

学位論文 博士(工学)

**身体性メディアを伴う
ネイキッドインタラクションの設計**

慶應義塾大学大学院 理工学研究科

尾形 正泰

指導教員：今井倫太

2015年度

Ph. D. Thesis

Design of Naked Interaction
with Embodied Media

Keio University
Graduate School of Science and Technology

Masayasu Ogata

Supervisor: Michita Imai

January 2016

論文要旨

人間とコンピュータの関係の中で、人間は情報に触れるためにコンピュータを用いてきた。ユーザが情報にたどり着くまでにインタフェースにおけるいくつかの障壁があり、ユーザは絶えずデスクトップメタファ、入出力インタフェース、デバイスの性能から影響を受けている。仮想的で抽象的な情報の処理を行うためのコンピュータが目的化して、コンピュータを中心にしたインタフェース設計を行うようになった。また、人間と情報メディアの間にインタフェースが介在することで生じてしまう認知的なズレも生じる。ユーザの自由度や利便性が向上しないのはこのためである。

そこで、身体の観点に立脚した人間とコンピュータの関係性の設計思想が必要となる。普段は潜在化している身体を顕在化することによって、人間の視点から身体を認識させ、身体と環境における関係性を更新する。環境における身体性の意味を発見するために必要になるのが、人間と機械、身体とモノ、入力と出力そして制御とフィードバックのような二項関係を結びつけるための身体性メディアである。

身体性メディアを導入することで、ネイキッドインタラクションが従来のインタラクション設計から脱却し、身体から発露する体験に基づいた設計を保証する。この過程を通して、身体性に立脚した意味に気づき、身体性から立脚したインタラクションの設計を統括的に行うことができる。結果的に従来のインタラクションにおける情報と身体の距離を埋められないインタフェースの設計問題にしての解決を示すことにもなる。身体性メディアを伴うネイキッドインタラクションの設計には、技術的手法、コンピュータサイエンスの手法による実装が不可欠である。しかしながら、ネイキッドインタラクションの設計思想は広域の設計に適用されるものであるため、設計思想の実現のためにプロトタイピングを通して、概念的設計と具体的設計を示す必要がある。

はじめに、身体を覆っている皮膚そのものについて注目した。皮膚は内省的に感覚を持つため、身体の延長としての道具に皮膚を選ぶ。皮膚を顕在化させることで身体の再身体化を行う。皮膚を通してメディアの身体化を自己の身体で体験・認識させる。次に、手指の擬人化を用いて手指のコミュニケーションメディアへの変換を行う。手指の拡張は身体を用いて意図通りに動かすことで、その機能を実現する。最後に、手を用いて対話しながら知的活動を行う紙を取り上げ、身体の延長としてのメディアとして設計する。紙によって物理環境における思考をするときの自己と対象の関係性を視覚化する。ここに挙げた3つの身体性メディアはそれぞれ身体によって思い通りに自在に動かせる。

プロトタイピングを通して、コンピュータの設計思想によって構成されていた環境とモノが、またそれによって生み出されたヒューマンインタフェースとこれを用いたヒューマンコンピュータインタラクションを、身体性メディアを通した身体と人間の原理的な視点から分解して再構成した。言い換えれば、現状のシステムに基づいた構成論によって規定されているシステムと身体の間で作られたユーザ体験というメディアを剥ぎ取り、物理性と身体の間形成される身体性メディアに置き換える設計を提案した。

Summary

In a human-computer relation, humans used computers for access to information, and they used to be affected by desktop metaphors, input/output interfaces, and the performance of a device. Further, there are some obstacles on interfaces during users touch to information. A computer that executes information processes virtually and abstractly, that became to be the purpose and the interface designed with a focus on the computer. As the interface intervenes between information media and humans, a difference in recognition can occur. This is also why freedom and convenience do not improve.

Thus, this situation requires design philosophy of the human-computer relation based on the perspective of the human body. The idea of this thesis is to actualize the human body, which is usually latent, to recognize a body from the human perspective and update the human body-environment relation. In addition, embodied media that connects binary relationship elements, such as human and machine, body and object, input and output, and control and feedback, is required for understanding the meaning of embodiment in the environment.

Through the introduction of embodied media, naked interaction guarantees leaving behind traditional interaction and designing new relations based on the experiences of a body. This process lets designers recognize the meaning of interaction based on embodiment and comprehensively design the computer from the embodiment perspective. Moreover, it provides a solution to the design problems in which the interface could not shorten the distance between the information and human body in traditional interactions. For achieving this, designing naked interaction with embodied media requires a method of technology and computer science. However, design philosophy is widely applied to designs; this thesis realizes its concept design and actual design through prototyping.

Each of the three embodied media can be controlled by the human body. First, skin, which covers the body, is selected as one of the embodied media because it has introspective perception. By actualizing the skin, a part of the human body is re-embodied by recognition of the user's own body. Skin sensation allows users to experience and recognize embodiment of media by their own bodies. Next, by utilizing finger anthropomorphism, a finger is turned into a communication medium. A ring device as the extension of the human body lets the use to understood controlling own embodiment based on the user's intention. Finally, picking up a piece of paper, which allows humans to perform intelligent work with their hands interactively, the piece of paper is designed to be one of the media, as an extension of body. The piece of paper visualizes the user-object relation when the user thinks assuming paper as physical environment.

Through prototyping, the environment and object, and the human interface and human computer interaction are composed by design philosophy of a computer resolved and reconstructed in the human body and primitive human being perspectives through actualizing embodiment. In other words, the philosophy of naked interaction has deprived the media of the user experience created between the system and body, which is provided by configuration theory based on present system design and has replaced it with embodied media, which is structured between physical environment and embodiment.

目次

第1章	序論	1
1.1	20世紀から21世紀のコンピュータへ	1
1.2	インタフェースの設計	4
1.3	物理的な身体とヒューマンインタフェース	6
1.4	研究の目的	7
1.5	論文の構成	8
第2章	背景	10
2.1	人間の拡張としてのコンピュータ	10
2.2	インタフェースの変遷	11
2.3	インタフェースコンセプト	12
2.3.1	インタフェースの実世界指向	13
2.3.2	Natural User Interface	14
2.3.3	Tangible User Interface	15
2.3.4	Organic User Interface	16
2.3.5	身体的インタフェース	16
2.4	身体性インタラクション	16
2.4.1	環境と素材	17
2.4.2	Desktop と Tabletop	17
2.4.3	ウェアラブル	17
2.5	技術と技法	18
2.5.1	計測技術	18
2.5.2	アクチュエーション技術	18
2.5.3	インタラクションデザイン	19
2.5.4	Personal Fabrication	19
2.6	本章の結論	20
第3章	身体性メディアを伴うネイキッドインタラクションの設計	21
3.1	身体性	21
3.2	人間とコンピュータの関係性の設計	22
3.3	ネイキッドインタラクション	23
3.4	身体性メディア	23

3.5	リミテーション	26
3.6	本論文における研究プロジェクト	26
3.6.1	皮膚のインタラクション	26
3.6.2	指のインタラクション	27
3.6.3	紙のインタラクション	27
3.7	本章の結論	27
第4章	関連研究	28
4.1	皮膚	28
4.1.1	On-body Interaction	28
4.1.2	光反射の計測	29
4.1.3	触覚と応力計測	29
4.1.4	デバイスと身体操作	29
4.2	指	30
4.2.1	ウェアラブルロボット	30
4.2.2	擬人化	30
4.3	紙	31
4.3.1	素材としての紙	31
4.3.2	紙を制御する	32
4.3.3	紙を用いたインタラクション	32
4.3.4	変形素材を用いたインタラクション	33
4.3.5	電磁気学を用いた制御	33
4.4	本章の結論	33
第5章	皮膚のインタラクション	34
5.1	概要	34
5.1.1	皮膚を用いたインタラクション	34
5.1.2	SenSkin	35
5.1.3	SkinWatch	36
5.2	原理と方法	37
5.3	ハードウェア設計	38
5.3.1	共通設計	38
5.3.2	SenSkin の設計	38
5.3.3	SkinWatch の設計	39

5.4	計測方法	41
5.4.1	記号の導入	42
5.4.2	キャリブレーション	42
5.4.3	正規化	43
5.5	応力の計測方法	43
5.5.1	2次元のせん断応力	43
5.5.2	垂直方向の応力	44
5.5.3	計算の図式化	44
5.6	応力の計測実験	45
5.6.1	実験構成	45
5.6.2	結果	45
5.7	ジェスチャ認識	46
5.7.1	SenSkin のジェスチャの種類	46
5.7.2	SkinWatch のジェスチャの種類	47
5.8	皮膚形状の認識と機械学習	48
5.8.1	学習データの収集	48
5.8.2	機械学習	48
5.8.3	SenSKin におけるパターンマッチ	49
5.8.4	SkinWatch におけるパターンマッチ	49
5.9	SenSkin を用いたアプリケーション	49
5.9.1	デスクトップの操作	51
5.10	SkinWatch を用いたアプリケーション	51
5.10.1	地図ナビゲーション	51
5.10.2	スクロール・回転操作	52
5.10.3	皮膚触覚の反映	53
5.11	リミテーション	53
5.11.1	身体動作とノイズ	53
5.11.2	計測手法	54
5.11.3	筐体デザインとセンサ配置	54
5.11.4	通信速度とリフレッシュレート	54
5.12	本章の結論	54
第 6 章	指のインタラクション	56
6.1	概要	56

6.2	Pygmy	57
6.3	小型化な指輪型ロボットの設計	58
6.3.1	マイクロコントローラ基板	59
6.3.2	超小型電磁石サーボモータ	59
6.3.3	可動なロボット筐体	60
6.3.4	バッテリーケース	61
6.3.5	コントローラとセンサ	61
6.3.6	スタンドアロン型の指輪型ロボット	62
6.4	ユーザビリティテスト	63
6.4.1	手順	63
6.4.2	アンケート	63
6.5	ユーザビリティテストの結果	65
6.5.1	ユーザビリティの評価	65
6.5.2	キャラクタの生成	65
6.5.3	コラボレーション	66
6.5.4	ユーザ体験	66
6.5.5	ウェアラブルロボットが与える印象	67
6.5.6	ロボットの存在感	68
6.6	ケーススタディ	68
6.6.1	実験環境	68
6.6.2	ビデオ分析	68
6.7	ディスカッション	69
6.7.1	デザイン方針の検証	69
6.7.2	物理的なデバイスの重要性	70
6.7.3	リミテーション	70
6.7.4	ストーリーテリングのためのロボットデバイス	71
6.7.5	今後見込まれる研究領域	71
6.7.6	将来の展望	71
6.8	本章の結論	72
第 7 章	紙のインタラクション	73
7.1	概要	73
7.2	FluxPaper	73
7.2.1	特徴	74

7.2.2	磁束による構造設計	75
7.2.3	磁束の制御方法	75
7.2.4	将来的な設計および実施方法	77
7.3	磁性紙の製造方法	78
7.3.1	磁石粉	79
7.3.2	樹脂との混合	79
7.3.3	鋳型と表面処理	80
7.3.4	着磁	81
7.3.5	整形	81
7.4	FluxPaper の性能	82
7.4.1	現行品との比較	82
7.4.2	安全性	83
7.5	最適な設計の検証	84
7.5.1	実験 1: スリットを用いたデザイン	84
7.5.2	実験 2: 磁性レイヤの面積と反発力の関係	86
7.5.3	結論	87
7.6	シミュレーションによる検証	87
7.6.1	シミュレータの性能	88
7.6.2	シミュレータの設定	88
7.6.3	磁束密度分布の分析	89
7.7	シミュレーションによるデザイン探索	90
7.7.1	単一磁石による空間磁束密度	90
7.7.2	最密充填磁石による空間磁束密度	92
7.7.3	物理計測による最密充填デザインの検証	94
7.8	アプリケーション	96
7.8.1	Self-alignment 志向によるインタラクション設計	96
7.8.2	自動化ホワイトボード	98
7.8.3	スタックからの任意選択	102
7.8.4	自己組み立て	104
7.9	リミテーション	104
7.10	本章の結論	105

目 次

1.1	三菱 D800iDS による文字入力的方式	2
1.2	GNU Emacs	6
1.3	TextEdit.app	6
1.4	Microsoft Word	6
2.1	TUI と Radical Atoms の概念図	15
3.1	ネイキッドインタラクションによる身体の顕在化のイメージ	24
3.2	設計思想の境界の考え方の比較	25
5.1	SenSKin の使用場面と操作のイメージ図	36
5.2	SkinWatch がない場合とある場合の比較	36
5.3	皮膚形状をセンシングする際の断面イメージ	37
5.4	赤外線距離センサのための回路図	38
5.5	アームバンドとセンサ配置	39
5.6	ケースデザイン	40
5.7	腕の回転動作のエラー回避	41
5.8	皮膚形状の変化の視覚化	41
5.9	計算式の図式化	44
5.10	実験環境と構成	45
5.11	X 方向への応力と計測値の関係	46
5.12	ジェスチャー一覧	47
5.13	SenSkin を用いた際の SVM のデータ	50
5.14	SkinWatch を用いた際の SVM のデータ	50
5.15	SenSkin を用いたデスクトップ操作	51
5.16	地図ナビゲーションのアプリケーション	52
5.17	回転操作を用いたアプリケーション	53
5.18	皮膚による変形情報を用いたアプリケーション	53
6.1	指輪型ロボット Pygmy を指に装着した場面	57
6.2	指輪型ロボットを構成する 3 つの指輪型デバイス	58
6.3	指輪型ロボットに内蔵された円形プリント基板	59
6.4	超小型電磁石サーボモータ	60
6.5	超小型電磁石サーボモータ (軸)	60

6.6	3D 出力した筐体部品の展開	60
6.7	コントローラ	61
6.8	指輪型センサ	62
6.9	すべての観察された動物または擬人的な表現（象、カエル、タコ、など）	64
6.10	コラボレーションの観察	65
6.11	コラボレーションの観察（表情変化）	65
6.12	コラボレーションの観察（他者による補完）	66
6.13	人らしい擬人的な表現	66
6.14	親子の観察	69
6.15	親子の観察（子供がりんごをあげる場面）	69
7.1	FluxPaper の構成とデザインの例	74
7.2	FluxPaper の磁束の視覚化とデザイン	76
7.3	FluxPaper の構成とデザインの例	76
7.4	FluxPaper を出力するプリンタの将来的なイメージ	77
7.5	FluxPaper の製造方法	78
7.6	溝付きケース	80
7.7	着磁器の断面図と磁界シミュレーションの結果	82
7.8	スリットデザインを用いた FluxPaper の試料	84
7.9	実験機材	85
7.10	面積比を変化させた FluxPaper の試料	86
7.11	面積比と反発力の関係	87
7.12	スリットデザインの磁界シミュレーション	90
7.13	磁石の形状と漏れ磁束の大きさ（パーミアンス）の関係	91
7.14	単一磁石の空間磁束密度の計算に用いる変数	91
7.15	複数のドットパターンのモデル化とシミュレーション	93
7.16	単一磁石の空間磁束密度のプロット	93
7.17	ドットデザインの空間磁束密度の 3 次元グラフ	95
7.18	ドットデザインの空間磁束密度の 3 次元プロット	95
7.19	書類をまとめるための自己スタック機能	97
7.20	複数の紙片を用いたグリッド機能	97
7.21	3 次元の構造組み立てと吸引・反発力によるプログラマブルな接続	98
7.22	FluxPaper を用いた自動化ホワイトボード	99
7.23	FluxPaper の移動	100

7.24 FluxPaper の背面デザインと動作	101
7.25 FluxPaper の電磁石を用いた動きの表現	101
7.26 カードの選択	103
7.27 カードの背面デザイン	103
7.28 電磁石装置による制御イメージ	104
7.29 組み立ての手順と電磁石装置による制御	105

表 目 次

1.1	文章を書くための道具	5
6.1	デバイスの操作に関する質問項目と評価の結果	64
6.2	スタディ前後での意見の変化と違い	67

第1章 序論

1.1 20世紀から21世紀のコンピュータへ

コンピュータは電気と電波が通じる場所に生きる人々にとって生活の道具の一つになった。コンピュータはパーソナルコンピュータの形だけではなく、さらに小型化された携帯電話やウェアラブルデバイスによって、また環境に埋め込まれたセンサネットワークや自動車を制御する運転補助の機能として使われている。つまり、物理的な環境において電気によって制御される道具にはほとんど搭載されているといってもよいだろう。こうした傾向はますます増えていき、われわれの意識から隠れた潜在的な存在として埋め込まれていくだろう。そして生活の場面を見ても、コンピュータはコミュニケーションの道具として常にわれわれ同士を接続してくれる。一日の始まりにはスケジュールの管理者として立会い、どこへ行くにもナビゲーションの機能を提供してくれる。われわれが生活をする上で必要な電気や水道のように、コンピュータもまたサービスにおけるインフラストラクチャの価値を持つようになった。

20世紀の間にわれわれが必要としていた機能のほとんどは、コンピュータの仮想的な世界の中に造られてしまった。われわれが必要としているデータは、コンピュータデバイスとネットワークサーバ上で分散的に管理されるため半永久的に保管される。そのためデバイスの消失がデータの消失を意味することはなくなった。デバイスの小型化とバッテリーの大容量化が進むとウェアラブルコンピュータの市場が開拓された。ユーザはどこで何をしていても、すぐに情報にアクセスして通知を受けたり知識を探することができる。20世紀に比べて格段に情報の伝達速度とコミュニケーションの質が変化した。同時にデバイスを使う回数も増え、デバイスの形状や種類も増えた。デバイスの進歩だけではなく、コンピュータとネットワークを用いたサービスも向上している。音声認識技術を用いて話しかけることでコンピュータとのインタラクティブな対話が可能になった。機械学習と自然言語処理のアルゴリズム、それを支えるサーバ技術によってメールの文字列から自動的にスケジュールを組んだり、友人を紹介するのは人ではなくオンラインサービスで行われる。これからもコミュニケーション、検索、情報整理といった用途でコンピュータへの依存が高くなる。

これまでの歴史を振り返るとコンピュータの誕生以来、計算機としてのコンピュータの基本的な構成は変わっていない。変わったのはグラフィカルな見た目を備えたオペレーティングシステム、人工知能を始めとしたアルゴリズム、カラー表示によって動きのあるアニメーションを伝達できる液晶ディスプレイなど、ハードウェア、ソフトウェア、そしてインタフェースの技術である。ところが、インタフェースの設計に関しては、20世紀に行われた発明と製品の普及によって事実的な標準となった方式を継承している。こうした歴史の変化とインタフェース設計の停滞は、1990年台から2000年台のコンピュータを利用してきた私にとっても経験の中から触

ることができる。1993 年頃、私が初めて触れたコンピュータは JDL 製の文作くん（CRT モニターに緑色の文字で表示されたワードプロセッサ）であった。キーボードだけが接続されており、マウスではなく十字キーでカーソルを移動して、基本的な文章やフローチャートを作成することができる。その次に NEC 製 PC-9821 シリーズのノートパソコンを利用していた。初めて汎用の民生品コンピュータとして GUI を搭載した Apple 社の Lisa が登場したのは 1983 年 1 月 19 日だが、それから 10 年以上経って我が家に持ち込まれた PC-9821 は、Windows 95 を搭載していた。このときのハードウェアとソフトウェアの構成が、現在でも売られているパーソナルコンピュータとほとんど同じである。

2007 年の大学進学とともに携帯電話を購入した。当時の携帯電話は 10 個の数字を用いた番号キーで日本語を入力する必要があった。Qwerty 配列に慣れ親しんだ私は、携帯電話の入力インターフェースが煩雑で無駄なものに思えたため、他の入力方式を検討した。Qwerty 配列の物理キーボードを備えた機種は主にビジネス用途だったため、電話機の機種代金も契約プランもいくらか高価だったという記憶がある。そこで購入したのが日本で発売された携帯電話としては初めて手書き文字認識機能を搭載した三菱製の携帯電話 D800iDS(図 1.1) だった。これ以前にも Sony の CLIE、シャープの Zaurus、高機能な電子辞書が手書き文字認識機能を搭載していたが、それらは携帯電話の用途がメインではなかった。折りたたみの筐体の上部には従来の携帯電話と同じように液晶画面を配置したが、下部には番号キーの代わりに感圧式のタッチ入力ディスプレイを搭載していた。ここにプラスチックペンまたは指の爪（感圧式タッチディスプレイのため、爪を用いないと認識されない）を用いて文字を書く。書いた文字は一文字ずつ画面上部にスタックされていき、日本語のひらがなから漢字に変換する候補を提示する。残念なことに認識できる文字は英語アルファベット、アラビア数字、日本語のひらがなとカタカナだけであった。購入した後にこの事実気づいたのだが、番号キーで日本語入力を行うよりは「惨めさ」や「窮屈さ」が少ないという点で納得ができた。自分自身を番号キーに日本語を打ち込むための専門のタイプライターとしてよりも、原稿用紙に文字を埋めていく小説家のような余裕さを得ることができた。



図 1.1: 三菱 D800iDS による文字入力的方式

いま、私の手元にはパーソナルコンピュータに匹敵する計算性能と携帯電話の利便性を兼ね備えたデバイスがある。スマートフォンと呼ばれるジャンルを確立した Apple 社の iPhone シリーズは、それまで散らばっていた入力技術、通信技術、アプリケーションを 1 つのデバイスに統合することでインタフェース革命を起こした。このデバイスがあれば通話やメールだけではなく、ソーシャルネットワーク上でのコミュニケーションを可能にする。また、外国人には難しい中国語の入力をピンインではなく手書きで提供する手書き文字入力的方式まで用意されている。スマートフォンの登場はヒューマンインタフェースの研究に大きな変化をもたらした。それまでも PDA¹と呼ばれる小型のモバイル端末が存在したが、ユーザインタフェースと入力方式は通常のパーソナルコンピュータに準ずる方式や様式が採用されていた。入力操作はペンを用いて感圧式タッチスクリーンを押す必要があり、ディスプレイの表示も細かくて緩慢であった。こうしたユーザを取り巻く市場環境はそれほど豊かではなかった時期にスマートフォンが登場し、タッチスクリーンによる直感的なユーザ体験と、好みのアプリケーションをダウンロードして実行できるカスタム性が受け入れられた。ユーザ数が増え続け、今では ACM² の HCI³ の学会 (CHI⁴ や UIST⁵, Mobile HCI⁶) でもスマートフォンを含むモバイル・ウェアラブル分野の研究が盛んになった。

コンピュータサイエンスの発展は著しく、企業同士のシェアの争奪や他の製品による淘汰が起こるなど市場競争も激しい。しかしながら、一度広く普及した方法や方式は変化しにくいという一面もある。その例が Qwerty キーボードであり、GUI⁷ である。とくにヒューマンインタフェース、ユーザインタフェースはユーザの認知的負荷を考慮した設計になるべきである。変更前の方法よりも変更後のほうがユーザのタスク完了速度が速かったとしても、その方法の習得に時間がかかってしまうとユーザにとっては心理的な負荷が大きい。その結果、製品が売れなくなってしまうのは元も子もないので開発者たちはインタフェースの変更については消極的になりがちである。

ここで、現在市場に出回っている商品はもっとも使いやすいものだろうか、という疑問が生まれる。答えは自明である。コンピュータインタフェースは依然として、一部の例外的なユーザを除き、大多数のユーザからは敬遠される存在である。私の両親だけではなく友人もたびたび遭遇する不可解なインタフェースのために作業を中断したり、そもそも始められなかった経験があると言う。著者はコンピュータサイエンスの学士と修士を取得したので一部の例外的なユーザではあるが、大多数のユーザと同じ経験がある。これは誰もが経験することであり、コンピュータの仮想的で潜在的な能力に対する期待と、実際のインタフェースの能力が乖離しているために起きる。実際のところ、コンピュータは我々が想起することをすぐに実現する能力はない。デザイナーとプログラマーによって設計・開発されたコンピュータシステムを使ってはじめてユーザはコンピュータを使用することができる。しかしユーザはこれを忘れて、自分のアイディアが大きなコンセプトを描くのにに対して、コンピュータの潜在能力はインタフェースによって制限されてしまう。

あらかじめ 2 章の内容を言えば、コンピュータのインタフェースは 20 世紀から大きく変わっておらず、21 世紀になってから出てきた研究や製品は 1980 年代にはおよそ登場していた

¹Personal Data Assistant, Personal Digital Assistant

²Association for Computing Machinery

³Human-Computer Interaction [50]

⁴The ACM Conference on Human Factors in Computing Systems

⁵Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology

⁶The Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services

⁷Graphical User Interface

ものである。それにもかかわらず、21世紀のコンピュータは依然として使いやすいものとはいえない。そして、使うときには窮屈さや自分のテンポとのズレを感じる。以降はコンピュータシステムにおけるインタフェースについて述べ、その中から身体を用いることの意味を考えていく。

