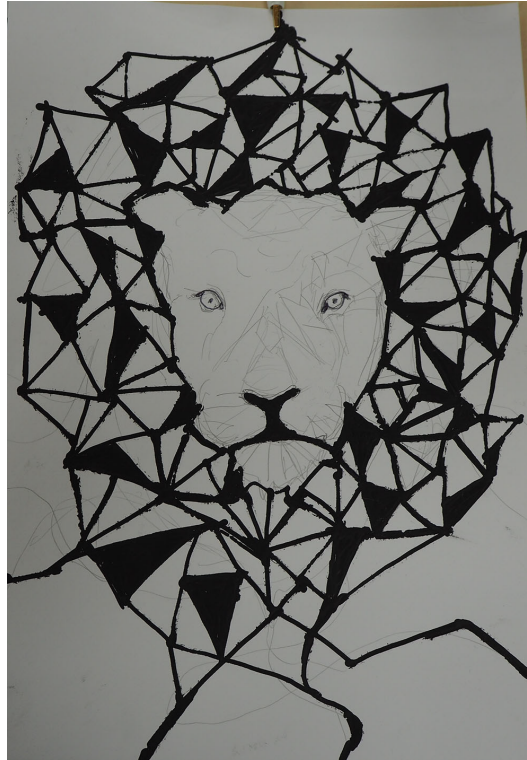


図 4.22: 実験2で用意した絵

S.H 氏の体験の様子

S.H 氏は、普段よりフィジカルな素材とデジタル技術を組み合わせたものづくりを行っており、特にシャボン玉を用いた作品を多く制作し、例えばシャボン玉を1ピクセルと見立てたディスプレイやシャボン玉を回路の一部とする装置などを開発している。

その一方でペンやハサミを使い、落書きのように即興的なお絵かきや切り絵を行っている。普段のハサミを使った例として、ポストイットを用いた切り絵を制作している。紙を数回折って、切り目を入れ、開くことで放射状の幾何学的な模様ができあがる。

まず enchanted scissors のデバイスを用いて、筆者が描画した絵を図 sfig19 のように切り取った。初めに切り取る絵を見た際、鬘の上のほうをふさふさと多めにし、下の方は短めにしようと考えた。ハサミの使い方を観察すると、刃の奥の方を使いながら切る傾向があった。また鬘の三角形から構成される規則性から、黒く塗りつぶした三角形の中も直線的に切り取っていた。しかし一度全て切り抜いた後で、三角形の黒い枠内を細かくハサミを入れていき、毛のような表現をしていた。

黒い枠内は切りやすく面白く切れたが、線が細い場合は集中しながら切る必要があるためストレスに繋がると指摘していた。また開閉用のサーボモータの厚みがあるため、紙に当たる事が多く角度が制限されたというコメントが有った。

また切り抜いた後で、図 4.24 のような絵を描画した。切り始めから切り終わりまで一回で切り落とせるような線となっており、木や動物など好きなものを切り落とせるような形になっていた。また中央下には好きな動物の形に切れるように、少し曖昧な形の動物のシルエットを配置した。線の細さとしては、体験者が細い線は切りにくかったために、太めの線を描画するように心がけた。

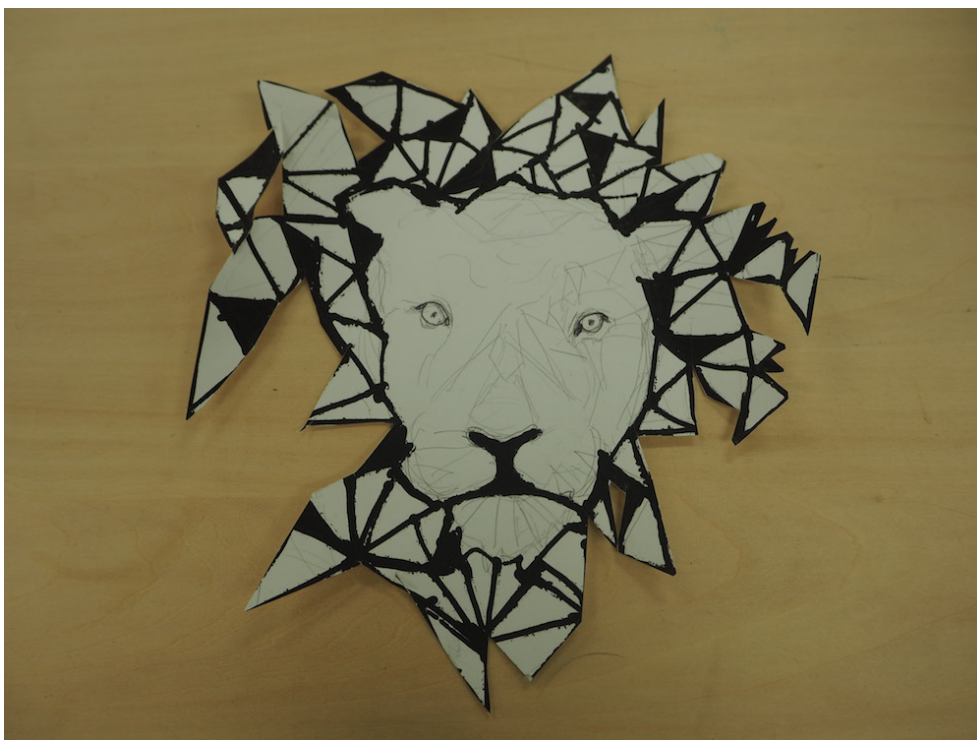


図 4.23: S.H 氏の切り絵

H.A 氏の体験の様子

H.A 氏は、日常的な道具の機能を違う視点で捉える作品や針金などの素材を用いて視覚体験の差を表現する作品などを制作している。また道具として面白い形状のハサミを集めたり、また周囲が覆われたハサミなどの作品も制作している。

本デバイスを使用し、前の被験者である S.H 氏の絵を図 4.25 のように切り抜いた。中央下の黒い枠で動物の形のように塗られた場所は、うねるように切り、曲げることで腕に見立てるなど立体的な表現を行っていた。また切る最中は頻繁にクリップを取り付ける位置を変えながら、最適な回路を選びながら切る傾向があった。

一方で線が細いと切る際に集中しなければいけないのでストレスに繋がるといった意見があった。



図 4.24: S.H 氏の描画した絵

またハサミの刃は描画線に一部でも触れていればいいので、紙を切りすぎてしまう場面や、ハサミに配置されたモータが紙に当たってしまい、刃を入れにくい場面が見られた。

その後、切り抜き用として、図 4.26 のような絵を描画した。普段の具象的なイラストとは異なり、抽象的な絵になったと述べていた。これは切るために回路の構造を意識したためである述べていた。また被験者が立体的に切り出したのと同様に、次の被験者にも立体的な表現を促すため、紙の両サイドに切り取ると円すい状になる模様と、中央にはそのような立体を自由に切れるような黒い円の枠を用意した。また線を選択しながら切れるように、あみだ状の場所や蟻の巣のような模様を描画していた。

A.O 氏の体験の様子

A.O 氏は、主にライブペインティングの方法によって即興的な作品を制作している。そのためハサミを用いた切り方もその場で思いつきながら即興的な切り方となった。図 4.27 は切り抜いた後の形である。

まず紙に対して左側より切り始めて、黒い丸型の領域を渦巻き模様のような形状に切り取り立体的な形状にしていた。その後、右下のあみだ状の場所を切り始め、切った箇所を折り立体感を出したり、紙を折ったところにハサミを入れて、紙の中央から四角い枠をくり抜くような切り方をしていた。これは絵が幾何学的でシンプルであるために立体的な形状にしたほうが面白いのではないかと考えたと述べていた。また線が入り組んでいた絵であったために、クリップを付ける



図 4.25: H.A 氏の切り絵



図 4.26: H.A 氏の描画した絵

場所を何度も変えている場面が見られた。

描画された線通りに切れることは、丁寧に切る際には便利であると述べていた。一方で細すぎる線を切る場合は、アレンジを加えられないため、機械的な切り方になってしまうとコメントしていた。また切る際に紙に開閉用のモータが接触したり、モータが片方の柄だけに取り付けられているため重さのバランスに偏りがあると述べていた。

デバイスを用いた切る体験後に、図 4.28 のような木の根をモチーフとした絵を描画した。一本の線をベースに描画されているので、一回で切り落とせるようになっており、木の根の中に描かれている模様も切ることができる。また枝から伸びている黒い部分は、動物の穴をイメージしており、生き物の形にアレンジを加えながら切ることができる。



図 4.27: A.O 氏の切り絵

S.K 氏の体験の様子

S.K 氏は、普段は触覚を軸にしたグラフィックやプロダクトのデザインを行っている。紙を扱った作品を制作しているため、普段からハサミを使用する機会が多い。実際にデバイスを用いて切り取った形は図 4.29 である。

まず右上から切り始めて、黒い丸枠内を切り抜いた。さらに途中で切り終わった部分がデバイスに当たるのを避けるために、紙を破っていた。また次の被験者への絵は図 4.30 のような、フォントを並べた絵である。



図 4.28: A.O 氏の描画した絵



図 4.29: S.K 氏の切り絵



図 4.30: S.K 氏の描画した絵

M.O 氏の体験の様子

M.O 氏は、イラストレーターで、植物や動物などをモチーフとした作品を制作している。

本デバイスを用いた体験では、しばらく考えた後、紙を切り始め、黒く塗りつぶされた領域に細かい切り込みなどを入れていた。幾つかのパーツに切り落として、最終的にレイアウトを調整し、パーツを並び替えて羊の形にしていた（図 4.31）。最後に G の文字を切り抜いていたが、何度もクリップを付け替えたり、切りにくい場面が見られた。

また線が細かったりするような切ることが難しい場所は、線を太くして黒い枠を増やすか、角を太めに塗りつぶすと簡単に切れるのではとコメントしていた。また普段は無意識に切りたいで、無意識かつ正確な切り方が求められる時に本デバイスは便利であると述べていた。

切った後に導電性インクで、花と家をモチーフにした絵を描画した（図 4.32）。次の被験者が切りやすいように、抽象的かつシンプルな絵としていた。また回路となるような線を心がけたり、切った時の経験から、線を切りやすくするために、角となる部分に黒い丸を描画したり、線を太めにしていた。

実験 2 の考察

各被験者の体験時間と抵抗値の関係から、創作時の行動の変化などについて考察する。図 4.33 は S.H 氏の体験のデータである。横軸は時間を表し、縦軸はクリップと刃先の間の抵抗値（マイクロコンピュータの A/D コンバータを使用し 1024 段階に変換した値）である。S.H 氏の体験時間



図 4.31: M.O 氏の切り絵

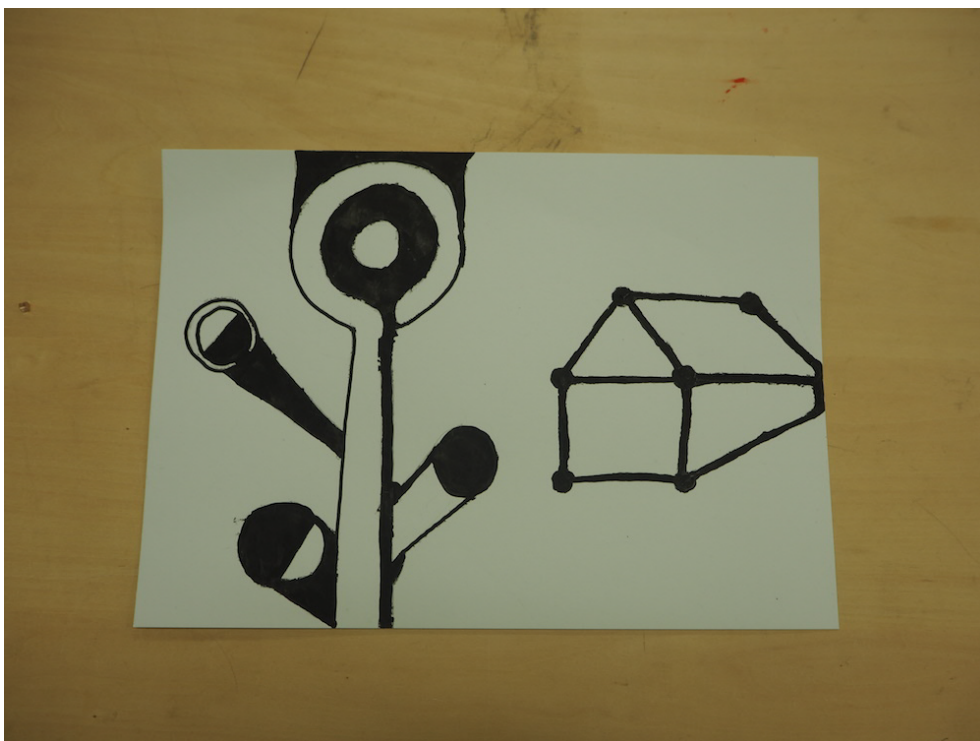
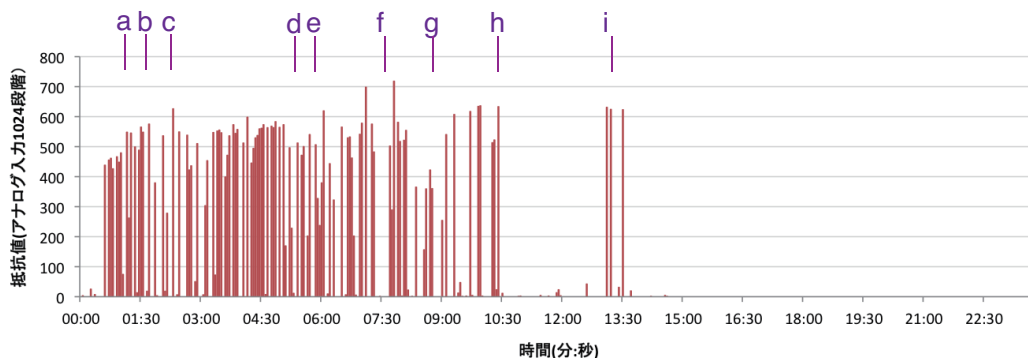


図 4.32: M.O 氏の描画した絵

の合計は約13分であった。切る線を選択しながら進めていく様子や、一度切った後にクリップを付けて細かい切込みを入れる様子がみられた。H.A氏の体験時間は約16分(図4.34)、A.O氏の体験時間は約10分であった(図4.35)。両者とも紙を折ったり、渦巻き模様に切り出すなど、立体的な表現を行っていた。S.K氏は約6分で完成させていた(図4.36)。導電性インクで描かれた線がひとつなぎであったため、抵抗値がゆるやかに上がっている。図4.37はM.O氏の体験データであり、体験時間は約21分であった。切り終えた後に、パーツを並び替えて、新しい形にする様子などがみられた。また被験者全員の切り始めるまでの平均時間は52秒であった。



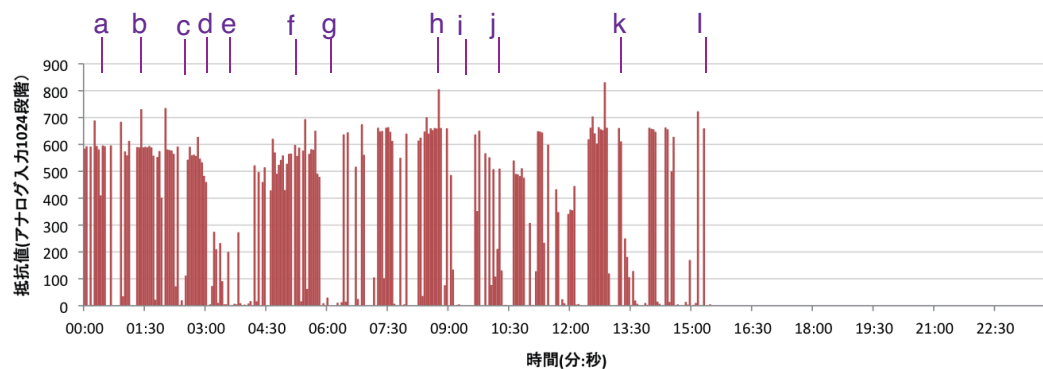
- (a) 完成の構図を考え、下からハサミを入れはじめる
- (b) 右方向へ切りはじめる
- (c) アレンジ可能な黒い領域入るが直線的に切り落とす
- (d) 上に到達
- (e) また下へ戻り、左方向に切っていく
- (f) アレンジ可能な黒い領域入る
- (g) 紙の端付近で、紙を切り落とす
- (h) 切り落とす
- (i) 再度、細かくハサミをいれていく。

図 4.33: S.H 氏の体験時間と抵抗値の関係

本デバイスを用いて予め決められた制限内で切るという切り方が、ユーザの表現活動に与える影響について考察したい。

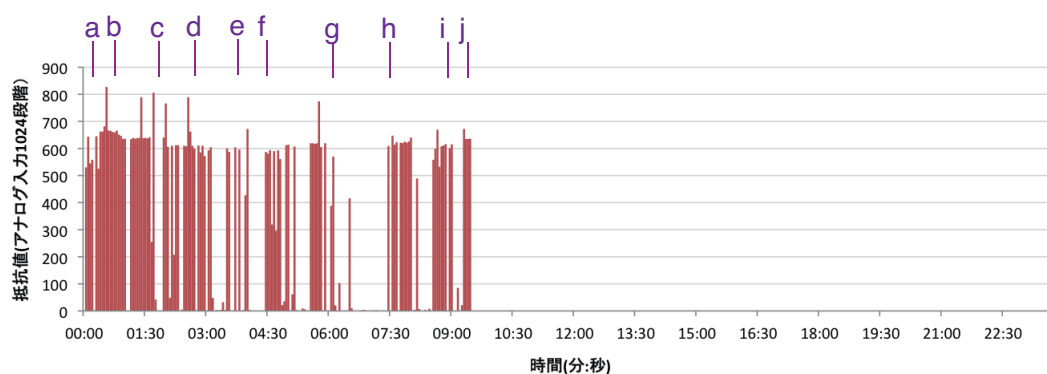
黒い線以外を切れないことは、細かい場所などを切ることに集中しなくて良いため、切る形のみを考えることができる。丁寧な線に切る場合は便利であるといった意見があった。一方で細かい線などを切る場合は、何度もストッパーが起動するためストレスに繋がるといった意見もあった。また、太い線や黒い枠内を切る際には、その制限領域内でアレンジを加えながら切ることができる。実際に平面的な切り方だけではなく、立体的な形状を意識しながら切ったり、一度切った後で細かい切込みを入れる例などがみられた。今回実験に参加した被験者は、普段は白紙を切ることが多いが、制限内で切ることは普段と異なる発想で作ることができると述べていた。

また本デバイスを用いて切るための絵を描画する場面では、普段被験者が描画する絵に比べて幾何学的で抽象的な絵が多くなった。被験者の1人は、回路となることを意識しているためであると述べていた。また実験を繰り返した結果、線が細かったり、急に曲がる場所などは、切る際



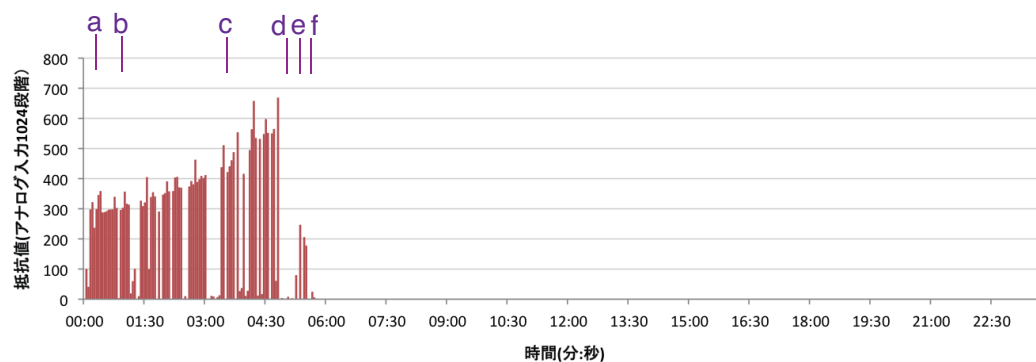
- (a) 下の動物あたりからハサミをいれはじめる
- (b) 初めは黒いところを輪郭に沿って切り始める
- (c) 動物形の場所をうねうねときりはじめる,
- (d) 手の形に切って折る
- (e) 木の方をきりはじめる
- (f) 雲を切るが, 途中でやめる
- (g) クリップを手前に付け替え, 再度切り始める
- (h) 「モータがあたって切りにくい」
- (h) クリップを左端の木の横につけて切り落とそうとする
- (i) 2回クリップをつけなおす
- (j) 白い部分を切る方法を思い付く
- (k) 葉っぱの輪郭をきる クリップを頻繁に付け替える
- (l) 動物の腕を折って立体感をだす

図 4.34: A.H 氏の体験時間と抵抗値の関係



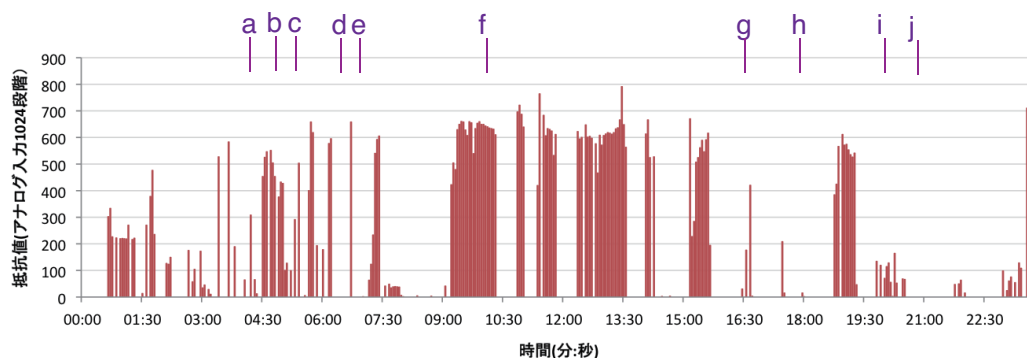
- (a) 紙の左から切り始める
- (b) 黒い丸内を渦巻き模様のようにきりはじめる
- (c) 下側の渦巻きを線に沿って切り始める
- (d) あみだ状のところをきりはじめる
- (e) 折ることを思い付く
- (f) 折ったりしながら立体的にしていく
- (g) 折って、中をくり抜こうとする
- (h) 蟻の巣のようなところを切ろうとするが、クリップが離れていたため付け替える
- (i) 切った所を折りながら切る
- (j) 切り終える

図 4.35: A.O 氏の体験時間と抵抗値の関係



- (a) 右上より切り始める
- (b) 黒い丸枠内を切り取る
- (c) 切りやすくするために紙を破る
- (e) クリップを付け替える
- (f) 模様を切ろうとする
- (g) 完成

図 4.36: S.K 氏の体験時間と抵抗値の関係



- (a) しばらく考えた後ハサミを入れ始める
- (b) 細かい切込みを入れる
- (c) 切りやすくするため紙を折る
- (d) 「D」を切り抜く
- (e) クリップを手前に付け替える
- (f) 一つ目のパーツを切り終える
- (g) 二つ目のパーツを切り取る
- (h) クリップを付け替えながらGを切り抜きはじめる
- (i) 切り終わる
- (j) パーツの配置を変えながら、羊の形にレイアウトして完成

図 4.37: M.O 氏の体験時間と抵抗値の関係

に切りにくくストレスになるため、線を太くしたり、角を切りやすくする工夫を描き加えたりなどの改善を行っていた。

また描画線で区切られた領域内を切りたい被験者もいた。線が繋がっている場合は、紙を折って切ることでもできるが、孤立した領域ではクリップを付けることができず切ることができない。そのため、クリップの代わりにシールのような電極を用意して、孤立した描画領域に貼り付け切り抜くなどの方法が考えられる。またその場合はカッター型のデバイスで切るなど、他の切りやすいデバイスの開発も考えられる。

また装置に関して、切り進める際にモータが厚いため、紙に当って切りにくいことや、片方の柄にモータが取り付けられているために、重さのバランスが偏っているという意見があった。モータを小型化したり、両方の柄のバランスを整えるなどの改善が必要である。

4.4.3 システム評価と考察

本デバイスのシステムの評価と実験から得られた考察についてまとめる。

まず本デバイスを用いて切る際の解像度について述べたい。本デバイスで使用しているサーボモータのスピードは0.17秒／60度であるため、描画線に刃が触れてストッパーが起動するまでの時間は短い。しかし刃の奥を使って切る際には、歯の奥の部分のみ通電して、刃の先端で紙を切ってしまう場合がある。刃の先端を用いて切り進めれば細かい造形が可能である。しかし本デバイスは、ある程度広い線で描かれた絵や模様などに対して、ユーザが手作業によるアレンジを

加えながら切ることを目的としている。実際に実験からも、細い線を切るよりは太い線や領域を切ることのほうが、切る際のストレスも少なく、また手作業感を足すことができていた。

そのようなある種の制限の中で、手作業によるアレンジを加えながら切り絵を行う様子は実験を通して観察できた。具体的には、予め決められた図形に対して、動物の形にしたり花の形にしたり異なる切り方が見られた。また平面的な領域に対して立体的な切り方を行うなどの切り方も見られた。一方で、Position-correcting tools for 2d digital fabrication [46] などの手作業では難しい細工を機械が行うという機能も考えられる。例えばユーザはフリーハンドで切る動きの中で、刃先が自由に動くことで、手作業では切りにくい模様のような細工を表現することも考えられる。

また実験では、切る行為を体験した後に、切るための絵を描画してもらった。その結果、細い線や急な角度は難しいという体験を元に、それらを改善するような絵を描画していた。

また本デバイスの刃先と描画線の接触を検知する方法として、抵抗値方式と静電容量方式を用意した。実験では抵抗値方式を採用したため、手が描画線に触れてもデバイスが反応することにはなかった。しかしクリップとハサミ間のケーブルが不要になる単線通信を用いる際には、静電容量方式にする必要がある。ケーブルが不要になることで、ユーザの創作活動を阻害しなくなるのではないかと考えられる。一方で、実験では頻繁に回路となることを意識しながらクリップを付け替えるユーザがいた。そのため刃先に小型カメラを装着して、黒い線を認識して制御するようなクリップが必要のない認識方法も考えられる。

また本デバイスで用いたハサミのモータは、手で力を入れた際にも動作するようにトルクの強いモータを使用した。そのため多少の厚みが出てしまい、創作を阻害する場面がみられた。今後は小型のモータを使用する必要がある。また常にモータの開閉を行うことで、自動的に切ってくれるようなハサミへの応用も考えられる。またサーボモータは、ユーザの力の入れ具合をフィードバックすることができるため、切り方の触感を変えることもできると考えられる。例えばダンボールのような厚い紙を切っているが、薄い紙を切っているような触感を出すなどの触覚提示研究への応用も考えられる。

4.5 まとめ

本章では、導電性インクとハサミ型デバイスを用いることで、ユーザの切る行為を補助する enchanted scissors の設計と実装について述べた。デモ展示やワークショップの来場者、また普段ものづくりを行うユーザの体験などを通して、機械の補助と手作業を組み合わせながら切る行為を見ることができた。ユーザの行動から、ある程度の太さの線の制限領域内で考えながら、手作業でアレンジを加えながら切り絵を行っていた。

今後の課題として、モータ部分の改良があげられる。体験ではサーボモータの存在が創作を阻害する場面が見られた。今後は回転部分にモータを内蔵するなど、切る行為を阻害しない制御方法を考えたい。またユーザの力の入れ具合を計測できるため、切る際の触感を変えながら切り絵を補助する方法などが考えられる。

またカッターやノコギリなど、様々な道具に応用することで、ユーザの多様な切る行為を補助できると考えられる。

第5章

手描きを拡張する描画システム dePENd

5.1 dePENdの背景

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言える。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採る中で、物理的な紙とペンの組み合わせを重視し、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。

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み合わせを用いながら、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。本研究では、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 5.1) 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、予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、ユーザは磁力に逆ら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、スケールを変えるなど対話的な機能も実現する。

またペンなどの筆記用具に振動アクチュエータを複数個配置したペングリップ型デバイスを装着することで、ユーザに多方向の牽引力や反発力を提示するシステム dePENd Ver.2 も開発した (図 5.10)。振動アクチュエータの加速度を非対称にすることで、任意の方向に仮想的な牽引力を提示することのできる技術 [76][77] を応用することで、ペン自体がユーザに牽引力を提示する。

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。

5.2 関連研究

5.2.1 インタラクティブ・ファブリケーションに関する研究

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挙げられる Suspended Pen on an XY Plotter[55] (図 5.2) は上部から下げたペンの位置を制御でき、また Center pivot pen plotter[56] (図 5.3) 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。

本研究と近い構成を持つ研究として、Blind Self Portrait[57] (図 5.4) 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、予め撮影した

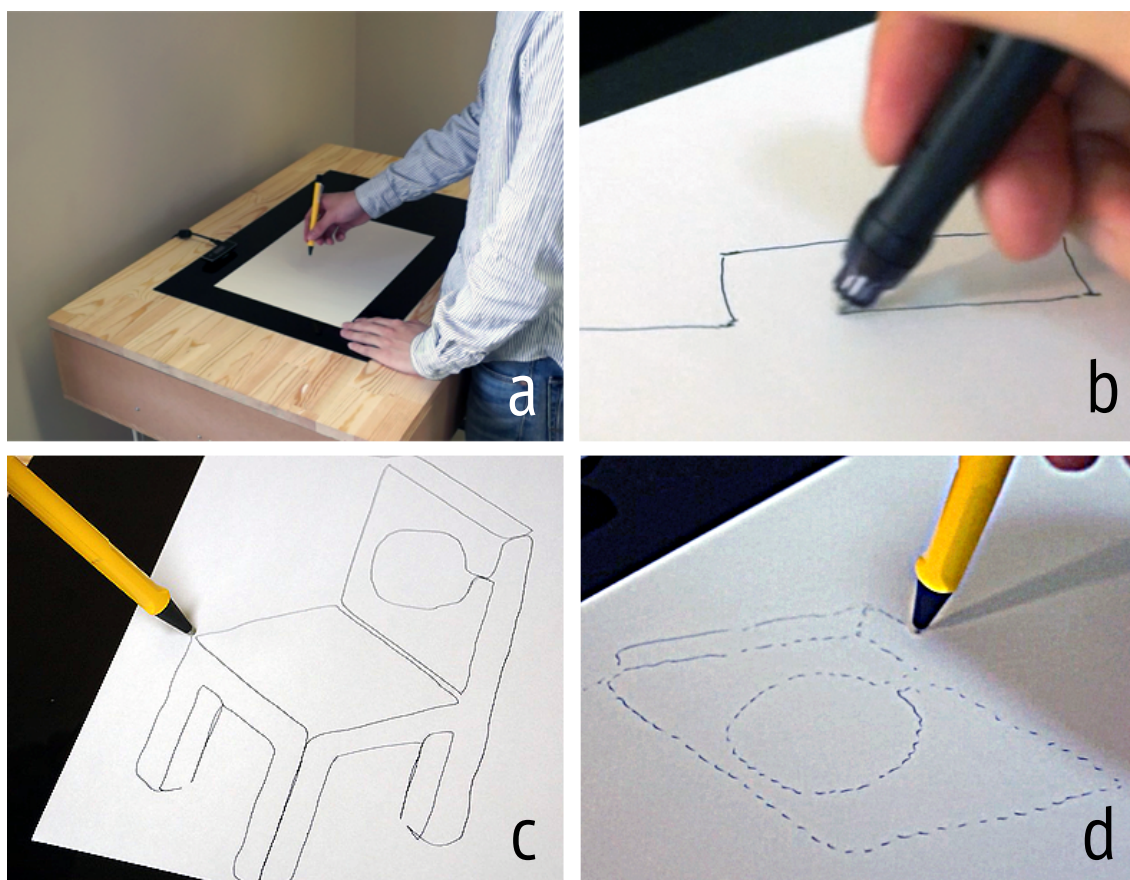


図 5.1: (a)dePENd: (b) ユーザは直線や (c) 図形を描画でき, (d) 描画行程中に自由に修正などを加えることができる.



図 5.2: Suspended Pen on an XY Plotter

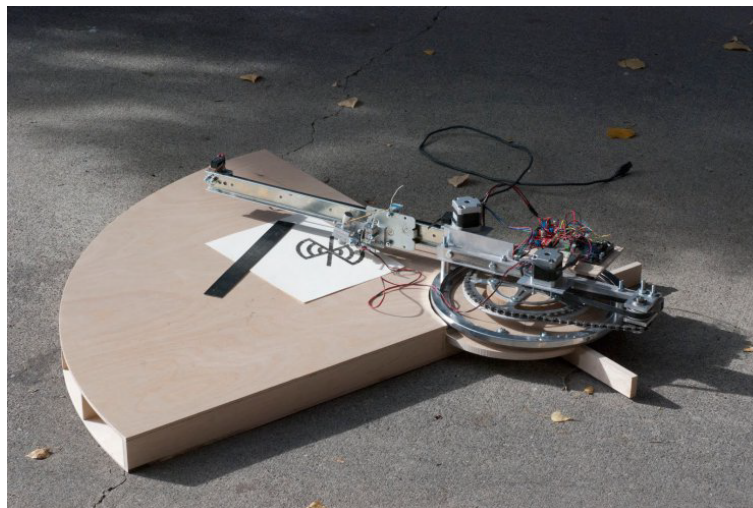


図 5.3: Center pivot pen plotter

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 [58] 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。

5.2.2 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る試みがなされてきた。Actuated Workbench[59] (図 5.5) や Proactive Desk II[60] 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[61] (図 5.6) は磁石を配置し SPIDAR[62] 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リーチャーのインタラクションを可能にしている。FingerFlux[63] (図 5.7) 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、ユーザは場所に応じて、触感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。

5.2.3 振動を用いた触覚提示技術

dePENd Ver.2 に関する研究として、振動を用いて触覚を提示する技術が挙げられる。ペンやスタイラスにアクチュエータを内蔵したモバイル性を持つデバイスを使用することで、自由な描



図 5.4: Blind Self Portrait



図 5.5: Actuated Workbench



図 5.6: Kobito



図 5.7: FingerFlux

画の中で補助する研究が行われてきた研究として、振動アクチュエータやスピーカを内蔵したデバイス [72][73][74] や、モータを用いてペンの持ち手部分を変形させることで触感を提示するデバイス [75] などが挙げられる。これらはモバイル性があり、振動によるテクスチャ感などの触覚提示に適しているものの、描く行為を触覚的に誘導するには、牽引力などの物理的な力覚提示が適している。

人間の知覚特性を利用して仮想的に牽引力を発生する研究として、Phantom-DRAW[76] (図 5.8) はクランク機構と重りを利用して非対称な加速度パターンを生成し力覚を提示するデバイスである。また Traxion[77] (図 5.9) は小型の振動アクチュエータを利用して、非対称の加速度による一次元の牽引力を発生させる触覚提示システムを提案している。これらは仮想的な牽引力を発生させているものの、一次元方向のナビゲーションに利用するなど空中で把持した時の触覚提示を想定している。本研究は、紙に置いたペンを振動させることで、二次元方向の力覚を知覚しながら、描く行為を拡張することを狙いとする。



図 5.8: Phantom-DRAW

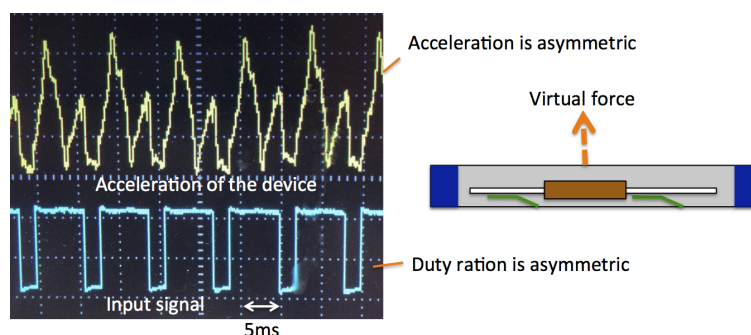


図 5.9: Traxion

物体を振動させることで二次元方向に牽引する技術は、デジタル情報を身体的に操作できるタ

ンジブルインタフェース Touchbugs[78] で用いられている。これは重りの偏心を利用した振動モータをしているため、前進時に進路を左右に変更することしかできず、前進から後進への変更など急な方向転換は難しい。本研究も振動を利用しペン先を移動させ牽引力を提示するが、リニア方向に振動する振動アクチュエータを複数台使用することで、多方向の牽引力提示を行う。

5.3 dePENd Ver.1 の設計と実装

本章で提案する手書き拡張システム dePENd Ver.1 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 5.10 は本システムの構成図である。

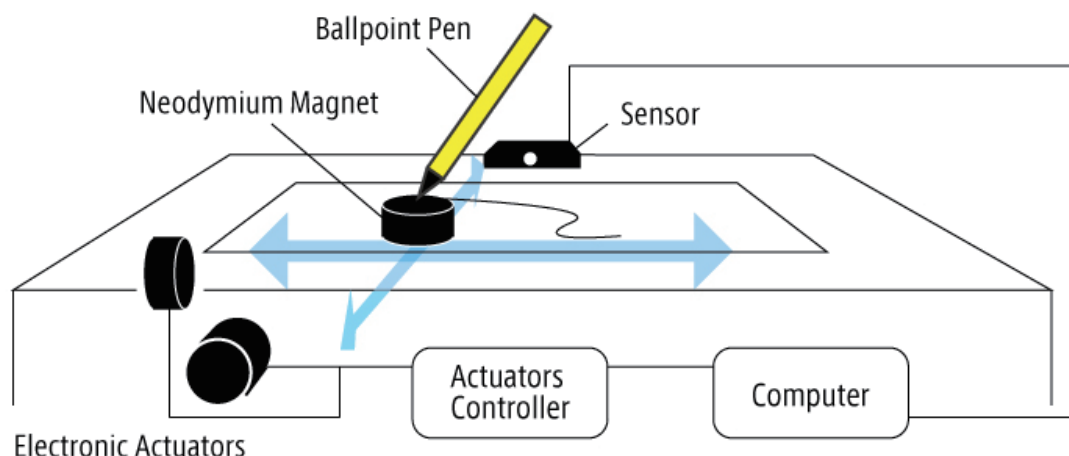


図 5.10: dePENd Ver.1 システム図

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[64] はアクチュエータを内蔵したアームを使用し、SPIDAR[62] はモーターとテグスを用いることで制御する。嵯峨らのシステム [58] 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。これらは触感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抱えるものの、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無く、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。

5.3.1 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鋼であり、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ウム磁石を使用した。ネオジウム磁石の形状は丸型で、大きさは直径14mm高さ30mmである（図5.11）。磁気特性は表面磁束密度が約450mT、吸着力が約12kgf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1mmの亚克力板を用いた。

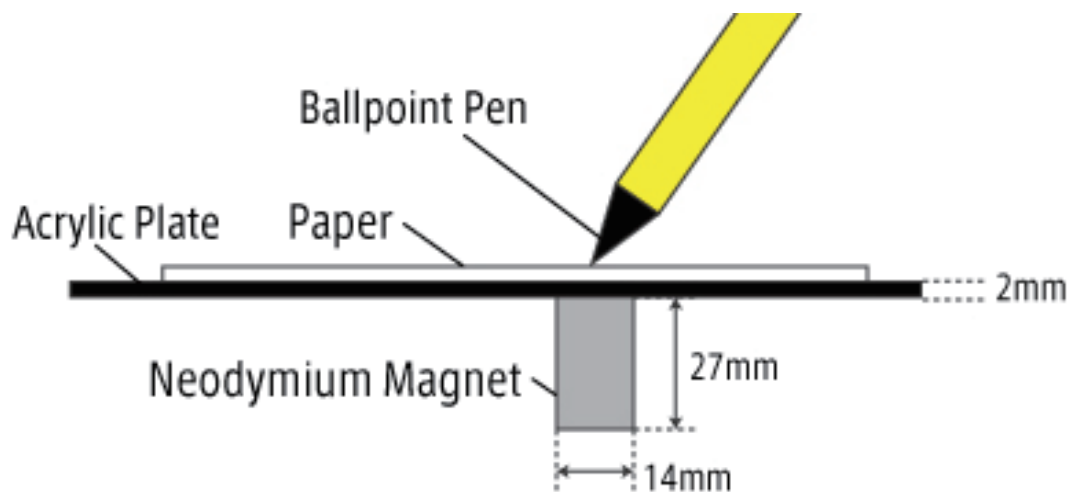


図 5.11: 磁石及び亚克力板のサイズ

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500mmY軸300mm、分解能は0.01mm、最高速度は60mm/s、最大推力は43Nである。移動するテーブル上にネオジウム磁石を配置することで、磁石の位置をX軸500mmY軸300mm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 (ATMEGA328P) 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。送信する値は予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机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。変換したデータを机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。

5.3.2 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、描いた絵を複製できるなどインタラク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 5.12)。

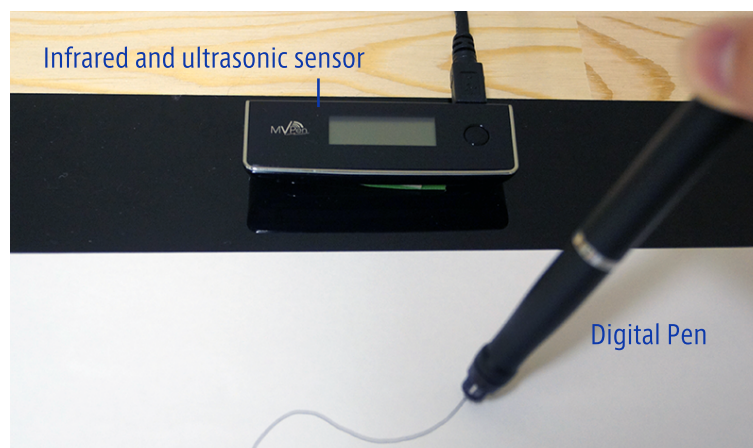


図 5.12: 赤外線／超音波検知ユニット，デジタルペン

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。

5.3.3 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ピングのために、基本となる図形の描画、予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。

入力したデータの描画

予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元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 Ver.1 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。

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一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。例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 5.13(a) の場所にデジタルペンで点を描画し、2点目である図 5.13(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。

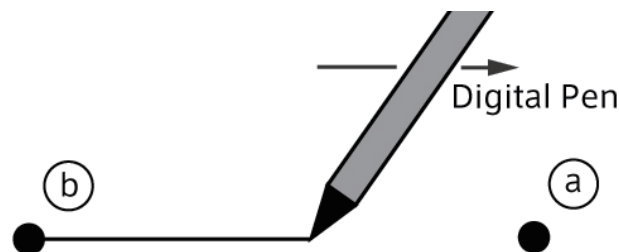


図 5.13: 直線描画機能

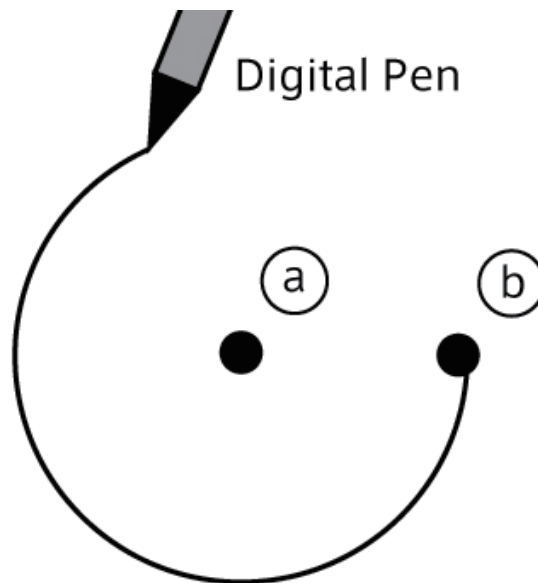


図 5.14: 円描画機能

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 5.14(a) を円の中心として描画し、2 点目図 5.14(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 5.15 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。

コピーアンドペースト機能

直線や円などの正確な線の描画に加え、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 5.16)。

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。

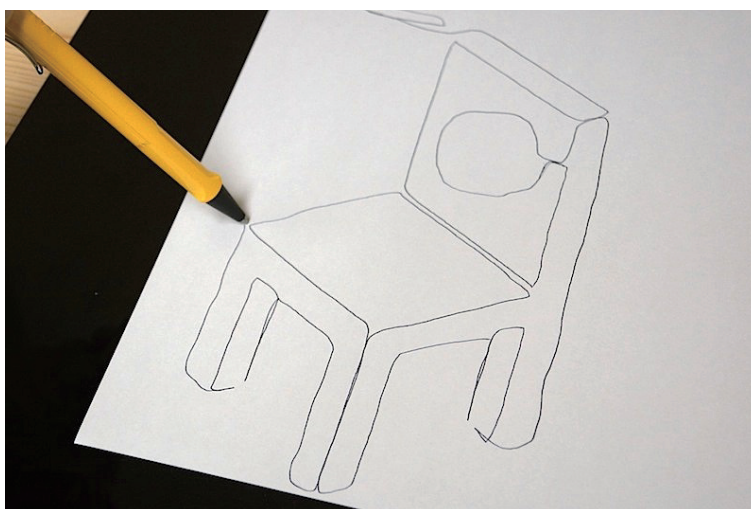


図 5.15: 直線, 円描画機能を組み合わせた描画の様子

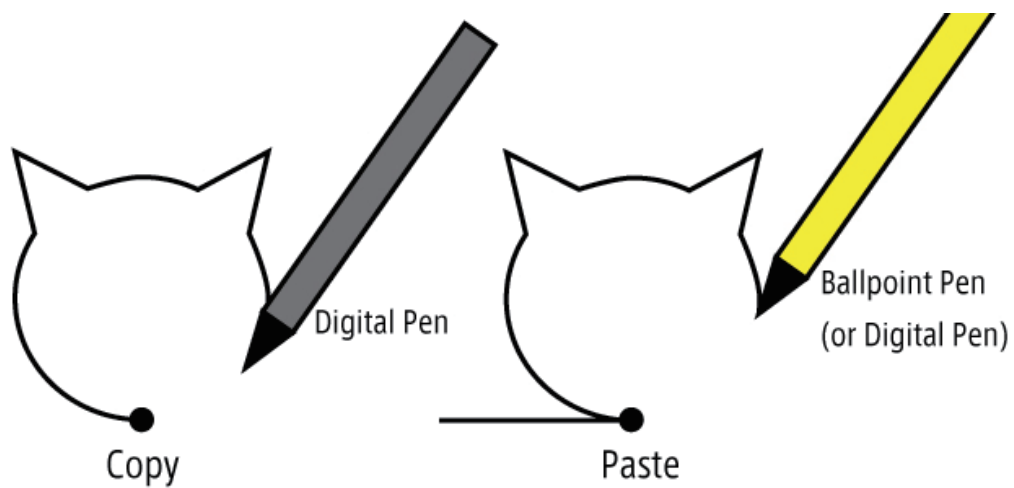


図 5.16: コピーアンドペースト機能

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 5.17 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，ユーザは紙を変え，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。

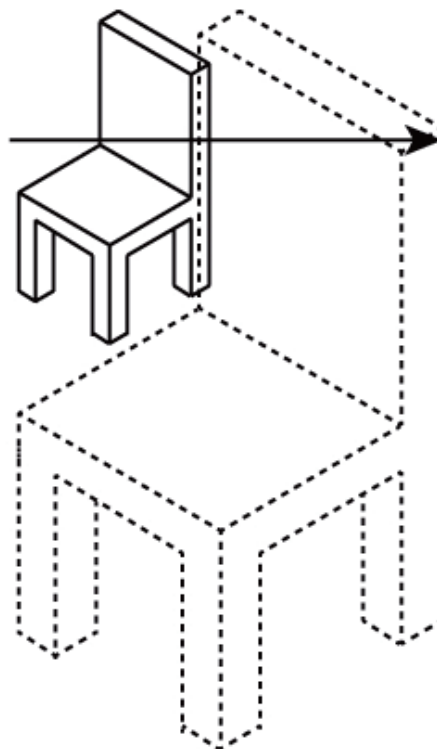


図 5.17: スケール変更機能

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 5.18)。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，表現の模索に繋がると考えられる。

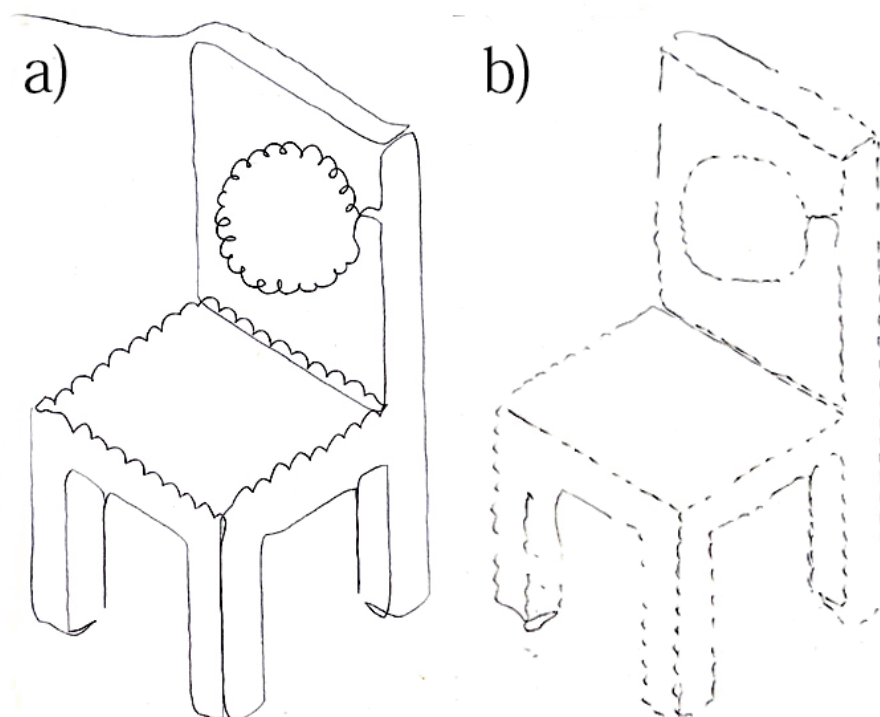


図 5.18: アレンジの追加 (a) 波線 (b) 破線

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 5.19）。

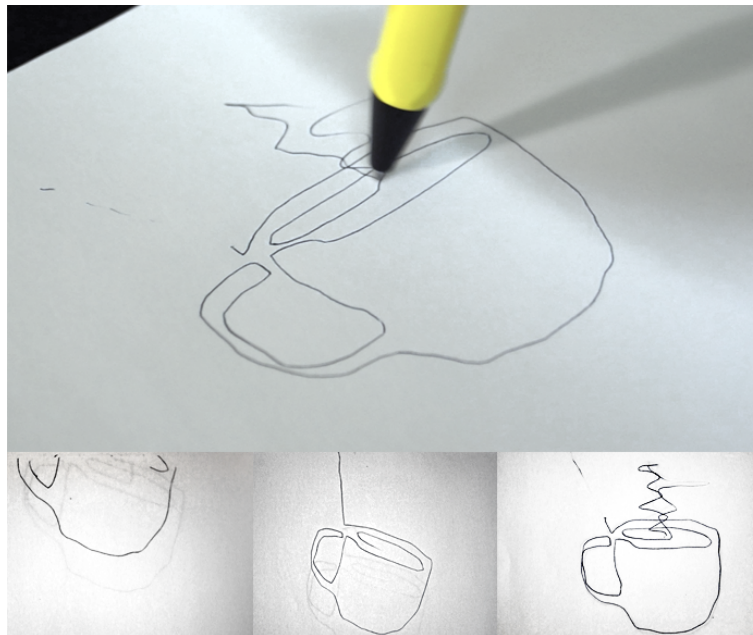


図 5.19: 絵を少しずつ変更しアニメーションを制作する様子

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。例えば、あるユーザのペンの動きを他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。

複数台のデバイスを通信することで、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 5.20）。デバイス間の通信は OSC 通信を用い、受信側と送信側の切り替えはスイッチにより変更する。送信側の入力には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 5.21）。

5.3.4 評価

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共に、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及び描画可能サイズ

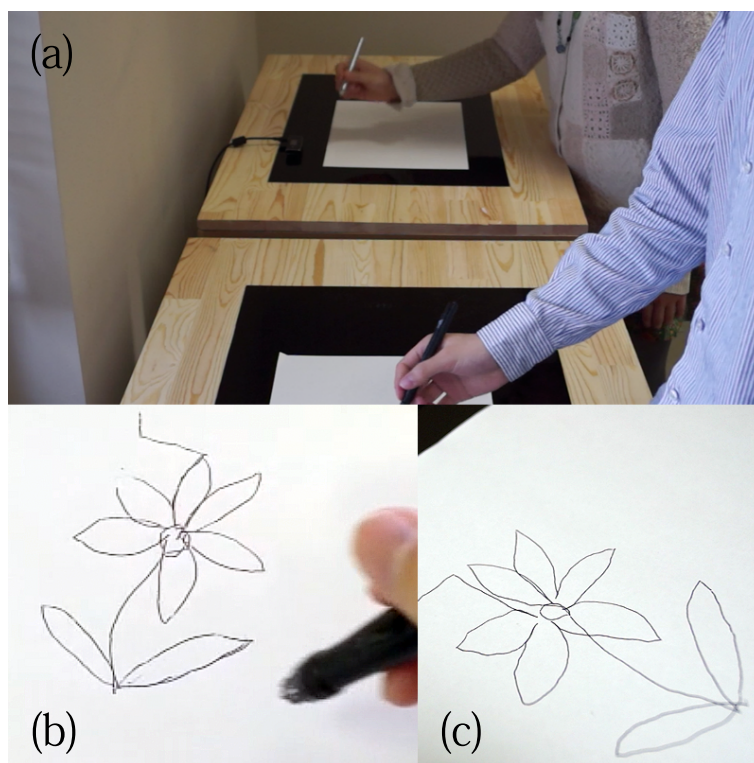


図 5.20: (a) 通信機能 (b) 送信側 (b) 受信側

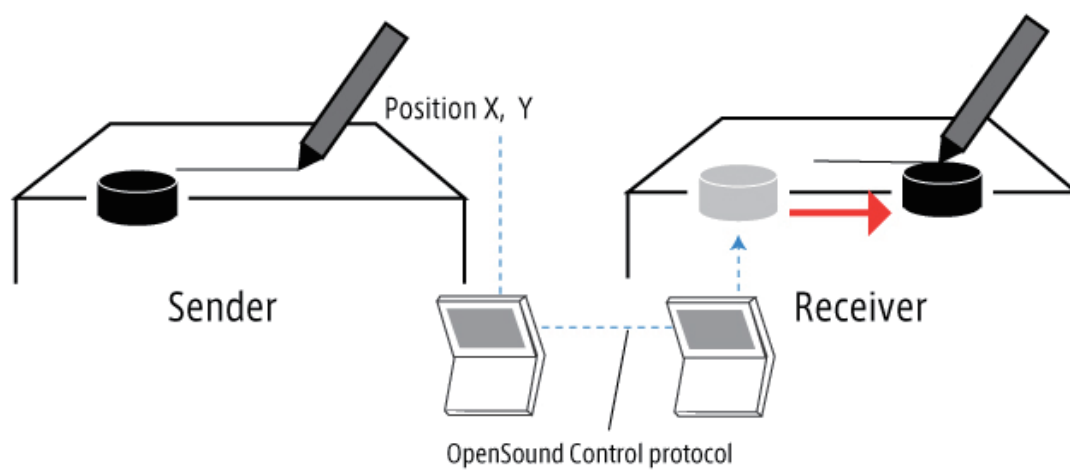


図 5.21: 通信機能システム

は、アクチュエータの大きさに依存する。今回は、縦300mm、横500mmと縦150mm、横150mm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いため、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60mm/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、全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23cm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、例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）する際に60mm/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60mm/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ウ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、ネオジウ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5.22のように高さ5mm～30mmで0.9N～1.15Nの引力の変化があった。高さ30mm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ウム磁石のサイズは高さ30mmとした。

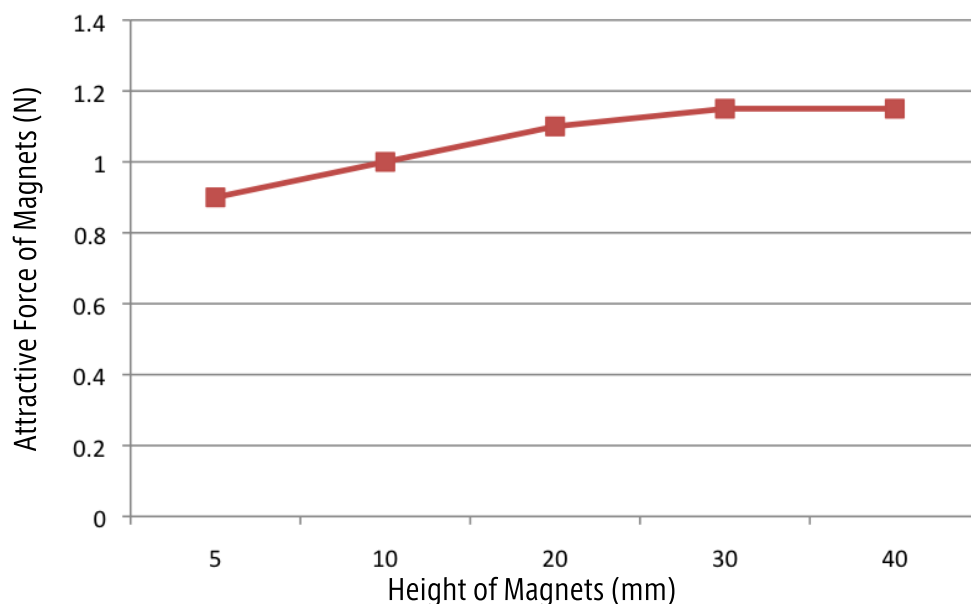


図 5.22: ネオジウム磁石の磁力と高さの関係

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 1mm 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 5.23 のように板の厚さ 1mm～6mm で 1.1～0.25N の変化があった。今回の実装では 1mm 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 0.6N である。

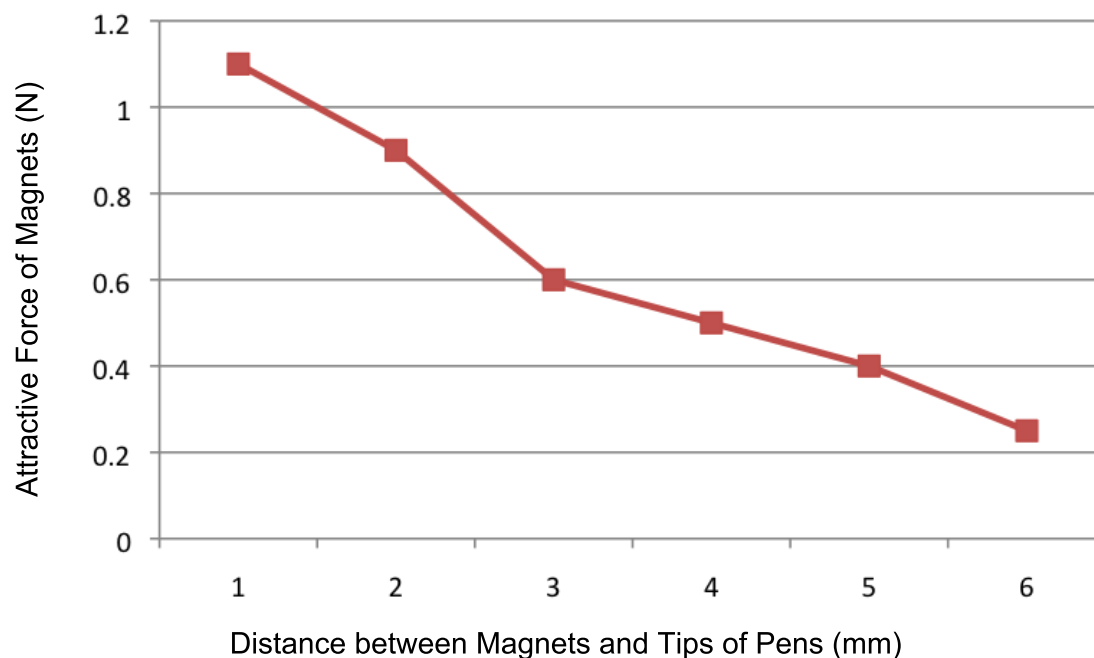


図 5.23: ペン先と磁石の距離と磁力の関係

また、上記の通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 210mm、横 297mm であったが、本来はアクチュエータの可動範囲を全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事のできる筆圧に限界があると言える。一方で、先述の通り、本システムで用いる磁石の磁力 0.6N 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る上ではこの構成は有効であるとも言える。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で磁力を効率よく伝える工夫や、磁石の配置方法、さらには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挙げられる。さらに Digital Rubbing[22]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良いか分からず、磁石の動きに付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。

5.4 dePENd Ver.2 の設計と実装

dePENd Ver1. では、ボールペンのペン先の強磁性に着目し、テーブル下の磁石をコンピュータ制御することで、ペンの動きを制御し、通常フリーハンドでは難しい絵や図形を描画できたり、遠隔地のユーザに描き方を伝えたりすることができる。大きな特徴として、単純な振動提示による触覚ではなく、牽引力によってペンの動きを誘導する。また通常のボールペンと紙を用いるため、大掛かりな装置を装着すること無く使用できる。またペン先は磁石と固定されていないため、ユーザは機械の移動による描画線に自由に修正やアレンジを加える事ができる。一方で、磁石の移動範囲が机型筐体の範囲内である制限は、ユーザの自由な描画を阻害する可能性がある。またボールペンでしか使用できないため、筆などを用いた習字学習の補助には使用できない。そこでペン自体が多方向の牽引力を提示することで、特殊な環境下以外で描画を補助できたり、ペンや筆、クレヨン、スタイラスなどそれぞれの筆記用具に対応した描き方の補助ができると考えられる。牽引力を提示する手法として、本研究では振動による牽引力提示に着目した。振動による牽引力提示は、大掛かりな装置を使用せずに、紙とペン先の接地面積が少ない状態でペンを誘導できたり、空中で把持した際にペンを誘導できる可能性があるため、日常的な描き方と近い状態で補助することができる。

そこで本研究では、ペンなどの筆記用具に振動アクチュエータを複数個配置したペングリップ型デバイスを装着することで、ユーザに多方向の牽引力や反発力を提示するシステム dePENd Ver.2 を提案する（図 5.24）。振動アクチュエータの加速度を非対称にすることで、任意の方向に仮想的な牽引力を提示することのできる技術 [76][77] を応用することで、ペン自体がユーザに牽引力

を提示する.