1.2 インタフェースの設計

コンピュータを扱うユーザにとって重要になるのが、コンピュータとの意思疎通のコストが低く、ユーザが実現したいことが効率的に実現できるかということである。これはコンピュータおよびインタフェースの使いやすさと言い換えることもできる。CLI⁸のように一般的なユーザにとって難解なコマンドを要求するような入力方法では、時間的にも能力的にも負荷が大きすぎる。また、WIMP⁹を用いて設計されたGUIであってもユーザの認知能力に適した設計でないとユーザを混乱させ、エラーを招いてしまう。例えばマウスポインタを動かして何度もアイコンとボタンをクリックしないと目的の機能に到達できないような深い階層構造や、マジックナンバーを超えるアイテムの中から機能を選ばせるようなメニューの設計では、使いやすいとはいえない。また、アイコンやメニューの配置、機能の内容とメニューの名前が一致しておらず、操作を惑わせるような名前では良い設計とはいえない。ユーザはコンピュータに対して「自在」に目的を達成するような設計が望ましい。ユーザが持つアイディア、つまり達成・実現したいことに対して、これを可能にする「自在性」の能力がインタフェースに必要である。この自在性が高いインタフェースは、ユーザにとって使いやすいと規定する。

こうしたユーザインタフェースの問題とは別に、人とコンピュータの間にインタフェースが存在すること自体からくる問題も存在する。インタフェースはユーザの操作を規定し、ユーザの身体性を拘束する。そのため、ユーザの発想やアイディアまでも規定してしまう危険性がある。アイディアやメモを書くときに紙製のノートを用いる人は多い。紙のノートとボールペンは単純に文字を書くための道具ではなく、自分の思考を環境に置くことで視覚化する役割がある。言い換えれば、紙とペンは思考の道具であり、描きながら想像をふくらませる作業を人間に許してくれる。こうした側面はコンピュータにはまだ備わっていない。それではなぜコンピュータではできない作業があり、紙のように実体のあるモノを用いると簡単にできる作業があるのかを考える必要がある。

以降は、コンピュータインタフェースの対象的な存在として、紙のメモ帳を取り上げて説明する。私が幼少期から触れてきたコンピュータも、主に書類を作成して印刷のためのワードプロセッサの役割を持って作られてきた。まずは紙とコンピュータの対比を説明して研究の目的を明確化したあとで、紙以外のモノと先行研究の例示を行う。

文章を書く道具として、紙のメモ帳、GNU Emacs¹⁰、TextEdit.app¹¹を取り上げてみる。メモ帳は物理的な紙の冊であり、ボールペンを使ってアイディアや図を書いていく。紙の上では位置的な制約がなくなり、行をまたいで矢印を引いたり、線で囲いを描いてグループを作ることが

⁸Command Line Interface

⁹WIMP = Windows, Icons, Menus, Pointer

¹⁰Editing MACroS: GNU プロジェクトによるフリーのテキストエディタ。Viを好むユーザもいる。

¹¹Mac OS X に付属するテキスト編集のアプリケーション。Windows なら notepad.exe がある。

できる。Emacs はマクロを用いて強力な検索やテキスト処理が可能である。コマンドを用いてモードを切り替えることで機能にアクセスして、プログラムの実行やメールの送受信も行える。TextEdit.app はシンプルなテキストを編集するための GUI アプリケーションである。画面上部のメニューから機能を選択して、検索機能や表示する文字の大きさやフォントの種類などの設定にアクセスできる。ここで興味深いのはそれぞれの得意分野とターゲットとするユーザが全く異なる点である。

紙のメモ帳は誰でも使うことができるが、大量の文章の中から必要な一節を探したり、マクロを書いて自動処理することはできない。Emacs と TextEdit.app ではそれが可能だが、メモ帳のように自由には自由に図式化したり、好きなところに好きな大きさの文字でコメントを書けない。Emacs は強力なマクロが備わっているが、何をするにもコマンドを入力しなければならず、初心者には到底扱うことができない。TextEdit.app は WIMP の考え方によって設計され、メニューから機能を選ぶことで初心者でも扱うことができるが、プレーンテキストを書く程度しかできない。この3つの道具を操作性、機能性、分かりやすさの視点から比較してみた。(表 1.1)

表 1.1: 文章を書くための道具

道具	環境	操作性	機能性	分かりやすさ
紙のメモ帳	物理	高い (ペンで描ける)	低い	高い
GNU Emacs	CLI	低い (コマンド依存)	高い (高度なマクロ)	低い
TextEdit.app	GUI	高い	低い	高い
Microsoft Word	GUI	高い	高い (メニュー選択)	低い (画面が複雑)

Emacs(図 1.2)、TextEdit.app(図 1.3) は数ある道具とアプリケーションプログラムの対比の中の一例にすぎない。Emacs は原始的なコンピュータの姿をしている。コマンドラインインターフェースにおける設計であっても、整列されたアルファベット、分割された編集画面とコマンド認識画面、反転を用いた選択機能といったユーザインタフェース上の工夫がある。こうしたインタフェースデザインの工夫は GUI のアプリケーションにも反映されている。TextEdit.app はシンプルな例を持ち出したが、今度は Microsoft Word¹² を挙げてみる (図 1.4)。印刷物を印象的に見せるための装飾や色使い、3D のアート表現などを可能にしている。機能はすべてメニューを通してアクセスでき、マクロ機能を用いてユーザの入力に対してインタラクティブに変更や更新を加えられる。Word は WYSIWYG¹³ に基づいた設計のため、文章作成をするためにとても良いアプリケーションソフトウェアであり、デファクトスタンダードとなっている。

ところで、例えばテキストエディタや Word のようなアプリケーションソフトウェアを使えば良い文章やアイディアを書くことができるだろうか。これまでの例でも述べたとおり、コンピュータのシステムを人間が使う場合に、インタフェース設計や技術を用いても解決できない問題が残っている。例えば紙のメモ帳には検索機能やマクロ機能、文字の色を変更するオプションはないが、ユーザが思い通りの構図でペン先の位置に描くことができる。言い換えれば、紙とペンを用いればすぐに、自在に、制約なくアイディアを描き出すことができる。これはコンピュータにはない

¹²Microsoft 社のオフィススイートに含まれる文章作成ソフトウェア

¹³What You See Is What You Get: ディスプレイ上での表示と処理内容が一致している設計

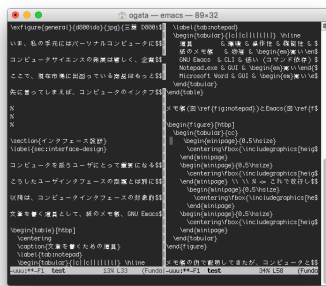


図 1.2: GNU Emacs



図 1.3: TextEdit.app

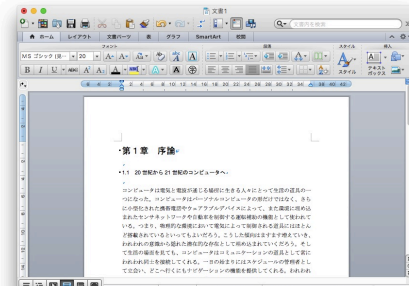


図 1.4: Microsoft Word

特性であり、コンピュータのアプリケーションが仮想的に実現していても、物理的な作業とは根本的に異なる概念である。

コンピュータの仮想的な処理は高速であり、データの変更や編集はあたかも頭のなかで文章を組み立てるかのように行うことができる。しかしながら、コンピュータは今のところ人間のような身体は持たない。コンピュータはヒューマンインタフェースと呼ばれるインタフェースデバイスを用いて、入力と出力を行う。具体的にはディスプレイによって操作結果や状態を表示し、プリンタで文章データを具体化する。入力にはマウスとキーボードを用いる。ユーザはマウスとキーボードの方式を覚え、それに合わせた身体の制御を行う。コンピュータを用いることと物理的な道具を用いることの違いは、作業の結果だけではなく作業途中の活動にも影響を及ぼす。

1.3 物理的な身体とヒューマンインタフェース

コンピュータによって仮想的なアプリケーションが次々と登場した。最初はワードプロセッサ、そして次第にカレンダーなどがアプリケーションとして物理的な手帳が取り込まれていった。特に Macintosh の初期の動きについて [47] (原著 [124]) で詳しく紹介されている。

人類が生み出したアプリケーションはコンピュータに取り込まれる方向に進化してきた。従来の物質的なアプリケーションに比べて、コンピュータの記憶、検索、プレゼンテーションの性能は、人間の能力を凌駕して作業効率を劇的に向上させた。今日のコンピュータは人間に効率性をもたらしたが、同時にコンピュータの複雑さやメタファーに戸惑い、ユーザとアプリケーションの距離を広げている側面もある。

ユーザにとって、コンピュータの利便性とアプリケーションの自在性はトレードオフによって決定されるか、コンピュータ上のインタフェースデザインによって解決される問題かのように思われている。ところが、コンピュータの利便性はコンピュータの外にも持ち出すことができる。物理世界におけるコンピューテーションを実現するテクノロジー（技術）とテクニック（技法）によって、アプリケーションを元の姿に戻しながら、利便性の退化を避ける方法が可能である。当然ながらコストは高くなるが、コンピュータデバイスとそれを実現する計算資源、センサ資源はコストダウンが見込め、アクチュエータも設計の工夫によって目的の機能を実現できる。

ところがコンピュータの仮想的な構造は、ときにユーザに対して戸惑いや疎外感を感じさせることがある。コンピュータが仮想的であることによる利点と弊害を指摘している人は多く、D.A. ノーマンもその一人である。彼は自著「誰のためのデザイン？」[122]において、モノがもつ認知的な作用を「アフォーダンス」という用語で説明している。) 仮想的なコンピュータを用いることでユーザの自由度が下がってしまう問題は、その後 HCI¹⁴ の研究分野で活発に議論された。ユーザの身体運動を取り入れたヒューマンインターフェースの研究が登場し、その初期にはマイロン・クルーガーの VideoPlace [43]、Bolt らの Put that there [9] などが挙げられる。また、パーソナルな存在であったコンピュータを複数人で扱える存在に拡張するために CSCW¹⁵ のような分野も生まれた。

インタフェースはユーザにとって有益な情報であるデータと、利用者であるユーザを結びつける役割がある。コンピュータの恩恵を得るためにユーザが行う目下の操作方法は、硬いガラスかプラスチックのデバイスの上で指を動かすことである。コンピュータの進化において計算性能と通信速度の向上、デバイスの軽量化とは対照的に、ユーザが触れる面に対してほとんど進歩がない。ユーザは依然として、硬くて工業的なインタフェースに仕切られた場所でコンピュータとの対話を行っている。この弊害を受けているのは、「データ」とは遠い関係にあるコラボレーションやクリエーション、ディスプレイの外にある日常のアプリケーションである。

次の節では、コンピュータと物理的な道具の違いを洗い出し、ヒューマンインタフェースの問題点も議論する。その上で、21世紀のコンピュータの設計について物理的な道具の観点から議論し、これを実現するアイデアを述べる。

1.4 研究の目的

これまで物理的な道具の例と対比しながら、コンピュータの設計とそれに基づいたアプリケーションについて述べてきた。紙とペンを用いてアイデアを書く行為と、コンピュータのアプリケーションを用いて文章を作成するという行為を例として、物理的な道具と仮想的な道具の違いについて比較した。コンピュータが仮想的な計算を行うことは、人間が脳内で思考を巡らせたりアイデアを考えることのアナロジーである。

コンピュータは電子回路によって計算を行う装置であると同時に、あらゆる入力装置と出力装置を組み合わせることで通信を行える。これはあたかも人間が様々な道具を使う方法を会得するかのようであり、コンピュータはデバイスによって身体を持つことができる。また、ヒューマンインタフェースデバイスによって人間との関係を物理的に持つことができる。しかしながら、もともと原理の異なる人間とコンピュータの関係性を設計するには、人間同士の関係性や、コンピュータ同士の関係性とは異なり、双方が持つ物理的な関係性を考慮する必要がある。

本論文の研究において目指すのは、人間とコンピュータの物質的な関係性を見直し、ユーザ側の立場から設計し直すことである。従来のヒューマンインタフェースの研究では、ユーザインタフェースと呼ばれるコンピュータ側の設計の視点から考えていた。また、ユーザの身体性を考慮し

¹⁴ ヒューマンコンピュータインタラクションの略称。ユーザインタフェース、CSCW、人間工学、デザインなどを包含する学際的な研究領域のこと。

¹⁵ Computer Supported Collaborative Work

た設計を取り入れたヒューマンインタフェースでも、ユーザインタフェースでの操作やメタファに対して、身体運動を対応させる方法で関係性を構築してきた。こうした方法ではコンピュータ側のインタフェースの設計が物理的になるが、ユーザの身体は物理化したコンピュータに合わせた動作を行うことで関係性を構築してきた。言い換えれば、ユーザが物理的なインタフェースの機能を受身的に享受してきた。

これに対し、本論文は身体の視点から、人間とコンピュータの関係性における設計思想を打ち出す。ユーザの身体を能動的に設計に反映するために、身体が持つ意味を捉え直す作業が必要である。この作業のことを身体の「顕在化」と定義して、従来のコンピュータにおける身体の「潜在的」な方式とは対比して考える。同時に、身体の視点から設計思想を打ち出すことで、従来のヒューマンインタフェースに介在する問題の解決も目指す。

これらの「顕在化」と身体性の意味の再定義を合わせて「ネイキッドインタラクション」(3.3節)として定義する。また、ネイキッドインタラクションの設計を示すために、身体と物理環境の間をつなぐ役割として「身体性メディア」(3.4節)を定義して導入する。これらを合わせた「身体性メディアを伴うネイキッドインタラクションの設計」について議論する前に、従来のヒューマンコンピュータインタラクションにおけるヒューマンインタフェースの歴史と研究について2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 節で触れる。

1.5 論文の構成

2章は、インタフェースの歴史と研究、またネイキッドインタラクションと身体性メディアを導入するにあたって必要となる共通概念や、対比するためのアイディア、ネイキッドインタラクションを実現するためのプロトタイピングに必要な技術や技法について触れる。これまでの議論の中で、ヒューマンインタフェースの議論が多く取り上げられた。本論文が対象とする領域を含むコンピュータの設計思想だけではなく、むしろこれまでのコンピュータシステムから出発した設計思想を見直すために対照的に引用して説明する。

3章では、ネイキッドインタラクションと身体性メディアをそれぞれ定義して説明する。また、2章での従来の設計思想と対比させ、本論文のコンセプトと有効範囲、そして学術的な貢献について述べる。ネイキッドインタラクションはプロトタイピングを通して検証することが必要であるため、5章、6章、7章のプロトタイピングについての関係性も説明する。

4章は、2章で説明されたプロトタイピングを実現する研究(5章, 7章, 6章)に対して、それぞれ個別に先行研究と関連する技術・技法をまとめる。特に、2章では説明しきれなかった研究の中で、プロトタイピングとの関連性がある研究を重点的に説明する。

5章, 6章, 7章はネイキッドインタラクションを検証するためのプロトタイピングとして行われた研究プロジェクトである。それぞれ、皮膚、指、紙というテーマでネイキッドインタラクションを具現化する。皮膚を用いて身体の触覚を知覚し、その皮膚をコンピュータに対する道具として設計する。次に、身体の延長として指輪型のロボットデバイスを設計する。身体としての手指とロボットによって、普段のコミュニケーションを身体中心のコミュニケーションに変換する。思考の記憶装置としての紙を、身体の延長としての道具として設計し、またコンピュータからの制

御も可能にした。

最後に8章では、全体の統括とネイキッドインタラクションの設計思想、そしてプロトタイピングの研究を通して得られた知見をまとめる。また、今後のネイキッドインタラクションの展望についても述べる。

第2章 背景

本論文においてネイキッドインタラクションと身体性メディアを解説するにあたって必要となる、次の概念について説明する。HCI とヒューマンインタフェースの歴史と研究、対比するためのインタフェースコンセプト、ネイキッドインタラクションを実現するためのプロトタイピングに必要な技術や技法である。

ヒューマンインタフェースの研究は、1980 年代で二分して考えられるだろう。1998 年に初版本が発行された「ヒューマンインタフェース」[125] に次のような記述がある。

1980 年代には現用の HI はすべて登場していた。

今、家庭やオフィスで用いられているヒューマンインタフェースを見るとおおよそは 1984 年の Macintosh 発売以来、USB などのインタフェースの変更を覗いては大きな変化は見られない。いわば、1980 年代までの研究開発が今日までのコンピュータの歴史を作ってきた。

では、それ以降の研究はどのように発展して、実用化されようとしているのか？それはまさに現在進行形で進んでいる。ここでは本論文の主眼とする 1980 年代以降に注目された実世界指向、タンジブル、そして身体性といったキーワードを中心に説明していく。そして、最後に本論文が目指すインタフェースのコンセプト (2.3 節を参照) との違いと、本論文のアイデアをサポートする技法と技術 (2.5 節を参照) について解説、補足していく。

2.1 人間の拡張としてのコンピュータ

ヒューマンインタフェースはいまでは HCI の文脈で語られることが多くなった。HCI は人とコンピュータの間のコミュニケーションにおける問題を解決するために注目されてきた。HCI の重要性に焦点が当たったのは、初期のコンピュータ ENIAC が登場した 1940 年代ではなく 1980 年代になってからだという [50]。それまでは UNIX システムにおいて、コマンドラインインタフェース (CLI) の環境を用いてコンピュータと対話を行っていた。1980 年代に入り、インタラクションの問題が議論された。

もともとはヨーロッパで人間が機械を使って作業する上での効率が問題になった。これを Ergonomics と名づけて、人間工学として研究が始まった。対してアメリカではこれを Human Factor と呼び、人間の認知の面から研究を行った。HCI に関する有名な国際会議 ACM CHI もその正式名称が *The ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* というのを考えれば、Human factor という用語がインタフェースやインタラクションの概念に近かったことが伺える。

機械での効率の問題は、機械よりも高度な計算機能を有したコンピュータにも引き継がれた。コンピュータとユーザの間を取り持つためのインタフェースが議論させる以前に、人類のためのコンピュータの可能性はすでに議論されていた。その一つが人間の知能や能力をコンピュータによって増幅という考え方である。

サイバネティックス (Cybernetics)[112] はノーバート・ウィーナーが1965年に同名の著書で提唱した人間と機械の関係性を論じた概念である。その日本語版の第1版に寄せたまえがき [128](P.5) に次のようにある。

われわれの状況に関する二つの変量があるものとして、その一方はわれわれには制御出来ないもの、他の一方はわれわれ調節できるものであるとしましょう。そのとき制御できない変量の過去から現在にいたるまでの値にもとづいて、調節できる変量の値を適当に定め、われわれに最もつごうのよい状況をもたせたいという望みがもたれます。それを達成する方法が Cybernetics にほかならないのです。

これを発展させれば、Cybernetics は制御できない領域の数量についても、道具を用いることで調節可能な世界に変えることができるということである。機械は人間が持てない力を与え、人間の能力を拡張することができた。これを電子的、情動的に扱うのがコンピュータである。コンピュータによる人間の能力拡張についてはダグラス・エンゲルバートが Augmenting Human Intellect[12] というレポートで言及している。近年はコンピュータの計算能力の進歩、小型化、装着などが容易になり、ACM 共催で Augmented Human という学会も開かれている。

コンピュータを人間の拡張として用いるというアイディアでは、Naked Interaction も同様である。コンピュータをインタフェースから取り出すことで、道具としてのコンピュータを設計するコンセプトである。とりわけ、コンピュータは人間の制御できない世界での事象を取り扱っている。コンピュータはいまや、数理統計学、自然言語処理など、人間が処理の内容を理解できる領域だけではなく、深層学習といった処理の途中の状態を理解することが困難な領域まで計算可能にしている。

ところで、コンピュータを使う方法についてはどうだろうか。この章の最初にも書いたが、ほとんどのインタフェースは1980年には登場していたという。今でもオフィスで使われているのはマウスやキーボードといった方式だ。それはコンピュータ上で展開されるユーザインタフェースについても同様のことが言える。デスクトップメタファもその時期に作られたユーザインタフェースのコンセプトである。

2.2 インタフェースの変遷

コンピュータの詳しい歴史については、MacKenzie[50] の Human-Computer Interaction や、田村 [125] の「ヒューマンインタフェース」に譲るが、簡単にその歴史を追ってみたい。1940年代に入ると、アメリカを含めて戦争に対する備えと技術開発が重要視されていた。特に当時の言葉で説明するならば「知能機械」による飛行機の操縦や、高速化する飛行機の軌道を予測しながら射撃する「知能機械」をいかにして達成するかという課題が持ち上がった。こうした課題の解

決は、第2次世界対戦中には当然間に合わなかった。しかし、操縦席における操作性と安全性の向上や製造工場での効率化といった Ergonomics の課題と同様に、戦時中の教訓と需要はその後の技術開発と国防計画に反映されることになった。

ノーバート・ウィーナーがサイバネティックスを発想した1940年代の当時は、アメリカでは超高速計算機が計画されていた[128]。その後、コンピュータの製造にかかる費用と規模が小型飛行機と同じぐらいであった時代を経て[125]、1981年の5月に National Computer Conference (NCC) と呼ばれるコンピュータの会議に Xerox Star というワークステーションが GUI を持ったコンピュータとして登場した。Xerox Star は、1978 年ごろに Xerox PARC が中心的役割を果たして開発した GUI を搭載した。ここには1968年にダグラス・エンゲルバートが発明したマウスも接続され、WYSIWYG¹ という概念が生まれた。アイコンとマウスによる WIMP の設計があり、直接操作 (Direct manipulation) が実現された。こうして、コンピュータのインタフェースは、文字を用いた CLI から、視覚的な効果を持った GUI へと進化していった。

2.3 インタフェースコンセプト

GUI の発明以降、インタフェースは様々な現実世界の機能をコンピュータに取り込むようになった。例えば、序論にも登場したワードプロセッサである。もともとはタイプライタが文章を作成するための機械であったが、これがコンピュータに代替された。コンピュータの利点は記憶できること、そして修正ができることであった。抽象的な情報を扱うのに適しており、ワードプロセッサに始まり、カレンダー、手紙（いまでは E メールとなった）など、様々なアプリケーションがコンピュータに取り込まれていった[124]。ちなみに、今日のコンピュータに搭載されているキーボードのアルファベットの並びは Qwerty 配列と言われているが、これはコンピュータの誕生以前からタイプライタで用いられていた。打鍵を触る際に指がもつれたり、タイプライタの鍵盤がもつれないよう、左右のバランスが良くなる設計であり、これもインタフェースの設計の一つである。

ディスプレイは光源の配列が点滅するだけの装置であったが、人間はそこに意味を見出すことができた。壁画を見ても書籍を見てもそこから意味が読み取れるように、GUI も人間が持つ認知の能力を用いたコンピュータの設計とも言える。最初の Macintosh には搭載されなかったが、カラーディスプレイは画期的な効果をもたらした。ノーマン自身、最初にカラーディスプレイを見た時には必要性を感じなかったそうだが、使ううちにカラーの重要性に気づき、不可欠なものになったと述べている[123]。ノーマンの言葉を借りれば、カラーは人間の情動に働きかけるものであり、さらにアニメーションは人間に注意を促し注目させる力を持っている。この点は、ブレンダ・ローレルの著書[124]のエッセイでも指摘されている。(第4部「技法と技術」の「インタフェースにおけるアニメーション」を参照)

インタフェースを構築する上で欠かせなかったのがメタファである。GUI はまさにメタファの産物であった。ディスプレイに現れるものが単なる文字列ではなく、人間が視覚的に見て分解可能な部品に分けることで、操作可能な世界として映し出すことができた。WIMP に含まれるの

¹What-you-see-is-what-you-get

は、ウィンドウ、アイコン、メニュー、そしてポインタである。ウィンドウによって機能と意味を分割して、アイコンはユーザに操作の可能性やアプリケーションの枠割を気づかせるものであった。メニューはユーザに選択可能な行為を提示して、ユーザの記憶に頼ること無く、コンピュータが持つ機能を選べるようにした。そしてポインタは、コンピュータにおいてたびたび失いがちな操作の箇所を知らせ、ユーザが縦横無尽に移動できる道具である。

コンピュータにおけるメタファは、いわば現実世界の書き写しであり、これによってユーザは抽象的なコンピュータを理解することができた。しかし、この仮想的で抽象的な機械をうまく設計しなければ、人間はコンピュータの世界とうまく通信をすることができないのも確かである。アラン・ケイは「Macintoshこそ批判に値する最初のインターフェースを実現した」と主張したようである(ドナルド・A・ノーマンの寄稿による、[124], P.170)。その後、30年近くの新化を経てMacintosh、Windows、Linuxの各オペレーティングシステムと搭載されているGUIは成熟した。しかし、その一方で解決できない問題も数多くある。コンピュータを使用すれば簡単な作業と分かっていても、一度用意されている操作を離れれば制約が出てきてしまう。また、コンピュータを起動したり、アプリケーションを展開するのには時間がかかり、その頻度が増えれば利便性は下がってしまう。