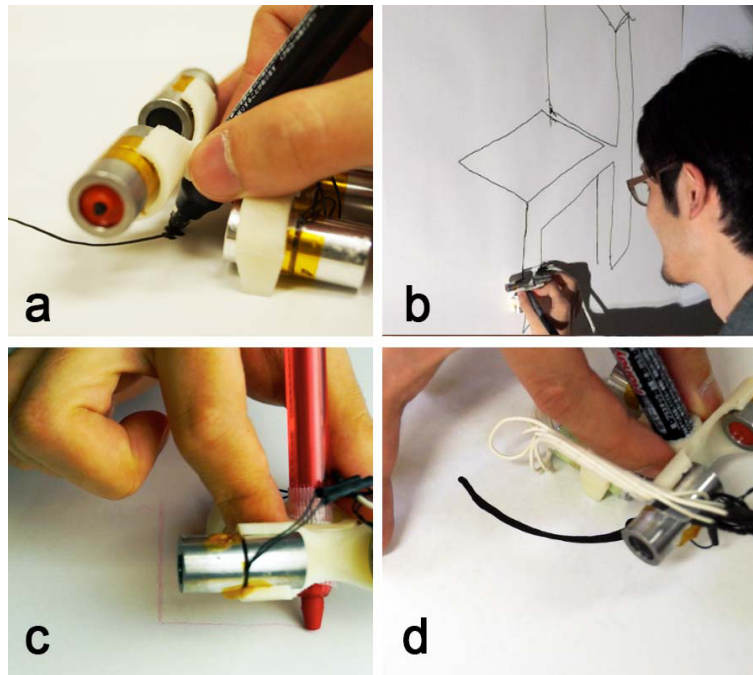


図 5.24: dePENd2.0

5.4.1 システム概要

本研究で提案する dePENd Ver.2 は、振動による牽引力提示により、日常的な描く行為の中で緩やかに補助を行い、ユーザの描画を拡張する。ユーザは、ペンやクレヨンなど普段用いる筆記用具にペングリップ型デバイスを装着し、紙にペン先を置くことで、ペン自体が移動しながら誘導して、半自動的に絵を描画できたり、描画線の補正や、触覚的なガイドにより描き方を学ぶことが可能になる。ペングリップ型デバイスは、複数台の振動アクチュエータが配置されており、それぞれの振動を制御し組み合わせることで、多方向の牽引力を提示することができる。本装置はペングリップ型であるため、様々な筆記用具に装着することができ、持ち運び可能であるため、場所の制限なく使用できる。またペンや筆に加え、ペン先の位置を認識することのできるデジタルペンやスタイラス入力を用いることで、インタラクティブな機能を持たせることができる。

5.4.2 動作原理

本研究では、リニア方向に駆動する振動アクチュエータ (Haptuator, Tactile Labs Inc.[79]) の加速度を非対称にすることで多方向の牽引力を発生させる。このアクチュエータはコイルの中に磁石が内蔵されており、コイルに電流を流すと磁石が一定方向に移動し加速度が発生する。使用する駆動波形は、Traxion と同様にデューティ比 2:6 の 125Hz のノコギリ波を用いる。また駆

動に使用した電圧は5Vである。これにより、各振動アクチュエータは一軸上の任意の方向に加速度を発生させることができる。発生した加速度は、ペン先に伝わり、一定間隔で地面を反発するような動きとなり移動する。

本研究では、この振動アクチュエータを4台使用し、2軸に配置することで2次元方向の加速度を発生させる。図5.25のように垂直方向と水平方向に2台ずつ配置した。デバイスの大きさは $78 \times 54 \times 31\text{mm}$ 、重さは67gである。原理上、水平、垂直方向1台ずつでも牽引力は発生できるが、今回使用したアクチュエータでは、ユーザが牽引力を知覚するには力が不足したため4台配置した。また振動によるペンの移動はペンの角度やデバイスの重心に影響する。そのためペンを指で摘む部分をデバイスの重心となるように、アクチュエータを配置する必要がある。重心がずれている場合、提示した牽引方向と異なる方向にペンが移動する場合がある。またデバイス底部に支えを配置してペンの角度を固定することで、ユーザが任意方向の牽引力を識別しやすくなる。ペンを常に水平にすることに慣れることで、支えが無い状態でも正確に牽引方向を識別できる。

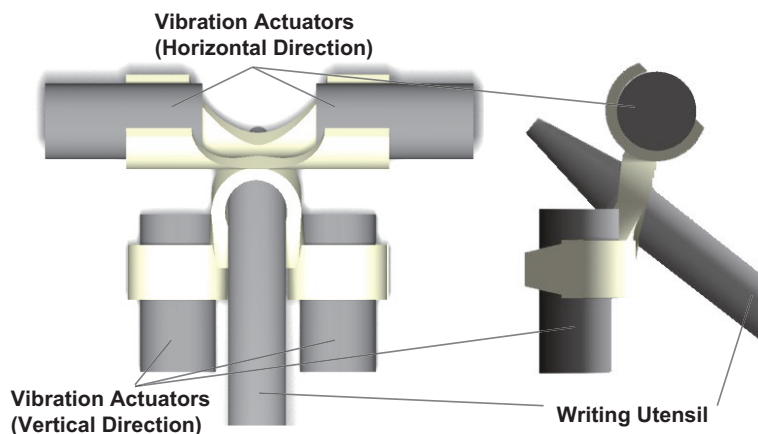


図 5.25: デバイス設計

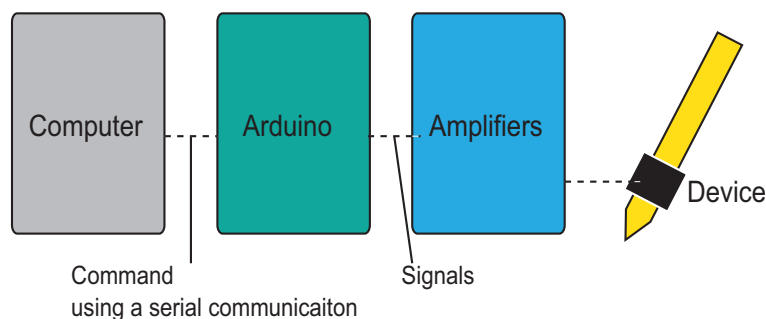


図 5.26: システム構成

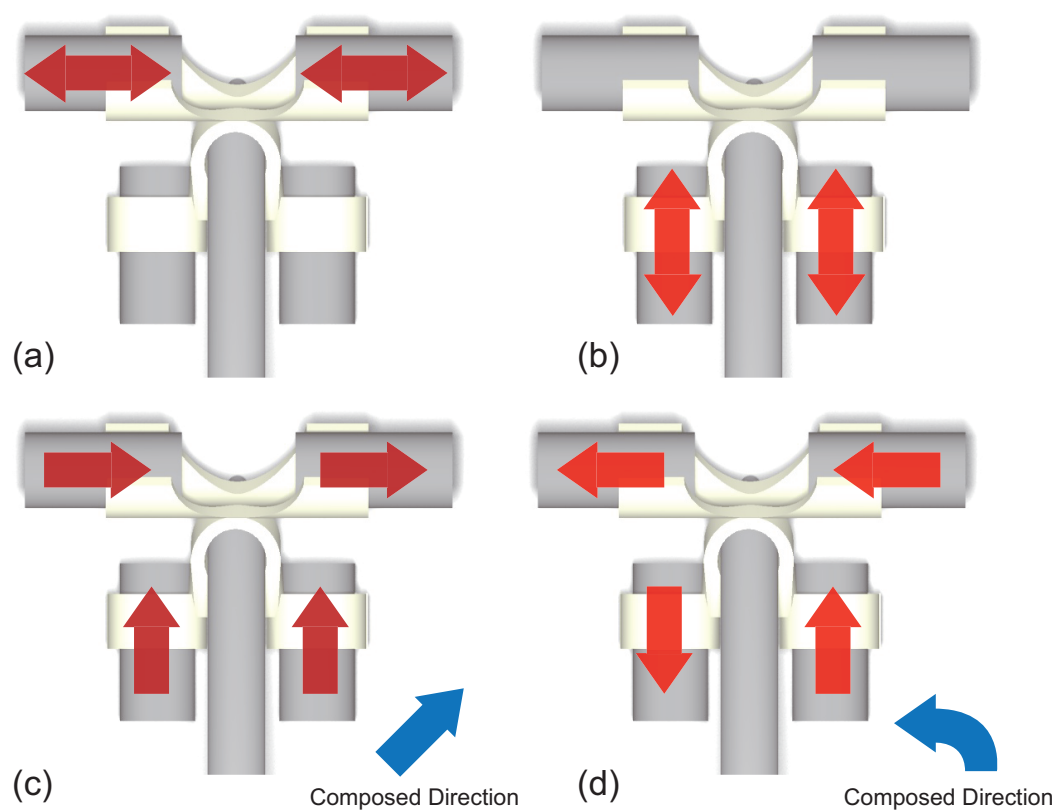


図 5.27: 多方向牽引力制御

5.4.3 システム構成

本システムは振動アクチュエータ、マイクロコンピュータ (Arduino)、アンプ、コンピュータで構成される (図 5.26)。まずシリアル通信を用いてコンピュータから、提示方向と提示時間からなるデータを元に、Arduino に指令を送る。

受け取った提示方向の指令を元に Arduino がアクチュエータに駆動波形を発生させる。信号を増幅するためにオーディオ用アンプ (MAX98306) を使用した。任意の方向の牽引力は、4 台のアクチュエータの牽引方向を組み合わせで提示する。水平方向の提示はデバイス前方のアクチュエータの牽引方向を切り替え (図 5.27a)、垂直方向はデバイス後方のアクチュエータを切り替える (図 5.27 b)。また斜め方向は 4 台全ての牽引方向を組み合わせで提示し (図 5.27 c)、ユーザから見て右方向を 0 度して計 45 度ごと 8 方向の切り替える。またペンを回転させるには、後方のアクチュエータ 2 台それぞれを異なる牽引方向で提示する (図 5.27 d)。本研究ではアクチュエータの力が少ないため提示可能な方向を 8 方向と設定したが、力の強いアクチュエータを使用することで角度の解像度を上げられる可能性がある。また本実装では、アクチュエータへの電源を供給するためにケーブルを使用するが、バッテリーを内蔵することも可能である。その際は先述のように重心が持ち手位置になるようにバッテリーやアクチュエータを配置する必要がある。

5.4.4 システム評価

ペンと紙を用いた二次元牽引力提示

本デバイスを用いて、二次元の任意方向に牽引力が提示できるか評価実験を行い検証した。被験者は 10 名の右利きの大学生である。被験者にアクチュエータを配置したサインペンをデバイスの重心を人差し指と親指で把持してもらい、振動を加えペンが移動させる。デバイス底部の支えは紙につけた状態で軽く把持した状態とする。アクチュエータの駆動時間は、描画線がある程度の長さとなるように 3200ms とした。提示角度はユーザから見て右方向を 0 度として 45 度ごとの 8 方向で、それぞれ 5 回、計 40 試行を行った。また音による影響を遮断するためホワイトノイズを聞きながら行った。

図 5.28 は実験結果である。提示角度と実際の描画線との角度の誤差平均は、32.5 度であった。0 度や 45 度などユーザから見て右上方向が識別しにくい結果となったが、概ねの方向の違いを知覚していることが分かる。被験者のインタビューから、ペンの持ち方や力の入れ具合によって感じやすさが変わるという意見があった。特に利き手と逆の手でペンを把持した場合、方向が分かりにくくなるという被験者が数名いた。力の入れ具合を調整しやすい利き手の方が、振動による誘導に適している可能性がある。

またペン先を紙に付けていない状態でも誘導できる場合、一筆書きしか描画できない問題を解消することができる。そのためペン先を紙につけずデバイスを空中で把持した際、被験者は方向の違いを知覚できるか調査した。前実験と同じ 10 名にアクチュエータを配置したペンを空中で把持してもらい、45 度ごとの 8 方向、各 5 回ずつ方向を提示し、牽引された角度を口頭で述べても

らった。また被験者にはアイマスクとホワイトノイズを聞かせながら実験を行った。実験結果は図5.29である。提示角度と実際にユーザが感じた方向の角度との誤差の平均は65度であり、紙にペン先を置いた実験と比べ認識率は低下した。被験者のインタビューによると、空中でデバイスを把持した時よりも、紙に乗せて動かした方が方向を知覚しやすいという意見が多くあった。空中でも方向が知覚可能であると、一筆書きしか描画できないという制限を解消できるため、力をより強いアクチュエータを配置するなど改善策を模索したい。

回転力覚の提示

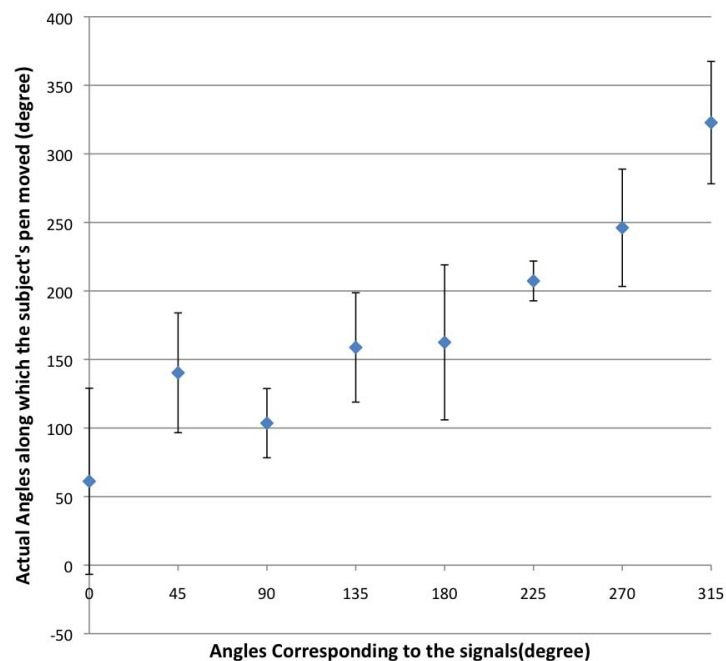


図 5.28: ペンと紙を用いた 2 次元方向牽引力提示の実験結果

また垂直方向の 2 台のアクチュエータの牽引力方向を逆方向にすることで、回転力覚を提示できるか調査した。被験者は 4.1 の実験参加者の内の 5 名で、右回転と左回転をランダムに 5 回ずつ提示し、正答率を調査した。提示時間は 3200ms であり、前実験と同様の持ち方で、紙にペン先を置いた状態でペンを回転させて、口頭で回転方向を答えてもらった。実験の結果、88 %という高い正答率であった。ユーザにペンの回転を提示できることは、単純な一方向の誘導だけではなく、複雑な誘導方法に繋がる可能性がある。

牽引力の大きさ

本デバイスの牽引力の大きさを調査した。本デバイスをサインペンに装着し、ペンをデジタルばね秤と紐で繋ぎ、振動による移動時の牽引力の大きさを計測した。提示時間は 3200ms であり、

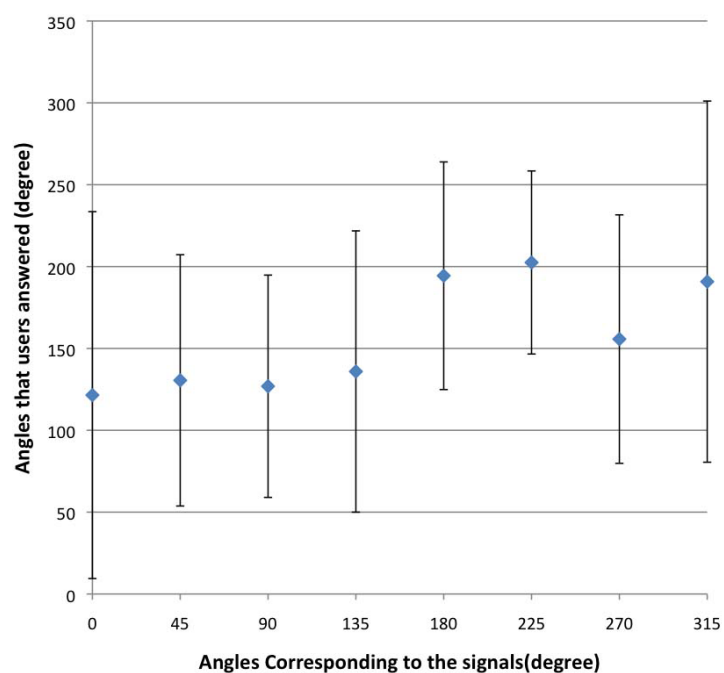


図 5.29: デバイスを空中で把持した時の 2 次元方向牽引力提示の実験結果

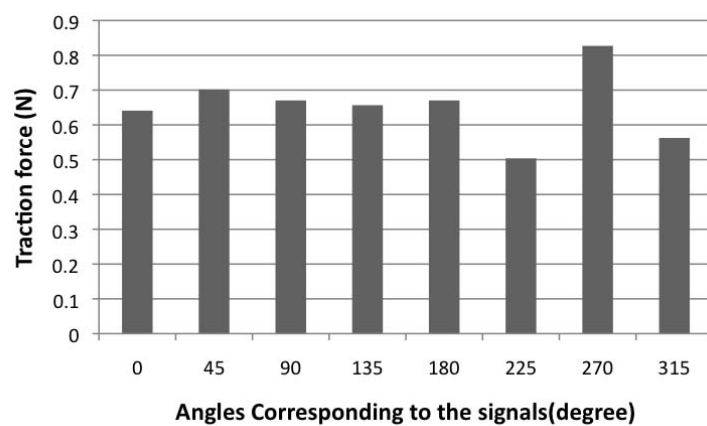


図 5.30: 牽引力の大きさの調査実験結果

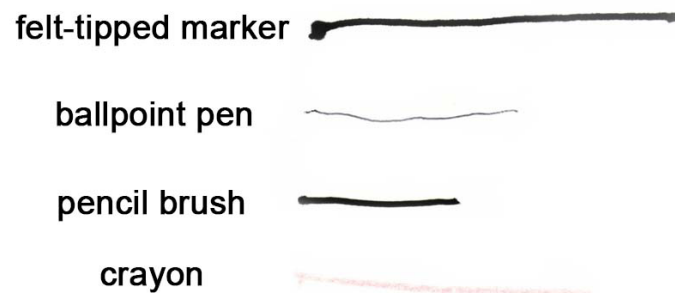


図 5.31: 筆記用具の違いによる描画線の長さ

前実験と同様の持ち方で、紙にペン先を付けた状態でペンを移動させ計測した。8方向各5回ずつ計測し、各平均を表したのが図 5.30 である。約 0.5N~0.8N と大きな変化は見られなかった。牽引力の大きさは、アクチュエータの性能に影響するため、より強い加速度を発生できるアクチュエータを使用することで牽引力を上げることができると考えられる。

筆記用具の違いによる移動量の差

また装着する筆記用具を変えた際に、描画線の長さが変化するか調査した。使用した筆記用具はサインペン、ボールペン、筆ペン、クレヨンである。それぞれ 3200ms の提示時間で、前方向に移動させた結果が図 5.31 である。筆記用具の先端が、摩擦係数の高い素材や、極端に細い場合は、振動が伝わりにくく移動距離が短い傾向がある。

5.4.5 考察

実験の結果、実験参加者は、空中でペンを把持した状態での方向の識別に比べ、紙にペン先を置いてペンを振動させ移動させた方が、牽引力方向の違いを識別していた。一部利き手により知覚しづらい角度はあるものの、多方向の牽引力を提示してユーザの描画を緩やかに補助できると考えられる。一方で、空中でデバイスを把持した時に方向の違いを識別することは難しく、一筆書きしか描画できないという制限はある。現状の解決策として、プロジェクタなどを用いて、次に書き始める場所を紙に投影し、視覚的なガイドとして誘導することが考えられる。

また提示角度と実際の描画線の角度に多少の誤差があるため、正確な絵を描くことは現在のシステムでは難しい。ペン先の位置を認識することのできるデジタルペンなどを用いることで、システムがペン先を正しい位置に補正することで正確な絵に近づけることが可能であると考えられる。また現在のシステムでは、牽引力を上げるために4台のアクチュエータを使用している。加速度の強い振動アクチュエータを使用することで、少ないアクチュエータで高い牽引力を出力できるが、アクチュエータは大型化する可能性がある。一方で本システムは構造が単純であるため、小型化が容易である。デバイスの小型化と牽引力を上げることはトレードオフの関係であるとい

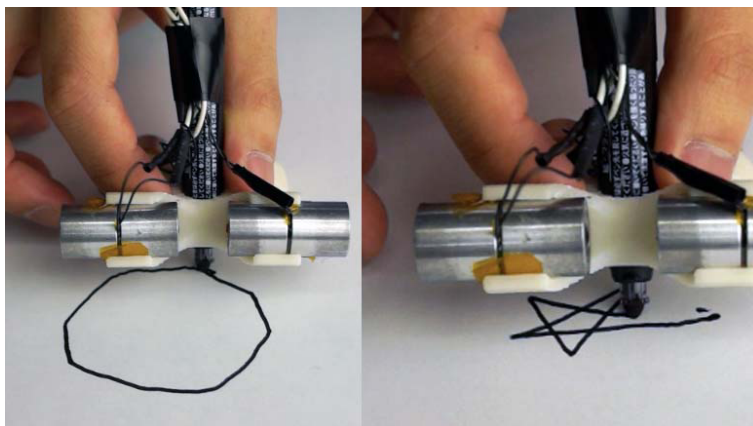


図 5.32: 円や星などの入力データの描画

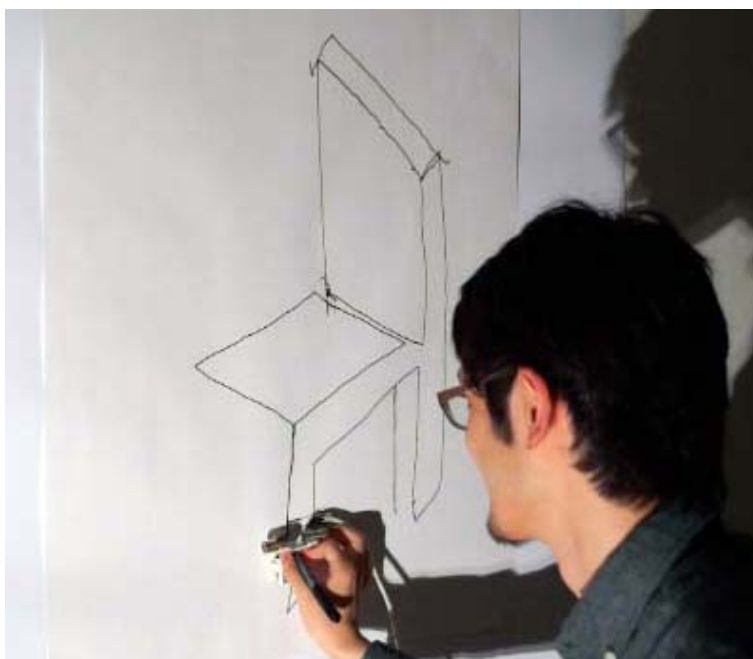


図 5.33: 大きな紙に描画する様子

える。また現在のシステムの提示可能な角度は 45 度ごとの 8 方向である。提示角度の解像度を上げるには、水平方向と垂直方向のアクチュエータに出力する電圧の配分を制御することによって、任意の角度の振動を合成する方法が考えられる。その際には、現在のデバイスより牽引力の大きいアクチュエータを使用する必要がある。

5.4.6 応用

本システムを用いることで、描画スキルの向上や新たな表現への応用例として、半自動的に図形を描画する例や通信機能、スタイラスを用いた触覚提示などについて述べる。

入力データの描画

予めコンピュータに入力したデータを半自動的に描画することができる。ペンなどをペングリップ型デバイスに装着し、紙に置くことで、移動方向が記録された図形データを元に振動を発生させて半自動的に絵を描画する。図 5.32 は実際に図形を描画する様子である。予めコンピュータに入力している図形データを元にした提示方向と提示時間のデータから、アクチュエータを制御するマイクロコンピュータに提示方向を出力し、任意の図形を描画する。ユーザは牽引力に少し抵抗することで、コンピュータの描画中に手書き感などを足してアレンジを加える事もできる。これまで自動的に紙に絵を描くということは先行研究でも可能であったが、本研究では通常のペンに手を添える形で体験することができ、場所に制約が無いため大きな紙上や、紙を空中で把持した状態でも描画することができる（図 5.33）。壁などの垂直面での描画は重力の影響を受ける可能性があるため、床などの水平面の方が誘導には適している。垂直面でユーザの描画を誘導できるか、今後の調査によって明らかにしたい。

描画線の補正

ユーザが直線を描画する時に、ペン先が描画可能な領域から外れた場合、元の領域内へペンに戻すことで緩やかに補正を行う。図 5.34 は水平方向に約 1cm の描画可能領域を設定し、その上でデジタルペンを用いて線を描画した際、領域から外れないようにペン先を領域内に戻して補正をした様子である。手を動かすことが不自由な人などが、補正しながら直線を描くことができるので、手を動かすきっかけとなるなどリハビリテーションの効果が期待される。

スタイラス入力による GUI 操作の指示

dePENd Ver.2 は通常の筆記用具以外にも装着することができる。例えばスタイラスなどに取り付けることで、タブレット画面上の情報とのインタラクティブな操作が可能になる。例えば、ペン先を認識して、画面上の次に押すべきボタンの方向に牽引力を発生させ、ペンが引っ張って誘導してくれたり（図 5.35）、画像のテキストを触覚的に感じることができる。

またデジタルペンと紙の組み合わせることで、署名などを書く場所までペンを誘導したり、ユーザが書いてはいけない場所にペンが触れると、反発力を提示するなどの機能が考えられる。

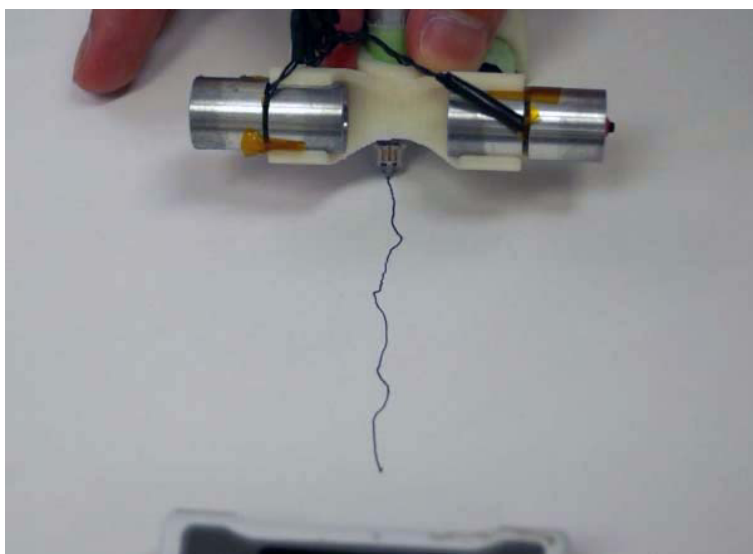


図 5.34: 描画線補正機能

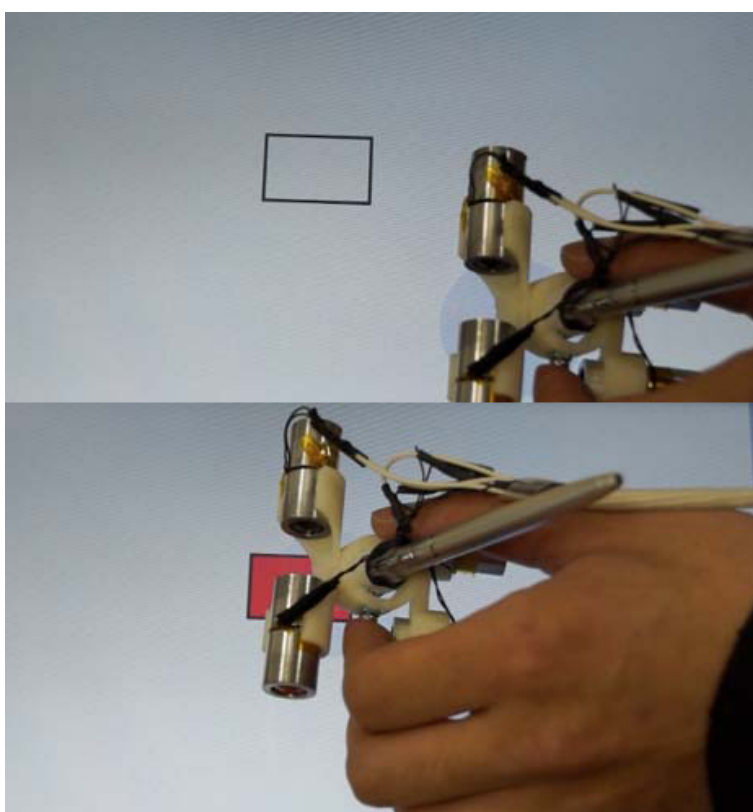


図 5.35: スタイルラス入力を用いた GUI 操作提示

5.5 ユーザ評価

5.5.1 実験概要

本ツールを用いて、機械による描画と手作業による描画を組み合わせながら創作する様子を観察するために、普段からものづくりを行っているユーザに体験してもらった。普段のものづくりに馴染みのある被験者のユーザ評価手法は、Zoran らの研究 [83] で用いられている手法である。