コンピュータの歴史において、GUIは有効な役割を果たし、仕事を効率化し、社会の発展を加速させた。それと同時に、人間から自由で、自然なコンピュータの体験を奪ってしまったのも確かである。また、メタファを否定するアイディアもある。メタファ自体が抽象的なものであり、自然ではないと考える動きもある。例えば、Steve Mannは、Naturalという言葉コンピュータに適用し、また1990年代にはDirect User Interfaceという言葉とともに*Metaphor-free computing*を提唱している。

次に、現状のメタファによるユーザインタフェースのコンセプトと、アンチメタファによるインタフェースのコンセプトの両方を見ていく。これ以降は、GUIやWIMPといった従来のコンシューマ向けユーザインタフェースに対して、さらに直感的な操作を目指した手法やアイディア、コンセプトを説明していく。

2.3.1 インタフェースの実世界指向

コンピュータが単に抽象的な計算を行うだけの機械ではなく、人間の能力の延長であると気がついた人がいた。それはウィーナーが提唱したCyberneticsであり、エンゲルバートのHuman Augmentationにも現れている。そして、それをコンピュータを用いて最初に実践したのはサザランドであった。サザランドは1963年にSketchpad[102]を、1968年にHMDの初期のアイディア[103]を発明している。その後も、人間と一体化した、または身体の延長にあるコンピュータの設計がなされてきた。

1980年の論文”Put-that-there”[9]が発表されてから、MITメディアラボにおいて身体メディアインタフェースへの関心が高まったようである[125]。それ以降、実世界指向のインタフェースが注目されてくる。MITメディアラボはインタフェースの領域では目を見張るアイディアと研究成果を発表してきた。こうした成果のあと、コンピュータを用いるための入力装置が用途と身体の

動きに合わせた設計を行っていく。光学式の計測のためにカメラを用いたり、触覚を取得するためにゲージセンサを用いるのもその一例である。

しかし、こうした実世界指向の操作方法はあまり定着しなかった。市販されるコンピュータはいまだに GUI を搭載している。自然な体の動きを用いたり、身体による操作を許す方法は依然として少ない。最近では技術的な手法の向上や、計算機の性能向上によっていくつかの自然な入力方法が実現されている。

2.3.2 Natural User Interface

手書き文字認識やタッチスクリーン、Kinect によるボディートラッキングである。これらは研究開発での発表、もしくは研究開発における使用が主な用途であった。21 世紀に入り、実用化が進んできた技術を含めながら、NUI² の研究の変遷と、現在の研究について触れていく。

Natural という言葉をはじめてインタフェースに用いたのが、S.Mann と言われている。[53] その前後でも、人間の自然な身体の動きを用いたインタフェースの提案がなされてきた。1980 年の”Put-that-there”[9] は指さし動作と音声言語のマニピュレーションによって実現されており、自然なインタフェースの一つである。

(1) 2000 年以降の NUI

2009 年の SIGGRAPH Asia Emerging Technologies では、MIT Media Lab の学生であった Pranav Mistry が Sixth Sense[58] というシステムを発表した。プロジェクタとカメラを組み合わせたシステムで、指にカラーマーカーとしてキャップをはめて使用する。カメラで取得した画像から指の動きを認識して、写真を撮影したり、プロジェクタの前にかざした新聞の上にニュース動画を投影、航空券のチケットにリアルタイムの遅延情報を投影するなどして、現実世界を拡張することができる。

(2) 2010 年以降の NUI

技術的手法として Touché [89] と呼ばれるタッチセンシング技術が挙げられる。従来の静電容量方式を用いたタッチセンシングの手法に対して、静電容量の計測に用いる定常波の周波数成分を変調して、複数の周波数の定常波による計測を行う。すると、タッチを行う際の手や指の構成、触り方によって周波数成分に分布する静電容量が変化する。この違いを機械学習によってパターンマッチするのが Touche の方式である。

インタラクションテクニクとして、WorldKit[115] という Kinect を用いたインタラクション領域を作り出す手法がある。この手法では、平面の領域を検出し、その領域を手で払うようにするとボタンなどのインタフェースをプロジェクタで投影する。ユーザはそこに投影された部品を操作することで、部品に紐付けられた機能や同じ空間の家電にアクセスできる。

²Natural User Interface

2010 年 10 月には製品として Microsoft 社から Kinect が発売された。Kinect は赤外線を用いた距離計測によってユーザのリビングでの動きを取得する。Kinect の登場によって、NUI の研究開発が促進され、様々なアプリケーションが生み出された。

2.3.3 Tangible User Interface

タンジブルインタフェースは 1995 年の国際会議 CHI において、当時 NTT 研究所の石井裕氏が発表した Clearboard に端を発する。その後、MIT メディアラボに移籍して研究を行い、1997 年の CHI においてそれまでの成果をまとめた論文において発表した。論文 [29] のタイトル「Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms」が意味しているのはタンジブルというコンセプトは情報を触れるようにすることである。タンジブルは、それまでの実世界インタフェースの概念とはことなる視点を提供している。タンジブル・ユーザ・インタフェース（以下、TUI）は GUI と並べて説明される。図 2.1³ は GUI、TUI⁴、Radical Atoms を概念的に比較したイメージである。GUI では水面下に情報が沈んでおり、ユーザはコンピュータインタフェースを通してその情報にアクセスしている。次に TUI はコンピュータインタフェースから頭をのぞかせた情報であり、その情報を触ることができる。ちなみに、隣が情報が実態を伴って物理的に作用する Radical Atoms である。

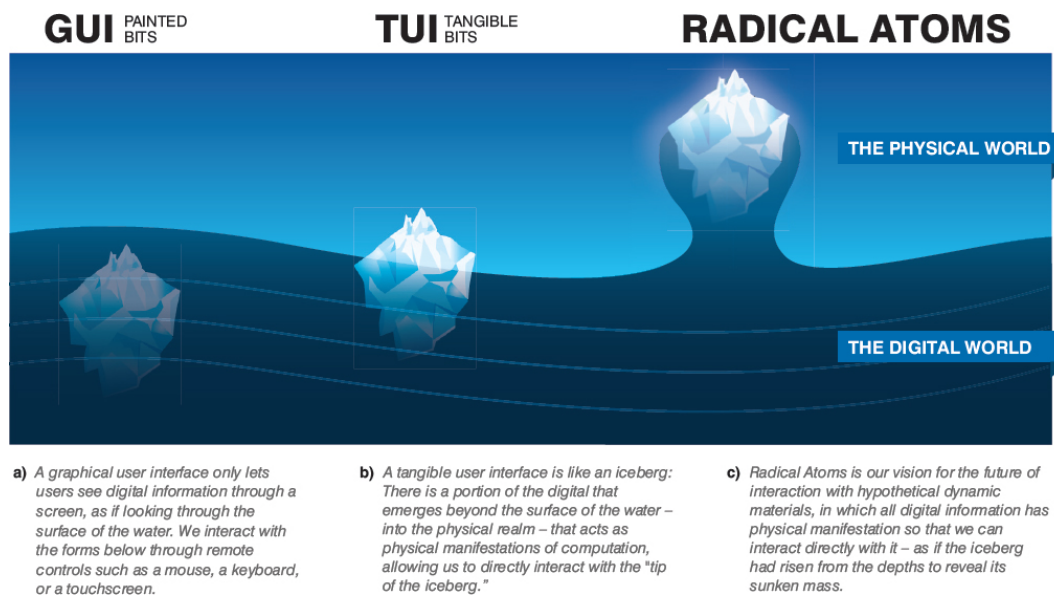


図 2.1: TUI と Radical Atoms の概念図

他にも ‘Radical Atoms’ という概念を提唱している。Radical Atoms は本論文の「紙のインタラクション」（第 7 章）で説明するアプリケーションに近い概念であるが、動かすものが鉄球やプラスチックで作られた物体であり、そこにプロジェクションしている点でメタファ的な設計である。

³ACM Interactions[1] から掲載。

⁴Tangible User Interface

TUI をテーマにした研究は枚挙にいとまがない。そのうちでもいくつか紹介する。このコンセプトを提唱した MIT Media Lab の Tangible Media Group から発表されているものでも、Triangles[19]、Actuated Workbench[76]、Mechanical constraints as computational constraints[78]、Relief[49] などがある。また、Radical Atoms をテーマにしたものには ZeroN[48]、InForm[17] などがある。

2.3.4 Organic User Interface

すでに OUI⁵ は、ACM が発行する Interactions という雑誌で特集 [106, 28, 84, 23, 77, 92, 39] が組まれ、定義がされている。ここでは日本語で「有機的な操作」によって目的が達成されるインタフェースと定義しておく。

DisplayStacks[18]、PaperPhone[45]、FoldMe[36] では紙のメタファを操作に取り入れ、折る、曲げる、たたむなどのメタファをインタフェースの身体的な操作に取り入れている。また、FlexPad[95] は紙の上にプロジェクトで像を投影する自由変形可能なディスプレイの技術と技法について研究している。

OUI のアイディアはタンジブルに共通する研究が複数ある。PneUI[117] も柔軟な素材を活かした入出力を行っている点で、OUI の一つといえる。

2.3.5 身体的インタフェース

タンジブルと同時に出てきたアイディアに、暦本純一氏の「身体的メディア」がある。情報処理学会情報メディア研究会のシンポジウム資料において「情報メディアから身体的メディア」(From Digital Media to Physical Media) と題された論文 [126](その後、建築雑誌にも掲載 [127]) に、それまでの暦本氏の研究実例と主にコンセプトが説明された。

「身体的メディア」(Physical Media) のアイディアは「タンジブル」とは異なり、コンピュータの情報処理装置としての利点と、インタフェースの物理的手法の組み合わせであると考えられる。「身体的メディア」の登場によって、インタフェースはセンサとアクチュエータもしくはプレゼンテーションとうまく連携しながら、情報世界の拘束を脱して物質世界と密接に情報を提示する方法を手に入れた。そしてこの延長線上に「身体性メディア」(Embodied Media) が存在する。

2.4 身体性インタラクション

身体性メディアを考える上で欠かせないのが、身体を用いたインタラクションをサポートする枠組みと、その環境である。ここでは、環境と素材 2.4.1、Desktop 2.4.2、ウェアラブル 2.4.3 について沿って解説する。

⁵Organic User Interface

2.4.1 環境と素材

空間的に仕切るための仕組みとしていくつか紹介する。Rekimoto の Squama[85] は、透明な液晶パネルをタイル上に並べて壁を作り、その壁の透過と不透過の状態をインタラクティブに切り替える。ユーザが室内にいる部屋であれば、外部にいる人から直接見えないようにし、部屋に果物があればその箇所だけ日が当たらないように日光を遮る。

Jamming User Interface[16] は素材に着目した研究である。ゴム製の袋のなかに粉体が入れているため、空気を抜くと固くなるインタフェースを自由形状で生成できる。PneUI[117] にも共通する素材であるが、どちらも空気によって制御されるためコンプレッサが必要である。コンプレッサを用いる限り、この方式はデモンストレーションの段階に留まってしまい、インタラクションデザインで議論が終わってしまう可能性もある。素材や材料工学の面からのアプローチが期待される。

2.4.2 Desktop と Tabletop

DigitalDesk[111] は環境にデジタル情報を投影した例の一つである。テーブルに乗っている書類に対して情報を投影して、インタラクティブなコンピュータの機能をテーブルの上で実現している。PlayAnywhere[114] はテーブル上の指の動きをビジョンによる計測で、またプロジェクタを使ってテーブル上に像を投影するシステムである。こちらもテーブルの上で指先を使って情報やアプリケーションにアクセスできる。

Microsoft 社が発売した Surface⁶ と呼ばれるテーブルトップ型コンピュータも注目に値する。現在ではタブレット型コンピュータに市場が置き換えられてしまったが、複数の指と複数の人によるインタラクションを提供した点で画期的である。認識には赤外線カメラを用いて、プロジェクションによって投影されたスクリーンの下から赤外線カメラで指や手の影を取得する。

こうしたテーブルトップの装置に対して、触覚を与える研究も行われている。Bau らの TeslaTouch[5] は electrovibration と呼ばれる擬似触覚を、皮膚と電極の間に生じる電位差によって提示する。

2.4.3 ウェアラブル

ウェアラブルは UbiComp (Ubiquitous Computing) のコンテキストで発展してきた。

指輪を例にしても、赤外線による心拍の計測 [56]、指の曲げを計測する手法 [69] など、多くの手法が提案されてきた。

指輪型のデバイスに 1 軸のジャイロセンサと赤外線距離センサを搭載した LightRing[37] は、最低限度の構成ながら 2 次元平面上を指でなぞる動きを詳細に計測できる。詳細な手の動きを取得するためのウェアラブル計測技術には、例えばデータグローブ [96] のように手全体を覆ってしまう必要があった。近年では赤外線カメラやその他の計測手法によって、精度とのトレードオフの中で形状や機能の利便性を向上させている。

⁶2016 年現在は、Microsoft 社が発売したタブレット型コンピュータの名称に変わっている。

腕時計型のデバイスの操作に皮膚の変形を計測して反映する手法 [68] がある。これは腕時計型では画面の領域が狭くなって操作しづらい問題を解決する試みである。また、画面を指の爪に搭載して、指の動きや指が触れるものと連動するアプリケーションを提案した NailDisplay[97] もある。

このようにウェアラブルとウェアラブルを実現するための技術とデザインは、身体の動きや部位、日常の中の行動に合わせてそれぞれのアプリケーションやデバイスが設計されている。

2.5 技術と技法

ここでは、科学技術のことを *Technology* = 技術、科学にかぎらずデザインその他を含めて専門的な技術を *Technique* = 技法と呼ぶことにする。

ここでは、計測技術とアクチュエーション技術をまとめて科学技術的なアプローチとして紹介する。

次に、インタラクションデザインや、Personal Fabrication で用いられるインタフェースのデザインについて、技法的なアプローチとして紹介する。

2.5.1 計測技術

計測技術はインタラクションの背景となる重要な要素である。様々な方式があるが、主に電気を用いて行うが、ウェアラブルなどバッテリーで駆動するデバイスでは消費電力が低い方式が好まれる。その中でも、静電容量方式はタッチを検出するのによく用いられる。また、電波を用いた接触や近接の認識も好まれる。消費電力を気にしない場合には RGB カメラや赤外線カメラによるトラッキングが用いられて、Kinect も主なモーションキャプチャカメラも赤外線を用いる。

赤外線による身体動作の計測をするものに、Masai らの AffectiveWear[54, 55]、iRing[69]、SenSkin[67]、LightRing[37] などがある。

本論文では皮膚の形状変化を赤外線距離センサで取得しているが、それ以外の素材に対して研究したものもある。例えば、紙のように柔軟な素材でも正確に形状変化を取得する方法に FlexSense[87] がある。

2.5.2 アクチュエーション技術

HCI の研究分野において用いられるアクチュエーション技術には、すでにツールキットとして発売されたり、技術的に成熟したものが多い。よく見られるものにモータがある。とくにサーボモータによって角度を調節したり、ステッピングモータによって回転させるなどの方法が用いられる。

紙によく取り付けられるバイオメタル (形状記憶合金)、Hiroshi Ishii らのグループでよく使われるリニアアクチュエータとエアーコンプレッサなど、最近では素材によってある程度の組み合わせが定型化していたり、研究グループによって得意な技術が繰り返し使われている。

その中でもとくにユニークなものには、ITO 基板を用いて紙を電圧で移動制御する手法 [3, 4]、触覚硬化を空気砲で実現する手法 [94] がある。

本論文の FluxPaper は磁力を用いてアクチュエーションを実現しているが、他にも磁力を用いた事例がある。FingerFlux[110] はサーフェイス状の電磁石の磁界制御によって、指に装着した磁石に対して触覚提示を行う。

小型の電磁石アクチュエータを用いた触覚提示も研究されている。Rekimoto の Traxion[86] は、電磁石アクチュエータに与える電圧の波形をのこぎり型にすることで、非対称な振動を創りだして人間が指でつまんだときに片方向に引っ張られる感覚を提示する。

2.5.3 インタラクションデザイン

インタラクションデザインは、UI の設計やデバイスのデザインなどで技巧を凝らすことで問題を解決したり、目標を達成する方法である。そこにはハードウェア的な、また電子・電気・物理的な発明や技術革新は含まれない。しかしながら、インタラクションデザインの研究は既存のハードウェアやコンピュータデバイスの構成を変えずに機能を提供できるため、ソフトウェア上では仮想的で組み換えの自由度が高いか、ハードウェア上でもソフトウェアの補助を加えて新しいインタラクションを提供できる可能性がある。

WorldKit[115] は Kinect を用いて部屋全体をインタフェース化する可能性を示した。また、FlashTouch[66] はスマートフォンの構成部品やセンサを用いて、情報通信をする方式を確立した。ほかにも、ノート型パソコンのキーボードを手でなぞった音をマイクで集音して解析することでスライド動作を行う [34] や、同じくノート型パソコンのマイクから集音した音を分析してディスプレイの前にかざした手の遠近を計測する手法 [20] が提案されている。

2.5.4 Personal Fabrication

パーソナルファブリケーションは個人でもものづくりを楽しめる仕組みである。この仕組みには、ユーザに使いやすい、結果が見えるか予測できる、身の回りのものをデザインできる、などの特徴がある。これらの特徴は、インタフェースを設計する上で重要であるだけでなく、これまで「コンピュータに親身だった」ユーザ以外にもその裾野を広げるという意味で、意義があると考えられる。

例えばプリント基板を紙に印刷する技術 [35] によって家庭でもプリント基板を製造できる。3D プリントは Staratasy 社の特許期限の終了に合わせてブレイクスルー的に低価格品と新規手法による製品が登場し、主に ABS 樹脂を材料とするプラスチックの積層出力が可能になった。これに関連して、SIGGRAPH でも数学的アプローチによる効率的な柔軟物の印刷手法 [91] が提案されている。また、Koyama らも 2 つの物体同士を結合するための手法 [42] を開発している。

またアクチュエータとしてのディスプレイや表示技術に関する Fabrication 事例も多い。紙などの素材の上に通電によって発光する塗料を塗布することで、フィルム状のタッチディスプレイを制作する技術 [74] がある。Printed optics[113] は光学的な内部構造をプリンタで出力するため、

光の反射や投影場所をオブジェクトの中に反映する。これにより、光学センサの形状や物理的な方式の新規な設計をしたり、液晶ディスプレイの像をオブジェクトの側面に投影したりできる。

計測技術とアクチュエーション技術を流用して新しいハードウェアを制作できる Personal Fabrication のアイディアに、Kato らの Form Follows Function[33] がある。他にも、Disney Research から歯車を用いた手回しのからくりを補助的に設計するソフトウェアツール [11] も発表されている。3D プリンタを活用して製作した自由変形のオブジェクトながら、外観をそのまま内部構造を調整することでスピーカに変換する技術 [27] も提案されている。

製品では Autodesk が Autodesk 360 と呼ばれる CAD ソフトウェアを、個人の非営利活動に対して無償で提供している。こうした研究開発および市場製品の発展により、急速に Personal Fabrication を取り巻く環境は変化している。

2.6 本章の結論

以上のように、コンピュータの誕生から HCI とヒューマンインタフェースの研究、そして現在まで続いているヒューマンインタフェースに関する試行錯誤とその研究成果を述べてきた。また、次章以降のネイキッドインタラクションの概念、それを現実化するためのプロトタイピングにおいて共通する技術と手法について解説した。

従来のヒューマンインタフェースのコンセプトの中でも、コンピュータの情報という概念に触れるようにしたタンジブルユーザインタフェースは、情報の具体化（身体化、Embodiment）の観点で特筆できる。それと同時に、ネイキッドインタラクションが身体から環境における延長の方向性であるのに対して、従来のヒューマンインタフェースのコンセプトとは異なる視点からの提案であることを次章で詳しく解説する。

第3章 身体性メディアを伴うネイキッドインタラクションの設計

これまで、1章ではコンピュータの持つ特性や人間とコンピュータの間の関係性を設計する重要性について説明し、2章ではその関係性を設計する試みやヒューマンインタフェースのコンセプトの変遷について、関連する技術や技法も含めた見てきた。本章では、これまでの議論を踏まえて、身体から環境、そして環境からコンピュータの方向に沿って環境、モノ、コンピュータのそれぞれを統合するための身体に立脚したネイキッドインタラクションの設計思想を提案し、説明する。またネイキッドインタラクションを現実化するにあたって研究した3つのプロジェクト(5章、6章、7章)についての関係性も説明する。

3.1 身体性

これまでも身体を用いたコンピュータの設計について考えてきたが、ここで「身体性」という観点から考えてみたい。身体と身体性は異なる用語である。身体性は身体の延長にあり、自分の身体と同化しているかのように扱えるものとして定義する。良く挙げられる例として、自動車を運転していると自分が自動車と一体化したかのような感覚を得ることも、ゴルフのクラブや卓球のラケットによってボールを打つ行為も、コンピュータを操作するときのマウスを用いる感覚も、すべて身体性によって人間が制御できる対象だと認識しているためである。

身体を用いることの重要性を説明するために、触知性という考え方に触れたい。身体性に深く関わるのが、触覚であり知覚である。D.A. ノーマンは著書でこれを「触知性」という言葉で説明した。(「エモーショナル・デザイン」[123]105ページから引用)

物理的なモノは重さ、きめ、表面をもつ。これをデザイン用語では「触知性」と呼ぶ。ハイテクで作られたあまりにも多くのものが、実際の物理的な制御ボタンや製品から、コンピュータのスクリーンとなり、スクリーンに触れたり、マウスを動かして操作するものになってしまった。物理的なものを操作する喜びは消え、おまけに制御感も消えた。物理的な感触が重要なのである。我々は物理的な身体、腕、脚をもつ、生物学的な生き物なのだ。脳の大きな部分が感覚システムに占められており、絶えず環境を探索し、インタラクションしている。良い製品は、このインタラクションをフルに活用する。調理するときのことを考えてみよう。バランスの良い高品質の包丁の感触、まな板の上で切る音、鍋に食材を入れたときのグツグツいう音、切りたての食材から立ち上がる匂い。あるいはガーデニングを想像してみよう。植物の柔らかい感

触、大地の力強さを感じるだろう。あるいはテニスをしているなら、ラケットがボールをはじく音、その感触が手に伝わる。手触り、感触、香り、音、見た目。さて、コンピュータスクリーン上でこれらをすべてやっているところを想像してほしい。見た目は実物そっくりかも知れないが、感触もなく、匂いもなく、振動もなく、音もない。

ノーマンが重要視するのは、行為と反応の対応関係（マッピング）が明確であり、行為による反応が直ちに知覚される（フィードバック）ことである。これを「アフォーダンス」という用語で説明しているが、ものどもの提唱者であるギブソンの定義を拡張してデザインに応用する形で説明した。

では、コンピュータはこの「触知性」を持つことができるだろうか。そして身体性の観点から、人間とコンピュータの関係性を上手に設計できるだろうか。そのためには、まず人間が自身の身体について認識することが必要である。その上で、身体の可能性と限界、同時に身体性の適用範囲を自分で定義できるようになると考える。

3.2 人間とコンピュータの関係性の設計

本論文で前提とするのは身体、物理環境、コンピュータの3者の統合的な設計思想である。人間同士であれば言語やジェスチャ、身体を用いたコミュニケーションが可能のように、コンピュータ同士であれば通信や同期処理によってコミュニケーションが可能である。しかし、人間とコンピュータの接続に関しては、原理の異なる感覚（コンピュータの概念で言えばプロトコル）をつなぎ合わせる必要がある。

これまでのヒューマンインタフェースの概念で重要視されていたのは、人間とコンピュータの両者が同じ環境を共有して、ハイブリッドの（概念的な意味であり、操作や制御も含めた）共通言語をもってコミュニケーションを取ることである。この基本的なアプローチは本論でも変わりはない。ネイキッドインタラクションを具現化するためのプロトタイピングを行ったそれぞれの研究プロジェクトでも、計測技術や提示手法を工夫することで、人間とコンピュータのコミュニケーションのための言語を作っている。

ところが、ここで問題になるのはどの視点からの設計を行うか、ということである。コンピュータの視点から設計するヒューマンインタフェースについて考えると、例えばコマンドによる入力操作もあれば、タッチスクリーン上で指を動かす動作によって提示される情報の位置制御を行うことができている。先に述べたノーマンのアフォーダンスを構成する条件も、表面的にはクリアすることができる。それは、ヒューマンインタフェースデバイスの応答速度を上げることでフィードバックが実現し、またインタフェースデザインによって操作と意味の間における適切な対応付けが可能だからである。

コンピュータのシステムから立脚したこれまでの設計によって、またこれに接続されるヒューマンインタフェースデバイスによって、人間は身体制御の方式や潜在的な行動を規定されている、という部分に着目したい。これこそが本論文における出発点である。私がこれまでのワープロ、パーソナルコンピュータ、そして手書き文字入力機能を持った携帯電話を使用した経験から、ま