実験には、ある程度の絵を描画する必要があるため、磁石と電動アクチュエータ、通常のペンを用いた dePENd Ver.1 を用いた。ペン座標の入力にはデジタルペンを用い、機能の切り替えには 10 キーボードを用いた。機能として、予め入力した絵を描く機能、直線描画機能、コピー・アンド・ペースト機能の 3 つを用意した。予め入力した絵を描画する機能には、「椅子」、「カブトムシ」の 2 種類の図形を用意し、ユーザに選んでもらった。直線描画機能は、デジタルペンを用いて、任意の場所に 2 箇所、点を描画すると磁石がペンに近づき線を描画する。この機能は続けて線を引くことが可能である。コピー・アンド・ペースト機能は、キーを押しながら絵を描くことで、描いた絵を記録する。その後、任意の場所でペンを置き、ペーストのボタンを押すと、磁石が近づき記録した絵を描画する。ペーストは何度も行うことができる。また一度記録した絵を消すには、消去ボタンを押す必要がある。

被験者は、普段から紙や絵の具などのアナログな素材とドローイングソフトなどのデジタルな環境を組み合わせながらものづくりを行っている 20～27 才の男女 6 名である。体験前後に約 10 分のインタビューを行った。実験前は、普段のものづくりのプロセスや、アナログとデジタルを組み合わせた制作の方法などについてインタビューした。実験後には、描画した絵についての質問や、機械と手描きを組み合わせた描画について答えてもらった。またデジタルペンの動きの座標データ、モータの動きの座標データ、機能を割り当てたキーの切り替えのデータをログとして記録した。またユーザの描き方を記録するため映像を撮影した。それぞれの体験者の制作プロセスから本デバイスの有用性や制限について考察したい。

5.5.2 各被験者の体験の様子

S.H 氏の体験の様子

S.H 氏は、普段よりフィジカルな素材とデジタル技術を組み合わせたものづくりを行っており、特にシャボン玉を用いた作品を多く制作し、例えばシャボン玉を 1 ピクセルと見立てたディスプレイやシャボン玉を回路の一部とする装置などを開発している。

普段はメモ帳などに落書きをする感覚で絵を描画しており、具体的な絵を描画するよりは、線を書くこと自体を好む。そのため完成のイメージを予め描くスタイルではなく、描かれた線から発想しながら、次々と形を決めていく描き方であることが多い。具体的には、図 5.36 のように抽象的な絵や幾何学的な模様を描くことを好む。

ペンや紙などを用いた描画の他に、Illustrator などのドローイングソフトウェアを用いたデジ

タル環境での描画も行う。具体的には、線や図形を描画して、数度ずつずらしながらコピーすることで、図 5.37 のような幾何学的な模様を描画する。これは作者は、アナログな画材を使ったのと同様な落書きのような表現であると語っている。

一つの作品の完成を目指す制作スタイルではなく落書きのような表現が多いため、アナログ環境とデジタル環境でのドローイングを組み合わせる作品を制作することはあまり行わず、またどちらの作業も基本的に描画し終わった後は保存せずに消去したり捨てることが多い。

dePENd を用いたドローイングでは、図 5.38 や図 5.39 のような絵を描画した。図 5.38 では、直線モードを多用し、機械による直線を描画と、フリーハンドでの線を描画を交互に行っていた。直線モードで描画した線と線の間をフリーハンドで描画した線で埋めていく様子も見られた。機械による線に影響されて、フリーハンドの線が曲がった時があったと述べていた。

また図 5.39 では、予めインプットしておいたカブトムシの図形を 2〜3 本の色付きペンを用いて描画していた。このとき 2 本のペンの間の距離を変えながら描画することで、出来上がる線に変化をつけていった。また機械による描画中に線を揺らして角の部分にアレンジを加えたり、曲線にする場面も見られた。

彼女は斜めの線をフリーハンドで描くのは難しいため、今回の体験では直線描画機能を用いて斜めの線を描画する場面が見られ、この装置はフリーハンドと定規のちょうど中間に位置づけられるとコメントしていた。

また描画した線の枠内を、自動的に埋めて塗りつぶす機能や、機能を変更した際の音によるフィードバック、またペンごとに機能が割り当てられており、ペンを変更することで機能を変更する操作などが欲しかったと述べていた。

H.A 氏の体験の様子

H.A 氏は普段よりアナログとデジタル環境の両方を組み合わせてイラストを制作している (図 5.40)。彼女の創作プロセスは、まず下絵を鉛筆などで紙に描画し、それをトレーシングペーパーで透かしながら清書を行う。清書をしたトレーシングペーパーをスキャナでコンピュータに取り込み、Photoshop を用いて彩色を行う。一筆で描画するというよりは試行錯誤しながら完成に近づけていく制作スタイルである。トレーシングペーパーを用いて何度も清書したり、彩色するためにソフトウェアを用いるのは試行錯誤のためであると述べている。一方で絵の題材は予め決まることが多く、試行錯誤するのは線の強弱や色味の調整が多い。

描き方は、最終的なアウトプットのメディアに応じて使い分けている。例えば最終的なアウトプットが画像などのデータである場合は、色塗りは Photoshop を用いる。一方で最終的なアウトプットが紙媒体である場合は、彩色は手塗りでやりたい。それは絵の具の色がかすれるような、紙ならではの变化を出していきたいからであると述べている。

dePENd を用いて描画した絵は図 5.41 のような作品である。両作品共に、最後に手で塗ることを想定しながら線を描画していた。まず 1 枚目では、楽譜のように直線機能を選択して直線を複数本描画していた。その後、コピー機能を用いて円を複数個描画する。円の配置後に、すべての

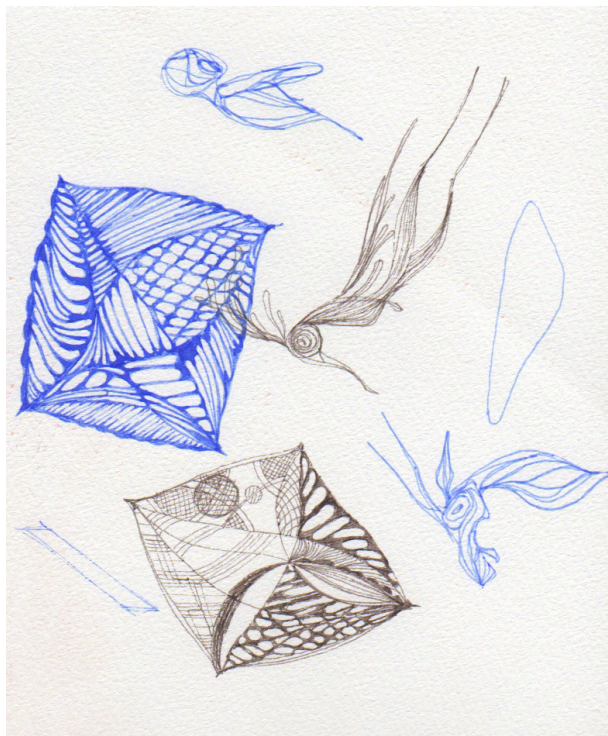


図 5.36: S.H 氏の作品 (1)

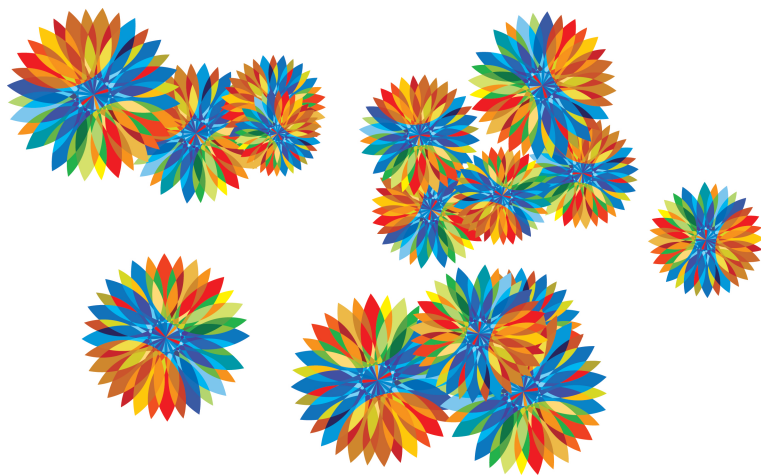


図 5.37: S.H 氏の作品 (2)

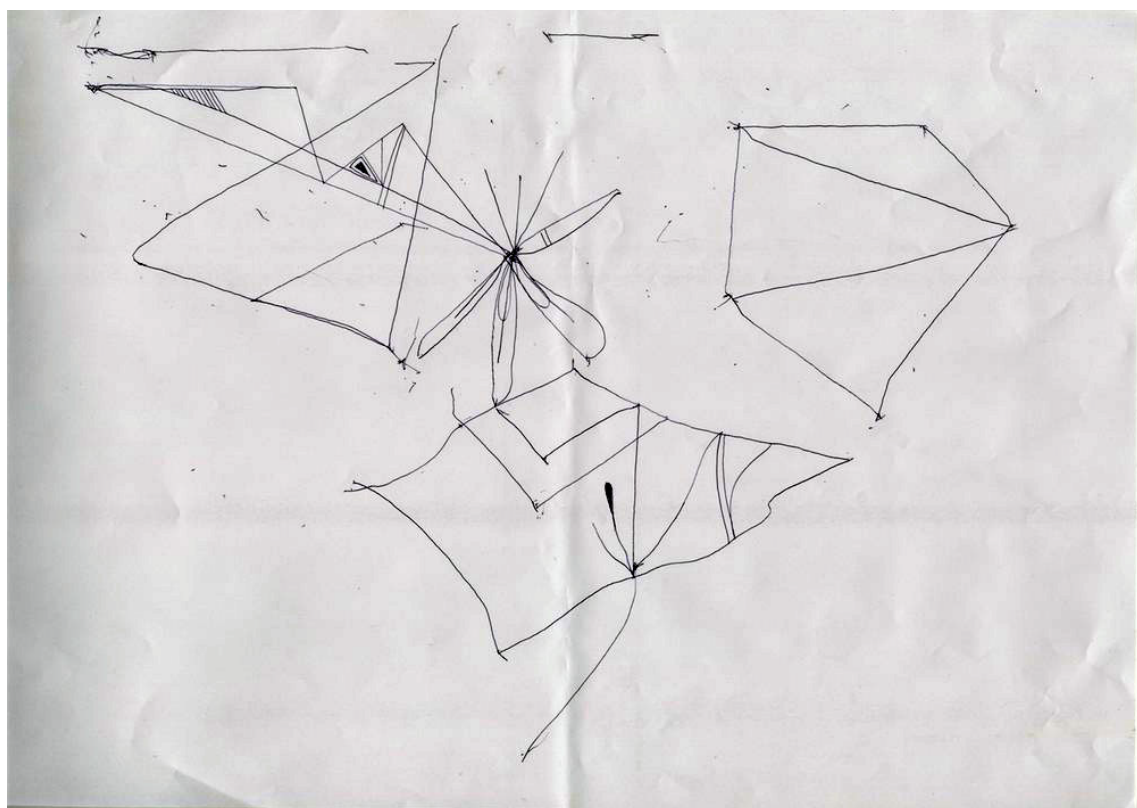


図 5.38: S.H 氏の dePENd を用いた作品 (1)

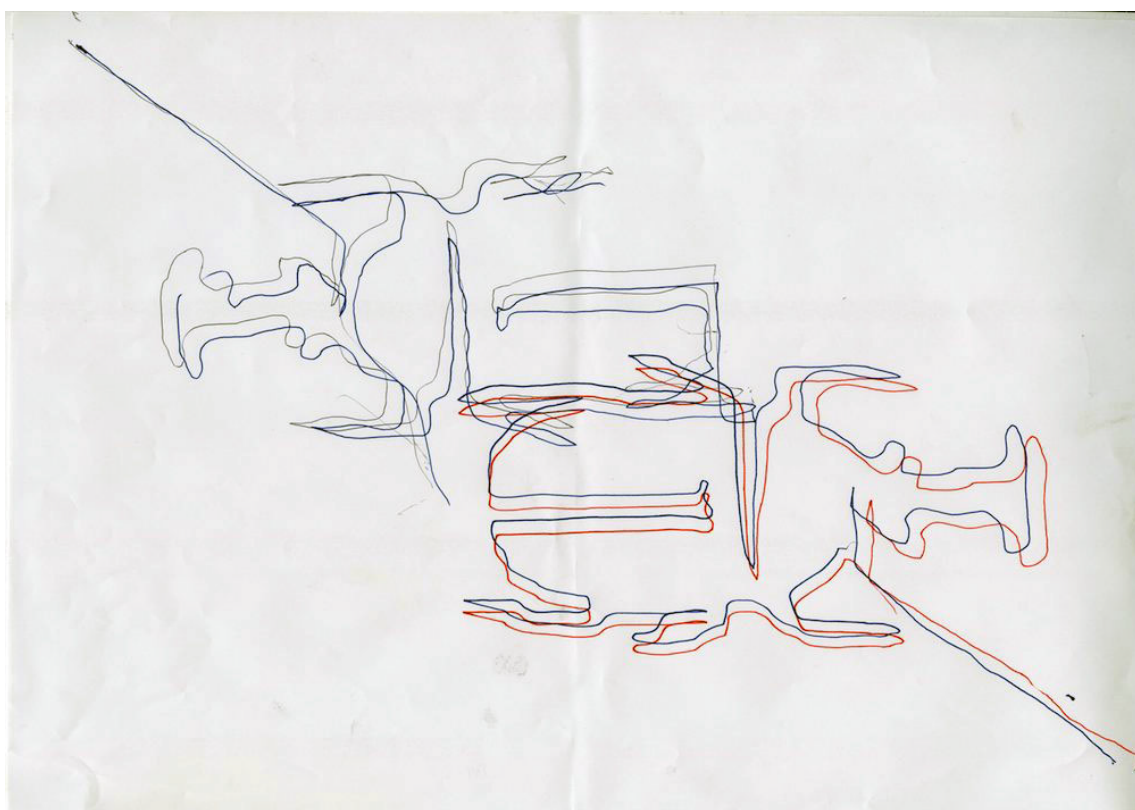


図 5.39: S.H 氏の dePENd を用いた作品 (2)

円を通るように直線機能を用いて線を描画していた。そうすることで線に囲まれた領域が複数個でき、その枠内を最後に色付きマーカーで手塗りしていた。

また2枚目は予めインプットされたカブトムシの図形を描画していた(図5.42)。色を玉虫色のような金色に変更して、角の部分をぎざぎざにするなどのアレンジを加えていた。またカブトムシの印象から、横に三角形の抽象的な絵をコピー機能と直線機能を用いて描画していた。

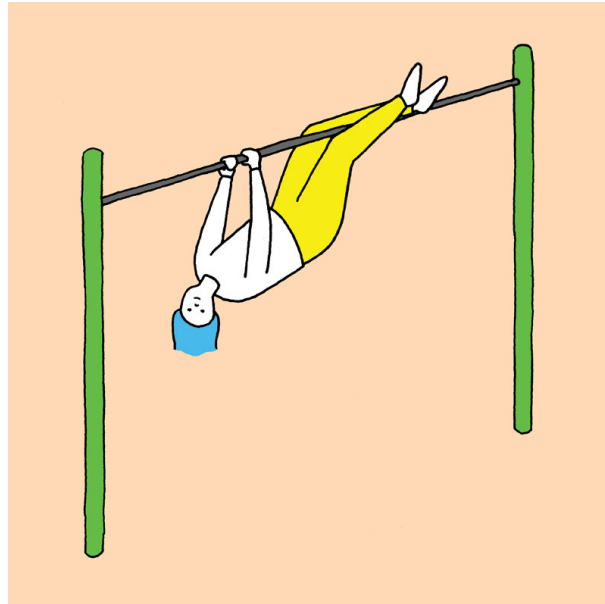


図 5.40: H.A 氏の作品

普段のフリーハンドによる描画では、幾何学的な図形を手描きで描画したり複製するのは難しかったため、今回の体験ではやってみたくないとコメントしている。また普段はトレーシングペーパーを用いて下絵を複製しているが、本システムのコピー機能はそのような下絵の複製に便利であると述べていた。

一方で直線機能によって直線を書き始める時など、ペンの位置に磁石が移動するまでに時間がかかるため、磁石の速度を上げるか、あるいはペンの近くで磁石が待機するようにして欲しかったと述べていた。また本装置の機能とは異なるが、描き方に応じて線の太さが変わるような特殊なペンを使って絵を描きたいとコメントしていた。

A.O 氏の体験の様子

A.O 氏は主にライブペインティングの方法によって即興的に作品を制作している(図5.43)。絵の具やマーカーを用いて、壁やガラス面に絵を書いていく。制作プロセスとしては、下絵を描かずに構図のみを事前に決めて、細かい絵や模様などは即興的に描いていく。また描画時に鑑賞者が伴うために、見る人を意識する描き方を行う。例えば体を寄せながら描いている絵がきちんと見えるようにしたり、あえて描くことが難しい真ん中から描き始め、鑑賞者を驚かせるなどのパ

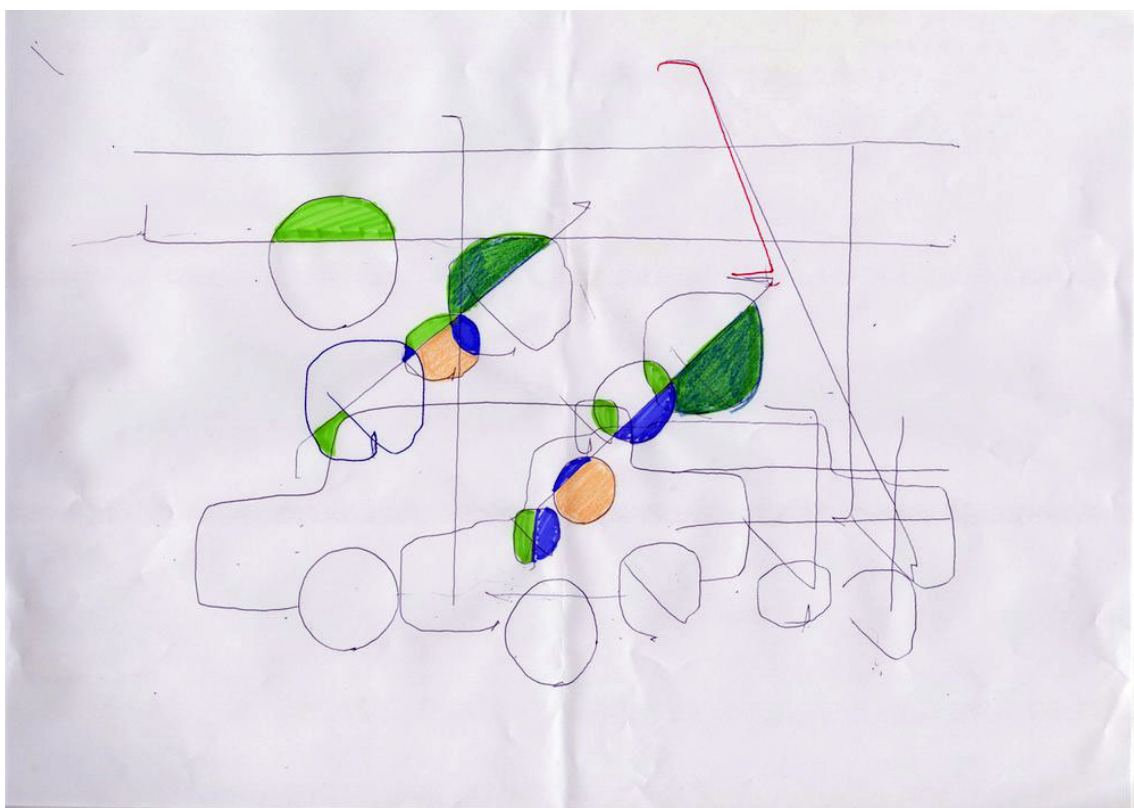


図 5.41: H.A 氏の dePENd を用いた作品 (1)

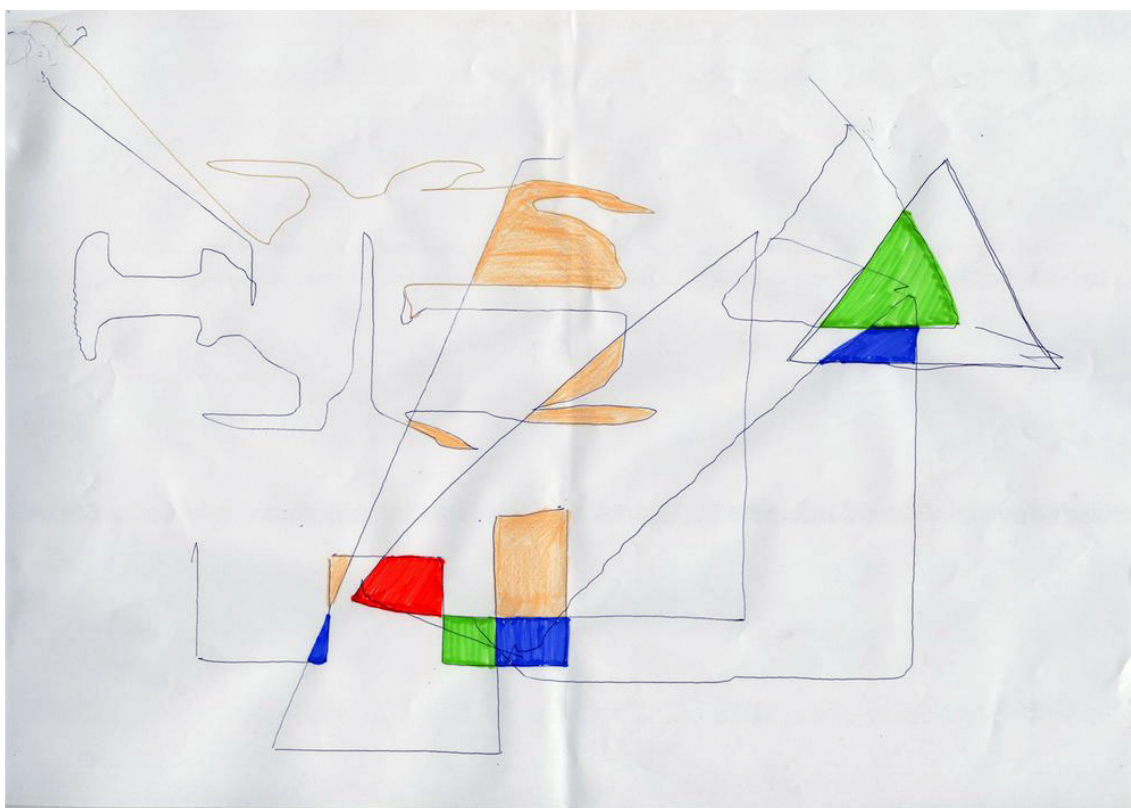


図 5.42: H.A 氏の dePENd を用いた作品 (2)

パフォーマンスを行う。

またアナログの画材とデジタル環境を組み合わせながら絵を描くことも多い。例えば Photoshop などに含まれているブラシツールを用いて背景を試行錯誤しながら描画し、事前にライブペインティング時に使用する背景を作る。完成した画像を大きなキャンバスに印刷し、その上に筆で線に強弱を付けながら即興的に絵を書いていくこともある。デジタル環境のみでは、何度もやり直しが出来てしまうので、一回で失敗なく描くことがパフォーマンスの一つであるライブペインティングでは面白さに欠けてしまう。失敗という制限が付き物であるアナログな画材を取り入れることによって、鑑賞者に驚きを与えるとコメントしていた。

A.O 氏は dePENd を用いて図 5.44 のような作品を制作した。まずコピーアンドペースト機能を用いて花瓶をコピーしたり、予めインプットしていた椅子の図形を描画していた。その後、直線機能で窓を描画した後に、太陽や人、猫などは手描きで描画していた。その後、色付きのマーカーを用いて輪郭をなぞったり、模様を描画していた。

本システムを用いて描画した結果、機械による絵にフリーハンドの描画が影響されたと述べていた。例えば椅子の絵を機械が描画した後に、室内の絵にしようと決め、壁や窓などを描画し始めた。また普段の作風とは異なる絵になっていることに気づいたと述べていた。機械によって描画するため、人物の顔が SF 調になっていたり、幾何学的な模様を描くなど、機械の動きに手描きの影響される場面があった。それはプロッターなどを用いずに、自分の手で描画するため、そのような機械による影響があったのだと述べていた。

また絵の細部もコピーできれば、普段描いているような絵をコピーできるので便利であるという意見や、今回の体験は用いなかったが通信機能は感覚を共有できるため、遠隔地の人と共作するなどの描き方はライブペインティングによる制作でも使いたいという意見があった。



図 5.43: O.A 氏の作品

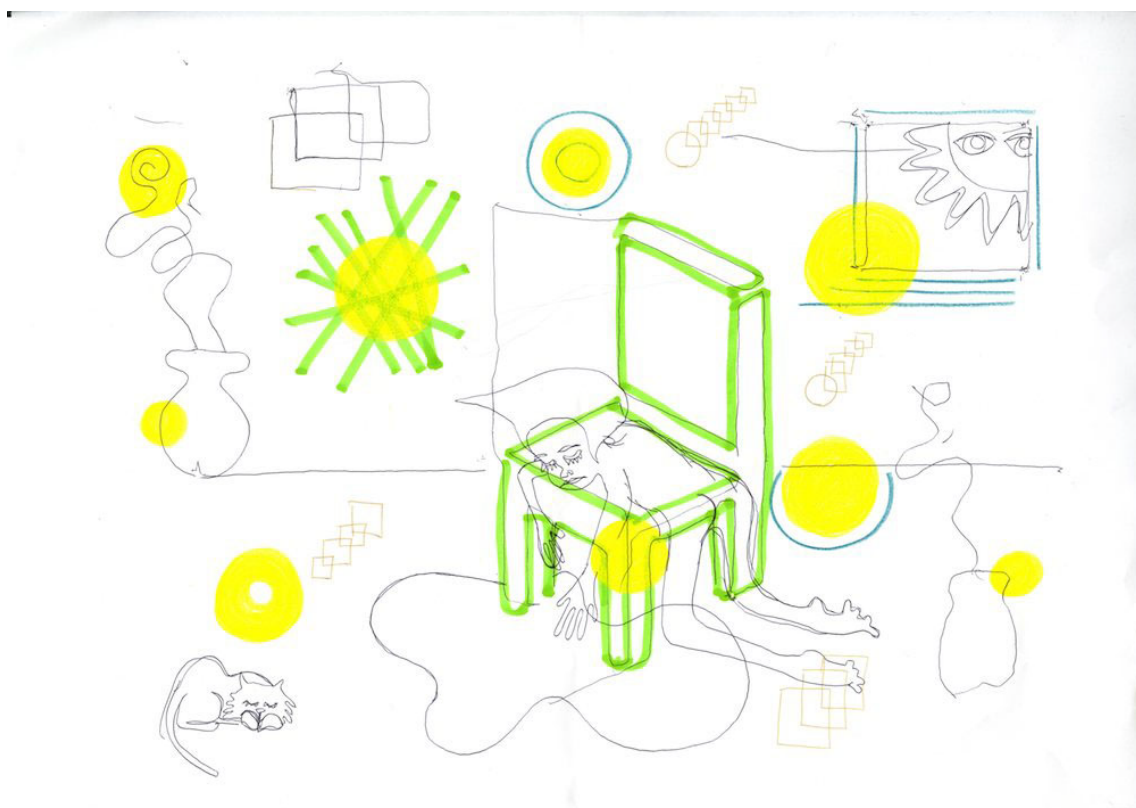


図 5.44: O.A 氏の dePENd を用いた作品

S.K 氏の体験の様子

S.K 氏は普段は触覚を軸にしたグラフィックやプロダクトのデザインを行っている（図 5.45）。例えば、水の質感を持ったフォントのデザインを行う際には、まず水の絵を何度も手描きでスケッチする。その後、トレース台印刷したフォントの画像、コピー用紙の順に置き、下の印刷したフォントをガイドとしながら水のような形を足しながらなぞっていくことで水の質感を持ったフォントを描く。その後、描画した絵をスキャンして、Illustrator でパスをなぞって完成である。

最終的なアウトプットごとに制作の手法は変えている。例えば、最終的なアウトプットが紙媒体の場合は、各工程ごとに実際に紙に印刷して、質感や色味を確認する必要がある。その場合、複数の種類の紙で印刷し、紙質の違いを確認しながら試行錯誤している。

dePENd を用いた描画体験では、図 5.46 のようなフォントをデザインしていた。まず ”1 ”と印刷された紙を用意し、白紙の下に置く。その後、コピーアンドペースト機能を選択し、下のフォントの絵をなぞりながらコピーする。紙の反対側にペーストすることで機械的な線になったり、線にずれが生じることでコピー元から変化したフォントが生成される。これを繰り返すことで手描きと機械によって変化を伴うフォントができた。

彼女は形のずれを伴うコピーアンドペースト機能が面白く、多用していた。また自らの手で描いた絵が変化する経験を伴いながらフォントを生成することは自分の意思が込められるような気がするため、プロッターのような機械を作ることと異なると述べていた。