たヒューマンインタフェースの研究に携わってきた経験から、ヒューマンインタフェースの問題点に対して身体の顕在化という観点から述べていく。

3.3 ネイキッドインタラクション

本論文の仮説を次のように考える。身体の視点から立脚した人間とコンピュータの関係性を構築することが出発点である。次に、人間の身体において受ける環境やコンピュータからの感覚を具体的なものに変換する。その結果として、身体的、認知的また心理的負荷を下げる、連続的な身体性と触知性を向上することである。

これを実現する方法として、これまでのヒューマンインタフェースによって規定されていた身体制御の方式や潜在的な行動を脱ぎ捨て、自覚的な身体について考える必要がある。言い換えれば、ユーザの身体を能動的に設計に反映するために、身体が持つ意味を捉え直す作業が必要である。これを「身体の顕在化」と定義する。

また、環境における身体性の意味を発見するために必要になるのが、人間と機械、身体とモノ、入力と出力そして制御とフィードバックのような二項関係を結びつけるための「身体性メディア」である。身体性メディアを導入することで、これまでコンピュータから環境までのメディアであるヒューマンインタフェースに対して、人間から環境までのメディアが不足していた問題を補う。つまり、人間と環境、環境とコンピュータのそれぞれに必要であったメディアのうち、人間と環境の間にはメディアが不足していたために、人間が環境を飛び越えて環境とコンピュータの間のメディアを触る必要があった、という考え方である。

なぜなら、これまでのヒューマンインタフェースの方法では物理的な方法によって情報を表現することを可能にしてきたために、情報に「アクセス」することが前提となっていた。これは、環境においてコンピュータ側のメディアが存在したのに、人間側のメディアが提供されていないために起きていた問題である。物理的な環境において、人間は環境とコンピュータのメディアとしてのインタフェースに対して、自分の身体の制御を変換していたことになる。「身体の顕在化」は、こうした身体の潜在化を解除し、身体の視点による関係性の再構築である。そのために、ネイキッドという言葉を用いている。

ネイキッドインタラクションの設計思想ついて、ネイキッドインタラクションの概念を構成図によって示す。言葉だけでは不明瞭な説明になってしまうため、図 3.1 を用いて説明する。

3.4 身体性メディア

ネイキッドインタラクションを実現する上で欠かせないのが、身体性メディアである。身体性メディアを導入することで、ネイキッドインタラクションが従来のインタラクション設計からの脱却と、身体から発露する体験に基づく設計を保証する。図 3.2 において、コンピュータと環境の間に介在するインタフェースメディアに対応するように、身体性メディアを定義する。

身体から伸びた矢印は、身体からの視点による設計を示している。これは、身体 of 制御や動き

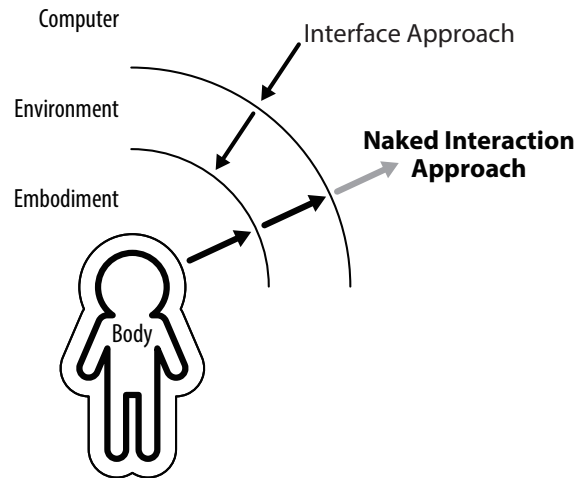


図 3.1: ネイキッドインタラクションによる身体の顕在化のイメージ

について、インタフェースメディアが介在しない状態において観察が必要である。本論文では、この観察によって仮定を作成し、その仮定に基づいた身体性メディアの設計を行う。

結果的に従来のインタラクションにおける情報と身体との距離を埋められないインタフェースの設計問題にしての解決を示すことにもなる。身体性メディアを伴うネイキッドインタラクションの設計には、工学的方法、コンピュータサイエンスの手法による実装が不可欠である。しかしながら、ネイキッドインタラクションの設計思想は広域の設計に適用されるものであるため、設計思想の実現のためにプロトタイピングを通して、概念的設計と具体的設計を示す。

本論文では3つの身体性メディアについてフォーカスし、これらに基づくネイキッドインタラクションを実現する。身体を用いて情報を扱う方法は、コンピュータが介在しなくとも可能である。コンピュータの介在を前提とせず身体性メディアを定義するとすれば、次のように身体性メディアを選択して、ネイキッドインタラクションのためのプロトタイピングを行うことができる。

はじめに、身体を覆っている皮膚そのものについて注目した。皮膚は自己内省的に感覚を持ち、身体の延長としての道具に皮膚を選ぶ。これを顕在化させることで身体の再身体化を行う。次に、手指の擬人化を用いて手指のコミュニケーションメディアへの変換を行う。最後に、手を用いて対話しながら知的活動を行う紙を取り上げ、身体の延長としてのメディアとして設計する。ここに挙げた3つの身体性メディアはそれぞれ身体によって思い通りに自在に動かせる。皮膚を通してメディアの身体化を自己の身体で体験・認識し、手指の拡張は身体を用いて音通りに動かすことで機能を実現し、紙によって物理環境における思考をするときの自己と対象の関係性を視覚化する。

1. 皮膚 次に挙げるのは、モノと身体の間にある皮膚である。皮膚は身近であり腕時計や装飾を身につけ、ボディペインティングや刺青のように表現としても使われるが、コンピュータを用いたメディアとしては未開拓の領域である。皮膚の触覚によるフィードバックは、ユーザ自身に自

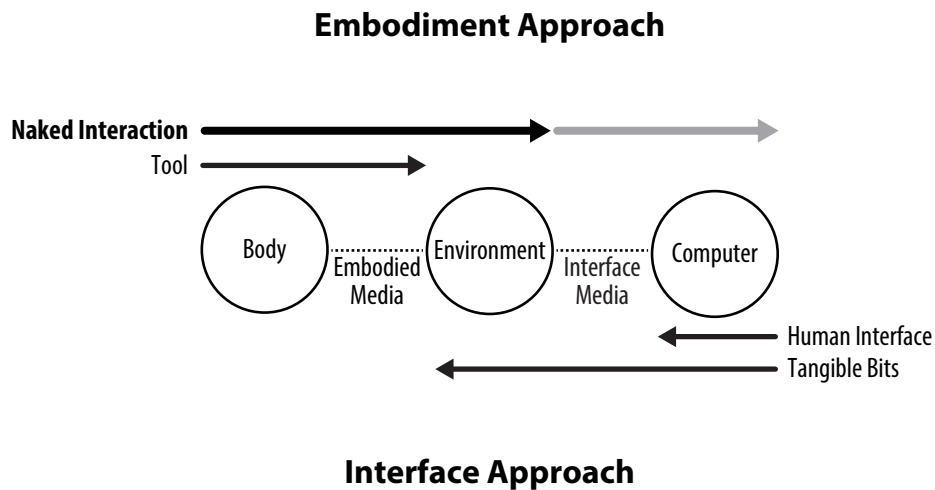


図 3.2: 設計思想の境界の考え方の比較

分の操作の状況を理解させるのに役立ち、身体の触覚とコンピュータに与える操作の意味が一致している点で、ネイキッドインタラクションを成立させることができる。

2. 指 最後には手と指に着目して、手がモノに触れたときにモノの情報を提供したり、手のジェスチャと組み合わせ、動きによってストーリーテリングや表現行為を促進するエージェントロボットを付与する。手の先にエージェントを与えることで、身体の先端においてモノと人間の関係性を融合すること、また人間同士の手を用いたコミュニケーションを作り出すために、ネイキッドインタラクションのアイデアを導入する。

3. 紙 最初に実現する身体性メディアは、デスクトップにおいて情報の入出力と保存の役割を担ってきた紙を指定する。紙のメタファはコンピュータの中においても強力であり、ワードプロセッサや画像処理ソフトウェアにおいてページ、ペン、消しゴムなどの機能に対応した名称とアイコンを提供している。紙とペン、そしてテーブルトップや壁のように、環境によって身体の動作が定義される場所において、紙という情報メディアを拡張するためのネイキッドインタラクションのアイデアを導入する。

以上のように、3つの身体性メディアはそれぞれ異なるモノと身体部位を対象にしているが、実は身体を用いたモノと情報との関係性の中で一直線上に存在する。3つの身体性メディアとそれに対するネイキッドインタラクションのアプローチはそれぞれ異なっているものの、お互いの身体性メディアには必ず他の身体性メディアのアイデアが介在しており、これを3つの研究プロジェクトを通して俯瞰的に、また個別的に深めていく。

3章以降、それぞれの身体性メディアについて研究成果を説明していく。ここでは身体性メディアに関する研究を、本論文で説明する研究成果に対応するように記述する。それぞれ、皮膚に関

する身体性メディアに関する研究は5章で、指は6章、紙は7章に対応しており、3.6節にてそれぞれの研究プロジェクトについてネイキッドインタラクションとの関係性を説明する。

3.5 リミテーション

あらかじめ注意する点として、ネイキッドインタラクションと身体性メディアは、ヒューマンインタフェースを否定する概念ではない。むしろ、コンピュータから環境の方面へ伸びるヒューマンインタフェースと、身体から環境の方面へのびるネイキッドインタラクションの2つを組み合わせることで、人間とコンピュータの双方の関係性を対等に設計できる。

そのため、ネイキッドインタラクションは技術的な方式やインタラクションデザインそのものに対して優位な関係を取るものではない。また、この設計思想には身体の視点から出発する必要がある、観察やメディアの選定が重要で、コンピュータシステムやヒューマンインタフェース一般に適用できない場合があることを断っておく。

3.6 本論文における研究プロジェクト

以下では、本論文における中心的な3つの研究をそれぞれまとめる。また、これ以外にも他の研究との関連性や、影響を最後に説明する。

3.6.1 皮膚のインタラクション

皮膚の形状変化を計測してパターンを識別する技術と、それを実現するためのセンサデバイスを提案する。デバイスの外観には社会的に受け入れやすい形を考え、ウェアラブルデバイスの典型的な種類であるアームバンド型とウォッチ型を製作した。これらのデバイスを装着すると、そのデバイスの周囲の皮膚の変形を取得でき、ユーザは自分が触った皮膚の感触によって触り方や強さをフィードバックされる。これにより、明示的な反応がなくても操作できる皮膚のインタラクションを可能にした。

これまで、皮膚の応力を皮膚と指の間にセンサを挟むことなく計測することはできなかった。SenSkinは皮膚にかかる3次元の応力をセンサで計測し、実験の結果からセンサの値と実際に掛かる応力の関係を計算できる。計測には耐久性とコスト、また信号処理の簡便さから赤外線距離センサを用いて、皮膚に照射した時の反射率を用いた。複数のセンサを並べることで、2本の指で触った時に複雑に変化する皮膚の形状を捉えることができる。また、この形状を機械学習によって識別することで、デバイスへのコマンド入力にも応用できる。

さらに、パターンマッチングで得られた皮膚の形状変化に対応するコマンドを用いて、コンピュータやウェアラブルデバイスの操作に応用するソフトウェアを開発した。その結果、ウェアラブルウォッチの小さい画面であっても画面を指で覆うことなく操作でき、操作性と機能を拡張することができた。

3.6.2 指のインタラクション

人の手は、パペットのようにストーリーテリングをする道具を装着するのに適している身体部位である。人の手に装着して、指による表現行為を拡張できる指輪型ロボット Pygmy[73, 71, 70]を製作した。指輪型ロボットを用いてパペットやキャラクタなどの擬人的な存在を演出する指輪型のロボットデバイスである。このロボットデバイスを用いることで、手の表現能力を活用したストーリーテリングや複数人の間でのインタラクションを作成する試みを行う。

ロボットデバイスの擬人的な外観と、手を動かして指の動きと組み合わせることで感情や意図を作り出すことができる。これらのデバイスは主に目と口のパーツに分けており、ユーザはこれらを自ら組み合わせることで、パペットやキャラクタを作って感情の表現を行う。また、ロボットデバイスを動かすためのコントローラとセンサによるインタラクティブな操作を提供することで、ロボットデバイスが生きているように振る舞わせることも可能である。

ユーザビリティテストやケーススタディを経て、Pygmy が被験者の手の上に生物的な感覚や、存在感を演出することを確認した。また、Pygmy を用いて創り出したキャラクタを通して、被験者同士のコラボレーションやインタラクションを促進する場面も観察された。

3.6.3 紙のインタラクション

FluxPaper[64] は強力に着磁された磁石紙とプログラマブルな磁界変化を用いて、物理的な運動と動的なアクチュエーションを可能にする紙素材です。紙の裏には 0.1mm 厚の磁性レイヤーが塗布されています。磁性レイヤーは極薄だが、日常的に用いられている紙素材の特性を活かしたまま、高速・強力・高精度な動きを実現しています。

磁性レイヤーの効率的なパターンとコンピュータ制御された磁界によって、通常の紙に対して新しいインタラクションモダリティを加えることができます。論文中において、磁化された紙の物理的な作用、実現のための課題とその過程、さらに Self-alignment（自己整列）、Self-construction（自己組み立て）、ホワイトボード上での移動、カードから高速に選び出す手法など、実用的なアプリケーションを説明しています。

3.7 本章の結論

以上のように、触知性や身体性に着目してネイキッドインタラクションと、これを媒介するための身体性メディアについて説明した。また、身体性メディアの種類をここで決めることで、ネイキッドインタラクションのためのプロトタイピングを行うための方法と、それに対応する研究の目標を決定した。次の章では、それぞれの研究を実現するにあたって前提となる関連研究と先行事例をまとめて説明する。

第4章 関連研究

ネイキッドインタラクションとこれを媒介するための身体性メディアについて、対応する研究を実現するにあたって前提となる関連研究と先行事例をまとめて説明する。

4.1 皮膚

皮膚を用いるインタフェースのアイディアは、HCIにおいてすでに活発な分野 [56] である。柔軟な皮膚をの変形を操作に用いるため、Organic User Interface[106](2.3.4 小節) にも関わりがある。Organic User Interface は機能と形状の間に等価な関係を与えることで、形状から判断して直感的な操作を可能にするものである。

4.1.1 On-body Interaction

身体の上でインタラクションを行う On-body Interaction は、ウェアラブルデバイスの市場での成功によって HCI 研究においても活発なテーマになっている [88, 22]。腕の上を叩くことでコマンド入力を行う Skinput[22] は、人体をインタフェースに変えるための技術と方法を提案している。生体の中を伝わる音を拾うための音響マイクを用いて、腕を叩いた時の微細な振動を録音、分析している。身体にコンピュータを埋め込むこと [24] で常に操作可能にするアイディアもあるが、手術によってデバイスを皮膚下に埋め込む必要がある。

Mujibiya ら [59] は音響振動を信号として、指に装着した音響振動スピーカの位置を、腕の上で推定する手法を開発した。腕には受信用のマイクがあり、マイクで取得した音響振動から指と送信マイクの位置を推定する。

Skin Buttons[46] はウェアラブルデバイスの周囲の皮膚にレーザ光を照射し、ボタンのアイコンを描画する。そのアイコンをユーザが触ると、触ったことが光センサで認識されるので、皮膚上にボタンを作り出すことができる。また、Xiao ら [116] は機械的な装置によってスマートウォッチのディスプレイを指で動かせるようにしてスタディを行った。

しかしこれらのアプローチを用いても、タッチスクリーンの上で可能な複数の指によるジェスチャを用いることはできない。皮膚を用いるインタラクションにおいては、皮膚をつまんだり、押しこむといった触覚的な動作も許容する必要がある。これらの皮膚を用いたジェスチャは動作に意味をもたせることができ、皮膚のジェスチャと操作のためのコマンドや感情表現との関係を調査した研究 [108] もある。

4.1.2 光反射の計測

皮膚の形状変化を計測するため、SenSkin[67, 72] や SkinWatch[65] では赤外線距離センサを用いて微細な皮膚の動きを計測した。計測の手法と応用場面は、環境での数値計測や物質の特性の計測だけにとどまらず、人体や生体にも応用可能である。そこで、同じセンサまたは同様の計測手法によって、人体の動き、身体を用いた操作、その他の計測とインタラクションへの応用を見ていく。

指輪型デバイスの中に赤外線距離センサを用いた iRing[69] は、指の運動や指輪にかかる圧力を計測する。指輪の内側にセンサを配置することで太陽光などの外部の光からノイズの影響を受けずに、指のインタラクションを計測できる。指輪の内側に穴を開けておくことで、指を曲げたり指輪を押した時に皮膚が穴に入り込んで、皮膚表面との距離の変化から圧力を推定できる仕組みである。

赤外線距離センサを用いて綿という異なる素材について計測したのが、Sugiura らの研究 [99] である。綿の密度の変化を赤外線の反射率の変化で取得する。綿の入ったクッションやぬいぐるみの変形を計測でき、複数のセンサを同時に埋め込んで用いることで、複雑な動きや広大な範囲にも対応できる。また、綿だけではなく、スポンジのように柔軟で素材の量を調節できるものであれば使用可能である。また、Sugiura らはストッキングの伸縮素材としての特性を用いて、物体表面での指による伸張操作を取得する手法 [98] を提案している。

4.1.3 触覚と応力計測

赤外線距離センサを用いた研究の中には、皮膚の表面のせん断応力を計測する手法 [52] もある。赤外線距離センサを生体センサとして用いており、皮膚の引張を取得する。皮膚を引っ張った時の僅かな隆起や凹みから、皮膚にかかるせん断応力を推定する。5章で説明する SenSkin はこの原理を2次元的に展開して応用することで、皮膚の有機的な変化を計測できるようにしている。

SenSkin の手法では指にセンサをとりつけられないため、指に伝わる触覚を計測することはできない。Nakatani らの手法 [61] は指の両側にゲージセンサを取り付けることで、指の平でもものをおした時の圧力を計測する。そのため、指の平と物の間には障害物はなく、装着した人の皮膚に触覚をノイズなく伝達できる。また、Yoshimoto らは電極と静電容量を用いた皮膚の圧力センサを開発した [119]。

4.1.4 デバイスと身体操作

身体性メディアについて語り、研究する上で欠かせない存在が身体である。

小型の画面を持つデバイスを操作する上で生じるオクルージョンを解決する方法に背面タッチ [6] があるが、この方法は身体に装着するウェアラブルデバイスでは背面が身体と接するため難しくなる。ウェアラブルデバイスでも画面を指で覆い隠さずに操作する方法として、デバイスに磁力センサを搭載し指に磁石を装着して操作する方法 [21]、タッチ可能な領域をウェアラブルディスプレイのデバイス側面に設置する方法 [63] が考案されている。

赤外線センサを横に並べて皮膚上においた指の位置を推定する入力手法 [62] は、時計型のデバイスを装着することで手の甲の上においた指をトラッキングする。指は手の甲の上で2次元的な動きができ、腕時計型のデバイスのディスプレイにその動きが反映される。

4.2 指

4.2.1 ウェアラブルロボット

いくつかのウェアラブルロボットが提案されている。体に装着するロボットとして、首にかけるタイプのアクセサリロボット [41] は個人的な情報をユーザに提供してくれる。また、テレプレゼンスロボットで肩に載せるタイプの Telecommunicator [105] や、TEROOS[32] がある。これらのロボットは、小型の身体を有したロボットを方に乗せて持ち運ぶことで、Human-Robot Intereaction におけるロボットの移動や製造のコストを下げ、テレプレゼンスのアプリケーションを提供できる。

エージェントロボットではなく、人間をコントロールするためのテレプレゼンスとしてのロボットも存在する。パラサイトヒューマンプロジェクト [51] では、電気刺激や計測のためのデバイスを搭載した「ウェアラブルロボット」を着ることで人間の動きを計測したり、人間の感覚器に刺激を与えて歩行の向きを変えるなどの影響を与える研究を行っている。

これらのウェアラブルロボットに対して、Pygmy は指に装着するという点でも、機能の面でも異なる。Pygmy はロボット自体がすべての身体を持たず、人の手を身体として借りることで成り立っている。人の手が持つ柔軟性や反応性を用いることで、擬人性を演出して、複数人によるストーリーテリングを提供する。

4.2.2 擬人化

次の2つの研究と展示は、手の動きを擬人的に用いた操作の方法である。Pygmy も同様に2本指を用いてパペットを歩行させるような動作を取り入れている点で共通する。

手を用いたストーリーテリングの方法として、手を用いた表現方法をエンターテイメントに応用することもできる。Whadget [60] は2足歩行のミミックを用いたインタラクティブなCG作品である。CG キャラクタをテーブルトップコンピュータのディスプレイに描画して、そのキャラクタを指を使って歩かせることができる。ユーザはディスプレイに2本の指を立てて人が歩くような擬人的な動きで前に進むと、ディスプレイに描画されたキャラクタがそれに合わせて動く様子を見ることができる。

Walky [14] は2足歩行ができるロボットの操作を、タッチスクリーンで行う方法である。タッチスクリーンの上に載せた2本の指で歩く動作をするように画面をなぞるとロボットがその動作に追随する。前進する、後退する、回転する、ジャンプする、ボールを蹴るという動作が、それぞれの指のジェスチャに割り当てられている。この手法は、人間の動きを真似た手の表現をメタファとして、ロボットの操作に応用している。

日常のモノを直接的に擬人化する研究もある。DisplayRobot [75] はあらゆる形のものにロボットパーツを取り付けられるようにした研究である。DisplayRobot は、モノに貼り付けられるとそのモノのエージェントとして働き、モノの説明や使い方をジェスチャや身振りで教えてくれる。ロボットパーツは主に目と口、そして手があり、これらを総合的に配置する。擬人化する対象やアプリケーションが異なるが、擬人性を持たせるロボットデバイスとして共通している。また、DisplayRobot で用いられているように、Pygmy では擬人的なパーツを分解して、再構成可能にしている。同様に、ぬいぐるみを擬人化する方法の一つとして、PINOKY[101, 100] ではぬいぐるみの腕に装着して腕を動かす機構を開発している。

ニコダマ (Nikodama) [44] も擬人性を利用したデバイスの一つである。ニコダマは「2 個の目玉」だけで構成されており、自動的に目を開閉する。目の開閉は無線通信によって同時に行われるように制御される。Pygmy はコントローラやセンサ入力で制御されているという点で、ニコダマとは異なり、インタラクティブなアプリケーションを実行できる。また、Pygmy はストーリーテリングのためのデバイスにとどまらず、人間の手を用いたインタラクティブなアプリケーションや、親子の間のインタラクションにも用いられる。

4.3 紙

4.3.1 素材としての紙

はじめに、誰もが使ったことがあるか知っているものとして、Post-it![2] はとても有名な情報媒体といえる。

紙は「プリンタによる印刷」という発明によって、コンピュータと人間の間を取り持つメディアとなった。これは単純にインクが滲んで文字を印刷しやすいという特性以外に、扱いやすさも関係している。紙は薄く、折りたたみやカット等の変形と整形が容易である。ここでは、素材としての紙に着目する。

紙に印刷できるインクにはいくつか種類がある。Anabiosis[104] と Electric origami[30] は、電圧をかけることで色が変化するインクを紙に印刷しておく。アプリケーションに応じて色を変えることで、インタラクティブな表現が可能になる。また、熱によって色が変わる素材を紙に塗布して、ペルチェ素子によって温冷を制御することで紙の上にアニメーションを表示する手法 [79] がある。

紙に印刷することで、紙の機能性を向上する試みはいくつかある。AgIC¹[35] も導電性インクを用いた方法で、電子回路を家庭用プリンタで印刷するための方法とプリンタ用のキットを提供している。Paper Generators [31] は紙の表面に導電性インクを印刷して、紙をこすることで電気を発生させる仕組みを作った。表面に発生するのは静電気であるが、こする動作を繰り返すことで持続的に電気を供給することができる。こする部分から他の部分に導線が伸びており、電子回路素子と組み合わせることで LED を光らせるなど電氣的な機能をもたせることができる。ほかにも、紙に電子回路を作成する方法はすでに多く提案されている。[93, 57, 10, 82, 83]

¹導電性インクを紙に印刷できるインクと特殊紙の一式についての製品名

4.3.2 紙を制御する

紙は安く、扱いやすい素材である。紙を動かすことで、ユーザにサービスを行うアプリケーションを容易に作ることができる。すでに街なかでも、レシート、座席の予約表がもらえるし、手紙やポストイットも紙で作られている。これらの共通点は、内容が文字で書かれるか印刷できることであり、常に身体によって操作されることである。これほど身体性メディアと呼べるものは他にないかもしれない。そこで、紙を動かすことを考えるが、同じようなアイディアはたくさんある。

一般的な紙を動かしたり、形を変えるアイディアはすでに提案されている。紙を制御する方法として、熱で変形する形状記憶合金はとても人気がある [40, 80, 81, 90, 120]。多くの場合、形状記憶合金 (SMA²) やそれに類する熱で制御できる素材を紙に貼り付ける方法が用いられる。こうした素材を紙に付着させることで、紙の素材性を失われる。紙の薄さ、自力で元の形に戻ろうとする弾力、ペンによって表面に記述できる記録性が減少するか、完全になくなってしまう。こうした欠点がありながらも、HCI の文脈において紙という素材を制御できるという利点は大きい。外部からの電力や熱量の供給によって、コンピュータはプログラマブルに紙の形を変形させることができる。外部エネルギーの供給には、導電性の導線 [121, 80, 81]、レーザー光線 [40]、マイクロ波の振動による発熱 [118] といった方法が見受けられる。導線を用いる方法では、紙に導線が接触しているために紙が物理的に拘束されてしまう。複雑な動きをさせるために SMA の数を増やせば、紙に接続される導線と紙の表面を這う SMA の数が増えてしまい、紙の素材性は失われしまう。光線やマイクロ波を用いれば紙は空間的に自由になるが、動きを与えている時間はユーザから遠ざける必要がある。光線の例では強力なレーザー光が反射してユーザの目に入らないように半透明のケースに収納したうえでレーザ光を照射する。マイクロ波の例は電磁レンジを用いて行う。動きのある瞬間にユーザが紙に触れることができないため、インタラクティビティが下がってしまう。

紙の性質を変えないという点では、紙を用いたロボットを折る研究 [13] がある。紙の表面に導電性の素材を貼り、その導電性の素材を電流が流れる際に生じる熱で紙を変形させる。大きなバッテリーを紙の上に載せる必要があるが、ワイヤは必要ではなく、単体かつ自動で折りたたみと移動を可能にする。

4.3.3 紙を用いたインタラクション

Klemmer らが開発した Designers' outpost [38] は、デザイナーたちの間で情報を共有するために使われている紙と、情報通信の技術を組み合わせた方法である。Pulp-based computing [10] はコンピュータを紙と一体化させることを目標として、センサやスピーカーを構成するための回路を部品として組み込んでいある。他にも、Saul らは LED の光によって紙を折る方法をユーザに指示するアプリケーションを製作した。また、ペーパークラフトや動く紙を目的として、ワイヤレス送電機能を加えたツールキットも提案されている。[120, 121].