一方で、コピー機能のキーを押しながら、絵を描くことが難しかったり、スイッチで機能を切り替えるより紙の上で選択できた方がいいと述べていた。



図 5.45: S.K 氏の作品

M.O 氏の体験の様子

M.O 氏は、イラストレーターで、植物や動物などをモチーフとした作品を制作している（図 5.47）。

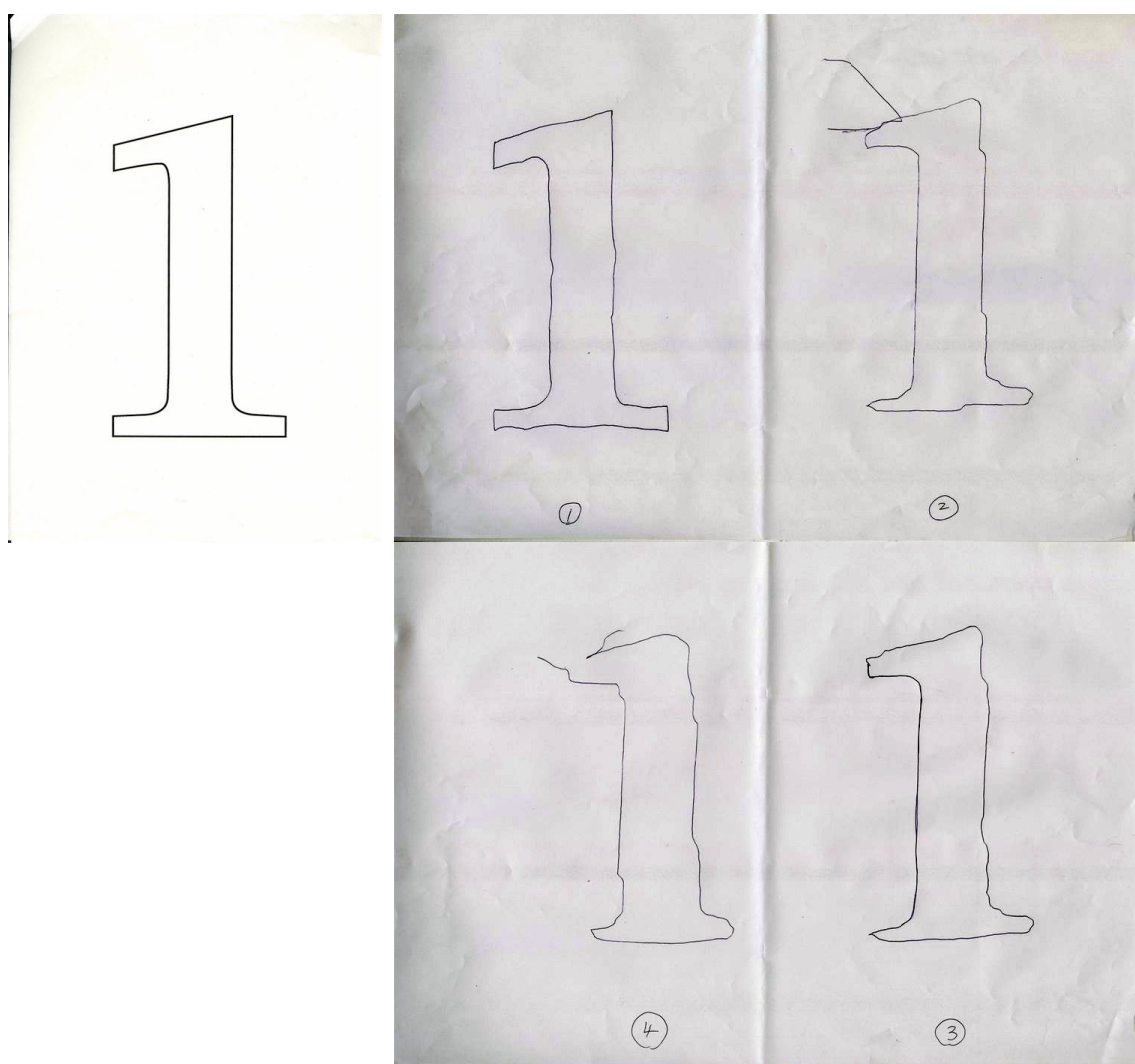


図 5.46: S.K 氏の dePENd を用いた作品

彼女の制作のスタイルは、まずスケッチ帳に描かれた落書きを見直し配置を考える。その後、細かい輪郭線を G ペンなどを用いて墨で清書したり、線の中を彩色する。細かい模様などは即興的に足していく。また壁紙などの素材を適切な大きさに切って貼り付けるなど、平面的な描き方だけではなく、立体的な素材を絵画に取り入れている。また手描きの絵に変化を取り入れるため、時間とともに変化する胡粉などの自然の顔料を取り入れる。

本デバイスを用いた描画では図 5.48 のような、リンゴの絵を描いていた。コピーアンドペースト機能を用いて、左側に書いた絵を右側に機械によってコピーしていた。種や葉脈などの使い回せる部分は、複数回ペーストしていたため、左右の絵で異なる部分がある。またペースト中は手の力を入れないようにしていた。最後に輪郭内をマーカーで色を塗ったり、細かい模様を足して完成させた。

機械の動きが予測できなかったり、磁石のぶれによって絵が変化するのが面白いと述べていた。

また大きな紙を移動させながら描画することで、スケールの大きな作品も作ってみたいとコメントしていた。また直線をコピーするなど、直線描画機能とコピーアンドペースト機能を同時に使ってみたいという意見もあった。



図 5.47: M.O 氏の作品

W.K 氏の体験の様子

W.K 氏は、紙媒体やウェブなどのグラフィックデザインを手がけている。また経年変化する素材を用いたグラフィックデザインの研究も行っている。

W.K 氏の制作のプロセスは、まずメモ帳に鉛筆などでスケッチする。具体的な設計のためというよりは、思考のために最初の作業は手描きのスケッチを好む。その後、Illustrator などのソフ

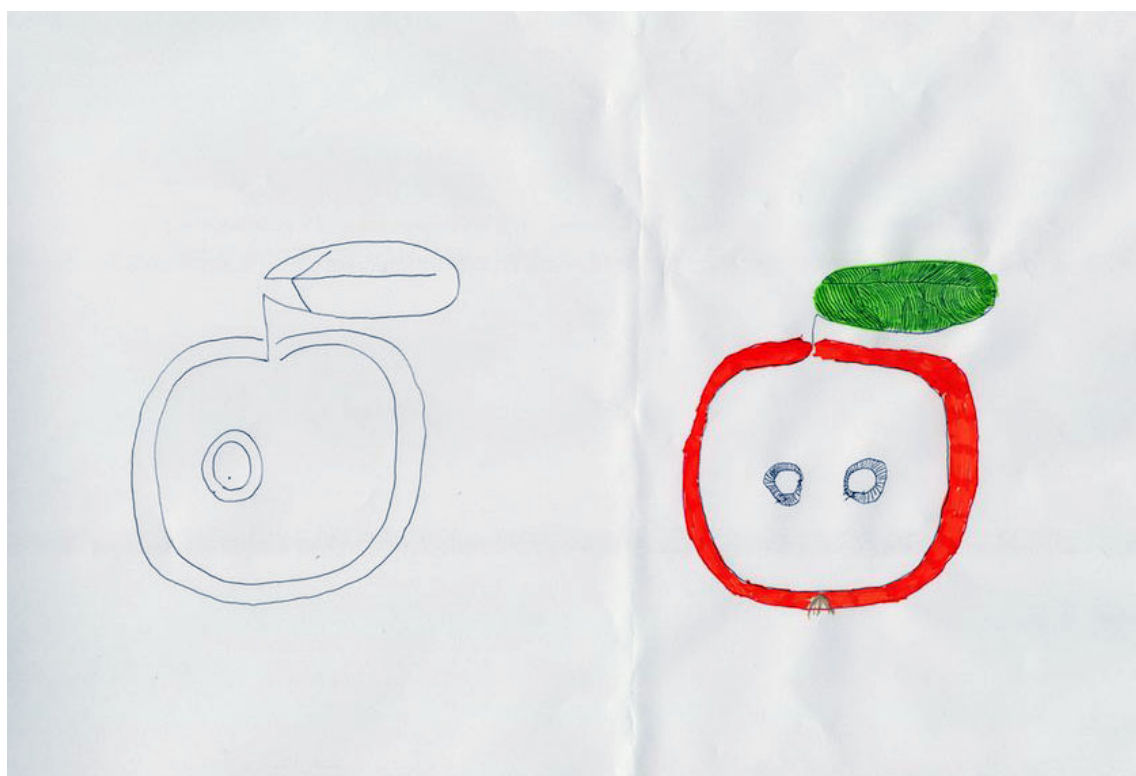


図 5.48: M.O 氏の dePENd を用いた作品

トウェアを用いて、画面上でデザインする。

最終的なアウトプットによって作業の仕方は異なる。紙媒体である場合は、何度も実際に紙に印刷して実寸で確認する。しかしウェブサイトのデザインの場合は、最後まで画面上で作業を行う。

dePENd を用いた制作では、図 5.50 のような絵を描画していた。描き始める前から、最終的に塗ることを想定していたため、線が交わる部分を多くするというルールを設定して描画していた。コピーアンドペースト機能を用いて、紙の左側に円を沢山描画する。その後、右側にペーストするが、ペーストは一筆書きで描画されるため、円と円の間が繋がりながら描画されていく。その後、交わる所を彩色していた。

コピーした際に少し形がずれることが、ノイズのような変化を生み出して良かったと述べていた。

一方で機能を切り替えるキー操作が難しく、覚えることが多かったと述べていた。キーの配置を機能毎に分けて配置するなど覚えやすくするか、紙に機能のアイコンが描画されていて、ペン先の叩くことで切り替わる方が良いとコメントしていた。



図 5.49: W.K 氏の作品

5.5.3 考察

本デバイスを用いた体験者の創作の様子から、デバイスの有用性や制限、機械と手描きを組み合わせる創作について考察する。

体験中に記録したペンの動き、モータの動きの座標、キーボード操作のデータから、体験時間とペン・モータの移動量の関係と、機能の切り替えについて定量的に示した。

数人のモータの移動とペンの移動を可視化した図が図 5.51、図 5.52 である。モータの動きとペンが磁石の範囲分ずれながら移動している様子がわかる。モータの動きとペンの動きの行き来を観察するために、時間軸上に表す。

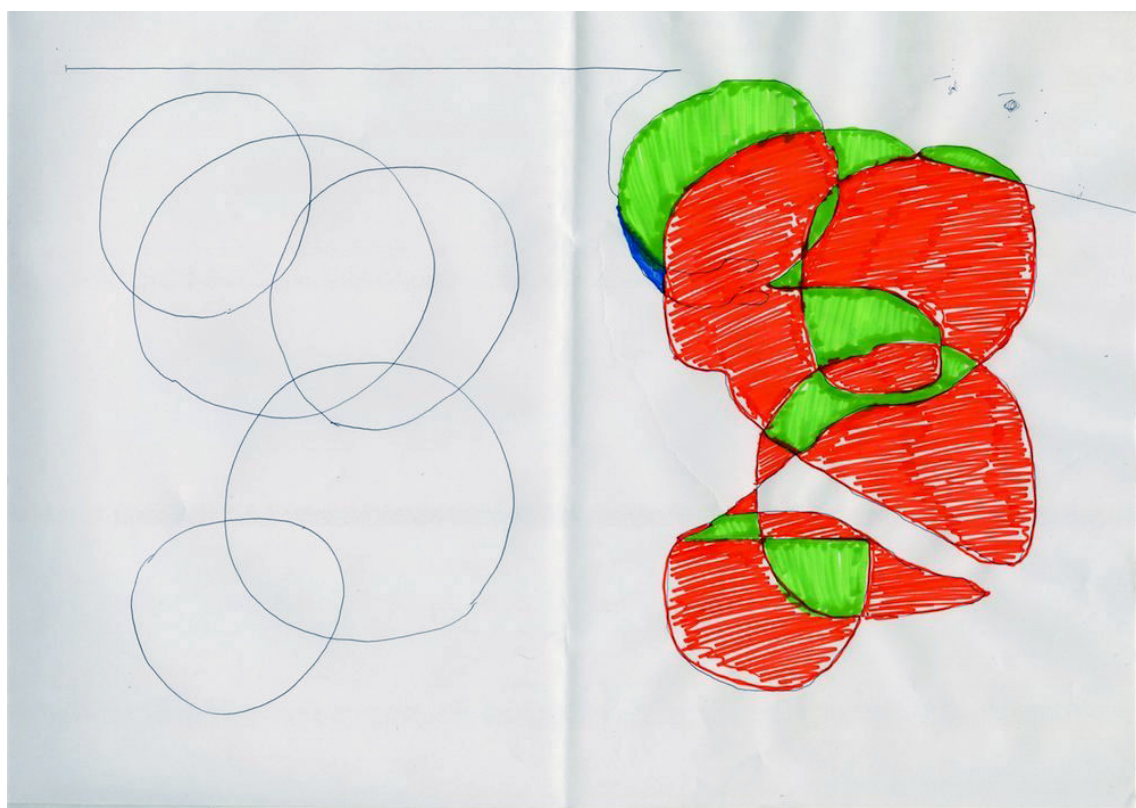


図 5.50: W.K 氏の dePENd を用いた作品

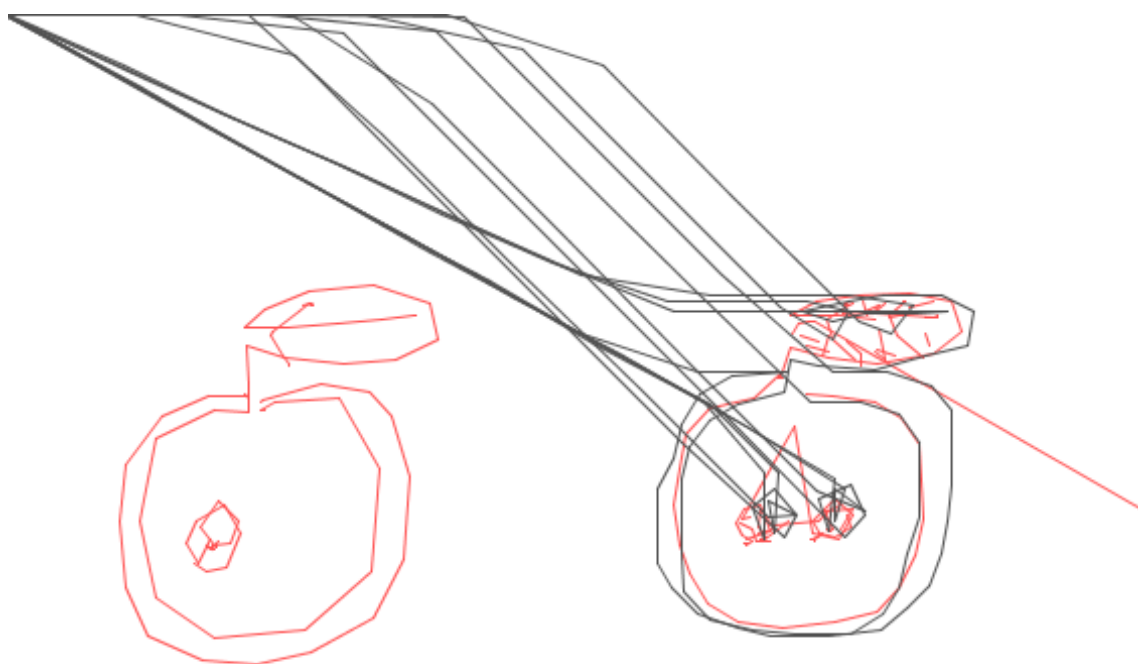


図 5.51: M.O 氏の体験時のペンとモータの動き

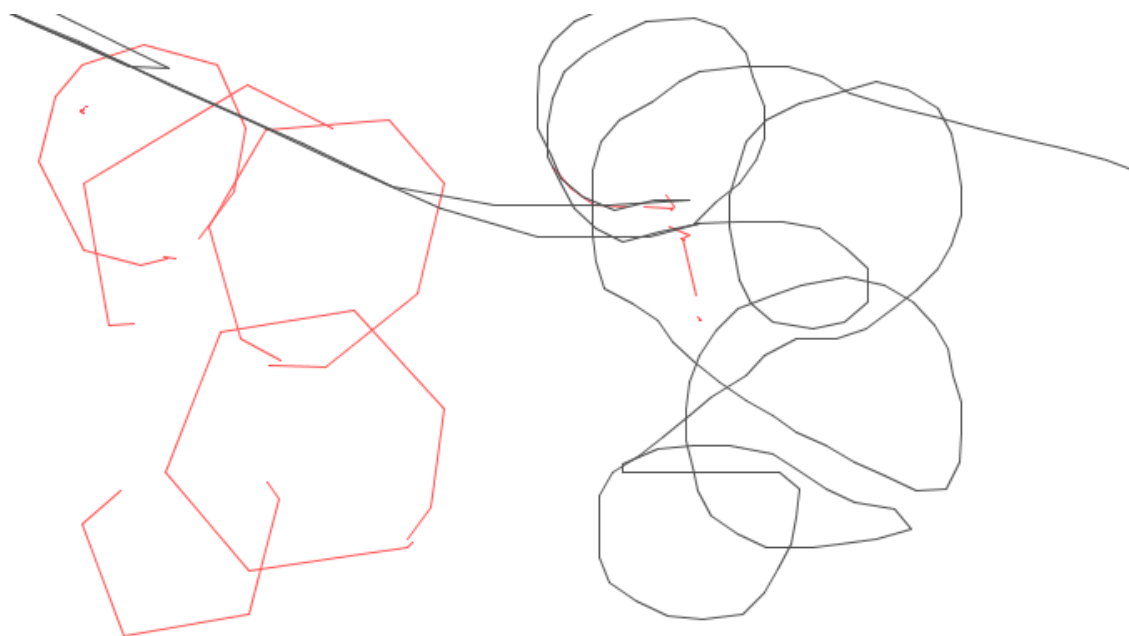


図 5.52: W.K 氏の体験時のペンとモータの動き

図 5.53 は S.H 氏の体験でのペンとモータの動き、図 5.54 は機能の切り替えを示している。図 5.53 の横軸は体験した時間を表し、縦軸の赤い縦棒はモータの移動量、青い縦棒はペンの移動量を表す。また上部の紫のバーはモータとペンが同時に移動するつまり機械による描画の時間を示し、橙色のバーはペンだけによる描画を示す。特徴的な場面については注釈を加えている。図 5.54 の横軸は体験時間、縦軸は機能のリストであり、キーボードの配置順に並んでいる。1 枚目を書き終えたのが開始から約 15 分ごろで、2 枚目を書き終えたのが約 30 分である。また 1 枚目では直線描画機能を多用し、2 枚目では予め入れていた絵を描画する機能を選択していた。1 枚目の描画では、フリーハンドで線を引くことと直線機能を組み合わせながら描画していた。2 枚目の描画では、ペンの動きの直後に、モータの動きが繰り返されている。これは予め入力した絵を描画する機能を選択し、一瞬デジタルペンが動くが、その後は色付きペンに切り替えて描画しているためである。

図 5.55 は H.A 氏の体験でのペンとモータの動き、図 5.56 は機能の切り替えを示している。1 枚目を書き終えたのが開始から約 25 分、2 枚目を書き終えたのが約 40 分であった。1 枚目、2 枚目共に全ての機能を組み合わせながら描く様子が見られた。特徴的だったのは、それぞれの絵を書き終わる約 2 分前まではデジタルペンを用いて線画を描画し、残りの時間で色付きマーカーなどを用いて、描画した線の枠内を色付けしていた。機械によって線が引かれた後に、手作業で彩色していた。

図 5.57 は A.O 氏の体験でのペンとモータの動き、図 5.58 は機能の切り替えを示している。開始から約 7 分半まで、コピーアンドペーストなどの機械による描画と手描きによる描画を繰り返している。その後、描画した線の枠内の色塗りを行ったため空白の時間が有るが、その後約 11 分からコピー機能を用いて四角形を複数個描画していた。これは機械を用いて絵の調整を行いたかったと述べていた。

図 5.59 は S.K 氏の体験でのペンとモータの動き、図 5.60 は機能の切り替えを示している。コピーアンドペースト機能を 2 回使い、約 8 分で変形したフォントを制作した。時間があれば、あと数回繰り返し、さらに変化させたいと述べていた。また彼女は直線機能や図描画機能は用いなかった。

図 5.61 は M.O 氏の体験でのペンとモータの動き、図 5.62 は機能の切り替えを示している。約 9 分で作品を完成させていた。コピーアンドペースト機能を合計 4 回使用し、左で描いた絵を右にコピーしながら絵を描いていた。約 3 分までは輪郭線のみ描画し、その後 2 分ほど色を塗った後に（色付きマーカーなどを用いたため動きの変化がない）、最後にまたコピーアンドペースト機能を用いて線の調整を行っていた。

図 5.63 は W.K 氏の体験でのペンとモータの動き、図 5.64 は機能の切り替えを示している。最初の約 1 分半で沢山の円をコピーしながら描画し、さらに約 3 分半までペースト機能を用いて紙の右側に描画していた。その後、約 7 分まで色付きマーカーで枠内を彩色していた。基本的にコピーアンドペースト機能のみを使用していた。

普段ものづくりを行っている被験者によるユーザテストの結果、本装置を用いて、ペンと紙に

よる手描きと機械による描画を繰り返し行き来しながら作品を制作する様子が見られた。被験者によって用いた機能や使い方が異なった。これは普段の手描きによる描き方によって使用する機能が異なると考えられる。例えば落書きのような表現を好む場合は直線機能、絵に変化を取り入れる場合はコピーアンドペースト機能を多用していた。

機械による描画だけではなく、手描きを使用していた例として、線画は装置を用いて描画し、彩色は手作業で行ったり、最後に細い模様を描画する様子が見られた。これは dePENd Ver.1 がボールペンのみ使用できるという制限や細かい描画が難しいという制限が影響している可能性がある。

また本システムはペンを完全に固定していないため、磁石の動きとペンの動きにずれが生じる。しかしユーザの多くは、この線のずれを利用した絵を描いていた。これは手描きと機械を組み合わせた特徴的な描画方法であると考えられる。

また今回のユーザテストでは、普段の絵とは異なる抽象的な絵を描画するユーザが多かった。これは機械の動きに影響されながら描画した、あるいは本装置が細かい絵を描くことが難しいため抽象的な絵になった可能性がある。

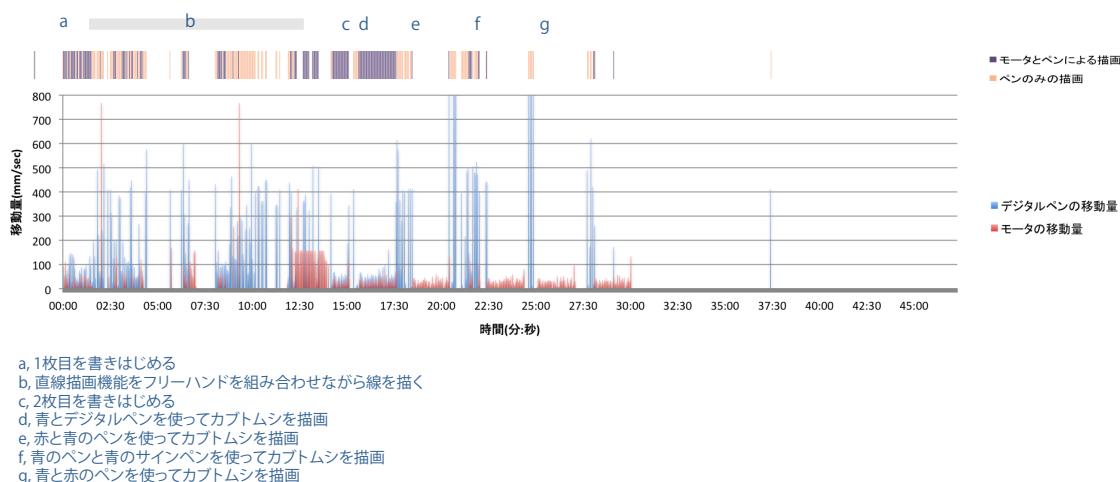


図 5.53: S.H 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係

5.6 まとめ

本章では、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 Ver.1 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ー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。また実際に普段ものづくりを行っている被験者を対照にしたユーザテストを行った結果、手描きと機械による描画を行き来しながら、普段の手描きによる描画の中で機械による補助を伴いながら作品を制作

第5章 手描きを拡張する描画システム dePENd

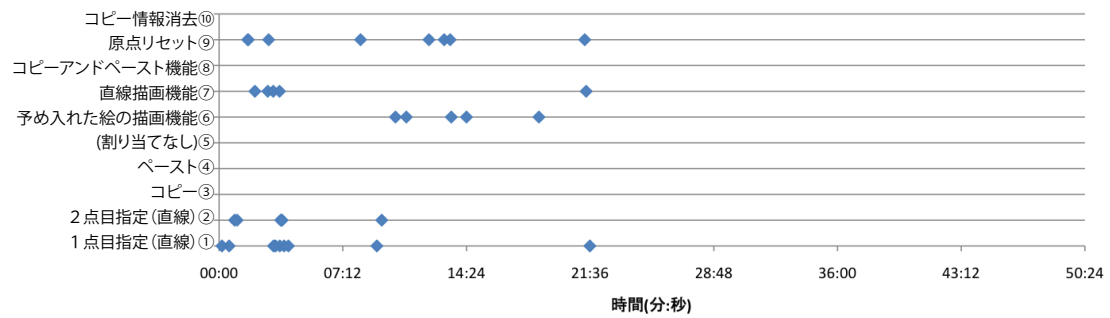


図 5.54: S.H 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係

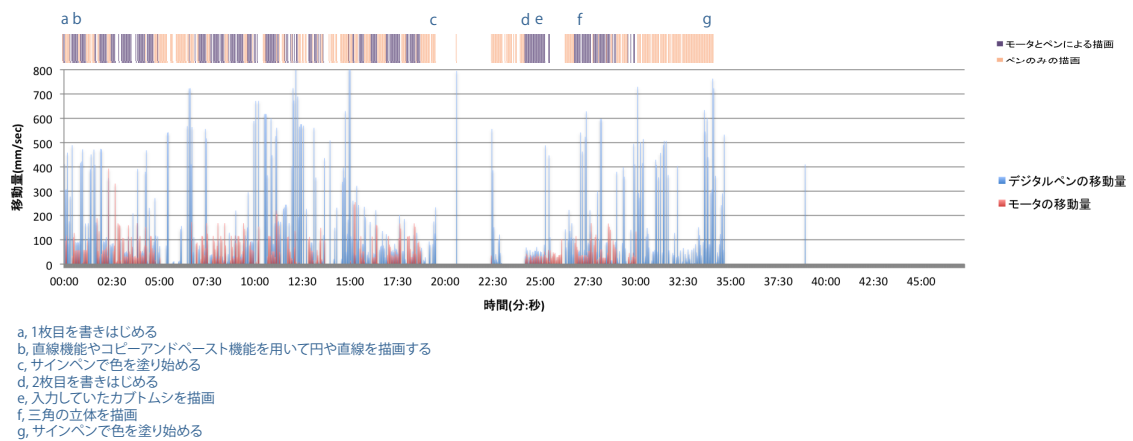


図 5.55: H.A 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係

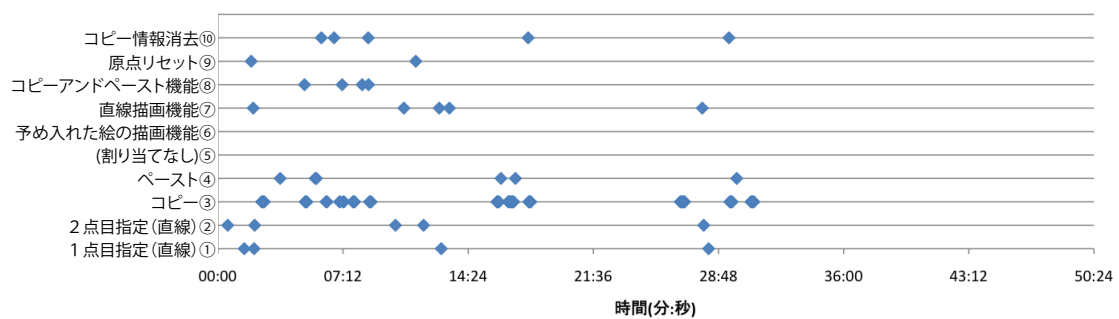


図 5.56: H.A 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係

第5章 手描きを拡張する描画システム dePENd

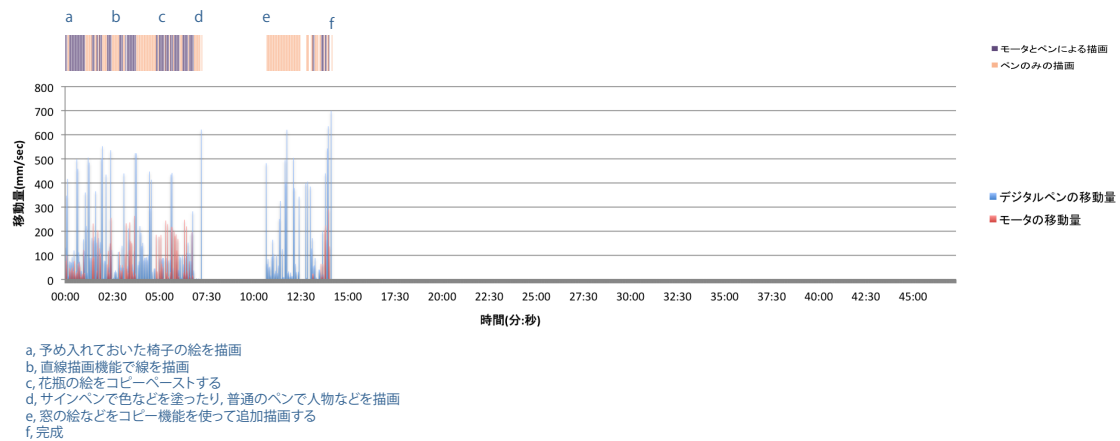


図 5.57: A.O 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係

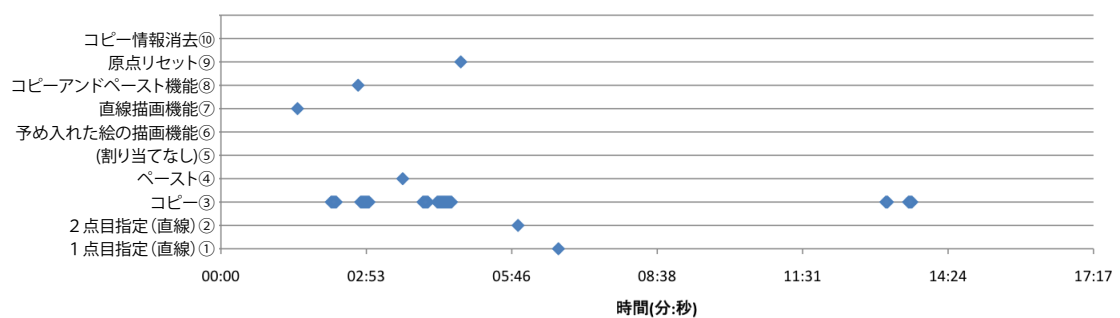


図 5.58: A.O 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係

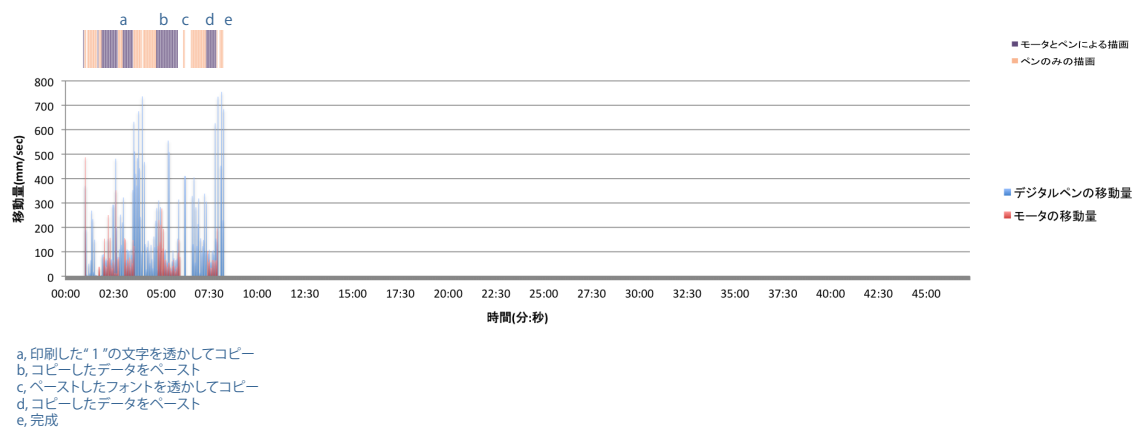


図 5.59: S.K 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係

第5章 手描きを拡張する描画システム dePENd

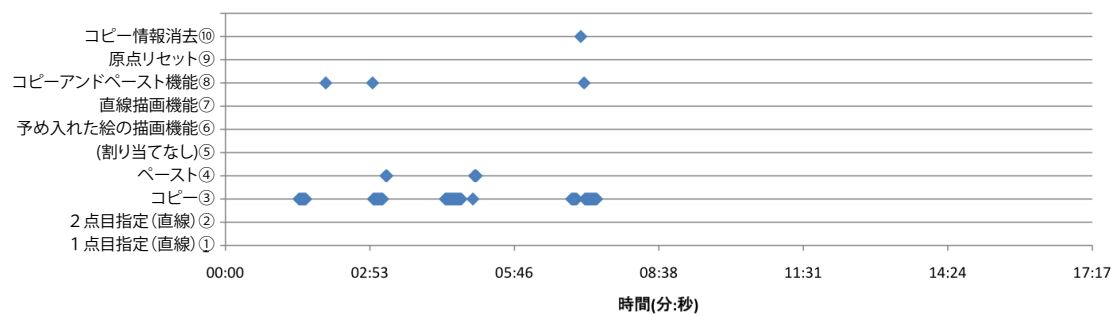


図 5.60: S.K 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係

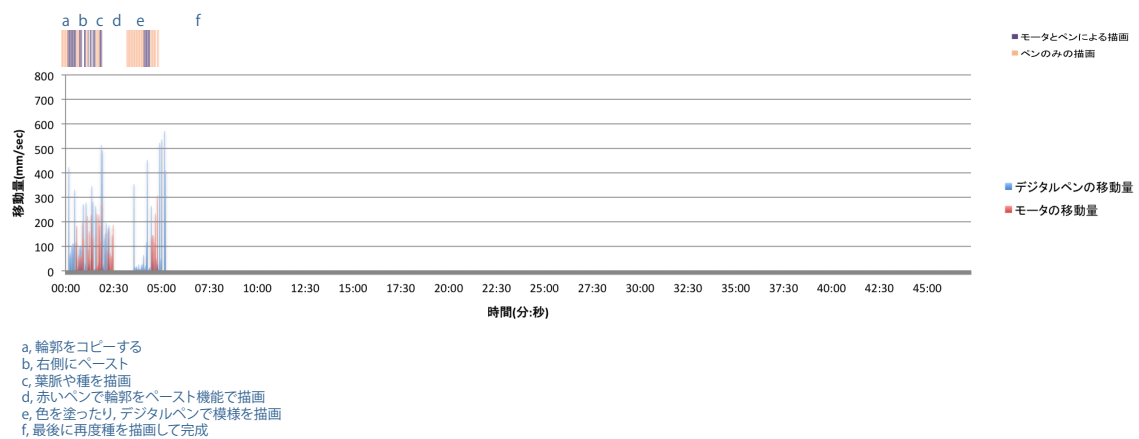


図 5.61: M.O 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係

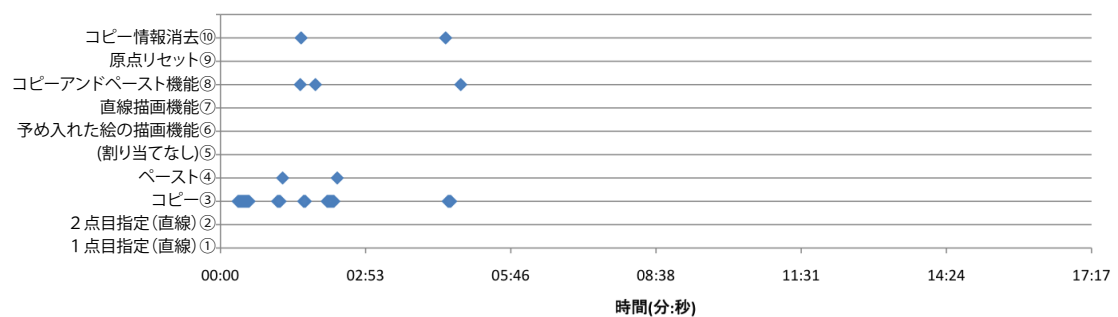


図 5.62: M.O 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係

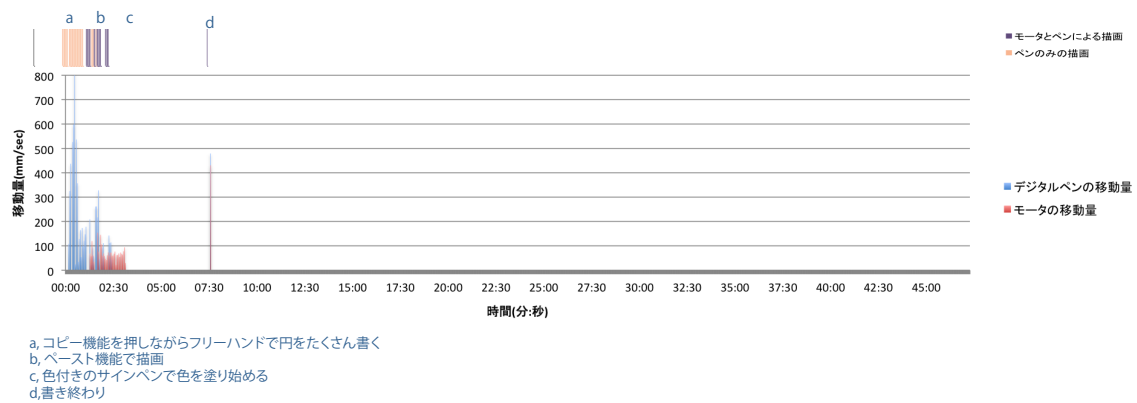


図 5.63: W.K 氏の体験時のペンとモータの移動量の関係

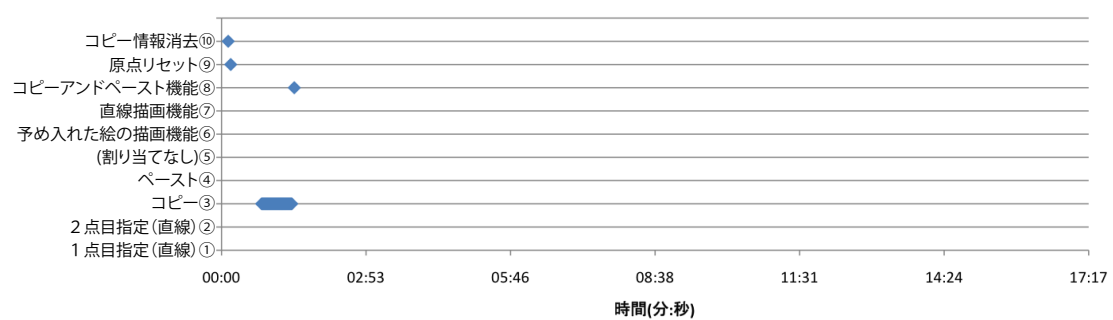


図 5.64: W.K 氏の体験時の機能の選択と体験時間の関係

する様子が見られた。

今後は体験者の反応を元に、描画のための新しいインタラクションを模索したい。例えば、描画中の機能の切り替えを、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、筆圧の強い時は機械によるアシストを止め、筆圧が弱い時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。

また振動による多方向牽引力を用いた描画支援システム dePENd Ver.2 についても提案した。ペングリップ型デバイスを色々な筆記用具に装着し、アクチュエータの振動によって多方向の牽引力を提示する手法について述べた。また応用例として、描画時の補正やスタイラスを用いた GUI 操作支援などを示した。

システム評価実験より、実験参加者は空中でペンを把持した時よりも、ペン先を紙に接触させて移動させた方が、二次元方向の牽引力を知覚しやすいことが確認できた。

一方で、デバイスの振動が創作に影響を与えている可能性があるため、実際にユーザがデバイスを用いて描画する様子を通して、この影響について調査したい。

また将来的には振動による多方向牽引力を、カッターや消しゴムなど他の道具に使用し、様々な創作活動の支援を考えている。

第6章

考察

本研究で提案した Augmented Craft の概念に基づき、幾つかのプロトタイプを開発した。それぞれの設計や実装また体験の様子や評価を通して、Augmented Craft の持つ特徴や制限、デジタルファブリケーションや従来の手作業によるものづくりの比較などについて考察したい。

実装したプロトタイプの機能の分類

開発したプロトタイプツールの特徴と機能などを役割別に分類した表が図 6.1 である。NeonDough は機械を内蔵することで粘土という素材自体が拡張し、色に変化するという制約を足している。enchanted scissors は紙である素材と道具であるハサミが拡張することで、特定の場所しか切れないという制約が切るときの発想を促す。dePENd は紙とペンは普段用いる道具と同様であるが、環境であるテーブルが拡張することでユーザの手描きが拡張される。ペンが誘導されるという緩やかな制約が、ユーザの手描き時の思考を促す。さらに他のデバイスと比較すると、手に装着する必要がある SPIDAR と比較すると、本研究や FreeD の特徴として、人側には特殊な装置を装着する必要がなく、人の行為を拡張することが挙げられる。さらに日常的に用いる道具や素材、環境をベースとして用いるので、使い方が直感的に分かると共に、手作業の中で思考を促すような制約を足している。

NeonDough は、可塑性のある粘土とコンピュータで制御された LED の色が一体化して、入出力に応じて相互に影響している（図 6.2）。ユーザが粘土に触ることで、粘土の形状と色に変化する。作業スペースは立体的な造形環境であり、主に色が変わるという視覚的な補助を伴う。具体的な機能の分類は下記になる。

	拡張する対象				ユーザの感覚の補助		拡張方法				
	環境	素材	道具	人(手)	視覚的補助	触覚的補助	緩やかな制約を加える	機械の作業にアレンジを加える	素材の特性の追加	手作業では難しい作業を補助	造形スキルの向上
NeonDough		粘土									
enchanted scissors		紙	ハサミ								
dePENd	テーブル	紙	ペン								
FreeD			デバイス								
SPIDAR				装着型デバイス							

図 6.1: Augmented Craft ツールの特徴と機能

手作業では難しい表現

仕上がりの拡張（光る粘土）

思考を促す機能

接触による混色

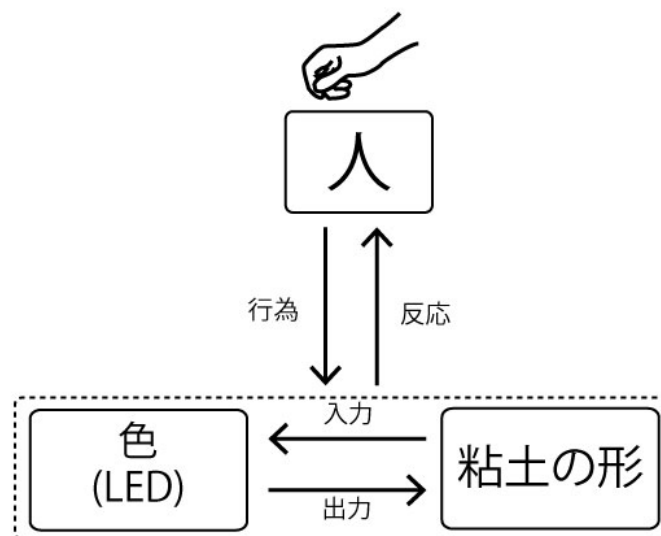


図 6.2: NeonDough の概念図

パレットによる色変更

明滅機能

光る粘土を用いた作品制作は、従来の粘土細工には無い新しい色の表現であるため、仕上がりの表現が新しいものとなっている。

また接触による混色や後で色を変更することは、色を決めて形を考えるとということと形を決めて色を決めることを行き来している。また明滅機能は通常の粘土ではない色表現なので、この色の変化から発想する場合もある。

NeonDough は他のツールに比べて拡張方法は少ないものの、色と形の対応付けが一对一であるので、素材との対話性が増え思考を促しやすいのではないかと考えられる。

enchanted scissors の場合はハサミとデバイスに内蔵された持ち手を開閉するモータが一体となっている（図 6.3）。作業スペースは平面的な造形環境であり、主にハサミの開閉を制御する触覚的な補助を伴う。コンピュータがユーザの線を切る行為を認識し、切れる／切れないという反応をユーザに返すことで、切り方に変化を与える。具体的な機能の分類は下記になる。

思考を促す機能

制限内でアレンジを加える

手作業では難しい作業

線の上のみを切る

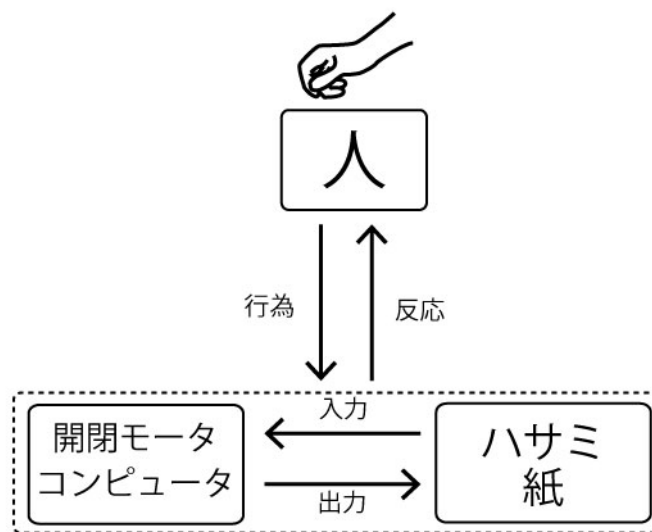


図 6.3: enchanted scissors の概念図

線を避けて切る
綺麗に封筒を切る

enchanted scissors の特徴として、線の上のみを切ることができるので手作業では難しい細かい作業などを手作業で行うことができる。

また思考を促す機能としては、切ることでできる領域内でアレンジを加えながら行う切り絵のような表現ができる。実際に使用する際には、刃先が反応する紙の場所を予め決めておく必要がある。

dePENd の場合は、素材であるペン・紙とその下にあるコンピュータ制御された磁石が一体となる構成である（図 6.4）。作業スペースは平面的な造形環境であり、主にペンが引っ張られるという触覚的な補助を伴う。ユーザは紙とペンを用いた手描きの中で機械の動きによる触覚的な感覚を得ながら描画する。具体的な機能の分類は下記になる。

思考を促す機能

アレンジを加える
アニメーション作成
通信機能

手作業では難しい表現

入力データの描画
直線や円の描画

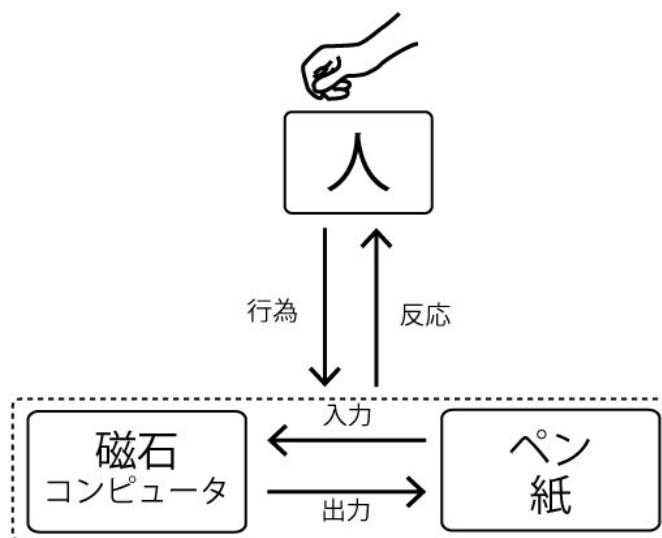


図 6.4: dePENd の概念図

スケール変更

コピーアンドペースト

スキルを上げる機能

入力データの描画

通信機能

思考を促す機能としては、機械による線の描画中にアレンジを加えるや、機械と手描きを組み合わせながら描画することが挙げられる。機械による描画の中で手描きで描く絵を発想したり、手描きの中で機械による補助が必要な表現の思考に繋がる。

また通信機能で交互に描き合うような描き方の共有は、他の人の描き方から自分の描く絵を決めることで、即興的な共作のような表現ができると考えられる。

手作業では難しい作業を支援する機能として、直線や円を手描きで描画したり、コピー・アンド・ペースト機能などは、従来のフリーハンドによる手描きの中でデジタルならではの表現を取り入れることができる。このような機能は図形データを描画プロセスの中でリアルタイムに作り出すことができる。一方で予め入力した絵を描画することなどは、描画する図形の切替などではできるものの、事前に図形を登録する必要がある。しかし予め決められた図形を描画する中でアレンジを加えるなどのインタラクティブ性を伴いながら描画できる。

また通信機能は、他のユーザに描き方を教えるなどの描画スキルの上達のために用いることがある。これは描画時の手の動かし方の理解に繋がると考えられる。

Augmented Craft におけるツール群の機能を分類した結果、後述のような特徴を持つ。思考を促す機能では、普段の手作業による創作活動の中で、機械がユーザの思考の補助を行う。機械による図形の描画や色の提案、制限領域内での創作などは、創作時の発想のきっかけを促すと考えられる。実際に NeonDough のユーザ体験からも見られたように、普段の手作業による創作には無い、デジタルならではの色の変化は発想や創作のきっかけを促していた。また enchanted scissors は、ユーザテストの結果、決められた枠内という制限の中で選択しながら切る様子が見られた。また dePENd のユーザテストでは、機械の動きから発想して手描きする場面や、手描きの途中で機械による補助を選択し、手描きと機械による描画を行き来しながら制作する様子が見られた。

さらに思考のきっかけを与える様々な方法について議論したい。NeonDough はユーザの行為を認識して、それにあった色の変化を提示している。dePENd の絵を描くと自動でコピーする様な、機械によって発想のきっかけとなるような変化を提示するインタラクティブな循環は、従来の手作業が持つ循環とは異なる発想の効果が期待される。例えば depend の今回は提案していない例として、ユーザが絵を描くと、その絵を機械が認識して新しい絵を描画する機能が考えられる。さらにその提示された絵からユーザが新たなイメージを思いつき、絵を描くというような機械と人の共作のような方法がある。

またスキルを上げる機能は、身体的な教示によって手の動かし方を学習することができる。そのようなスキル学習は、従来の手作業による創作活動でも見られた。例えば習字を習う時に先生が手を取って教える方法などである。そのような身体的な教示を機械を用いて行う際には、例えばモータが内蔵されたアーム状の装置を用いることでユーザのペンの動きを制御する方法などが提案されている。本研究のスキル学習の特徴としては、ユーザの日常における創作活動の中で、あたかも誰かが手を握っているかのような身体的な感覚提示で手の動かし方を学ぶことができる。

また通常の手作業では難しい表現を手作業で行うことができる。これは例えば日常の描く行為の中で、少し綺麗な線を描きたい場合に、機械が補助してくれる機能である。プリンタなどを用いた出力に比べて、素材に直接出力するので早いという利点や、試行錯誤が容易である、また機械による補助と人の手描きを切り替えながら行えるという特徴がある。そして機械の存在が見えないことで、ユーザは従来の手作業が拡張されたと感じながら創作することができる。

思考を促す機能

アレンジを加える表現とその変化から発想する

スキルを上げる機能

身体の動かし方を思考する

手作業では難しい作業

機械の補助による表現

手作業が拡張されたような体験を与える

創作時のきっかけとなるゆるやかな制約について

本研究で提案したツール群には、通常の道具の持つ機能に加え、創作時のきっかけとなるようなゆるやかな制約が付与されている。例えば NeonDough の場合は形によって色が変わるという制約である。enchanted scissors の場合は、導電性インクで描画された範囲で切るという制約である。dePENd の場合は、機械の動きの中で手描きで描画するという制約である。これらは創作の開始あるいは新しいアイデアを促すきっかけに繋がるものの、それぞれの制約の性質は異なる。

例えば NeonDough の場合は、色が変わるという一つの制約のみが与えられ、伸ばすなどの形に応じて色に変化を与えることはできる。意図的に切り替えができる機能としては明滅機能などを切り替えることで、色のパターンを変えることができる。

enchanted scissors の場合は、線の範囲のみ切るあるいは線の周りのみを切るという制約を切り替える。予めインクで切る範囲を設定できるため、ゆるやかな制約をある程度調整することは可能である。

dePENd の場合は、他の2つのツールと異なり、直線描画やコピーアンドペースト、通信機能など様々な機能が用意されている。ユーザは無意識的に機械に誘導されながら描画しているが、このような機能の切り替えは意識的に行う必要がある。

ゆるやかな制約の範囲あるいは切り替えは、ツールによって異なっている。この作業をユーザが行うのか、あるいは機械がユーザの行動を判断して自動的に切り替えるかは議論する余地がある。また機能の切り替えに関しても、キーボードなどを用いて意識的に行うのではなく、無意識に近い行動によって切り替えられるような環境を目指す必要性はある。

他のファブリケーションツールとの関係性について

人とデジタルデータ、素材が相互に影響しあいながら、デジタルとフィジカルを組み合わせたものづくりができるという点ではインタラクティブファブリケーションとも共通する考えである。一方で本研究は、身近な素材や文房具とデジタルデータが一体となることで手作業の延長のような体験をユーザに提供する。これはファブリケーションというよりも手作業に近い形であるため、従来の手作業によるものづくりをデジタルにより拡張する創作環境を提案している。また素材とデジタルデータが一体化したツールは工作機械をベースとしたツールよりも、出力する素材との対話が増えるため、手作業と機械による作業を行き来しながら作ることができる。

現在普及しているようなデジタルファブリケーションツールは、手作業では難しい精度の高い加工ができる。そのためミリ単位の精密な造形加工など精度の高い作業をする際には、Augmented Craft ツールよりもデジタルファブリケーションツールの方が適切な場面もある。このように Augmented Craft ツール、デジタルファブリケーションツールの両者は使用する場所・ユーザに応じて使い分けられる。

一方でデジタルファブリケーションツールに Augmented Craft の概念を取り込む可能性について考えたい。筆者はデジタルファブリケーションツールにおける直感的なインタフェースの開発を進めている。具体的には付録 A のような、3D プリンタと立体映像を用いたモデリング・造

形環境である。この研究はデジタルデータであるモデルデータとフィジカルな造形物の距離を近づけることで、等倍のモデリングや実物体を用いたモデリングが可能である。しかしモデルデータとフィジカルな造形物は関係性は近づいているものの、まだ完全に一体化したとはいえない。Augmented Craft の概念としては、ユーザはフィジカルな素材を直接扱える環境を目指している。そのため、粘土細工のように素材に直接触れることで素材が変形するなどの 3D プリンティング環境が理想である。これは後述の将来性についても述べるが、将来的にはフィジカルな素材の中にデジタルが内包されて、フィジカルな素材とデジタルデータがインタラクティブに影響すると同時に、ユーザにもインタラクティブに作用する環境が望ましい。

正確さについて

本研究におけるツール群は、工作機械に比べて工作時の細部の加工などの精度は落ちる。それは人の手が加わることによって、機械の動きの中でずれが生じてしまうためである。しかし本研究は機械による造形の中で人が自由に介入できたり、人と機械の造形を交互に行いながら通常の手作業では難しい表現を可能にすることや、また創作時の思考やきっかけを支援することを目的としている。

実際に普段ものづくりを行うユーザが enchanted scissors や dePENd を使用した結果、機械の動きに手作業のずれを取り入れながら表現する様子がみられた。

一方で正確な造形を行う場合には、素材に触れるツールの先端が独立して動くことにより、ユーザの動きの精度を上げる方法も考えられる。これは関連研究の Position-correcting tools for 2d digital fabrication[46] と同様の方法である。実際にユーザテストに参加した被験者の反応に、もっと細かい絵が書けると表現の幅が広がるという意見があった。

インタラクティブ性について

本研究のインタラクティブ性について考察したい。インタラクティブファブリケーションツールの多くはユーザの操作に対して、すぐに素材の修正が行えるような、時間的に一致したインタラクションが提案されている。本研究で提案したツールは、時間的に一致したインタラクションに加え、素材に直接触れるというインタラクションが付加される。このため素材との対話性を伴った、機械と手作業による造形ができる。

素材への触れ方はツールや素材によって異なる。これは従来の手作業とも同様であるが、例えば粘土の場合は手で素材に直接触れるのに対して、ペンやハサミ等の場合は、手と素材（紙）の間に道具が間接的に介在している。このような間接的な触れ方は、バーチャルリアリティなどの触覚提示に関する研究の観点から考えると、素材の持つ情報をそぎ落としながらユーザの身体に伝達しながらも、人が素材のテクスチャを補完するためリアリティを感じることができる。直接触れる面積が多い素材は、その表面全てに情報提示する機構が必要になる。しかし素材に直接触れることは、素材の持つ様々な特性を身体的に感じ取ることができる。例えば粘土の場合は、ねじるやちぎる、押す、丸めるなど多彩な触れ方が可能である。素材・ツールによって触れ方は異

なるものの、このような直接触れることのできるインタラクティブ性を担保しながらデジタル技術を手作業に取り入れることは、従来のデジタルファブリケーションツールにはない特徴であるとも言える。

早さについて

今回開発したツールを用いて造形し完成するまでの平均時間は、ユーザテストの結果、enchanted scissors が 13.2 分、dePENd は 12.5 分であった。これは試行錯誤の時間も含めたものである。デジタルファブリケーションツールは工作機械の特徴によって造形時間は異なるが、レーザーカッターなどの高速に切削可能な機械もある。しかしデータを作る時間が必要である。Augmented Craft ツールも同様に造形と思考を伴うが、その行き来が同じ手作業内とシームレスに行うことができる。

また今回は提案していないが、手作業を高速化する方法として、例えば dePENd では、ユーザの動きを検出してペンの動きを加速させることなどが考えられる。

作業環境について

本研究は既存の素材や筆記用具にコンピュータを内蔵しているため、持ち運びができるのが特徴である。そのため、使用できる場所の制限があるものが少ない。既存のデジタルファブリケーションツールでは大型の機械が多いことが多く、使用できる場所や素材の大きさに制限があり、ユーザの創造性を阻害してしまう。本研究では手持ちの道具を用いて、大きな創作物を制作できるなどの利点がある。dePENd のプロトタイプでは、磁石を用いてボールペンの動きを制御していたが、特殊なテーブルが必要であり、その上でしか動作しなかった。しかし振動アクチュエータを用いることで、振動によってペンを多方向に誘導できる方法を開発したため、場所の制限がなく、また様々な筆記用具を用いて描く行為を拡張できるようになった。

一方で enchanted scissors のユーザテストでは、ハサミに内蔵されたモータの大きさが創作の妨げとなる場面が見られた。そのためツールや素材に違和感なく内蔵する必要がある。

通常のクラフトとの比較

“書く”などの普段日常的に行う手作業は、“手紙を書く”や“お絵かきで表現する”、“書き順を学ぶ”など目的は異なるが、書くという行為自体は紙にインクを付着させるという共通した現象である。つまり汎用的な道具の本質は、使う人や使う目的に応じて機能が変化する。

今回実装したツール群は、その素材や文房具の持つ特性やポテンシャルそのものを拡張することで、ユーザの手作業による行為を拡張している。具体的には dePENd では、例えば“絵を書く”ということのみを拡張するのではなく、“ペンの動き”そのものを拡張することで、“書く”行為全般的に拡張することができる（enchanted scissors は“ハサミの開閉”から“切る”行為の拡張、NeonDough は“粘土の形・色”から“塑造する”行為の拡張を実現している）。dePENd のユーザ

テストでは、被験者の作家は普段のそれぞれ異なる制作スタイルの中で、機械による描画を取り入れながら制作を行っていた。

一方で、機械を用いて緩やかな制約を加えることと、通常のクラフトで起きる対話が無くなることはトレードオフの関係である。例えば enchanted scissors では、通常のはさみでは紙に対して好きな場所を切ることができるが、緩やかな制約によってユーザの意思を反映する自由度は少なくなってしまう。