また [25, 45, 18] が興味深いのは、紙を用いないデバイスであっても紙のメタファを用いたユーザの操作を可能にする点である。

²Shape Memory Alloy

4.3.4 変形素材を用いたインタラクション

紙を素材とした例の1つに、Figueiredo[15]らが製作した変形ロボットがある。紙の表面に電流を流すための導線を印刷しておき、ロボットの目的とする機能や形態を実現するときに電流が流れる時の熱で紙を変形させる。変形後は、紙に付属しているモータを用いて各部品を制御して移動する。

紙以外にも変形素材としてゴム製の素材が提案されている。POPAPY [118] は熱で変形する素材（熱収縮チューブ）をカットして紙の表面に貼ることで、電子レンジの中に入れて熱をかけることで変形する紙製の自動組立てできるクラフトを提案している。また、PneUI [117] のようにゴムを用いた例もある。ゴムは伸縮性に富む素材であるが制御が難しいため、ここでは空気がアクチュエータの動力として用いられている。

4.3.5 電磁気学を用いた制御

いくつかのHCIの研究において、電磁気学はコンピュータからの制御ができるため人気がある。ZeroN[48] は磁気浮揚を用いた空中型のインタラクション装置である。Triangles [19] は三角形のデバイスを組み合わせて用いるタンジブルインタフェースであるが、このデバイス同士の接続に磁力を用いてユーザの作業をサポートしている。Actuated workbench [76] はテーブルトップでものを動かすための装置である。テーブルの下には電磁石装置が敷き詰めてあり、磁力の吸引力によって鉄製や磁石製のピースを動かす。これはPICOも同じ原理であるが、PICOではプロジェクションと組み合わせて情報を提示している。Madgets [109] も磁力を用いたテーブルトップインタフェースである。これらの研究は、磁力を用いることで物体をアクティブに動かすことを可能にしている良い例である。Programmable Blobs [107] は磁性流体を電磁石装置によって変形させるメディアアートの装置である。

磁石をセンサとして用いている研究も多い。次に挙げるのは磁石を単純に計測のために用いるだけではなく、目的としているアプリケーションに合わせるように磁石とセンサを工夫している。Bridging book [15] は絵本の中に磁石を埋め込み、絵本の表紙部分に組み込んだコンパスセンサによってどのページが開かれているかを推定する。しかしながら、薄型のネオジム磁石をそのまま紙のページに挟み込んでいるため、本としてはとても分厚くなってしまう。

4.4 本章の結論

ネイキッドインタラクションとこれを媒介するための身体性メディアについて、対応する研究を実現するにあたって前提となる関連研究と先行事例をまとめて説明した。次の章からそれぞれ皮膚、指、紙に関するネイキッドインタラクションの事例を研究プロジェクトとして解説していく。

第5章 皮膚のインタラクション

皮膚は人間の身体部位を包み道具を持ったときの境界として接する役割があると同時に、また皮膚も道具として用いることができる。この章では、皮膚を身体としてではなく、身体の延長として認識される道具の一つとして、身体の再定義をする。身体の再定義をするために、皮膚を直接触ることができるセンサ技術を開発し、皮膚を道具として使用できるウェアラブルデバイスと組み合わせた。

5.1 概要

皮膚は身体の最も身近にあるセンサであり、手や腕などの動かす部分にも必ず存在する。服、腕時計、指輪など、身につけているものの感触も皮膚を通して伝えられる。ネイキッドインタラクションにおける身体性メディアとして、皮膚は人間に一番近いものである。この章では、この皮膚とコンピュータの境界を融合することで直感的なインタラクション体験を実現するとともに、これを可能にするための技術と技法について研究を行った。

時計や腕輪の形状をしたスマートウォッチを始めとしたウェアラブルデバイスはいまでは市場に受け入れられ、人気が出ている。これらのデバイスは多機能で小さい。ユーザは通知を受け取るだけではなく、デバイス进行操作することでコンピュータの機能にもアクセスすることができる。こうしたデバイスに対して、使いやすく直感的な操作を提供することが求められていると考える。しかしながら、ディスプレイを用いた操作ではデバイスの小ささから使いにくく、直感的とは言いがたい。また、身体の上になら使用できる身体部分は反対側の手の指先だけであった。

こうした問題に対して、身体もコンピュータインタフェースの一部として提供することで、直感性や利便性を上げることができると考えた。同時に、身体に対してフィードバックが伝えられるため、コンピュータを介したフィードバックよりも早く、ユーザは操作を直感的に理解することができる。ここで必要になるのが、身体の接触を計測・認識するための方法である。

5.1.1 皮膚を用いたインタラクション

皮膚の変形を計測する技術と技法を用いることで、皮膚を触ることで自分がしている操作を認識しながら、コンピュータに対する入力を可能にする。皮膚は常に人間の体を通して自分自身にフィードバックを与えている。この性質を用いることで、自分の皮膚が触られている場所や触り方、強さを知覚することができる。本研究はユーザに触ったことに対する直接的なフィードバックを常に与える操作を実現する。そのため、ユーザには他に明示的なフィードバックがなくても

自分の操作を知覚することができ、操作を継続できる。また、皮膚の上にはフィルム状の触覚センサのように触覚を妨げるものではなく、皮膚と皮膚の接触を直接行えるようにした。

現状では社会的に受け入れられてきたウェアラブルデバイスと同様の形状にすることで、人体につけていても違和感のない筐体を設計した。本研究では2種類のデバイスを設計した。1つはアームバンド型の SenSkin(5.1.2 節)、1つはスマートウォッチ型の SkinWatch(5.1.3 節)である。アームバンドは主に原理や性質を明らかにしたり、初期のアプリケーションの開発に用いた。アームバンド型では2つのアームバンドを腕に装着すると、その間の皮膚の領域を計測可能にする。腕と異なる方の手を用いて触ったときの方向、強さ、変形の形状を取得できる。次に、市場製品に近い形態に近づけて使用する場面を想定して、スマートウォッチ型を設計した。

皮膚の変形によるインタラクションを実現するために、赤外線センサによって皮膚の変形を計測する。これにより、定量的に皮膚の上でのせん断力と引張力を計測することができる。また、ユーザが行う操作の種類を判定できるように、信号処理と機械学習を組み合わせることで操作を推定する仕組みを実装した。これらの技術と技法を組み合わせ、身体の上で行うインタラクションと、スマートウォッチと組み合わせたアプリケーションを提示する。

5.1.2 SenSkin

すでに先行研究 4.1 に示したように、身体の動きをセンシングすることでインタフェースやコンピュータの操作に役立てる方法はいくつも提案されている。その中には触覚フィードバックを与える方法もあるが、いまだ人間の皮膚に直接触ったことのフィードバックを与えようとした例はない。それに対して、SenSkin では皮膚の表面には何も設置することなく、皮膚に触れた際の力を3次元方向に分析することができる。この方法によって、皮膚を柔軟な入力サーフェイスとして用いることができる。

とくに SenSkin の構成を使うと、皮膚の表面をむき出しにしたまま、皮膚と指の間のインタラクションの様子を計測できる。これは、社会的に皮膚と皮膚の接触が人同士の関係性や信頼感に繋がるような場面において、また自分の身体を触ることで刺激を与えたり自分の行為を再認識する場面に、コンピュータが入り込むことができる。SenSkin ではこうした皮膚と皮膚のインタラクションを定量的に取得できるように工夫した。図 5.1 に、指で皮膚を触り、変形によってコンピュータを操作する場面の例である。

SenSkin の先行研究 [52] では1つの方向に対する皮膚上のせん断応力を計測する仕組みを発明した。これを応用して、使用するセンサの数を増やして横に並べることで、2次元のせん断応力に対応した。また、せん断応力だけではなく皮膚をつねったり引っ張ったときの形状も取得することができる。変形の形状はアームバンド型のデバイスの下部にある赤外線距離センサによって計測され、アームバンドと皮膚の間の微小な接触距離によって推定される。さらに、2つのアームバンドのすべてのセンサの変化値を足し合わせることで、3次元方向の力も推定することができる。

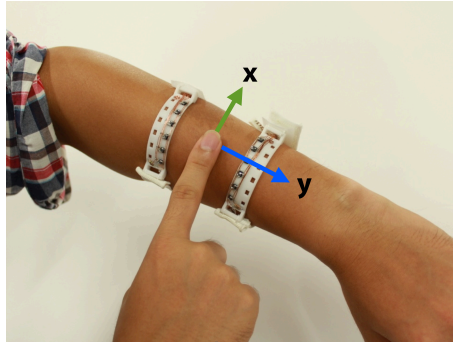


図 5.1: SenSKin の使用場面と操作のイメージ図

5.1.3 SkinWatch

SkinWatch はスマートウォッチの裏面に、SenSKin で用いたのと同じセンサを設置して、皮膚の変形を取得する。皮膚の変形情報を使って、スマートウォッチなどのウェアラブルデバイスを制御するアイデアである。このときも、ユーザはウェアラブルデバイスの下にある皮膚を伝って、自分の身体の動きをフィードバックされるため、直感的に操作内容を理解しながらデバイスを操作できる。

これまでもスマートウォッチのための操作手法やインタフェースの提案がされてきた (4.1.4) が、ユーザの身体をインタフェースの一部として用いることで操作領域を拡張するだけではなく、直感的な操作のフィードバックを与える。ほとんどの場合、ウェアラブルデバイスのディスプレイは小さく、図 5.2 に示すように、1.6inch のディスプレイでは指で簡単に半分程度が隠れてしまう。複雑な操作をするには不十分であった。また、タッチスクリーンの上で指をなぞることで操作をする必要があるため、連続的なスクロールには指を何度もすべらせるなど、操作の方法においても困難があった。

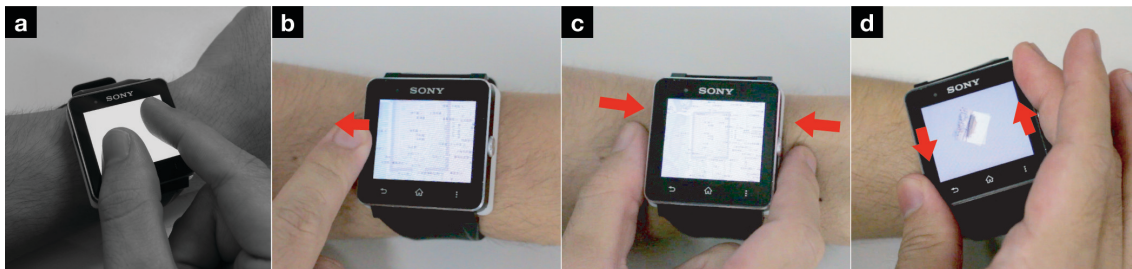


図 5.2: SkinWatch がない場合とある場合の比較

SkinWatch は皮膚の変形を計測するための技術をインタフェース技術として導入することで、ジェスチャ操作を可能にして、指の自在性を活かした複雑で有機的な操作を可能にした。インタフェースとして拡張された周囲の皮膚を用いれば、画面に指を置く必要もないため画面のオクルージョンも解消される。画面のヴィジュアルフィードバックも見やすくなり、また皮膚を触ることによるユーザの身体を通した直感的なフィードバックも伝達される。デバイスの筐体には、皮膚の方向に向かって赤外線距離センサが配列状に配置されており、2 次元的な皮膚の形状変化を取得

できる。また、皮膚の形状によって異なるコマンドをデバイスに登録しておくことで、日本の指で皮膚を左右に引っ張れば地図のような画面をズームするような操作も可能になる。

5.2 原理と方法

SenSkin と SkinWatch はどちらも共通の原理を用いて皮膚の形状変化を認識している。以降は先行研究である SenSkin を中心に説明する。SenSkin は皮膚の柔軟性と変形を利用した計測手法である。関節などの曲げ具合によって皮膚が十分に張っていない時、皮膚にはたるみやシワが発生する。また、皮膚が引っ張られた時、何かに当たった時には、皮下組織と皮下脂肪が体を防御する役割をしている。そして、体の内部にある筋肉や骨の動きによっても皮膚の表面の伸張の状態は変化する。こうした皮膚の変形について、定量的に皮膚にかかる力の強さは、 $\square$ でコンピュータシミュレーションを用いた弾性モデルで示されている。この弾性モデルは Hooke's law を用いた弾性膜で構成されており、皮膚にも適用できると考えられる。皮膚には3つの階層、表皮、真皮、皮下組織がある。外部から力が加わった際、変形するのはこの階層である。

SenSkin を製作するにあたり、光による計測を用いることにした。皮膚に当たる光の反射率を計算すれば、皮膚の表面にフィルムや網を貼ることなく、皮膚に当たる力を計測できると考えた。皮膚を押ししたり、つねったりしたには皮膚は与えられた力のおりに変形するため、皮膚を指で押しこめば指の先に皮膚が盛り上がり、指の下にある部分の皮膚は引っ張られて低くなる。この皮膚の弾力のある素材としての原理を応用した。この様子は図 5.3 に断面図として描画されている。指を押しこむことで SenSkin のセンサ部分に皮膚が集中し、センサと皮膚の間隔が短くなる。この間隔を赤外線距離センサで読み取る。このときの皮膚における赤外線の反射率は高くなるため、皮膚が盛り上がっているときにセンサの値が高くなる。

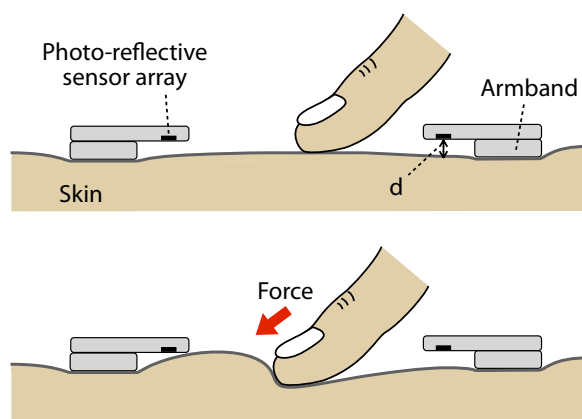


図 5.3: 皮膚形状をセンシングする際の断面イメージ

赤外線距離センサは赤外線を照射し、物体に当たった部分の反射率を計測するセンサである。そのため、センサ内部は赤外線を発生させる LED と、赤外線を受容する光ダイオードで構成されている。赤外線を距離計測に用いる手法は広く一般的に使われており、機械部品が動いたり、制

御する位置を調整するために用いられる。また水質検査のような、光の透過度を利用した計測にも有効である。このセンサを皮膚の変形の計測にもいることで、センサのサイズを小さく抑え、赤外線以外の影響を人体に与えない設計にした。機械的な機構がないため、衝撃や故障にも強い。

5.3 ハードウェア設計

5.3.1 共通設計

赤外線距離センサは、構成によってはフォトインタラプタと呼ばれることもある、赤外線 LED と光ダイオードを組み合わせたものである。SenSkin では SG-105 (Kodenshi Corp.) を、SkinWatch では TRF-105C を選択した。赤外線距離センサと抵抗、A/D コンバータの接続は図 5.4 のようにした。LED の出力を決める抵抗には $750\ \Omega$ 、光ダイオードの感度を決める抵抗には $30\text{k}\ \Omega$ を用いた。光ダイオードの出力は A/D コンバータに接続される。

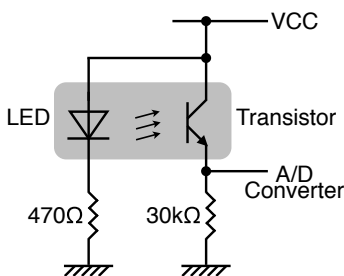


図 5.4: 赤外線距離センサのための回路図

A/D コンバータとして、マイクロコントローラの Arduino Pro Mini (3.3V 版) を用いた。SkinWatch では Arduino Pro Mini と同様の IC と構成を用いてプリント基板を設計した。A/D コンバータでは電圧を 10bit で量子化して、20Hz の間隔でコンピュータに送信する。

5.3.2 SenSkin の設計

皮膚に対する 3 次元の圧力を計測するために、SenSkin のデバイスはできるだけ皮膚の変形に反応できるようなセンサの配置を行った。その結果、2つのアームバンド型のデバイスで皮膚の領域を囲うことで、着脱性と身体への装着感の点で違和感なく、皮膚の柔軟な変化を計測できる設計にした。アームバンドにはそれぞれ 6 個の赤外線距離センサを接着し、弾力のあるゴム紐、ゴム紐の上にマジックテープを縫いこんだ。

(1) アームバンド設計

アームバンド (図 5.5) の製作にあたって、まずは腕の形状を調べた。今回は筆者の腕をモデルにした。半円を描くようにしてカットした厚紙を用いて、半円の円弧の大きさを調節した。その

形状を元に、CAD ソフトウェア上で 3D モデルを作成し、ABS 樹脂を用いて 3D プリンタで出力した。

アームバンドに設置した距離センサと皮膚の間に隙間ができるように、アームバンド中央の皮膚に触れる部分は端よりも 2mm 高くなっている。この 2mm の突起によって皮膚とセンサの間に距離を稼ぎ、皮膚の変形を計測できるように工夫した。

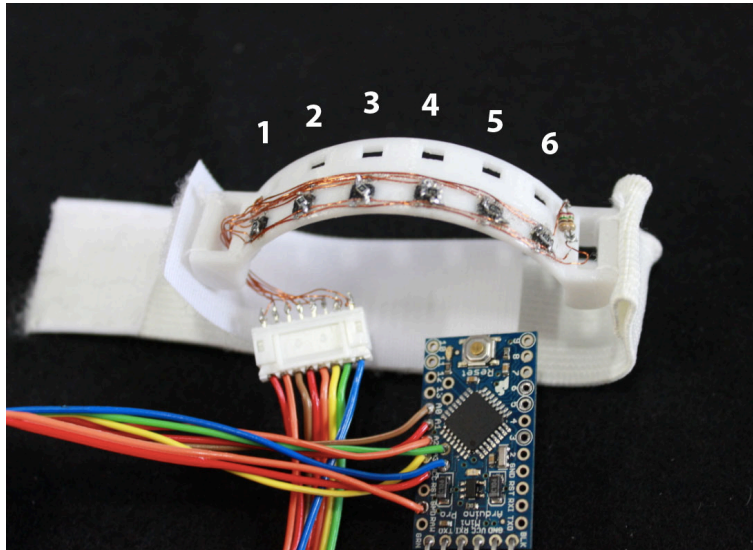


図 5.5: アームバンドとセンサ配置

(2) 電子回路設計

センサは 10mm 間隔で設置し、センサの 4 つの端子に対して配線した。センサには赤外線 LED と光ダイオードが入っているため、それぞれのアノードとカソードがある。これを整理して抵抗を挟むことで、電源 (VCC)、グラウンド (GND)、出力 (OUTPUT) の 3 端子に分けることができる。回路は図 5.4 に示した。

アームバンドの上に赤外線距離センサを設置し、その上に抵抗を乗せてセンサのピンを折り返して直接接続した。信号線は 1 本ずつマイクロコントローラの ADC の端子に繋いだ。センサと抵抗を直接組み合わせることで、マイクロコントローラとセンサの間の配線を最小限に留めることができた。また、チップ抵抗を用いることで、アームバンドに載せる電子部品の大きさを最小限にとどめた。

5.3.3 SkinWatch の設計

SkinWatch のハードウェア構成は、スマートウォッチ部分とアタッチメントの 2 つに分けることができる。アタッチメントはセンサとそれを載せるためのプリント基板、プリント基板をスマートウォッチに設置するためのケースで構成される。

スマートウォッチには Sony 製の SmartWatch2 を選択した。現在では Android Wear を搭載した機種があるが、制作当時ではアプリケーションの製作やインタラク션을達成するためのハードウェアの構成（カラー液晶、タッチパネルなど）でもっとも優れていた。

(1) プリント基板設計

アタッチメントはスマートウォッチの底面と同じサイズで設計した。また、そこに格納するプリント基板も筐体からはみ出さないように注意して設計した。プリント基板の左右に5個ずつの赤外線距離センサを載せる電極とホールをつけた。また、エラーを除外する目的でスマートウォッチが大きく腕から離れたことを検出するため、他に2個をプリント基板の中央の上下に設置した。

(2) ケース設計

アタッチメントの筐体を薄くするためにプリント基板は0.8mmの厚さで製作した。センサやICを加えた全体の高さは2.1mmとなった。アタッチメントの筐体はABS素材を、3Dプリンタで出力した。ABSの筐体には傾斜をつけた。手首側の皮膚が固く、腕側の皮膚が柔らかいため傾斜のない筐体だと手首側に大きな隙間が生じ、デバイス全体が傾いてしまう。傾斜は3度に設定され、この問題を解決した。傾斜の働きがわかる場面を図5.6に示した。

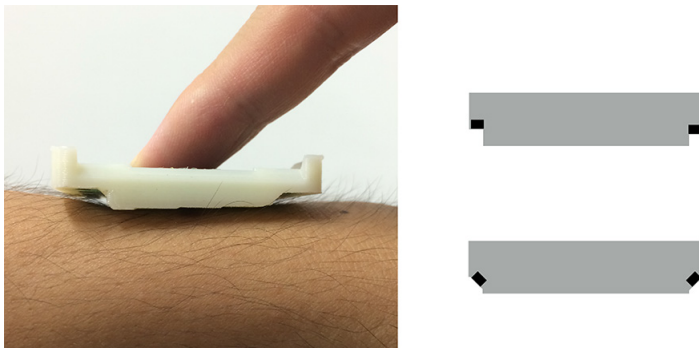


図 5.6: ケースデザイン

(3) エラー防止機構

腕を肩から下に下ろした時、手首を回転する軸をヨー軸¹と同じ軸に限定する。そうすると、どのような位置に腕を維持しても、手首を回転させると時計と腕の間には隙間が生じる。図5.7に示すように、隙間は回転の方向と角度に応じて変化する。とくに、ユーザの顔の正面に腕を持ってきたとき、時計もユーザの顔に向いていれば隙間は生じないが、違う向きに回転させると隙間が生じる。

¹地面に対して垂直に回転する軸

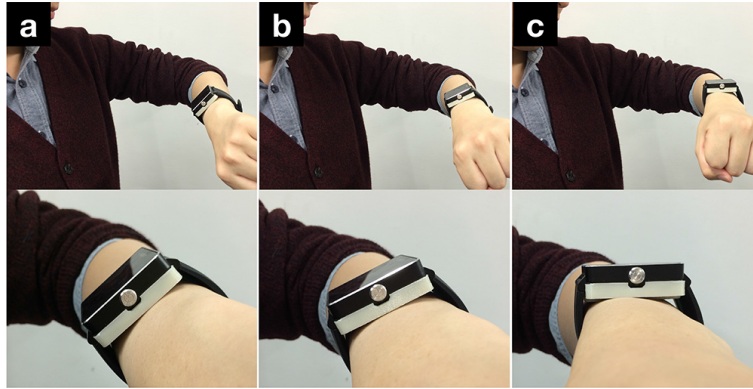


図 5.7: 腕の回転動作のエラー回避

これは前腕の内部の2本の骨が腕の内部構造を変化させるためである。この現象はSkinWatchにとってエラーであり、信号としてはノイズである。このエラーを取り除く方法を実装した。ケースの裏面に皮膚の変形を計測する10個のセンサ以外に、2個の赤外線距離センサを設置する。このセンサを筐体の中央の上下部分に設置することで、腕の回転を検出する。2個のセンサによって隙間が検出された場合、腕が回転しているとみなして入力を受け付けない。