しかし本研究では、緩やかな制約を制御可能にすることで通常のクラフトの対話を担保している。つまり装置のコンピュータの電源を切ることによって、制約を無くした状態にでき、通常のクラフトと同様の体験を提供することができる。

将来的にはユーザが、制約や機能を自由に制御できる環境が求められる。

機能の切り替えについて

今回実装したツール群の機能の切り替えは、主にキーボード操作や、スイッチのようなインタフェースによって変更する。通常のパーソナルコンピュータという道具を例に考えると、目的に応じてソフトウェアを切り替えながら作業する。そのため機能をスイッチングすることは分かりやすいが、キーボードやスイッチは手作業による創作活動の中では自然とは言い難い。実際にユーザテストではキーボードによる機能の切り替えは直感的でないという意見があった。例えば dePENd では紙の上に機能のチェックボックスがあり、ボックスを選択すると機能が切り替わるなど、行為の中で機能を切り替えることが考えられる。一方で NeonDough におけるパレット機能では、ユーザは直感的に色を変更できていた。

またツールがユーザの動きや環境を検出して、機能を切り替えるということも考えられる。例えば表や製図を書こうとしているから、直線モードに切り替える方法などが考えられる。

データについて

本研究で用いるデータとは、図形情報などのデータと、あるアルゴリズムによって動くプログラムデータが有る。例えば dePENd の場合は、予め入力した図形のデータによって描画する場合と、直線や円描画などのプログラムを用いて描画する。さらにこの二つのデータは、ユーザが自ら作るか、それとも他者が作ったデータを用いるかという場合がある。例えば図形データをダウンロードし、好きなデータを選択して描画することなども考えられる。一方でコピーアンドペースト機能のようなプログラム自体をユーザがフィジカルな素材を用いて作ることも将来的には必要である。その場合は2章 関連研究のハードウェア・プロトタイピングツールのように、素材の動きを記憶させ、ユーザの動きに応じて再現するなどのプログラミング環境が求められる。

最終的な仕上がりの新しさについて

造形に機械を取り入れることで、最終的な仕上がりが手作業では表現できないような新しい形に繋がるのもデジタルファブリケーションの特徴である。例えば Oxman の研究 [84] は幾何学的

かつ有機的な造形に着目しているが、造形自体は機械が行う。また Zoran の研究 [45] ではモデルデータの造形を手作業で行うことが目的であるため、ユーザの意思を反映する自由度は少ない。

本研究は手作業に機械的な精巧さを取り入れることを目的としていない。手作業による精巧さは最大限活かしながら、機械による動的な制約を造形プロセスに組み込むことでユーザの造形時の思考を拡張することが狙いである。

造形スキルの向上について

本ツール群は、造形のスキルを向上させる目的の機能も併せ持つ。例えば dePENd の描き方を教える通信機能や enchanted scissors の適切な切り方を教える機能である。実際にスキルの向上を観察するには長期間の調査が必要である。しかしデッサンの練習などは繰り返し行うことで向上したり、関連研究の Shadowdraw[18] のようにガイドとして提示することでスキルが向上する可能性がある。

将来性について

本研究のビジョンは、従来の機械に造形を任せるものづくりとは異なる、お絵かきや工作など日常的に行われるクラフトを手作業と機械の補助によって拡張するものづくりのムーブメントへの接続である。デジタルデータとフィジカルな素材や文房具、環境が一体となった創作手段は、日常的にクラフトを行う人々や造形スキルを身につけたい子供たちが通常の手作業のクラフトでは無い思考を促したり、手作業の補助を行うことができる。

本稿の序論の章では、道具同士がネットワークを介することで連携したり、他のユーザと繋がりながら創作するビジョンについて述べた。今回幾つかのプロトタイプツールを実装した結果、身近な文房具や画材にコンピュータによってゆるやかな制約を付与することで、創作時の思考を促していることできた。

ビジョンでも述べたように、今後は素材や文房具自体がインターネットを介して繋がることで、離れた素材や人とのインタラクションによる新しい創作手法なども考えられる。さらに今回提案したツール群同士が、ネットワークを介して相互に協調することも考えられる。例えば、ペンで描いたものを、ハサミに送ることで、道具同士を組み合わせながら創作することができる Augmented Craft の環境が考えられる。

Augmented Craft は素材とデジタルデータの一体化を目指すため、素材の中にコンピュータが内蔵され、手作業を拡張したい時に即座に拡張できるような環境が理想である。今回実装したツール群は、素材・筆記用具の内部に見えない形でコンピュータが内蔵され、ユーザの手作業を拡張するような実装を行った。これは Radical Atoms[85] で提唱されている素材自体にデジタルデータを内包することで、素材を変形させると即座にデータに反映され形にも反映されるような概念と共通する。

第7章

結論

第7章 結論

本論文では、デジタルツールにより手仕事を拡張する Augmented Craft について提案を行い、提案した概念に基づいたツール群を開発し有用性について検証した。

第1章では、まず、手作業による創作活動やデジタルファブリケーションおよびインタラクティブファブリケーションに関する社会的背景および学術的背景について述べ、本研究の目的を明らかにした。さらに、Augmented Craft を実現するためのツールに必要な要素を整理し、それを実現するための大まかなアプローチについて論じた。

第2章では、Augmented Craft に関連するデジタルドローイング、ハードウェアプロトタイピング、デジタルファブリケーションに関する研究事例および、本稿で提案したプロトタイプツール群に関連する研究について整理し、本研究の位置づけを行った。

第3章では、色と形の表現を促す光る粘土 NeonDough を提案した。これは、粘土の形の変化により色をダイナミックに変化できる仕組みを考案し、利用者の立体的な造形を促し、塑造を拡張する粘土ツールである。実際にプロトタイプを実装し、ワークショップによるユーザ体験を通して、形と色の変化が体験者の創作のきっかけを与えていたことを検証した。

第4章では、切ることを補助するハサミ型ツール enchanted scissors を提案した。これはハサミの開閉を制御することで、描画した線を切ることを緩やかに補助することが狙いである。デバイスを実装し、幾つかの日常で用いるアプリケーションを用意し、ユーザ体験を通して実際に使った際の様子を観察した。

第5章では、手描き拡張システム dePENd を提案した。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、描画補助システムである。思考を促したり、描き方を学ぶための学習、複雑な図形の描画など描く行為を拡張するアプリケーションを用意し、システムの持つ特徴や制限についての評価を行った。

第6章では、今回開発した幾つかのプロトタイプ群の設計や実装また体験の様子や評価を通して、Augmented Craft の持つ特徴や制限、デジタルファブリケーションや従来の手作業によるものづくりの比較などについて考察した。

デジタルとフィジカルを組み合わせたものづくり、特にデジタルファブリケーションの分野では、主に工作機械を中心とした研究に焦点が当てられており、人間の手作業を主体とする手法の提案は少なかった。本研究では、人間の手作業をデジタル技術によって拡張する Augmented Craft およびそのツール群について論じた。

実際に実装し考察した結果、主に工作機械による作業との大きな違いとして、手作業には思考を伴うため、コンピュータはユーザの思考を促し創作活動のきっかけを与えたり、学習効果を高めるようなアプリケーションを用意することが手作業の拡張に繋がる。

その際に、デジタルの持つ正確さやコピー可能などの特徴を取り入れることで手作業は拡張される。そのような機能を作る実世界におけるプログラミング環境や、機能を切り替えるための方法などは今後の課題である。

また将来的には、素材の中にコンピュータを内蔵することで、手作業をいつでもどこでも拡張できるような環境が求められる。また素材や文房具とコンピュータを組み合わせたツール同士が繋

がることで、離れた素材や人とのインタラクションによる新しい創作手法や、ツール群同士が相互に協調することも考えられる

また今回提案した Augmented Craft は彫刻や陶芸、裁縫や書道など他の創作活動へ応用できる可能性を持っている。将来的には従来のクラフトで用いられてきた道具にコンピュータが内蔵され、機械が主体なのではなく、人間主体のものづくりをデジタル技術が補助する環境を提案していきたい。

付録 A

空中像と3Dプリンタを用いた 造形ツール MiragePrinter

A.1 はじめに

本論文では、コンピュータを手作業に取り入れることによって、手作業を拡張する Augmented Craft に関してまとめた。一方でデジタルファブリケーションツールを使用する際には、直感的なインタフェースが求められる。そこで、Augmented Craft とは異なるアプローチでユーザのものづくりを支援するツールを開発した。

近年、3D プリンタやレーザーカッターなどのデジタルファブリケーションツールの普及に伴い、多くの人々がアイデアを高精細かつ高速に造形することが可能になった。一方で現在のデジタルファブリケーションツールを用いた造形プロセスでは、CAD などのコンピュータの画面上で行う設計プロセスと実空間での造形プロセスが乖離している。そのためデジタル空間上のモデルと実物体の大きさを比較しながら設計するといった、直感的な造形は難しい。例えば、コンピュータの画面内でペン立ての形状データを作成する場合、ペンを計測してデータ化し、そのデータを元に画面上でペン立ての設計を行い、3D プリンタを用いて造形する。この行き来はユーザの直感的な造形を妨げ、ものづくりへのハードルを高める要因となり得る。

本研究では、デジタル環境での作業と実空間の作業をシームレスにつなぐ新たなインタラクティブファブリケーションツールを提案する（図 A.1）。これは、空中像ディスプレイと 3D プリンタから構成され、ユーザの視点からは 3D プリンタの出力ステージの上に、実寸大のポリゴンデータが浮かんで見える。この装置を用いることで、データの作成時と出力時の作業領域を一致させ、ユーザは常に同じ場所を見つめながら作業をすることが可能になる。これにより実物体とデジタル空間上のモデルの大きさを比較しながら設計できたり、実物体を 3D プリンタ内に配置して、その上に直接部品を造形して付け足すなど、デジタルデータと実物体をシームレスに繋ぐ設計が可能になる。本稿では、システム設計と実装、今後の展望についてまとめる。



図 A.1: 本システムを使用した造形の様子

A.2 関連研究

実物体に情報を重ね合わせる Mixed Reality 技術を、3D プリンタを用いた造形に取り入れたシステムとして、Yee らは HMD を用いて空間上に 3D モデルを描画し、3D プリンタを造形できるシステムを提案した [67]。また MixFab[68] は深度センサを用いて、実物体の形状をスキャンし、ハーフミラー上にそのデータ形状を表示しながら設計することができるシステムである。しかし実際に立体造形する際は、データを出力し、3D プリンタに入力して造形を行う。本研究では、設計プロセスと造形プロセスを一つの装置内で行えるため、実際に立体物を造形しながら設計データを修正したり、実物体に直接造形物を付け足すことができる。また機器の装着や把持を前提としない空間への情報重畳として、MARIO[69] と同様に空中像ディスプレイを用いる。

A.3 システム設計

本研究で提案するシステムは、3D プリンタ内の空中像による実寸大のモデルデータを見ながら設計し、立体物を造形することができる。ユーザは 3D プリンタの正面から内部を見ることで、図 A.2 のように造形ステージ上に空間的に表示される 2 次元の映像を見ることができる。この表示された実寸大のモデルデータを、マウス等の入力インタフェースを用いてモデリングすることにより直感的な造作物の設計を提供する。例えば、ペン立てを造形する場合、ペンを 3D プリンタ内に置き、ペンが丁度入るような大きさのペン立てを直感的に設計できる。

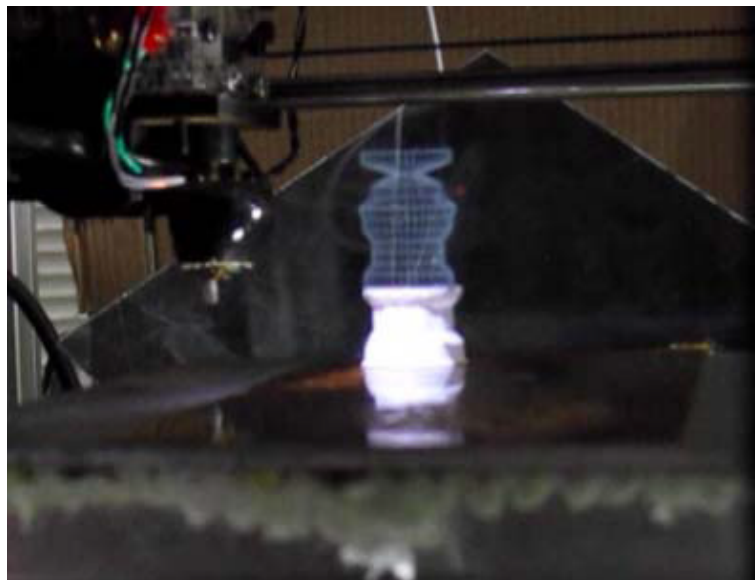


図 A.2: 3D プリンタ内の空中像

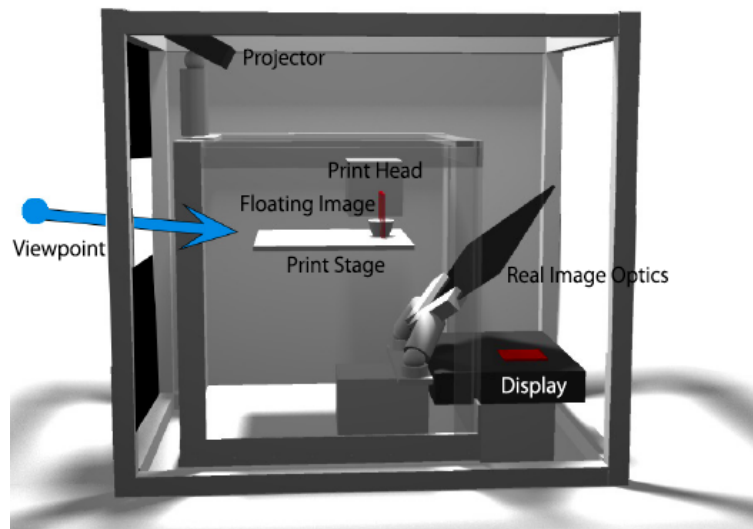


図 A.3: システム設計

A.3.1 ハードウェア設計

本システムは、積層型 3D プリンタ (Solidoodle 2), 空中像ディスプレイ, コンピュータから構成される. 3D プリンタの造形ステージ上に, 空中像を提示するために光学結像ミラー (ASUKANET AI Plate) を利用する. 今回使用した AI Plate は 15cm 角で, 造形ステージは 15cm x 15cm である. 図 A.3 のように AI Plate を 3D プリンタの後部に 45 度の角度で設置し, その下に小型のモニタ (plus one LCD-800V) を上向きに配置する. これにより, 3D プリンタの正面から内部を見ると, 造形ステージ上にモニタの画面が浮かんでいるように見える. 図 A.4 で示すように, 水平方向, 垂直方向の -20~20 度の視野角の変化による見え方の違い調べたところ, 視点の移動による映像の歪みは少なかった. しかし AI Plate の特性上, -20~20 度以上の視野角から像を見た場合, 映像の歪みが生じてしまうため, 本装置では造形ステージの前方に視野角を制限する窓 (23cm x 15cm) を設置した.

また今回の実装では, ユーザはマウス入力によってモデルデータの頂点座標を移動しながら修正し, モードの切替にはキーボードを用いる. モデルデータの頂点座標をマウスで移動させると, データの各頂点座標が書き換えられる. データの各頂点座標の XY 座標から, 制御プロトコルである G コードを一層ずつリアルタイムに生成し, 3D プリンタに送信する. 一層ずつ送信するため造形の途中でもその先のデータを編集・更新することができる. 空中に結像して見えるデータが次第に実体を伴って造形されていき, 実体化されていない部分は常に編集可能である. 通常は, 出力するデータを作成して 3D プリンタに送信すれば完成するのを待つのみだが, 本研究では造形中にインタラクティブな編集が可能である.

A.3.2 ソフトウェア設計

本システムの応用の一つとして、3D オブジェクトのモデリングを行うソフトウェアを実装した。図 A.5 のように、ユーザは円筒、円錐、三角錐、球など基本的なモデルの形状と大きさを選択する。ユーザは、そのポリゴンの各頂点をマウスによってドラッグすることで、モデルの形状を編集することができる。編集方法は二つあり、一つは、全体編集モードである。ろくろを用いた陶芸の様に、画面上の輪郭を変更すると、それを中央の軸を中心に回転させたような立体がモデリングできる方法である。もう一つは個別編集モードである。これは、任意の点を選択して横方向にマウスドラッグで頂点を移動させると、選択した点と回りの 8 点が移動する。周り 8 点の移動量は選択した頂点の移動量の $1/2$ とした。

本装置は、二次元の平面的な画面を空間的に提示しているため、ユーザが視点を移動してもデータの見え方は変わらない。そのため、データを回転させるためのモードを用意し、マウスのドラッグすることでデータを回転させながら、形状を決定していくことができる。またデータをズームして閲覧するズームモードや実寸大に表示するモードがある。編集する際、3D プリンタの射出ヘッドによって映像が見えにくいため、造形を一時停止して射出ヘッドを 3D プリンタ端に移動させる。

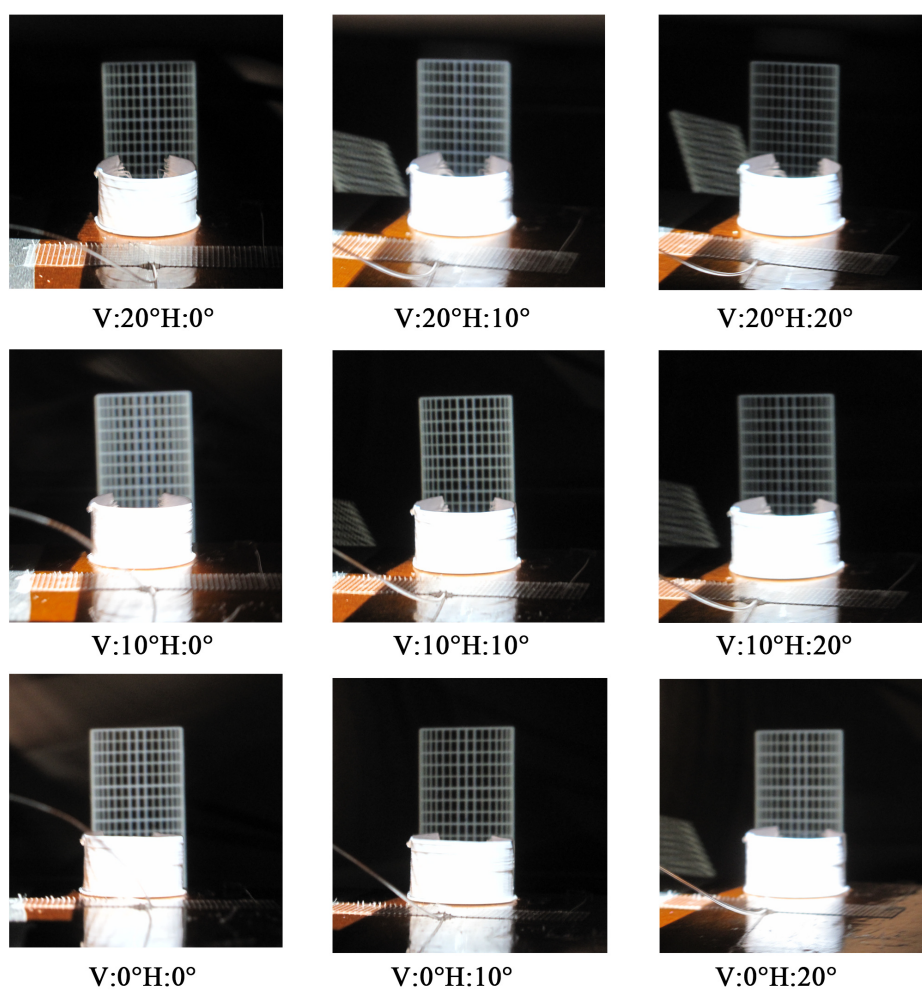
本システムでは、空間的に同じ場所で設計と造形を行うことができる。上記の設計ツールを応用することで、実オブジェクトを用いてモデリングを行ったり、実オブジェクトに新たなパーツを取り付けるといったインタラクティブな立体造形を可能にする。例えば、実物体の大きさに合わせて容器を設計することができる。図 A.6 (a) のように、3D プリンタ内の造形途中の造形物の上に球を置き、その球の大きさに合わせて、上部のモデル形状を変形させる。最終的に用意した球を入れるのに最適な容器が完成する(図 A.6 (b))。また、既にある皿に合わせてコップを設計する場合など、比較する対象を横に実際に置きながら、モデリングおよび造形を行うこともできる。

さらに、本システムでは既存の実オブジェクトに新たにパーツを付け加えることができる。例えば、図 A.7 のような器の側面に取っ手を新たに造形する場合、器を造形ステージに置き、その上に取っ手を設計する。器に重ねてモデリングを行うことで、位置や大きさなどバランスを見ながら設計できる。3D プリンタの用途の一つである、破損した部品の修理などを直感的に行うことができる。

A.4 評価

本研究で提案したシステムの評価を述べる。まず空中像と造形物の重なりや視野角の変化による見え方の違いは、実験の結果、映像の歪みは少なかった。一方で表示可能な映像は 2 次元的な平面の映像であるため、陰影のある立体的な映像を表示する際には、顔の位置をトラッキングして擬似的な立体表示する方法が考えられる。

今回使用した 3D プリンタは、造形可能範囲が奥行き 15cm、高さ 15cm、幅 15cm であった。そのため、手をプリンタ内に入れて動かすのは難しいため、モデルデータを修正する際の入力イン



V: Vertical Position, H: Horizontal Position

図 A.4: 視野角の違いによる見え方の変化

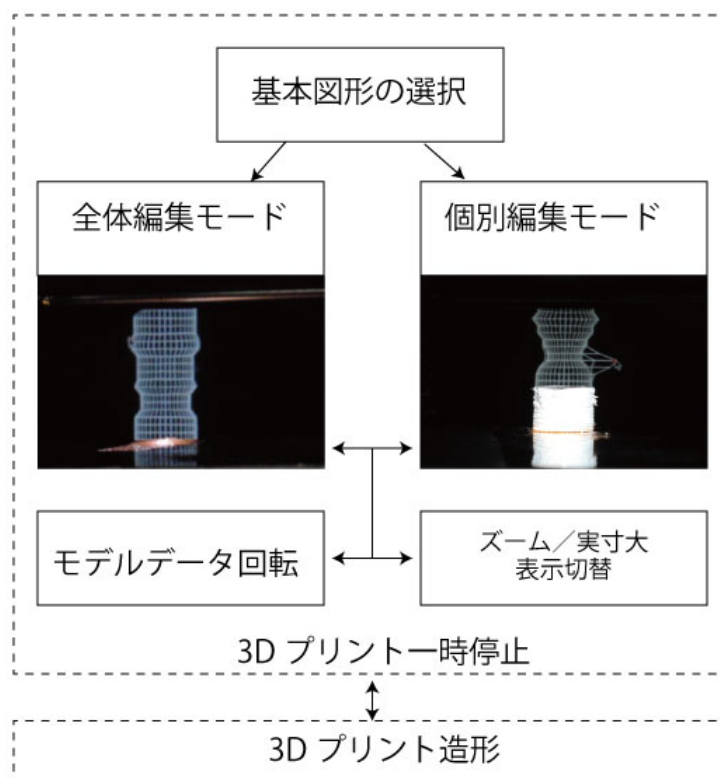


図 A.5: ソフトウェア設計

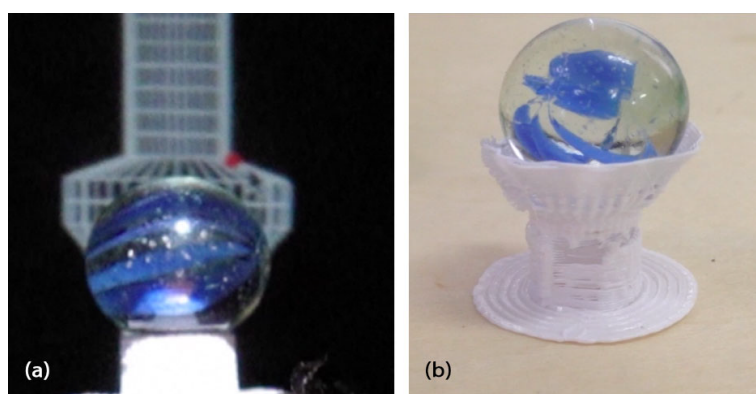


図 A.6: 実物体を用いた編集 (a) と造形 (b)

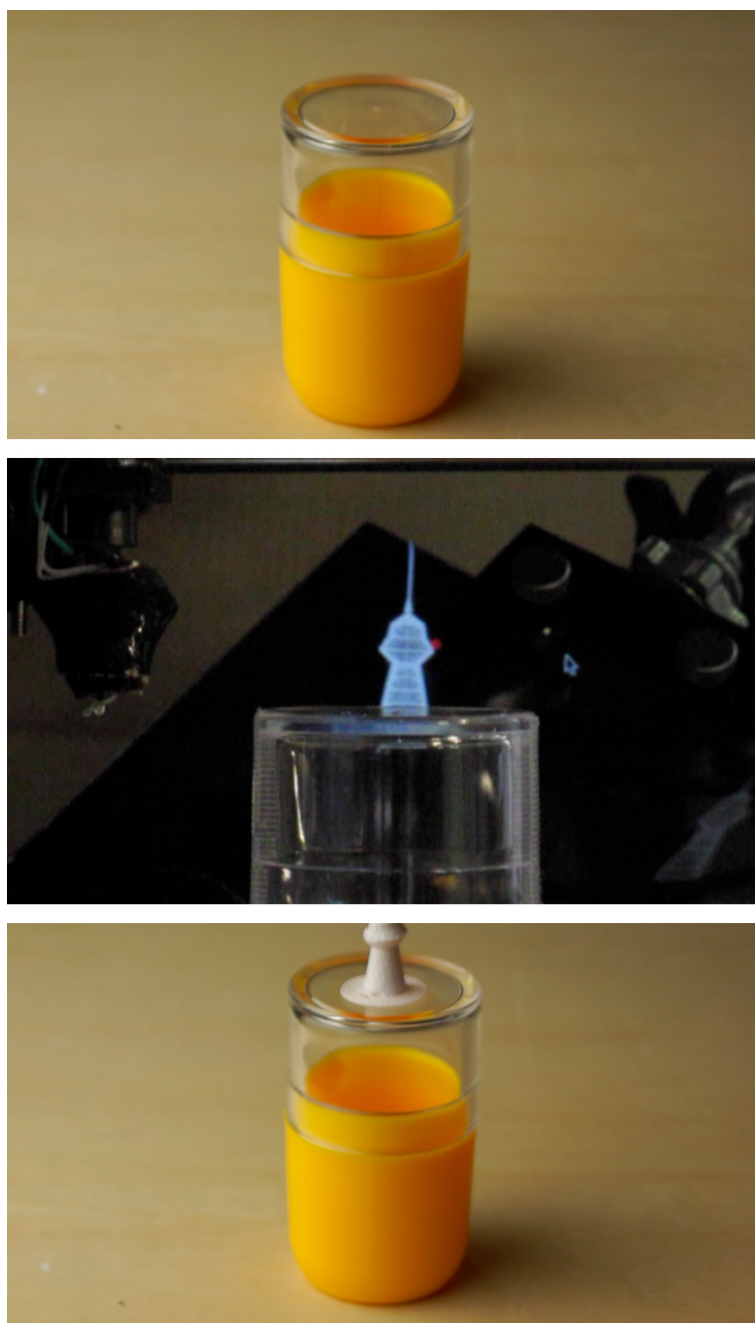


図 A.7: 器に取手を付け足す様子：(上) 通常の器（中）取手を編集する（下）取手が追加された器

ターフェースとしてマウスを用いた。手によるジェスチャ入力を用いる場合は、より大きい造形範囲の 3D プリンタを用いるか、プリンタの前でジェスチャを行うことが考えられる。また棒状の装置をプリンタ内に入れながら設計を行うことが考えられる。

また造形途中でモデルデータを修正した際に、これから出力される部分が、既に造形されている部分よりも広い場合、サポート部分を新たに造形することができず、思い通りの形状を造形できない。解決策として、パーツを分解して造形する方法や、サポート部分を別に造形して、補助が必要な箇所に置くことで、その上に新たな樹脂を載せながら造形することが考えられる。

また今回実装したソフトウェアでは、円柱などの基本的な図形を修正する形で設計する。複雑な形状を設計する場合には、CAD などを用いる設計手法（ブーリアン演算など）を実装する必要がある。またモデルデータのスケール変更や回転なども同様に用意することで、より複雑な形状を制作できる。

A.5 まとめ

本稿では、3D プリンタと空中像ディスプレイを組み合わせたインタラクティブファブリケーションツールについて提案した。ユーザは 3D プリンタ内の実寸大のデジタルデータを見ながら、実物体の大きさと比較したり、実物体の上に直接パーツを付け足したりできる。現在は 1 人のユーザがプリンタ内を覗きながら設計しているが、複数人で設計する場合は、複数の空中像ディスプレイを配置することで、多人数による設計が可能になる。

また空中像ディスプレイの特性上、造形物の前面に投影することはできない。今後は 3D プリンタ前面にプロジェクタを配置することで、造形物表面にも情報を重ねながらの造形を想定している。また実際にユーザに本ツールを用いて、造形物を制作してもらい、造形プロセスと完成物から使いやすさや創造活動の変化などを観察したい。

付録B

Morphing Cube

本論文では、コンピュータを手作業に取り入れることによって、手作業を拡張する Augmented Craft に関してまとめた。HCI 領域のみならず、メディアアート分野ではデジタル技術とフィジカルな素材や環境を組み合わせる試みが盛んに行われている。本付録では、筆者のアート領域における作品 Morphing Cube に関して紹介する。

Morphing Cube は、コンピュータグラフィックスの幾何学形状を物理的に再現することで、様々な形状に変形するキネティックな構造体です。ゴム、テグス、モータ、制御用コンピュータで構成され、外枠の各頂点に配置された8つのモータを制御することで、ゴム製の立方体が、台形や平面など様々な形状に変形したり、平行移動します。人の大きさに応じて変形する空間や建築への応用などが考えられます。