5.4 計測方法

SenSkin を用いた場合、図 5.8 のように皮膚の形状変化が取得される。図 5.8 の左側は センサの入力と推定した皮膚の変形を表示するアプリケーションソフトウェアの画面である。腕に6個の赤外線距離センサを搭載したアームバンドを2つ装着しており、画面上では上下それぞれ6個の点でグラフを描画している。皮膚を押し込んだ時のコンピュータ上での推定が対応付けられている。青い線が中央値からの距離の変化に対応している。

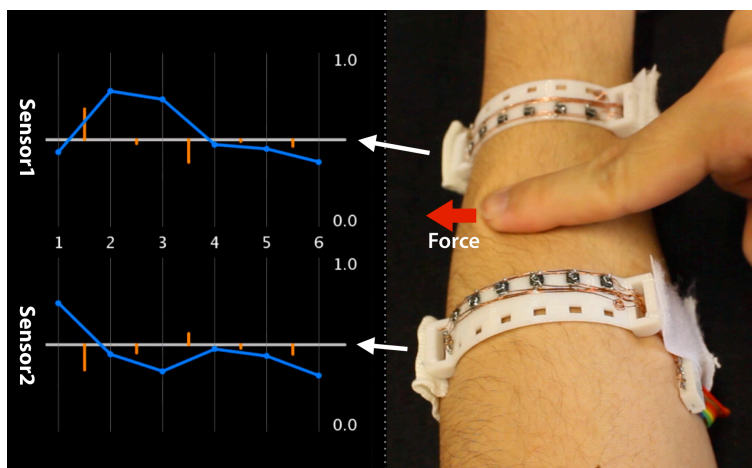


図 5.8: 皮膚形状の変化の視覚化

5.4.1 記号の導入

SenSkin で用いる 2つのアームバンドをそれぞれ A と B に分ける。腕を縦においた時に、手首の方向にあるのが A で、肘の方向にあるのが B である。以降は、センサの集合を記号 A,B を用いて表す。また、アームバンドには 6 個のセンサが搭載されており、左側から 1-6 の番号を設定した。これもセンサを表すインデックスとして使用する。

- $Raw_{X(i)}$: センサから与えられる処理をしていない信号値である
- $Min_{X(i)}$: キャリブレーションで設定された信号値の最小値で、正規化に用いる
- $Mid_{X(i)}$: キャリブレーションで設定された信号値の中央値で、正規化に用いる
- $Max_{X(i)}$: キャリブレーションで設定された信号値の最大値で、正規化に用いる
- $Norm_{X(i)}$: 信号値の最小、中央、最大値を用いて求められた正規化されたセンサ値である

センサが接続されたマイクロコントローラでは 10bit の A/D 変換を行うため、センサから直接与えられる $Raw_{X(i)}$ は 0-1023 の範囲で与えられる。

5.4.2 キャリブレーション

計測には準備が必要で、これをキャリブレーションという。いつ、どのような場合でも計測の結果が同じように得られるのが望ましい。また、使用する人が異なっても同じ結果が得られるようにする必要がある。そのために皮膚とセンサの状態が同じ条件になるようにキャリブレーションを行う。SenSkin と SkinWatch では共通のセンサと電子回路、計算用のソフトウェアを用いるため、ハードウェアのデザインが異なっても基本的な方法は同じである。

使用している赤外線距離センサは皮膚とセンサの間の距離を計測するため、キャリブレーションにおいて皮膚の状態が正規化の対象になる。皮膚の弛みや皺の影響を極力除外し、センサとの距離を適切に設定する。また、皮膚の位置によって皮膚の柔軟性は異なるため、これも考慮に入れる必要がある。そのためには、ソフトウェア上でセンサが得られる信号の範囲を記録し、その範囲の中で受け取った信号を読み替える必要がある。手順を以下に示す。

1. デバイスと皮膚が離れたり、皮膚がはみ出さないよう、ベルトの締りを適切に調節する
2. デバイスと皮膚の間に、不自然な伸張がないようにデバイスを皮膚の上に載せる
3. ソフトウェア上で、センサの中央値 ($Mid_{X(i)}$) を登録する
4. ソフトウェア上で、センサの上限値 ($Max_{X(i)}$) と下限値 ($Min_{X(i)}$) を自動更新するように設定する
5. 指を操作対象の皮膚の上でランダムに動かす
6. センサに向けて皮膚を寄せたり、センサから皮膚を遠ざけるように動かす
7. ソフトウェア上で、自動更新を解除する
8. 皮膚に不自然な伸張がないことを確認する
9. ソフトウェア上で、再びセンサの中央値 ($Mid_{X(i)}$) を登録する

5.4.3 正規化

キャリブレーションで求められたセンサの信号値の最小、中央、最大値を用いて、センサ値を正規化する。中央値を境界として、中央値から最大値までを 0.5-1.0 に変換し、中央値から最小値までを 0.5-0.0 に変換する。計算式は以下のとおりである。

$$Norm_{X(i)} = \begin{cases} 1.0 & (Raw_{X(i)} \geq Max_{X(i)}) \\ 0.5 + 0.5 \times \frac{Raw_{X(i)} - Mid_{X(i)}}{Max_{X(i)} - Mid_{X(i)}} & (Mid_{X(i)} < Raw_{X(i)} < Max_{X(i)}) \\ 0.5 & (Raw_{X(i)} = Mid_{X(i)}) \\ 0.5 \times \frac{Raw_{X(i)} - Min_{X(i)}}{Mid_{X(i)} - Min_{X(i)}} & (Min_{X(i)} < Raw_{X(i)} < Mid_{X(i)}) \\ 0.0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5.1)$$

5.5 応力の計測方法

ここでは、SenSkin を用いてせん断応力、皮膚の法線方向への応力をセンサ値から計算するための方法を説明する。5.4 小節で設定したものと同一記号を用いる。なお、SkinWatch では応力の計算は使用しない。

5.5.1 2次元のせん断応力

まずは2次元方向のせん断応力が印加されたときの、センサ値から応力を推定する計算式を計算する。センサ値は $S_{X(i)}$ という変数で表現される。これは5.4小節の $Norm_{X(i)}$ に対応する。X には A または B が代入され、i にはセンサ番号として 1-6 が代入される。

X 方向の応力をセンサ値から推定する式は次のようになる。

$$\begin{aligned} X_A &= \sum_{i=1}^3 (S_{A(i)} - S_{A(i+3)}) \\ X_B &= \sum_{i=1}^3 (S_{B(i)} - S_{B(i+3)}) \\ X &= \frac{X_A - X_B}{2} \end{aligned} \quad (5.2)$$

同様に、Y 方向の応力をセンサ値から推定する式は次のようになる。差分を計算する方向が X 軸の式とは異なる。

$$Y_A = \sum_{i=1}^6 (S_{A(i)})$$

$$\begin{aligned}
 Y_B &= \sum_{i=1}^6 (S_{B(i)}) \\
 Y &= \frac{Y_A - Y_B}{2}
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

5.5.2 垂直方向の応力

Z 軸方向の応力をセンサ値から推定する式は以下のようになる。ここでは、すべてのセンサの変化の差分を合成している。

$$\begin{aligned}
 Z_A &= \sum_{i=1}^6 (S_{A(i)}) \\
 Z_B &= \sum_{i=1}^6 (S_{B(i)}) \\
 Z &= \frac{Z_A + Z_B}{2}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

5.5.3 計算の図式化

上記の数式 5.2、5.3、5.4 は感覚的にはわかりにくい。理解を促すために、図 5.9 に数式が示しているセンサ値の計算を図式化した。X 軸では左右のセンサの変化の差分を、Y 軸では上下の変化の差分を用いているのがわかる。

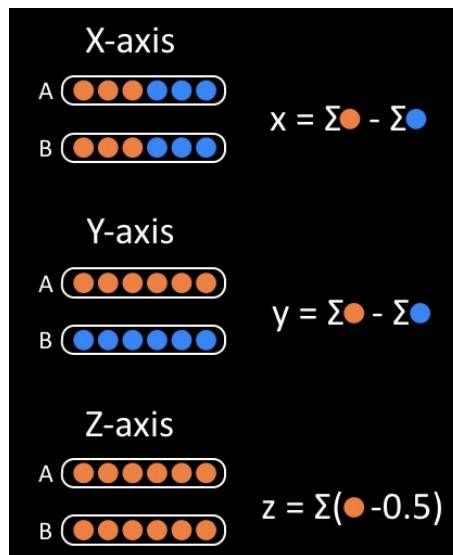


図 5.9: 計算式の図式化

5.6 応力の計測実験

SenSkin を用いて、皮膚のせん断応力を計測できるかどうか検証した。皮膚にせん断応力が加わるように、皮膚の表面の水平方向に皮膚を引っ張った。皮膚をひっぱったときの応力と、その周囲に取り付けた SenSkin が示す値の相関関係を示す。

実験は筆者の腕を用いて行われた。データを取得した試行の前には、準備的に2回試行した。1回目は両面テープが弱く、皮膚から器具は外れてしまったため中止した。2回目は計測に成功し、3回目とおおよそ同じ結果を示した。5.6.2 では3回目の計測結果を示す。

5.6.1 実験構成

計測する機器にはフォースゲージ (A&D Company, Limited. 型番: AD-4932A-50N; 解像度: 0.01N) を選択した。また、皮膚とフォースゲージを接続するために、皮膚には透明なプラスチック板を両面テープで貼り付け、プラスチック板とフォースゲージの間を糸で結んだ。

実験は図 5.10 に示す構成で行った。皮膚の引っ張る方向は、腕に対して垂直方向である。SenSkin では X 方向の応力として計測される。フォースゲージには結果をデジタル的に出力するインターフェースが備わっていないため、フォースゲージの表示窓をウェブカメラで撮影した。ウェブカメラからの映像²と、ソフトウェア上での SenSkin の計算結果の映像を、Mac OS X のデスクトップ録画機能³で録画した。計測終了後に、録画した映像を見て、フォースゲージの応力と SenSkin の計算結果をそれぞれプロットに書き写した。

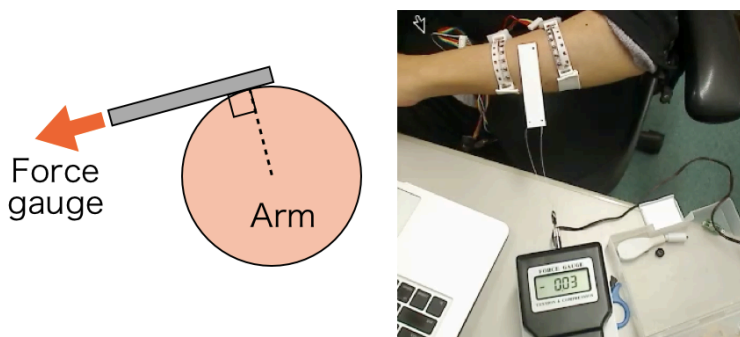


図 5.10: 実験環境と構成

5.6.2 結果

図 5.11 は X 方向への応力を計測の結果を示したグラフである。グラフの Y 軸は SenSkin で計算されたセンサ値の相対値、X 軸は実際にフォースゲージで計測した応力である。グラフから読み取れるのは以下の点である。

²QuickTime Play.app を起動し、メニューの「ファイル」から「新規ムービー収録」を選択する。

³QuickTime Play.app を起動し、メニューの「ファイル」から「新規画面収録」を選択する。

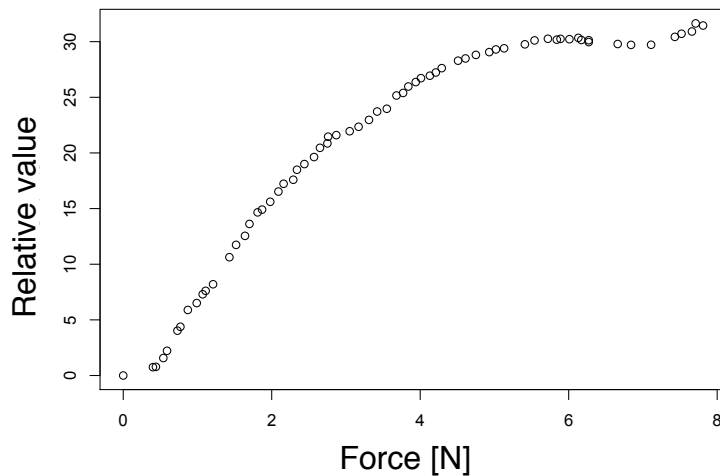


図 5.11: X 方向への応力と計測値の関係

- プロットはおおよそ 5N(約 510g) の地点まで線形に近い形状を示している。
- プロットの 0 に近い部分では、応力がかかっても SenSkin の計測値には反映されていない。
これは紐の弛みと、皮膚の弛みの両方の原因があると考えられる。
- 6N から 8N の間は弾力的な変化を示している。

5.7 ジェスチャ認識

ハードウェアの構成とセンサの設置する位置が異なるため、SenSkin と SkinWatch で計測できる皮膚の場所と形状、そしてジェスチャも異なる。ここでは、それぞれのハードウェアで取得できる、または取得するように設計したジェスチャについて、文章と図を用いて解説する。

5.7.1 SenSkin のジェスチャの種類

以下の 7 種類のコマンドを設定した。

- normal: 普通、触れていない状態
- push: 1 本の指で押す
- pinch: 2 本の指で摘む
- pull-up: 1 本の指で上に引っ張る
- pull-down: 1 本の指で下に引っ張る
- pull-right: 1 本の指で右に引っ張る
- pull-left: 1 本の指で左に引っ張る

これ以外に、応力を計測して2次元方向のせん断応力、垂直方向の応力を計測するモードをそれぞれ設定した。ジェスチャの認識を行う場合には、パターンにマッチした状態しか判定できない。モードを切り替えることで機能を切り分け、皮膚にかかる応力を3次元的に数値化する。

5.7.2 SkinWatch のジェスチャの種類

SkinWatch では多様で有機的な入力に対応するため、以下の15種類のコマンドを設定した。図5.12にそれぞれ対応するコマンドについて、指によるジェスチャ入力の様子を写真で示す。

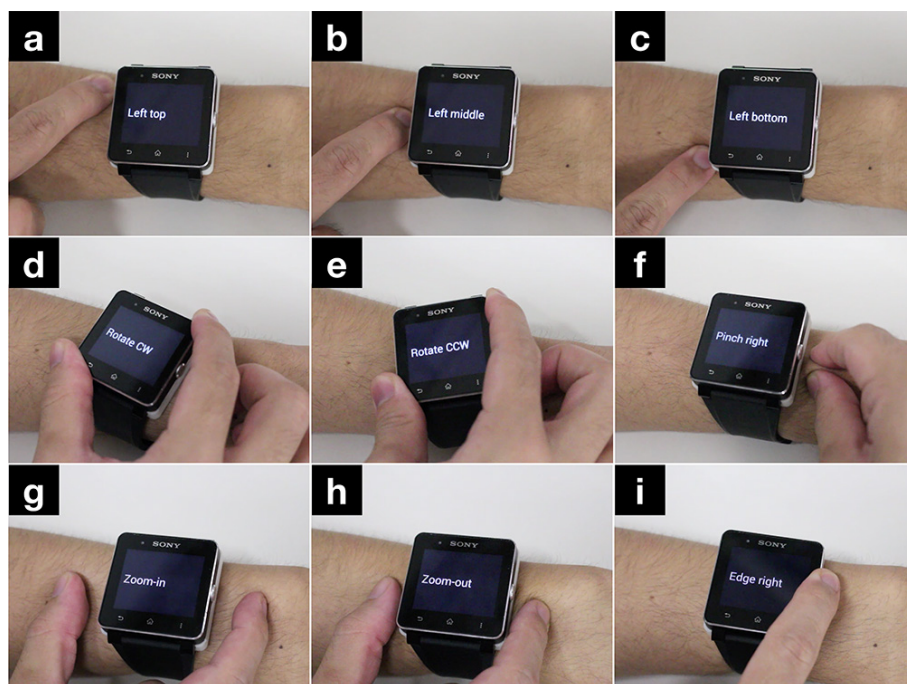


図 5.12: ジェスチャー一覧

- Neutral: ニュートラル、触れていない状態
- Push Right Top: デバイス右側の皮膚の上部を押す
- Push Right Liddle: デバイス右側の皮膚の中部を押す
- Push Right Bottom: デバイス右側の皮膚の下部を押す
- Push Left Top: デバイス左側の皮膚の上部を押す (図 5.12 (a))
- Push Left Liddle: デバイス左側の皮膚の中部を押す (図 5.12 (b))
- Push Left Bottom: デバイス左側の皮膚の下部を押す (図 5.12 (c))
- Rotate CW: デバイスを掴んで時計方向への回転 (図 5.12 (d))
- Rotate CCW: デバイスを掴んで反時計方向への回転 (図 5.12 (e))
- Pinch Right: デバイス右側の皮膚をつまむ (図 5.12 (f))
- Pinch Left: デバイス左側の皮膚をつまむ
- Zoom In: デバイス両側の皮膚を引き離す (図 5.12 (g))

- Zoom Out: デバイス両側の皮膚を引き寄せる (図 5.12 (h))
- Edge Right: デバイスの右端を押し込む (図 5.12 (i))
- Edge Left: デバイスの左端を押し込む

5.8 皮膚形状の認識と機械学習

スマートウォッチなどへのコマンドを入力するためには、皮膚の形状のパターンをコンピュータが推定できる必要がある。ここでは、SenSkin を例にしてサポートベクターマシンを用いて皮膚の変化をパターンマッチングする方法を説明する。SkinWatch も同様の方法で行っているが、SenSkin のセンサが 12 個なのに対して SkinWatch は 10 個である点と、センサで取得する皮膚の変形の領域が異なる点に注意が必要である。SenSkin では 2 つのアームバンドの間の皮膚領域でパターンを認識しているが、SkinWatch ではデバイスの両隣の領域でパターンを認識している。

5.8.1 学習データの収集

学習データは実際に以下の 7 種類の操作を行ったときのデータを記録して用いた。キャリブレーションを行ったあとで、それぞれのコマンドに対応した皮膚の変形を多少の変化をつけながら入力した。

- コマンド: normal, push, pinch, pull-up, pull-down, pull-right, pull-left (7 種類)
- データ数: 145 (おおよそ各 20 回の計測データ)

5.8.2 機械学習

SenSkin の 2 つのアームバンドから取得されるデータは合計で 12 個である。12 個のデータはそれぞれ時系列のデータとして取得され、マイコンのセンサ値の更新頻度に合わせて更新され、コンピュータに送信される。コンピュータ側では 12 個のデータをそれぞれキャリブレーションで得られた上限値、下限値、中央値を用いて正規化する。さらに、この正規化データをサポートベクターマシンで処理できるように、範囲を 0.0 1.0 の間に変換する。このとき、中央値は 0.5 とする。

サポートベクターマシンでは、精度を高めることを目的として 3 種類のデータを生成して教師データを作成した。学習に用いたデータセットは次のとおりである。サポートベクターマシンでは学習に用いるデータの変数の数に応じて次元が生成される。

- Raw: 正規化データをそのまま使用するため 12 次元。
- Diff: アームバンド内の隣り合ったセンサ間の差分。アームバンド 1 つのセンサは 6 個なので、Diff は 5 個になる。アームバンドが 2 つあるため倍の 10 個として 10 次元。
- Cross: 向かい合うアームバンドでそれぞれ対応するセンサの間の差分のため 6 次元。

データセット Diff と Cross で用いるデータは、それぞれ正規化されたセンサ値 $S_{X(i)}$ を用いて以下のように計算される。

$$Diff_A(i) = S_{A(i+1)} - S_{A(i)} \quad (1 \leq i \leq 5) \quad (5.5)$$

$$Diff_B(i) = S_{B(i+1)} - S_{B(i)} \quad (1 \leq i \leq 5) \quad (5.6)$$

$$Cross(i) = S_{A(i)} - S_{B(i)} \quad (1 \leq i \leq 6) \quad (5.7)$$

収集した 7 種類、145 のデータを用いて学習データを作成し、同じデータを使って認識率を調べた。データセットの組み合わせと認識率は以下のとおりである。

- Raw: 98.11%
- Raw + Diff: 91.82 %
- Raw + Cross: 98.74%

認識の結果、それぞれの認識率はジェスチャを判別する上で十分だと考えられる。そして、学習データに Cross を入れたのがもっとも高い精度を出した理由は明らかである。Cross のデータセットは 2 つのアームバンド間の弾力的な変化を反映できるので、皮膚の弾力モデルのマッチングに適していたと考えられる。それに対して、Diff のデータセットでは認識率は上がらなかったが、隣り合うセンサ間の差分は、とくに皮膚をつまむなどの皮膚の形状変化に富む操作に貢献すると考えられる。

5.8.3 SenSKin におけるパターンマッチ

図 5.13 に、5.7.1 小節のコマンドに対応するデータセットを視覚化したグラフを示す。

5.8.4 SkinWatch におけるパターンマッチ

図 5.14 に、5.7.2 小節のコマンドに対応するデータセットを視覚化したグラフを示す。

5.9 SenSkin を用いたアプリケーション

SenSkin は主に皮膚のせん断応力の計測方法と検証実験を行うことを目的とした。アプリケーションを目的に設計していないため、アプリケーションは派生的なものであるが、いくつかの例を挙げることができる。

- 医療や美容における皮膚上での実験の評価
- プレゼンテーションのリモートコントローラ
- スポーツ中のウェアラブルデバイスの操作

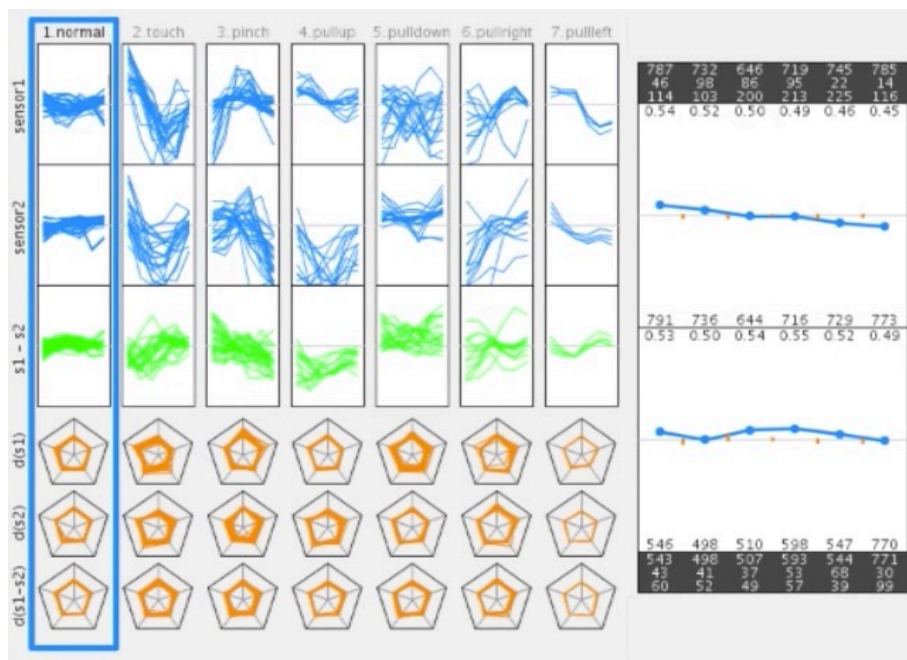


図 5.13: SenSkin を用いた際の SVM のデータ

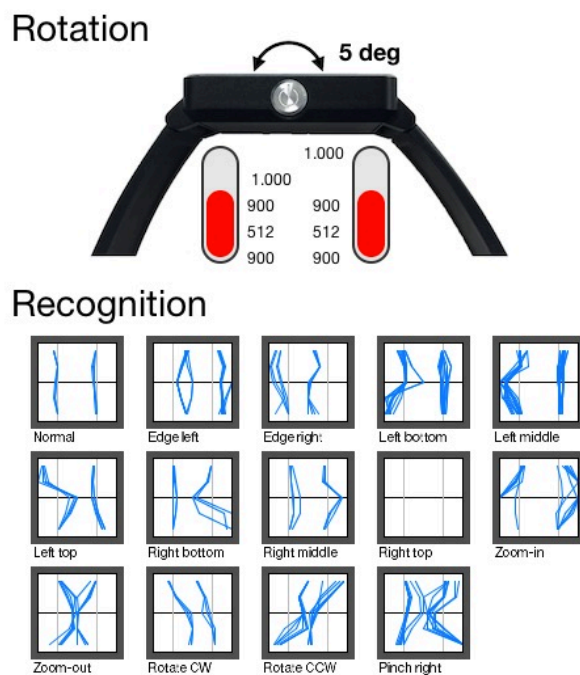


図 5.14: SkinWatch を用いた際の SVM のデータ

また、実際に実装したものとしてデスクトップを操作するために皮膚をタッチパッドとして用いるアプリケーションがある。

5.9.1 デスクトップの操作

SenSkin を用いることで、皮膚をタッチパッドのようなコントローラとして設計した。指で皮膚を引っ張ることでカーソルを移動し、皮膚をつまむことでアイコンをポインティングする。この操作をデスクトップで行えるように、仮想的なデスクトップとアイコンを作成した。図 5.15 にデスクトップの画面を示す。これらのアイコンのうちから2つを移動するのに、○秒を要した。マウスに比べると効率的とはいえないが、皮膚がタッチパッドとして用いることができる点で、計測手法の有用性を示した。また、人体を用いたインタラクションの事例として発展が期待できる。

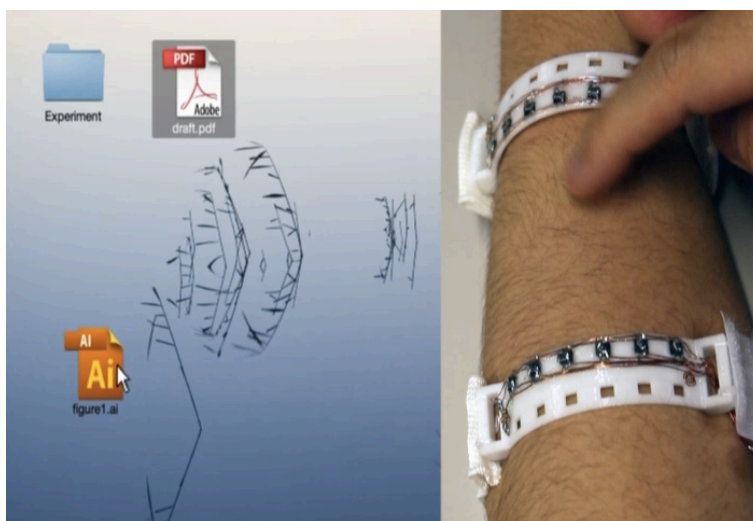


図 5.15: SenSkin を用いたデスクトップ操作

5.10 SkinWatch を用いたアプリケーション

5.10.1 地図ナビゲーション

地図ナビゲーションはスマートフォンにおいても需要の高いアプリケーションである。これをスマートウォッチで閲覧することができれば、移動中にスマートフォンを手持たなくても目的地を目指して移動することが可能になる。現状では、ズームインとズームアウトをピンチ操作で行うスマートフォンに対して、画面の小さいスマートウォッチでは操作手段が乏しい。皮膚の領域を操作できるように拡張して、スマートフォンと同じ操作感を提供することができれば利便性が向上すると考えた。

図 5.16 にスマートウォッチのアプリケーションとして実装した地図ナビゲーションを示す。地図は Google Map で表示した北京市内の地図をキャプチャして使用している。デバイスの左右の

皮膚を指で触ることで、地図のズームインとズームアウトを行う。また、画面の淵を押しこむ操作で、その方向にスクロールする操作を行う。



図 5.16: 地図ナビゲーションのアプリケーション

5.10.2 スクロール・回転操作

スクロールと回転の操作はスマートウォッチが不得意な操作である。SkinWatch はデバイスに組み込まれたセンサによる皮膚形状の計測と機械学習のパターンマッチを組み合わせて、小さい画面のみでは困難な操作を可能にした。

スクロール 先に地図ナビゲーションの例でも見たように、画面の淵を押しこむ操作をスクロールに対応させた。スマートフォンを用いれば、スクロール操作は指を画面の上を高速に動かしたあと指を浮かせればよい。スマートウォッチでも同様に操作すれば実現できそうであるが、スクロールのように何度も指を動かすとオクルージョンが生じてしまう。とくに画面が小さいため、オクルージョンによって操作の対象を見失う場合もある。オクルージョンを発生させず、操作中にも画面を見られるような設計と、ユーザの操作が皮膚への触感で認識されるフィードバックの両方を実現した。

回転 次に回転は、スマートウォッチを指で掴んで回転させる操作に対応させた。回転動作はタッチスクリーンにおいても操作しにくい手段の一つである。タッチスクリーンでは日本の指を用いて、2本の指の間の傾きに依拠して、画像などの視覚的な対象を回転させる。このとき、スマートフォンの画面に触れる2本の指をスマートウォッチの小さい画面ではなく、スマートウォッチの淵を掴む動作に対応させることでオクルージョンが生じなくなる。物理的にも操作しやすく、また回転中の視覚的なフィードバックを与えるようにした。図 5.17 には、画像の回転と、キャラクターの回転をそれぞれ示す。



図 5.17: 回転操作を用いたアプリケーション

5.10.3 皮膚触覚の反映

SkinWatch の利点の一つに、皮膚の感覚をユーザに伝えながらコンピュータを操作できる点がある。この利点を活かすアプリケーションも可能である。たとえば画面の中に柔軟に変形するキャラクターや、図、その他の視覚的なフィードバックを入れることで、皮膚の変形に追従するような変形を与えることができる。図 5.18 には、皮膚を掴んだとき皮膚変形に対応するように設計されたキャラクターを示す。



図 5.18: 皮膚による変形情報を用いたアプリケーション

5.11 リミテーション

5.11.1 身体動作とノイズ

皮膚の表面の形状には、関節などの身体の動きが影響してしまう。この影響はとくに SenSkin のようなアームバンド型のデバイスで、センサの下に筋肉がある場合に顕著に現れる。SenSkin の場合、計測実験やジェスチャコマンドの登録を行う際には、同じ姿勢を保つ必要がある。SkinWatch では腕時計を装着する箇所と同じ部分の皮膚変形を計測するため、筋肉の影響を受けにくい。それでも身体の動きは計測に影響を与えてしまうため、精密な計測を行う場合や製品に組み込む場合には工夫が必要である。例えば、加速度センサを用いて腕やデバイスが一定の位置に留まった

場合にジェスチャを認識するなど、身体の動きに対する状況の判定を入れると良い。これにより、センサから読み取ったデータにノイズが混ざった際にもエラーを取り除くことが期待できる。

5.11.2 計測手法

次に、計測手法に対する懸念も存在する。計測には赤外線距離センサを用いている。SenSkin と SkinWatch で用いているセンサからの赤外線の出力は、例えば医療機器のように市販されている血流計よりは高い出力を用いていると思われる。これは、赤外線が反射する場所がデバイスによって閉じられた環境ではなく、皮膚とデバイスの間に隙間があり、外部の光が入り込む余地があるためである。人によっては赤外線に弱い皮膚を持っていたり、光によってやけどしやすい場合があるので注意が必要である。これを解決するには、デバイスとセンサの位置を設計する際にセンサはなるべく外部に露出しないようにするか、時間分割した赤外線の信号を用いて外部光に影響されない計測の仕組みに対応する必要がある。

5.11.3 筐体デザインとセンサ配置

SkinWatch の実装において、筐体が分厚くなってしまう問題がある。これはセンサをプリント基板に対して垂直に乗せているためである。皮膚との距離を計測するだけなら、センサは斜めに取り付けても良い。回路や筐体のデザインを工夫することで製品レベルの薄さに実装可能であり、スマートウォッチの筐体に組み込むことが可能である。

5.11.4 通信速度とリフレッシュレート

使用機材に Android と Sony 製の SmartWatch2 を用いた。スマートウォッチの画面は Android で描画し、その画像を Bluetooth 通信で SmartWatch2 に転送している。そのため、Bluetooth 通信で使用する 2.4GHz 帯の電波が混線する環境、Bluetooth 機器が多く用いられている環境では通信が遅くなり、結果的に皮膚で操作をしてからの画面の更新が遅くなる点に注意する必要がある。なお、現在では Android Wear が使用可能なため、通信速度の問題もある程度は解決可能である。

5.12 本章の結論

これまで、皮膚を触ることをコンピュータに認識させることで、身体もコントローラの一部として応用する方法を検証してきた。技術的には赤外線距離センサと機械学習を、技法的にはセンサの配置やジェスチャの種類を工夫することで、それぞれのデバイスにあった操作方法とアプリケーションを提供した。SenSkin と SkinWatch を通して、次の成果が得られた。

- 赤外線の反射を用いた方法で有機的な操作を柔軟な皮膚を通して可能にした
- 皮膚と皮膚の間に障害物を挟まずにせん断応力を計測する手法を確立した

- 機械学習によって柔軟な皮膚の変形をパターンマッチする方法を示した
- 皮膚を用いたインタラクションとアプリケーションを示した
- 小型でコストの低いハードウェアでウェアラブルデバイスの操作を拡張した

皮膚の柔軟性をインタラクションに応用することで、ユーザが自分の身体を通して伝わる操作の結果をフィードバックされる。これは明らかに高速で連続的なフィードバックであり、ネイキッドインタラクションが目指すコンピュータの形である。

第6章 指のインタラクション

指は、身体の最も先端にある部分であり、道具を使うことによって目的を達成したり、目の前にある環境を改変するために用いられる身体部位である。また、コミュニケーションの中で多用され、非言語情報としてジェスチャによる意図の伝達、指差しによる注視を促すなど多様なチャネルを持っている。人とモノのインタラクションを考えた時に、指と手は人間側の能動的な道具であるため、身体性メディアを考察する上で重要な要素である。ネイキッドインタラクションにおける身体性メディアとして、コンピュータインタフェースの制御にとどまらない設計や方法を提示する。

6.1 概要

手はジェスチャを通じて感情を伝えるだけではなく、人間の歴史を通してパフォーマンスやコミュニケーション、アートといった表現に用いられてきた。影を用いたパペットや、手話、およびハンドペインティングは、人の手が芸術や意思疎通において非常に表現力があることを証明している。特に、影を用いたパペットでは手がキャラクタを演じるために動くため、手の役割は大きい。また、人の手は生物として演技する能力を持っている。

擬人化によって手を他の生物的なものに見立てることができる。例えば、机の上においた2本の指を脚に見立てることで二足歩行をしたり、小指と人差し指を親指の上に載せて手の構えと動きをきつね見立てることが可能だ。これは手が持っている「柔軟性」と「反射性」のためであると考えられる。関節が多いため、手は高い「柔軟性」を持っている。そして「反射性」とは、人の意図を反映して即座に変形できるような能力を指している。これはキーボードやタッチパッドなどのインタフェース機器を容易に操作するときの手の能力とも言える。

本研究では、手と指が持つ表現力を根拠に、手に装着するロボットの存在感を演出することを目的とする。手とロボットを組み合わせることで、手の柔軟性と反射性によってもたらされる擬人化の能力を引き出す。パフォーマンス、コミュニケーション、およびストーリーテリングを目的として、指に装着しやすいウェアラブルロボットである Pygmy を開発した。(図 6.1)

Pygmy は、手のジェスチャや表現を補助する指輪型のロボットデバイスである。指輪デバイスごとに、目や口などの顔の部分の模した部品が埋め込まれている。ユーザーは、それらの指に身に付けられている機器をコントロールすることで、様々な表情のキャラクタを作り出すことができる。Pygmy によって生み出されたキャラクタの存在感によって、ユーザの周囲の人々とユーザに印象を与えるような演技を行う。



図 6.1: 指輪型ロボット Pygmy を指に装着した場面

6.2 Pygmy

指輪型ロボットの Pygmy をスタンドアロンの機器として機能するように設計した。Pygmy は、ストーリーテリングロボットとして、人間の手に装着できるロボットとして、また擬人化のためのデバイスとしてなど、いくつかのアプリケーションのために設計する必要がある。これらの設計の要件を満たすために、下記の設計ポリシーを策定した。

柔軟性 (Flexibility): Pygmy は指に装着するため、それぞれが指の動きを妨げないように設計する必要がある。装着時に指を上下に揺らしたり曲げたりすることを考慮して、指輪の部分の細いリング状にした。また、様々な指、様々な指の太さのユーザでも装着できるように、サイズの異なるリングを用意してリングの部分交換できるようにした。

組み換え可能性 (Reconfigurability): ユーザーがデバイスを身に着けて顔や動物の擬人的な表現を作るためには、様々なパターンを施行して、装着の構成をカスタマイズする。リングの設計において、柔軟性に加えて、身体から容易に迅速に取り外せる必要がある。組み換え可能性は、擬人化のアプリケーションにおいて様々な形態のキャラクターの作成をサポートする。

拡張性 (Scalability): 装着のパターンを多様化するために、デバイスの配置は手と指の姿勢に従って自由に変更でき、ユーザーにより動的に追加できるようにする必要がある。こうした拡張性を確保するために、無線通信モジュールを使って数量や構成を自由に変えられるようにした。

擬人性 (Human likeness): ロボットの外観の印象がユーザに視覚的な影響をあたえるため、擬人性は重要な要素である。そこで、ロボットに与える外観の中で、もっとも擬人性を出せる顔を選んだ。ロボットは指輪型で小さいため、それぞれの指輪型デバイスの上に目と口のパーツを搭載する。ここで、リアルな外観を持つパーツも検討したが、リアルな外観が指輪に分割されているのは不気味であるとわかった。それぞれのパーツは抽象化されたデザインを用いた。

安全性 (Safety): 指輪型ロボットが子供にも使われることを前提に、デバイスをデザインする必要があった。デバイスを体に装着するため、デバイスの内部に搭載するマイクロコントローラの基板とバッテリーがプラスチックのケースの中に固定されるようにした。また、顔のパーツを動かすためのモーターは電極や磁石が直接触れないように格納した。また、バッテリー、マイクロコントローラとモータ部分は指輪の上下に分割されるため、それぞれのデバイスが落下しないよう、ビニールの導線で接続した。

反応性 (Responsiveness): 反応性はインタラクションのための重要なファクターである。開発したデバイスは、指の動きに対して顔のパーツが動くまでの時間を短くし、速い反応を保証している。無線通信を含めて、全体のシステムを極力遅延がないようにデザインした。

小型化 (Miniaturization): 柔軟性、組み換え可能性、および擬人性を達成するために、リング状のデバイスの小型化は不可欠である。デバイスのサイズはユーザの経験に影響を与える。とくに指輪型ロボットを指に装着する際、顔のパーツが大きすぎるとは比率が不自然に見えてしまう。指輪型デバイスの内側に格納できる小さいマイクロコントローラの基板と格納するためのケースを設計した。

6.3 小型化な指輪型ロボットの設計

Pygmy は、手と指に装着して擬人性を演出するための指輪型ロボットである。指輪 6.2 はそれぞれ顔のパーツを持っており、これらを組み替えて装着することでキャラクタを構成する。指輪以外にも、指輪に埋め込んだ指曲げセンサ、顔の形を模倣したコントローラなどを設計、製作した。これらのデバイスはすべて Bluetooth か ZigBee の無線通信を用いて接続されている。

小型化は Pygmy をデザインする上で不可欠であった。小型化を達成するために、機器は、超小型電磁石サーボモータ、一から設計された円形のマイクロコントローラ基板、超小型の Lipo バッテリー¹ およびポリカーボネート製の筐体を使って組み立てられた。



図 6.2: 指輪型ロボットを構成する 3 つの指輪型デバイス

¹ リチウムポリマーイオンバッテリー

6.3.1 マイクロコントローラ基板

円形のマイクロコントローラ基板の設計図を図 6.3 に掲載した。基板は、オープンソースのハードウェアプロジェクトである Arduino の設計図を元にして設計された。また、マイクロコントローラ IC には Arduino プロジェクトが製作したファームウェア (Arduino Pro Mini 3.3V 8MHz に用いられるファームウェアと同一のもの) を用いた。マイクロコントローラ IC には Arduino Pro Mini で使用されているのと同じ Atmega328p を用いた。

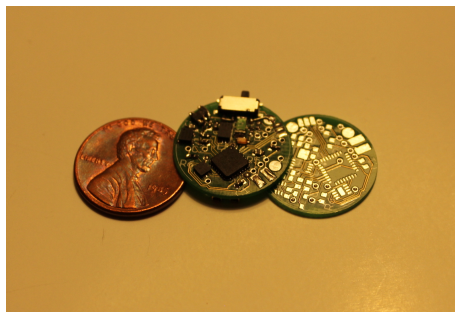


図 6.3: 指輪型ロボットに内蔵された円形プリント基板

基板には以下のものが実装されている。

- Atmega328p
- Bluetooth モジュール (KC Wirefree 2.0)
- 3.3V レギュレータ
- Lipo 充電器

6.3.2 超小型電磁石サーボモータ

超小型電磁石サーボモータ (図 6.4、図 6.5) は、通常のサーボモータとは違い、ギアを用いずに角度制御を行うサーボモータである。また通常用いられる DC モータや AC モータといった回転モータではなく、電磁石を用いているのも特徴である。具体的にはモータのコイルに流れる電流に比例して生じる磁束によって、モータの可動軸に取り付けられているネオジム磁石に吸着力と反発力を作用させ、モータの軸を回転させている。電流が流れていないときは、コイルの側面に接着されたネオジム磁石によってコイルの中央軸と同じ方向に姿勢を制御する。

マイクロコントローラ IC を通して超小型電磁石サーボモータを制御する。モータは Atmega328p のデジタル出力に備わっている PWM 機能² を用いてモータのコイルに流れる電流を調節し、モータの角度を制御する。モータによってネオジム磁石の取り付け位置が微妙に異なるため、コイルに流れる電流に対してモータの軸の傾きが異なる。

²Pulse Width Modulation: パルス幅変調。ある一定の電圧のパルスを時間分割して出力することで、目的の電圧に調整することができる。



図 6.4: 超小型電磁石サーボモータ



図 6.5: 超小型電磁石サーボモータ（軸）

6.3.3 可動なロボット筐体

Pygmy は小型ロボットデバイスである。そのため、ロボットの可動部を指輪の上に実装する必要があった。おおよそ 13mm の直径の球体の中に、超小型電磁石サーボモータを格納し、そのモータの軸の動きによってロボットの表情を作る部品を動かしている。部品には口と目が含まれていて、口なら唇を、目ならまぶたを動かす。動かすのは 1 枚の半球状のプレートであり、これをおおよそ 90 度スライドさせることで、表情に動きをつけている。

展開した筐体の部品を図 6.6 に示す。モータの軸と半球状のプレートは、細い棒によって接続され、可動部品の底面に接続するリングの取り付け部分に干渉しないように設計してある。また、棒を用いることで半球状のプレートの重さを軽くし、省電力化と動きの高速化を図った。

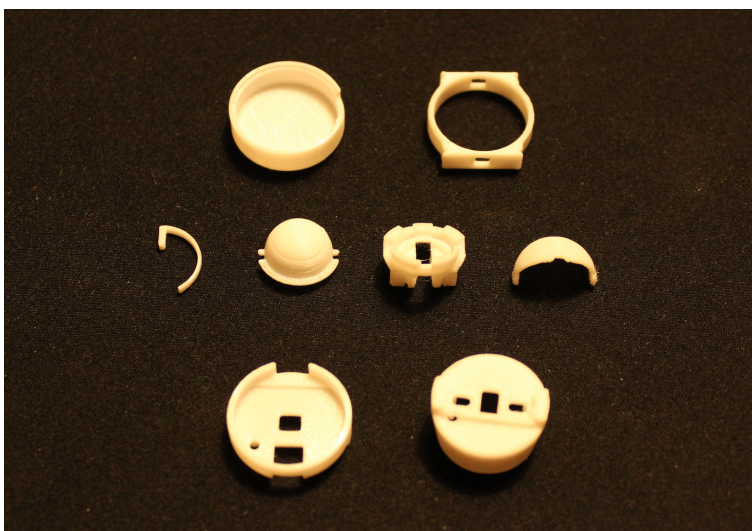


図 6.6: 3D 出力した筐体部品の展開

6.3.4 バッテリーケース

バッテリーケースは指輪デバイスの下部、指の下に隠れるように設計された。バッテリーケースにはマイクロコントローラ基板も含まれる。マイクロコントローラ基板からはモータを制御するための2本のビニル導線が出ており、それがリングを沿って上部の可動部に接続されている。バッテリーケースは接着剤で貼りあわせるため開けることはできない。これは子供が使うことを前提とした安全性の対策である。

バッテリーの電極は基板に接続され、基板に搭載された Lipo バッテリー用の充電 IC で充電される。充電は USB と同じ 5V 電圧を用いて、ケース側面にある2個の穴に 2.54mm ピッチのヘッダピンを挿入して充電できる。バッテリーが充電されている最中は基板に搭載された LED が点灯し、満タンになると消えるため充電が完了したことがわかる。

6.3.5 コントローラとセンサ

(1) コントローラ

コントローラ (図 6.7) は、指輪型ロボットとは独立したハードウェアであり、無線通信によって指輪型ロボットを制御することができる。コントローラには ZigBee モジュールが搭載され、ZigBee はホストとなるコンピュータと通信する。さらにコンピュータから Bluetooth 通信を通して指輪型ロボットに信号が伝達される。コントローラにも Lipo バッテリーが内蔵されている。マイクロコントローラには Arduino FIO³ を用いた。

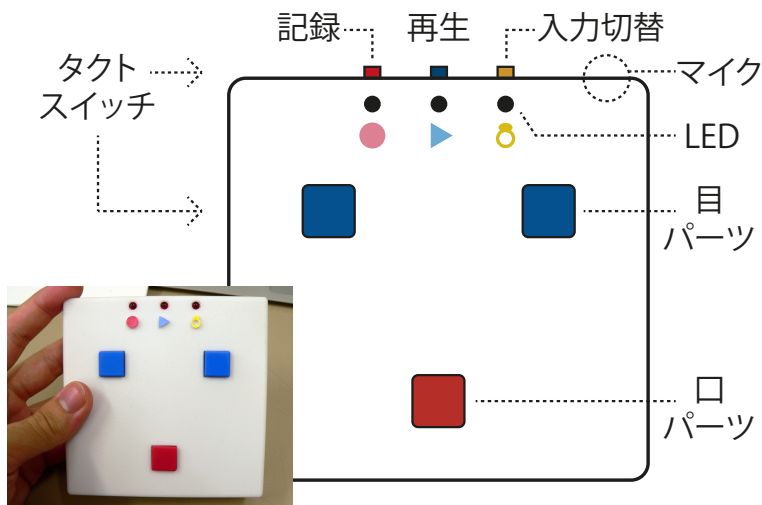


図 6.7: コントローラ

コントローラには3つのボタンがついており、2個の目と1個の口に対応している。ボタンをおすことでそれぞれに対応した信号をコンピュータに伝える。コンピュータ側のアプリケーションで信号を指輪型ロボットに振り分ける。対象の指輪型デバイスに対して Bluetooth モジュール

³ZigBee を直接搭載できる Arduino のシリーズ。Lipo バッテリーの充電回路も備わっている。

を通してモータの制御値を変更するように伝達する。指輪型デバイスのマイクロコントローラは信号を受け取り、モータに与える電圧を制御することで、モータの軸を動かして目や口を開かせたり、連続的にまぶたを開閉させる。

また、コントローラには次に説明するセンサの一部も搭載されている。コントローラには近くで話した音声に反応するようにマイクロフォンを搭載した。これにより、コントローラで2つの目を動かしながら、口は喋った声に追隨して動くようにプログラミングできる。ボタンも含め、これらの操作はコンピュータ側で1分間記録して、同じ動作を再生することができる。記録と再生はコントローラ上部のボタンを押すことで実行される。

(2) センサ

センサには3種類ある。1つがコントローラに搭載されたマイクロフォンであり、他に指輪の形をした加速度センサ(図 6.8)、スタンドアロン型の指輪型ロボット 6.3.6 で用いられる指輪に埋め込まれた赤外線距離センサがある。指運動の計測には [69] におけるセンシングの仕組みを用いている。ここでは加速度センサについて説明する。



図 6.8: 指輪型センサ

口の動きに対応したのがマイクロフォンであれば、目の動きに対応したのが加速度センサ搭載の指輪である。加速度センサは指輪上部のケースに、バッテリー、マイクロコントローラ基板とともに格納される。指をふることで加速度の数値が Bluetooth 通信を経由してコンピュータに送信される。コンピュータは加速度センサの値を元にして、目の指輪型デバイスに目のまぶたの動きを連動するように制御の命令を送る。

6.3.6 スタンドアロン型の指輪型ロボット

指輪型ロボットは無線通信を行わない状態でも、ユーザの指の上でインタラクションできるように、異なる設計も用意した。これをスタンドアロン型と呼ぶ。スタンドアロン型では、指を曲げたり動かした時の動作を、バッテリーケースに格納されたマイクロコントローラ基板のセンサによって計測する。計測には赤外線距離センサを用いて、バッテリーケースの穴から赤外線を照射して指の表面との距離の変化を計測する。