三次元コンピュータグラフィックスは、3次元空間上のワイヤフレームモデルの頂点を移動することで、任意の図形を即座に出力できる。本作品では、この変形可能な特性を実世界のマテリアルで表現する。現在普及している立体ディスプレイは、両眼視差の特性を利用したものなど擬似的な立体表現が多い。一方で物質の特性やロボットを用いて、ボリユーメトリックなピクセル・立体表現を行う例がある。例えば、ナノロボット工学では Dynamic Physical Rendering [86] など仮想空間上のピクセルを実世界で出力する概念が提案されている。芸術領域では David Bowen[87] が動的な情報の物理的表現を目指している。本作品では、ゴムの張力とテグスの透明性に着目して、コンピュータグラフィックスで表現可能な幾何学的形状を、実世界のマテリアルの特性を利用して物理的に表現し、様々な形状に変形することができる。

本作品は、丸ゴム、テグス、モータ、制御用コンピュータで構成される。外枠の各頂点に配置された8つのモータを制御することで、丸ゴムでできたシンプルなキューブが、台形や四角柱、平面体など様々な形状に変形したり、平行移動する。キューブはゴムの特性上 200 % の大きさに変形する。また外枠のサイズを変えることで、小型の卓上サイズや建築スケールの大きさも表現可能である。アプリケーションとして、様々な形に変形していく機能と、Kinect を用いて人の動きに応じてキューブが変形する機能を実装した。将来的には、実世界モデリング環境や変形可能なデバイス、また人の大きさに応じて変形する空間や建築の構造物への応用などが考えられる。

本作品は TOKYO DESIGNERS WEEK2014(2014.10.25-11.3, 明治神宮外苑), ICC OPENSPACE 2014 「HABILITATE」(2014.9.23-12.28, NTT インターコミュニケーション・センター) にて展示を行った。来場者の多くは浮遊するキューブを眺めながら観察していた。コンピュータグラフィックスのように見えるという意見や、スケールの大きな空間で見てみたいという意見、また色々な多面体に変形する形状も見たいという意見があった。

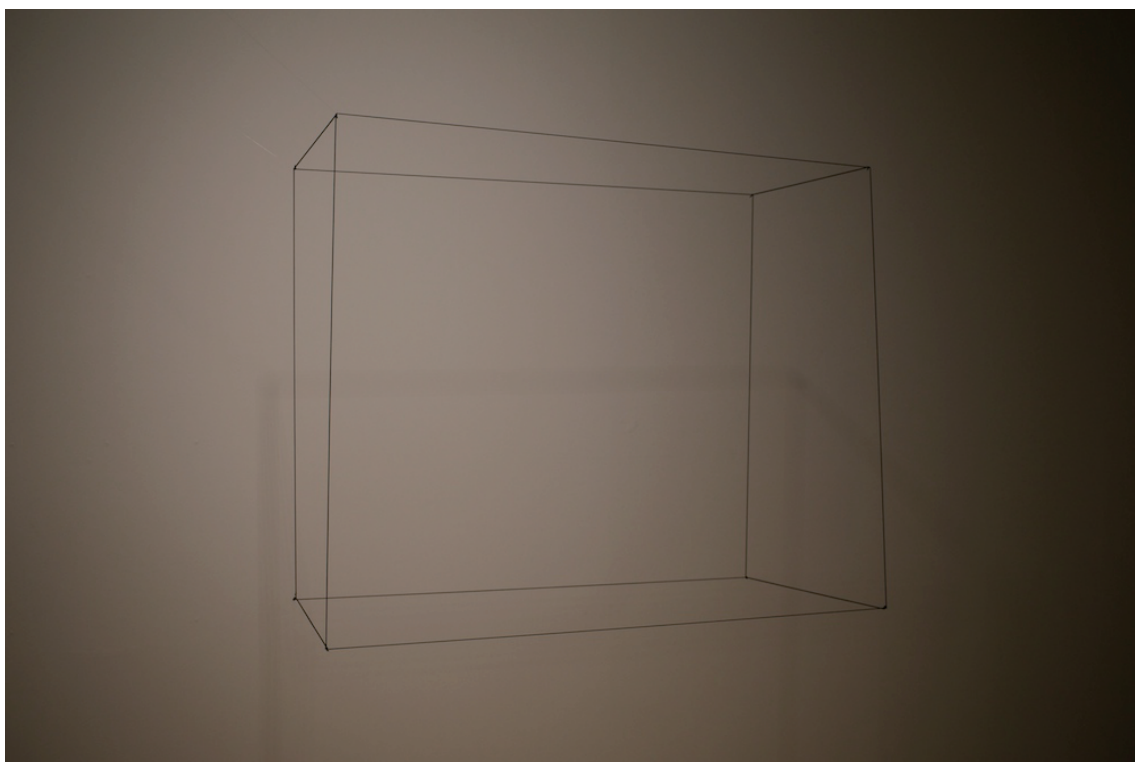


図 B.1: Morphing Cube

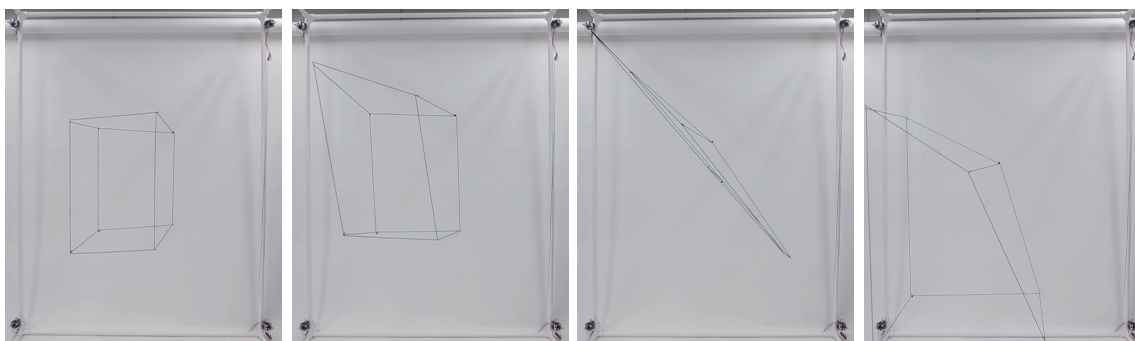


図 B.2: 変形する様子

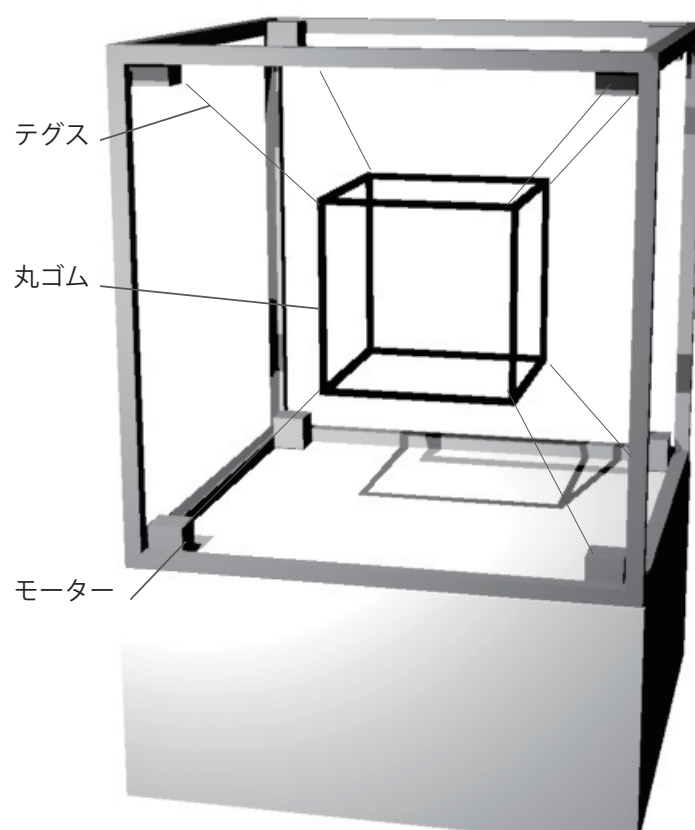


図 B.3: システム図

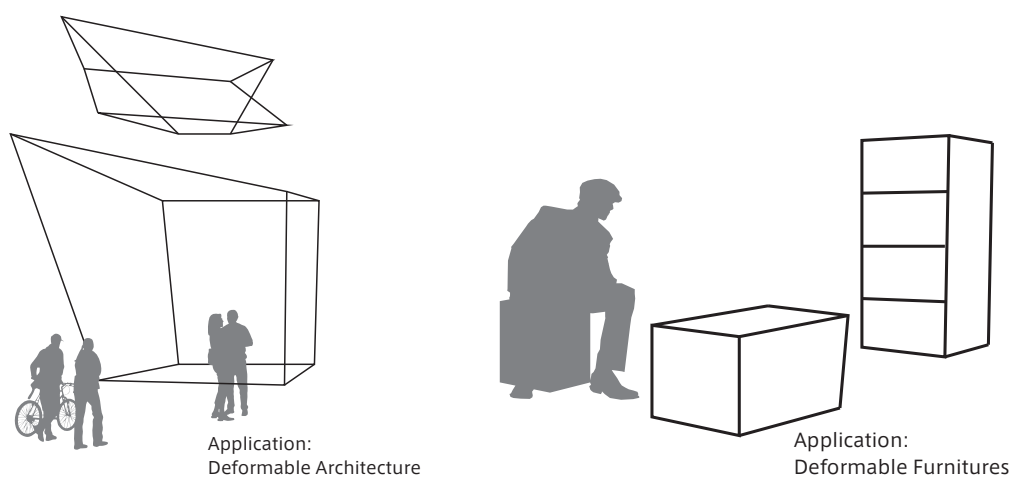


図 B.4: 応用例

参考文献

- [1] 柳 宗悦: “ 手仕事の日本 ”, 岩波文庫,1985.
- [2] 小林康夫編, 松浦寿輝編:“ 表象のディスクール6 創造現場から現場へ ”, 東京大学出版会,2000.
- [3] 佐々木正人編著, 三嶋博之編著, :“シリーズ・身体とシステムアフォーダンスと行為 ”, 金子書房, 2001.
- [4] 阿部 米蔵, :“彫刻の思索と体験 ”, 杉山書店,1973.
- [5] Malcolm McCullough, “Abstracting Craft: The Practiced Digital Hand ”, MIT Press Cambridge,1996.
- [6] 安藤 忠雄,:“デザインとコンクリート:素材との対話”, Concrete Journal 28(7), pp 81-85, 1990 .
- [7] 柏木博,:“道具の政治学”, 冬樹社,1985.
- [8] 福井研介訳, ヴィゴツキー著: “子供の想像力と創造 ”, 新読書社, 1974.
- [9] 高橋敏之, 伊藤智里: “一幼児の積み木遊びに見られる多様な発達の特徴 ”, 美術科教育学会誌 32, pp.41-53, 2011.
- [10] ジャン・ピアジェ, 滝沢武久・佐々木明訳: “構造主義 ”, 白水社,1970.
- [11] 諏訪 正樹: “ビジュアルな表現と認知プロセス ”, 可視化情報学会誌 19(72),pp 13-18, 1999.
- [12] Gershenfeld,N.: “Fab: The Coming Revolution on Your Desktop—from Personal Computers to Personal Fabrication. ”, Basic Books, Inc., 2007.
- [13] Willis, Karl D.D. and Xu, Cheng and Wu, Kuan-Ju and Levin, Golan and Gross, Mark D. .: “ Interactive fabrication: new interfaces for digital fabrication”, TEI '11, pp.69-72, ACM(2011).
- [14] Sutherland, I.: “ Sketchpad: a man-machine graphical communication system”, AFIPS '63, pp.329-346, 1963.
- [15] Igarashi, K. S. T. H., T. and Matsuoka, S.: “ Pegasus: a drawing system for rapid geometric design”, CHI '98, pp.24-25, 1998.
- [16] 草地映介, 渡邊淳司: “ 表現意図と偶然性を併せ持つ“ Minimal Drawing ”の提案”, TVRSJ Vol.12 No.3, 2007.
- [17] 江渡浩一郎, 櫻井稔: “ Sequential Graphics: 描画時の臨場感を再現するペイントソフト”, WISS 2008, 2008.

- [18] Lee, Z. C., Y.J. and Cohen, M.: “ Shadowdraw: real-time user guidance for freehand drawing”, ACM Trans. Graph, 27:1–27:10, ACM, 2011.
- [19] Ryokai, K., Mart, , S., , Ishii, H. : “ I/O Brush : Drawing with Everyday Objects as Ink”, Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ‘ 04) , 2004.
- [20] Peter Vandoren, Tom Van Laerhoven, Luc Claesen, Johannes Taelman, Chris Raymaekers, Frank Van Reeth .: “IntuPaint: Bridging the Gap between Physical and Digital Painting ”,Horizontal Interactive Human Computer Systems, Proc. IEEE International Workshop Horizontal Interactive Human Computer Systems,pp.65-72, 2008.
- [21] Peter Vandoren, Luc Claesen, Tom Van Laerhoven, Johannes Taelman, Chris Raymaekers, Eddy Flerackers, Frank Van Reeth : “FluidPaint: An Interactive Digital Painting System Using Real Wet Brushes ”, Proc. ACM Int l Conf. Interactive Tabletops and Surfaces,pp.53-56,2009.
- [22] Kim, Hyunjung and Kim, Seoktae and Lee, Boram and Pak, Jinhee and Sohn, Minjung and Lee, Geehyuk and Lee, Woohun.: “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.
- [23] Nakagaki, K. and Kakehi, Y.: “Comp*Pass: A Compass-Based Drawing Interface ”, Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA 14), ACM, pp. 447-450, 2014.
- [24] R. Shilkrot, P. M. and Zoran, A.: “Physical Rendering with a Digital Airbrush ”, ACM SIGGRAPH 2014, Emerging Technologies track, 2014.
- [25] “PixelRoller”, in <http://random-international.com/work/pixelroller/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [26] Coelho, M.: “BitBrush”, in <http://www.cmarcelo.com/bitbrush/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [27] Hashida, Tomoko and Nishimura, Kohei and Naemura, Takeshi.: “Hand-rewriting: Automatic Rewriting Like Natural Handwriting”,SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies, 2012.
- [28] Arduino, <http://www.arduino.cc/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [29] シーモア・パパート著, 奥村貴世子訳: “マインドストームー子供、コンピューター、そして強力なアイデア ”, 未来社,1995.
- [30] Mitchel Resnick, Fred Martin, Robert Berg, Rick Borovoy, Vanessa Colella, Kwin Kramer, Brian Silverman .: “Digital Manipulatives: New Toys to Think With”, CHI 1998, ACM, pp.281- 287,1998.

- [31] “LEGO,MINDSTORMS”, in <http://www.lego.com/en-us/mindstorms>, (閲覧日 2015.1.14).
- [32] Sylvia Weir, “LEGO-Logo: a vehicle for learning” , Learning mathematics and logo Pages 169 - 190.
- [33] “PicoCricket”, in <http://www.picocricket.com/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [34] “ATOMS Express Toys,”, in <http://www.atoms-express.com/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [35] Phil Frei,Victor Su,Bakhtiar Mikhak,Hiroshi Ishii,“curlybot: designing a new class of computational toys”,CHI '00 Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems Pages 129-136,2000.
- [36] H, Raffle., A, Parkes., H, Ishii.:“ Topobo:a constructive assembly system with kinetic memory”, CHI '04 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems,ACM, 2004.
- [37] 伊藤雄一, 山口徳郎, 秋信真太郎, 渡邊亮一, 市田浩靖, 北村喜文, 岸野文郎.: “ TSU.MI.KI:仮想世界と実世界をシームレスに融合するユーザインタフェース”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 11, no. 1, pp. 171-180, 2006.
- [38] LittleBits, <http://littlebits.cc/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [39] クリス・アンダーソン著,“MAKERS:21世紀の産業革命が始まる”,NHK 出版,2012.
- [40] 田中浩也, “FabLifeーデジタルファブリケーションから生まれる「つくりかたの未来」”, オライリー・ジャパン,2012.
- [41] David Mellis, Sean Follmer, Bjorn Hartmann, Leah Buechley, and Mark D. Gross.“FAB at CHI: digital fabrication tools, design, and community. ”, In CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '13). ACM, New York, NY, USA, 3307-3310.
- [42] Mueller, S., Lopes, P., and Baudisch, P. :“ Interactive construction: interactive fabrication of functional mechanical devices.” , UIST '12, pp.599-606, ACM, 2012.
- [43] Lee, J.,“Haptic Intelligentsia” ,
<http://studio-homunculus.com/portfolio/haptic-intelligentsia-human-prototyping-machine/>, , (閲覧日 2015.1.14).
- [44] Sensable, : PHANTOM Omni. ,
<http://geomagic.com/en/products-landing-pages/sensable>, (閲覧日 2015.1.14).

- [45] Zoran, A., and Paradiso, J.A. :“ Free D: a freehand digital sculpting tool. ”, CHI ’13, pp.2613-2616, ACM, 2013.
- [46] Rivers, A., Moyer, I. E., Durand, F., “Position-Correcting Tools for 2D Digital Fabrication”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 31, No. 88, 2012.
- [47] Baudisch, P., Sinclair, M., Wilson, A.:“ Soap: a pointing device that works in mid-air”, UIST ’06 Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology, 2006.
- [48] Yuta Sugiura, Gota Kakehi, Anusha Withana, Calista Lee, Daisuke Sakamoto, Maki Sugimoto, Masahiko Inami and Takeo Igarashi:“ Detecting Shape Deformation of Soft Objects Using Directional Photoreactivity Measurement”, In Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST 2011), pp.509-516, 2011.
- [49] Piper, B., Ratti, C., Ishii, H.: “ Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis”, CHI ’02 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Changing our world, changing our selves, 2002.
- [50] Brendan Dawes: “PLAY-DOH AS INTERFACE”;
<http://brendandawes.com/projects/playdoh/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [51] Reed, M.: “Prototyping digital clay as an active material”, TEI ’09 Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction, 2009.
- [52] Johnson, S., Thomas, A.M.: “Squishy Circuits: A Tangible Medium for Electronics Education”, Extended Abstracts of the ACM Conference on Computer Human Interactions 2010, Atlanta, GA, 2010.
- [53] A,Thomas.: Squishy Circuits Project Page.;
<http://courseweb.stthomas.edu/apthomas/SquishyCircuits/conductiveDough.htm> , (閲覧日 2015.1.14).
- [54] Resistance of a Cylinder;<http://www.physics.udel.edu/watson/scen103/cylinder.html> , (閲覧日 2015.1.14),1999.
- [55] Moon, H. : “Suspended Pen on an XY Plotter”: The Drawing Machine.
<http://unanything.com/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [56] Bynoe, D.: “Drawing Machine”,
<http://dbynoe.blogspot.jp/2012/09/drawing-machine.html>, (閲覧日 2015.1.14).

- [57] McDonald, K.a. :“Blind Self Portrait”. ,The 3rd Annual NYCR Interactive Show, 2012.
- [58] 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.
- [59] 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).
- [60] 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.
- [61] 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, pp313-322, 2006.
- [62] 佐久間正泰, 正守晋, 原田哲也:“ 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.
- [63] Weiss, M., Wacharamanotham, C., Voelker, S., and Borchers, J. :“ Finger-flux: near-surface haptic feedback on tabletops.” , UIST '11, pp.615-620, ACM, 2011.
- [64] Sensable, : PHANTOM Omni. ,
<http://geomagic.com/en/products-landing-pages/sensable>, (閲覧日 2015.1.14).
- [65] Okamura A. M., Webster III R. J., Johnson Nolin K. W., Jaftry H.: “The Haptic Scissors: Cutting in Virtual Environments”, Robotics and Automation, ICRA '03, Vol. 1, pp. 828-833, 2003.
- [66] Air-Hair DIGINFO TV <http://www.diginfo.tv/v/10-0106-r-en.php>, (閲覧日 2015.1.14).
- [67] B. Yee, Y. Ning, and H. Lipson.,“ Augmented reality in-situ 3D sketching of physical objects.”, In Intelligent UI Workshop on Sketch Recognition, 2009.
- [68] Christian Weichel, Manfred Lau, David Kim, Nicolas Villar, and Hans W. Gellersen.“ MixFab: a mixed-reality environment for personal fabrication. ”,In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14). ACM.
- [69] Kim, H., Takahashi, I., Yamamoto, H., Kai, T., Maekawa, S., and Naemura, T. “Mario: Mid-air augmented realityinteraction with objects.”, In Advances in Computer Entertainment, Springer International Publishing , pp.560- 563, 2013.
- [70] 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.

- [71] 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.
- [72] Lee, J. et al., “Haptic pen: a tactile feedback stylus for touch screens”, UIST '04 Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.291-294, 2004.
- [73] Poupyrev, I., Okabe, M., and Maruyama, S., “Haptic feedback for pen computing: Directions and strategies.” In CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '04, ACM (New York, NY, USA), pp.1309–1312, 2004.
- [74] Kyung, K.-U., and Lee, J.-Y., “wubi-pen: Windows graphical user interface interacting with haptic feedback stylus.” In ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos, SIGGRAPH '08, ACM (New York, NY, USA, 2008), 42:1–42:4.
- [75] Kamuro, S., Minamizawa, K., Kawakami, N., and Tachi, S. “Pen de touch.”, In SIGGRAPH '09: Posters, SIGGRAPH '09, ACM (New York, NY, USA, 2009), 51:1–51:1.
- [76] Amemiya, T., Ando, H., and Maeda, T. “Phantom-drawn: Direction guidance using rapid and asymmetric acceleration weighted by nonlinearity of perception.”, In Proceedings of the 2005 International Conference on Augmented Tele-existence, ICAT '05, ACM, pp. 201–208, (New York, NY, USA, 2005).
- [77] Rekimoto, J., “Traxion: A tactile interaction device with virtual force sensation.”, In Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13, ACM, pp. 427–432, (New York, NY, USA, 2013).
- [78] Nowacka, D., Ladha, K., Hammerla, N. Y., Jackson, D., Ladha, C., Rukzio, E., and Olivier, P., “Touchbugs: Actuated tangibles on multi-touch tables.”, In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13, ACM, pp.759–762, (New York, NY, USA, 2013).
- [79] TactileLabs. Haptuator, <http://www.tactilelabs.com/products/haptics/haptuator/>, (閲覧日 2015.1.14).
- [80] T. Endo, S. Tanimura, H. Kawasaki, “Development of Tool-Type Devices for a Multifingered Haptic Interface Robot”, IEEE Transactions on Robotics (Impact Factor: 2.57). 01/2013; 29(1):68-81.
- [81] 木村 朝子, 上坂晃雅, 柴田史久, 田村秀行, “空間型作業での選択・移動操作に適した道具型デバイスの機能設計と評価”, 情報処理学会論文誌 51(2), 314-323, 2010-02-15.

- [82] Troels Gravesen, Graphite Resistors, <http://www.troelsgravesen.dk/graphite.htm>, (閲覧日 2015.1.14).
- [83] Amit Zoran, Roy Shilkrot, Suranga Nanyakkara, Joseph Paradiso: “The Hybrid Artisans: A Case Study in Smart Tools”, ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Volume 21 Issue 3, 2014.
- [84] Oxman, N. “Beyond Material Typologies: Helical Morphologies as Highly Differentiated Self-Supporting Surface Structures.”, Architectural Association, London, dipl. thesis, 2005.
- [85] Hiroshi Ishii, Dvid Lakatos, Leonardo Bonanni, “Radical atoms: beyond tangible bits, toward transformable materials”, Magazine interactions, Volume 19 Issue 1, pp 38-51, 2012.
- [86] Goldstein, Seth Copen and Mowry, Todd C.: “Claytronics: An Instance of Programmable Matter”, In Wild and Crazy Ideas Session of ASPLOS, 2004.
- [87] David Bowen, tele-present water series, <http://www.dwbowen.com/>, (閲覧日 2015.1.14).

研究業績

原著論文（査読有）

- [1] 山岡潤一, 笥 康明: “ dePENd: ボールペンの強磁性を利用した手描き補助システム”, 情報処理学会論文誌, 55 巻-4 号, pp 1237-1245 (2014.4).
- [2] 山岡 潤一, 笥 康明: “NeonDough: 導電性粘土を用いた光る粘土細工”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 14, No. 4, pp. 341-350 (2012.11).

国際学会

- [1] Junichi Yamaoka, Yasuaki Kakehi, “A pen-based device for sketching with multi-directional traction forces”, User interface software and technology(UIST2014, Demo), pp. 43-44, (2014.10).
- [2] Junichi Yamaoka, Yasuaki Kakehi, “dePENd: augmented handwriting system using ferromagnetism of a ballpoint pen”, User interface software and technology (UIST2013, Paper), pp.203-210 (2013.10).
- [3] Mayu Yamashita, Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi, “enchanted scissors: A Scissor Interface for Support in Cutting and Interactive Fabrication”, ACM SIGGRAPH 2013, Posters (2013, 7).
- [4] Junichi Yamaoka, Yasuaki Kakehi, “NeonDough: Crafting With Interactive Lighted Clay”, ACM SIGGRAPH 2012, Posters, Article No. 74 (2012.8).

国内学会

- [1] 山岡 潤一, 笥 康明: “空中像ディスプレイと 3D プリンタを用いたインタラクティブファブリケーションツールの基礎検討”, 32E-2, , 日本バーチャルリアリティ学会大会, (2014.9).
- [2] 山岡 潤一, 笥 康明: “dePENd2.0 : 多方向牽引力を用いた描画支援のためのペン型デバイスとしての電子デバイスの提案”, エンタテインメントコンピューティング 2014-EC-32(5), 1-6, (2014.5).
- [3] 山下真裕, 山岡 潤一, 笥 康明 : “enchanted scissors:ハサミの開閉制御による「切る」作業の補助”, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会 (2013. 9. 17-19).

- [4] 山岡 潤一, 笥 康明: “ボールペンの強磁性を利用した手描き拡張システムの提案”, 情報処理学会第 27 回 SIGEC 研究会, (2013.3).
- [5] 山岡 潤一, 笥 康明: “光る粘土 NeonDough を用いた造形ワークショップの実践と考察”, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2012.9).
- [6] 田代 俊太郎, 山岡 潤一, 笥 康明: “Paperimposer: 紙に小型ディスプレイを透かす拡張現実感システムの提案”, 日本バーチャルリアリティ学会第 17 回大会, 13B-5, (2012.9).
- [7] 田代 俊太郎, 山岡 潤一, 笥 康明: “AtlasScape: 紙とスマートフォンの接触による情報重畳の提案と展示支援への応用”, 信学技報 MVE2011-120, vol.111, No.479, pp. 243-244, (2012.3).
- [8] 山岡 潤一, 笥 康明: “NeonDough: 光る粘土を用いた粘土細工の提案”, インタラクション 2012, 東京 (2012.3).
- [9] 山岡 潤一, 笥 康明: “導電性粘土を用いた変形・分割可能なタンジブルインタフェースの基礎検討”, エンタテインメントコンピューティング 2011 (2011.10).

展示発表

- [1] 山岡潤一, 笥康明: “Cube”, 「HABILITATE」 02 「Physical Digital」, NTT インターコミュニケーション・センター, (2014.9.23-12.28)
- [2] 山岡潤一, 笥康明: “dePENd”, ICC OPEN SPACE2014 慶應義塾大学 笥康明研究室「HABILITATE」 01 「Usual Unusual」, NTT インターコミュニケーション・センター, (2014.6.21-9.21)
- [3] 山岡 潤一: “Morphing Cube”, TOKYO DESIGNERS WEEK 2014 Asia Awards デザイン部門, (2014.10.25-11.3)
- [4] 山岡 潤一, 笥 康明: “dePENd”, いしかわ夢未来博, 石川県産業展示館 (2013.11.9-10).
- [5] 山岡 潤一, 笥 康明: “ dePENd”, Innovative Technologies2013 , デジタルコンテンツエキスポ 2013, (2013.10).
- [6] Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi : “ NeonDough”, Techfest2012-2013 (2013.1.3-5).
- [7] 山岡 潤一, 笥 康明: “NeonDough”, いしかわ夢未来博, 石川県産業展示館 (2011.10.29-10.30).

受賞

- [1] Wired Creative Hack Award 2014, グランプリ受賞 (2014)
- [2] TOKYO DESIGNERS WEEK 2014 Asia Awards デザイン部門 準グランプリ受賞 (2014)
- [3] 情報処理学会論文誌特選論文 (2014)
- [4] ヒューマンインタフェース学会論文賞 (2013)
- [5] Innovative Technologies2013 採択, 経済産業省, (2014.9.10)
- [6] 学生発表賞、 情報処理学会エンタテインメントコンピューティング (2014.3)
- [7] 湘南藤沢学会「第 8 回研究発表大会」卒業プロジェクト発表部門優秀賞 (2010)

- [8] 第 72 回情報処理学会全国大会学生奨励賞 (2010)

謝辞

学部時代から長い期間、私の研究を親身にご指導くださった慶應義塾大学 環境情報学部 笥 康明 准教授に深く感謝致します。研究相談や学会投稿の手助けだけではなく、研究者・作家としての心得を教えて頂きました。

同大学 環境情報学部 田中浩也 准教授、脇田玲 教授には、研究を進めるにあたり、本論文の方向性を決める段階から相談させて頂きました。感謝の意を表させていただきます。

中西 泰人 准教授、加藤 文俊 教授には、本論文の副査として審査をお引き受け頂き、研究をまとめる上でアドバイスを多く頂きました。有難う御座いました。エクステザインプログラムの先生方にはとても貴重な助言を頂きました。感謝の意を表させていただきます。

本論文を進めるにあたり、研究室のメンバーや友人など普段からものづくりに馴染みのある作家の方々に協力して頂き、とても貴重な意見やフィードバックを頂きました。この場をお借りして感謝の意を表させていただきます。

本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究支援事業 CREST の支援が無くては勧められませんでした。感謝の意を表させていただきます。日本バーチャルリアリティ学会アート&エンタテインメント研究委員会の皆様には貴重なご意見を頂いたことに感謝します。

研究を進めるにあたり、共同研究者である山下 真裕氏を始めとして、笥康明研究室のメンバーやOB/OGにはアドバイスや励ましを頂きました。素晴らしい仲間に出会えたことに感謝します。最後に、学生生活を通して常に支えて励ましてくれた家族に感謝します。

山岡 潤一