スタンドアロン型の設計により、ユーザは自分の身体の動きに追従する指輪型ロボットを体験することができる。

6.4 ユーザビリティテスト

ユーザビリティテストでは、1組2名の被験者が同時に行う。デバイスを評価するために、ユーザの間の自発的なインタラクションを観察した。このテストに参加した10名の被験者はコンピュータサイエンスを専攻する学生である。被験者はそれぞれ2名ごとにペアにわけられた。被験者にはコントローラとセンサを使用する方法が教えられる。テスト中の動作はすべてビデオに記録された。テストの終わりに、被験者にアンケートを実施した。

6.4.1 手順

ユーザビリティテストにおいてデバイスを操作する手順を被験者に提示した。与えた内容は以下のとおりである。

1. 指輪型ロボットをコントローラを用いて操作する
2. 他の被験者の手の上に乗っている指輪型ロボットをコントローラを用いて操作する
3. 指輪型の加速度センサとマイクログフォンセンサを用いる
4. コントローラの記録と再生の機能を使う
5. 手を用いて動物とヒトの動きを表現する
6. 指を動かしながら話す、会話をする
7. 自由に遊ぶ

6.4.2 アンケート

ユーザビリティテストのあと、被験者に表 6.1 に示す内容を質問した。評価はすべて7段階のLikert スケールを用いて評価された。また、被験者にはデバイスを用いた印象と彼らの体験についてのインタビューを行った。(図 6.9)

表 6.1 の結果欄には3つのカラムがある。

1. 平均値: 7段階 Likert スケールの平均値
2. 標準偏差: 7段階 Likert スケールの標準偏差
3. 好印象の割合: ポジティブな回答者の割合 (Likert スケールの中央値である 3.5 ポイントよりも高い評価を与えた被験者の割合)



図 6.9: すべての観察された動物または擬人的な表現（象、カエル、タコ、など）

表 6.1: デバイスの操作に関する質問項目と評価の結果

質問内容	平均値	標準偏差	好印象の割合 [%]
1. 操作のしやすさ	4.4	6.3	100
2. 動作の作りやすさ	4.5	3.1	90
3. コントローラの使いやすさ	6.4	0.66	100
4. デバイスが動くことによる楽しさ	6.1	0.94	100
5. キャラクタを通して表情を表現するときの簡易さ	4.3	1.79	70
6. 被験者の手があたかも他の生き物であるような感覚	5.7	1.00	90
7. 指輪型ロボットに指の姿勢を変えることで遊ぶ能力があるか	6.0	1.48	90
8. デバイスを動かしながら同時にしゃべることの楽しさ	6.1	1.37	80

6.5 ユーザビリティテストの結果

6.5.1 ユーザビリティの評価

表 6.1 の 1 番から 3 番は、指輪型デバイスとコントローラのユーザビリティの評価を示している。評価によって得られたポジティブな回答と平均値から、Pygmy は次のような視点でユーザの満足が得られたと考えられる。それは、物理的なデバイスのデザイン、デバイス間の通信、コントローラを通した協調作業である。

さらに、インタビューの質問として「操作するときに難しいと感じた点がありますか？」と聞くと、以下の反応が得られた。

1. 被験者 10 名のうち、2 名は問題がなかったと答えた
2. デバイスの準備中に、無線通信の接続に時間がかかったことについて 2 件報告された
3. コントローラの操作に遅延について 2 件報告された
4. 加速度センサの指輪によって目のパーツのまぶたが上下運動するのが適切に反応しなかった点が 1 件報告された
5. 指輪型デバイスを装着した状態で指を動かす向きを決めるのが難しいことが 1 件報告された

6.5.2 キャラクタの生成

被験者たちは、自分の手と指輪型ロボットを使って顔とキャラクタを作るのを楽しんだ。観察の結果、被験者がデバイスを手のひら側や手の甲側の指に取り付けて、いくつかの表現を生成できることに気付いた。例えば、すべての指を全体的に曲げることで、うつむいているような表情を作った。起こった表情や困った表情を作るために、まぶたの角度を斜めにしているところも観察された（図 6.10, 図 6.11）。何人かの被験者は、ヒトの表情または動物の表情に見せるために、二人で複数の手を使って顔のパーツを自由に配置、変更していた。

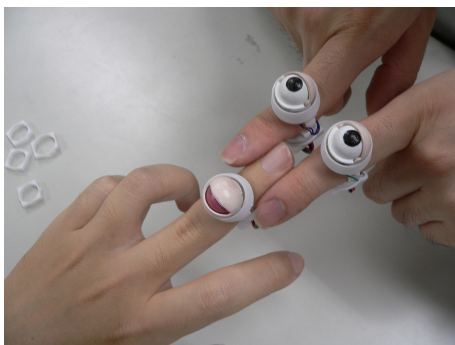


図 6.10: コラボレーションの観察



図 6.11: コラボレーションの観察（表情変化）

被験者へのインタビューを通して、ユーザビリティテストにおいて観察されたジェスチャや表情を図 6.11 のように分類できた。1 つのジェスチャを達成するために、人差し指のみに様々な部

品を載せた方法も観察された。また、何かを表現をするのに部品が足りない場合には、柔軟に他の指から持ってきたり他の被験者から提供されていた（図 6.12）。



図 6.12: コラボレーションの観察（他者による補完）

6.5.3 コラボレーション

被験者が協力しながら表情を作っているときに、他の被験者に操作を促すために表情の動作を用いるのが観察された（図 6.13）。他の被験者の指に載せた指輪型デバイスの表情をコントロールする間、他の被験者の指の動作に合わせてコントローラのボタンを押すタイミングを調整していた。また、被験者は指輪型デバイスをコントローラで操作するのに合わせてキャラクタの代わりに話すように指示されていた。その被験者が指輪型デバイスをコントロールする間に、被験者が他の人と話すのを観察できた。

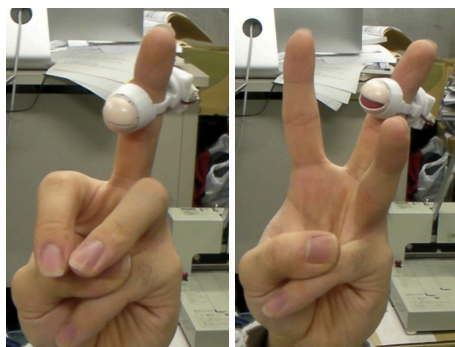


図 6.13: 人らしい擬人的な表現

6.5.4 ユーザ体験

表 6.1 の 4 番の指示内容（センサを搭載した指輪型デバイスとコントローラを使う）について、すべての被験者からポジティブな評価を得た。さらに、被験者が指輪型デバイスを使った時には、コミュニケーションと遊びのタスクについて評価された。被験者は以下のファクターについて、デバイスを用いる体験をポジティブに評価した。

1. 顔のパーツの配置を変えられること
2. 驚きの表情とウィンクの動作の作りやすい
3. 非言語情報としてのジェスチャでコミュニケーションできること
4. デバイスを組み合わせることで複数の顔の表情を作り出せること
5. 配置換えが少しの変更でできること
6. 自分の手に表情があるかのような感覚

一方、ネガティブなフィードバックも以下のように示された。

1. 過去の体験から手を使って表情を作って動かすのが難しいこと
2. キャラクターが演技をするのが想像できないこと
3. 口のパーツの動きが乏しくて退屈であること

6.5.5 ウェアラブルロボットが与える印象

指輪型デバイスにより、ウェアラブルロボットが与える印象を評価するための調査を行った。表 6.2 はユーザビリティスタディの前後にされた質問内容と、その回答結果を示す。このアンケートも表 6.1 と同様に、7 段階の Likert スケールで実施された。

本研究の目的の一つに、小さなウェアラブルロボットを作ることがある。本研究の以前に提案されていたウェアラブルロボットのプロジェクトのうちのいくつかは、装着しにくいものがあると考えられる。このスタディは、ヒューマンロボットインタラクションのような状況において、デバイスが潜在的に受け入れられるかどうかを明らかにした。表 6.2 の 3 番は、Pygmy の装着前と後でウェアラブルロボットを装着することに対する印象が良くなったことを示している。被験者はすでに複数の関連研究を知っていたので、この調査を始める前にウェアラブルロボットに該当するものを説明した。

表 6.2

表 6.2: スタディ前後での意見の変化と違い

質問	平均	標準偏差	割合 [%]
1. ウェアラブルロボットを装着したいと思いましたか?	4.4	2.01	60
1'. ユーザスタディ後に同じ質問	4.6	1.62	80
2. 指輪の形をしたロボットを装着したいですか?	4.8	1.47	50
2'. ユーザスタディ後に同じ質問	5.3	1.85	80
3. ロボットを装着するのは負担だと感じましたか? (低い数値はポジティブな評価を意味する)	5.4	1.2	20
3'. ユーザスタディ後に同じ質問	4.0	1.1	30

6.5.6 ロボットの存在感

複数の被験者は、表 6.1 の 6 番の結果に示されるように、指輪型デバイスが生きているように感じると報告した。これは、指輪型デバイスがストーリーテリング用のロボットとして機能する可能性があることを示している。ヒトの手は周囲にある物体に触れるための使われる身体の一部であり、そのために被験者の手を用いるパペット人形としての使い方は、現実の世界において情報インタフェースとして作動すると考えられる。将来の展望において、Pygmy を用いて実現可能なアプリケーションを複数提案する。表 6.2 は、ウェアラブルロボットおよびその存在感について Pygmy を使用したときの反応を示している。これらの反応は、Pygmy がストーリーテリング用のロボットデバイスとして容認できることを示している。Pygmy を用いることで、結果的にウェアラブルロボットの印象の評価を改善した。

コラボレーションのタスクにおいて被験者が会話をするとき、被験者は Pygmy を用いて演技中に見られた他人の行動を反映して、キャラクタの表情と発声を作ることが観察された。結果的に、Pygmy が被験者の代役として行動できることを明らかにした。

6.6 ケーススタディ

親と子供を被験者として、ケーススタディを行った。Pygmy は無線通信によって動作するものではなく、スタンドアロン型の設計のものを用いた。ロボットデバイスは、リング部分に埋め込まれた赤外線距離センサで作動する。また、加速度計や感触センサなどのセンサを埋め込むことで、Pygmy はユーザの指の動作に従って反応する。このデモンストレーションは [11] において提案されている。

6.6.1 実験環境

ケーススタディにおいて、親と子供のためのインタラクションを観察するために実験環境を用意した。実験環境は白い壁の部屋を用いた。室内にはビデオカメラおよびいくつかのパペット人形が置かれている。30 分の間、被験者である 2 歳子供および彼の母親は、指輪型デバイス Pygmy、他のパペット人形、およびおもちゃで遊んだ。このとき実験への影響を考慮して、母親には Pygmy を使って遊ぶことを子供にすすめることがないように頼んだ。

6.6.2 ビデオ分析

実験の後、撮影されたビデオを分析した。ビデオは母親と子供のためのインタラクションを中心に撮影されている。分析の結果、ロボットデバイスの主なユーザは母親であり、彼女は指にデバイスを装着して、動物の名前を言いながら犬やカエルなどのパペットを作り、その鳴き声をまねしていた。母親は実験中に装着している Pygmy のいくつかのデバイスを指に組み替えていた。それらのインタラクションの場面は、図 6.14、図 6.15 に示されている。



図 6.14: 親子の観察



図 6.15: 親子の観察（子供がりんごをあげる場面）

子供は、母親が作ったパペットのキャラクタに惹きつけられていた。子供がパペットのキャラクタをひとりで作ったことは一度もなかった。なぜなら、彼はパペットのキャラクタを表現するための能力を持つには若かったからだと考えられる。この分析において最も興味深かったのは、子供が母親によって作られたパペットのキャラクタを触ろうとしていたことであった。子供のこの反応のあと、母親は子供にりんごのおもちゃをパペットにあげるように言われ、母親の手に作られていたパペットの口のところに持って行っていった。

6.7 ディスカッション

6.7.1 デザイン方針の検証

オリジナルのデザインの方針について、かなりの量のフィードバックがユーザスタディから得られた。このフィードバックに基づき、それぞれ方針を次の通り検証した。

柔軟性 (Flexibility): 指輪型デバイスの構造の問題で、すべての指の姿勢で機器を安定させて装備することが難しかった。デバイス装置の位置によっては、顔のパーツが奇妙な表情になる向きになってしまうこともあった。さらに、マイクロコントローラ基板とバッテリーを収納するケースが大きかったので、指輪型デバイスを装着しながら手を握るとき、指を完全に曲げる姿勢を取るのが難しかった点を改良する必要がある。

組み換え可能性 (Reconfigurability): 指輪型デバイスを組み替えることが容易になるようにあらかじめ設計されいたので、ユーザは自身の身体を使って自由に表現を作ることができた。しかしながら、デバイスのサイズによって引き起こされた不快感や痛みもあったので、より一層の小型化と、2つ以上の指輪型デバイスを1本の指に取り付けるための工夫が必要であるとわかった。

拡張性 (Scalability): 指輪の形状は、着脱の簡単さの視点から効果的であった。しかし、ユーザのそれぞれの指のサイズによって適切な指輪のサイズを突き止めることは困難なため、最初のうちは指輪の大きさが指に合わない点が不便だと感じるユーザがいた。また、指の関節が太いた

めに、指輪型デバイスを指から取り外すのに苦闘したユーザもいた。今後は、様々なサイズまたは形の指に最適な指輪部分の構造を考える必要があることがわかった。

擬人性 (Human likeness): 外観的なデザインと指輪型デバイスの物理的な構造によって、手の上に擬人性のあるキャラクタを演出することができた。しかしながら、もともと想定されていた擬人性のための設計以外にも、ユーザ自身が身体の動きや手の組み換え、コラボレーションによって多様なキャラクタと擬人的な姿勢を生み出すことを確認できた。

安全性 (Safety): 指輪型デバイスの電源はバッテリーから供給されており、最新の設計ではマイクロコントローラ基板から充電できる。ユーザビリティスタディを行った時期にはバッテリーを取り外すことによって電源を落としていたため、その点が機能が低いと指摘された。さらにバッテリーの充電容量が低かったので、デバイスを操作できる時間は20～30分に制限されていた。この点は、コイン型の充電式 Lipo バッテリーを使用すること、マイクロコントローラ基板に Lipo バッテリーの充電器を搭載したことで解決された。

反応性 (Responsiveness): ユーザスタディにおいてデバイスの反応が悪いことが指摘されたが、指輪型デバイスの反応性は無線通信を強化することにより改善される。特に問題があったのはコンピュータ上で動作しているサーバープログラムで、これを再起動することが必要であった。ソフトウェアの再設計によって通信バッファの問題を解決できると考えている。またマイクロコントローラ基板の設計上、Bluetooth モジュールのアンテナがマイクロコントローラ IC に近かったことが Bluetooth の通信を阻害していたと考えられる。そのため有効な通信距離は約 1m に限定されていた。現在ではマイクロコントローラ基板を新しい設計に直したため、通信速度と有効通信距離が改善されている。

6.7.2 物理的なデバイスの重要性

指輪型デバイスは、電磁石サーボモータおよび擬人的な外観のパーツによって目と口の顔の表情と動きを作り出していた。これらのパーツが物理的に動かされたことで、通常は擬人化される身体部位ではない手や指において、生物的印象と存在感を作り出すことができた。

例えば、LED 液晶ディスプレイのように光を発光させてアニメーションを投影する方法では、ディスプレイによって外観と動きを伝えることは可能だったが、ディスプレイの投影機構のため傾きによって見えない範囲が生じることが予想された。今回の指輪型ロボットは物理的な身体とパーツを用いることで、インタラクティブな動作と擬人性を与えることにした。

6.7.3 リミテーション

ユーザの想像力の限界が、を用いた表現行為に影響することは明らかである。指輪型ロボット Pygmy は、ユーザスタディの結果、生物的反応や感覚を演出することに成功している。さらに

コミュニケーションの道具としての Pygmy を使うためには、インタラクションデザインの観点から機能を改善することが実用に向けて必要であると考えられる。

ユーザスタディにおいて一定の被験者は手順を全く教えなかった場合には、指輪型ロボットを用いるための理解と方法が得られなかったために、想定していた動きや組み立てをできなかった。しかし、種々の指の姿勢を被験者に促すインストラクションを行った場合では、様々な表現を達成することができた。

デバイスのサイズの制限から追加のモータを埋め込むことができないために、具体的な表情や感情の表現は難しいと考えられた。ユーザスタディにおいて得られた結果から、再度システムとデバイスをデザインすることが重要と考えられる。また今後は、ユーザのデバイスに対する指示と、それを認識するための計測手法を改善することが、インタラクティブ性の向上に必要である。

6.7.4 ストーリーテリングのためのロボットデバイス

ストーリーテリングの視点から、Pygmy はこのアプリケーションに適切である。子供と母親間のインタラクションの分析において、母親は様々なパペットのキャラクタを容易に作ることができ、動物やその他の生物を含むキャラクタを演じてストーリーを作った。母親は子供の注意を引きつけるために、5 秒以内ごとに指の姿勢や指輪型デバイスの構成を変更した。このスタディにおいて、Pygmy はストーリーテリングにおける組み換え可能性と拡張性について重要な役割を果たした。

6.7.5 今後見込まれる研究領域

ユーザビリティスタディの結果から、被験者は自分に与えられる 1 組の Pygmy の 2 倍のデバイスを用いて、実験を行うことが観察された。この結果は、Pygmy がストーリーテリングのパペットとして使用できる能力があると示唆していると考えられる。さらに、Pygmy は被験者の子供と両親の間のコラボレーションのためのテレコミュニケーションロボットとストーリーテリングのデバイスとしても機能する。パペット人形としての演技によって、Pygmy は新しいインタラクションモデルを提供した。なぜなら、このロボットデバイスは装着できるため、ユーザの身体に密着することで物理的にも心理的にも距離が近くなると考えるからである。

6.7.6 将来の展望

Pygmy は小さなロボットデバイスであるだけでなく、擬人化されたパペットロボットとしてユーザのとその周囲の人に動きかけることができることを示した。この機能によって、Pygmy は子供と両親の間の関係性を作るためのテレプレゼンスロボットや、おもちゃなどのコミュニケーションデバイスとしても機能するかもしれない。また、指の姿勢やユーザの表情を認識するシステムと組み合わせることで、コントローラがなくても自動的に操作することも可能である。さらに、ウェアラブルエージェントロボットとして、ユーザーが見たり触れたものについての情報をインタラクティブに提供できる。

6.8 本章の結論

本研究ではストーリーテリングのための指輪型ロボットデバイスを提案し、ユーザスタディを含む2つのスタディによってその意義を確認した。姿勢と動作を与えることで、手と指の表現を強化するリング形状をした擬人化デバイスを使うことによって、動物のキャラクタ、表情、感情、およびパペット人形に似たタイプのキャラクタを作り出すことができた。Pygmy はパペッロボットとしての使い方も見出された。ユーザビリティのスタディにおいて、被験者は手を擬人化するコンセプトを理解した。被験者は指輪型デバイスを使って、表情を作りながらコミュニケーションやストーリーテリングを行った。また観察のなかで、被験者同士でコラボレーションを行うことで、指輪型デバイスが持っている制限を解決できることも発見した。ウェアラブルロボット Pygmy により生み出された印象によって、擬人的な外観を拡大し、またユーザビリティと存在感を与えることができた。

第7章 紙のインタラクション

紙は、ペンと用いることでアイデアを発想するための道具であると同時にアイデアの大切な置き場所である。これからのデジタル技術の革新を経ても、紙という素材はコンピュータには代替できない役割を持っている。ネイキッドインタラクションにおける身体性メディアの中で、紙を道具としてのメディアと定義して、研究を行う。紙に対して人間の身体性が及ぶ触知性を残しながら、コンピュータによる制御の機能を組み合わせる試みである。

7.1 概要

紙は折り紙のように美しいデザインに折りたたむことも、モノを包装するための素材としても、知的生産活動のために印刷や記述をする媒体としても用いることができる素材である。紙は手頃に入手できる素材のため、コンピュータの歴史の中でも用いられてきた。はじめは大型計算機にデータを入力するためのパンチカードから始まり、次にコンピュータの処理結果を印刷するために、そして現代では書いた文字をカメラによって取り込むための素材として使われている。ところが、紙に代替する決定的なデジタルメディアが登場していないのも事実である。ここでは、普遍的な読み書き、印刷、工作、その他の身体的な動作を伴って用いる道具として紙を取り扱う。

前述のとおり(4.3節)、HCIの研究では紙を用いてインタラクションの設計を行ってきた。紙を用いることの利点は、再利用が可能であり代替しやすいことである。以前用いた紙に内容を書き足して用いたり、古くなった不要な紙を捨てて新しい紙を用いても、コストや廃棄の観点で他の素材に対して有利である。しかしこうした利点を維持するのは難しく、紙に対して多くの素材的な改変や海賊が必要であった。そのため、HCIの文脈で有効なアプリケーションを提供するのは依然として困難であった。

この章では、紙をベースにした身体性メディアとして製作したFluxPaperについて説明する。FluxPaperは、アクチュエーションのために磁力制御を取り入れた新しい素材である。FluxPaperの特性と、これをコンピュータによって制御する電磁気装置によって、新しいインタラクションを実現する。また、この製作の方法と、身体性メディアとして可能になったアプリケーションについて解説する。

7.2 FluxPaper

FluxPaperは紙をベースにした新しい身体性メディアであり、強磁性の着磁された紙とプログラマブルな磁場によって物理的な移動や動的なインタラクションを可能にする。FluxPaperは

0.1mm という紙と同じ薄さの磁性レイヤを持っており、通常の紙の裏側に印刷されている。我々の身体性や生活に馴染んでいる紙の薄さや素材性を保ちながら、ネオジム磁石を原料とした磁性レイヤによって、高速、強力かつ正確に物理的な動作を可能にする。効果的な着磁パターンとコンピュータ制御された磁場によって、FluxPaper は普遍的な紙という素材に新しいインタラクション様式 (modality) を付与した。

紙に磁力を与えるという発想と、それを実現する発明によって、紙に物理的な作用を与えることができる。磁力を用いた物理的な作用は、紙同士が磁力によって吸着と反発を行う自己相互作用と、コンピュータ制御された電磁気装置によって空間的な動きが発生する外部磁場制御を可能にした。これを用いて紙同士が結合したり、結合によって3次元の立体を制作するアプリケーションを実現した。また、コンピュータ制御により電磁気装置で紙を動かしたり、任意の紙を選ぶ、立体を組み立てるといった物理的な作業も可能になった。

7.2.1 特徴

FluxPaper は図 7.1 に示すように、薄い紙の上に磁性レイヤを印刷もしくは張り合わせた紙である。磁性レイヤはどのようなパターンでもよく、その形状や紙の表面の位置によって、実現できる動きや機能が異なる。紙はどのような紙でも可能であるが、磁力が作用できる程度に軽い紙である必要がある。紙に塗布された磁性レイヤと外部の磁場の間に生じる磁力が、紙の総重量を下回る場合には、物理的な作用を起こすことはできない。

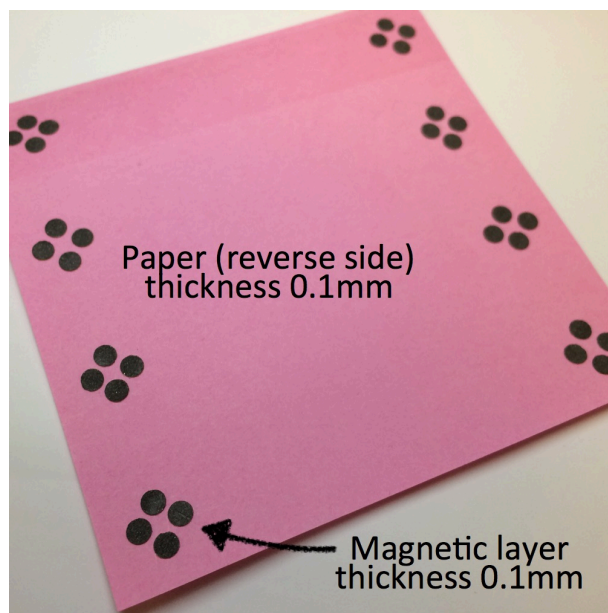


図 7.1: FluxPaper の構成とデザインの例

できるだけ紙の薄さや素材性を失わないための工夫をしている。一般的な印刷用紙は単位面積あたり $72g/m^2$ の重量であり、0.092mm の厚みがある。そのため、FluxPaper は基本的に紙と同程度の 0.1mm の厚みを目指して製造してある。アプリケーションによっては強力な磁力が必要に

なる場合があるため、0.2mm などの厚みにすることも可能である。磁性レイヤを 0.1mm の厚みに製造するために、粒径が非常に小さい磁石粉末を用いた。また、紙の柔軟性に合わせて、磁石粉末と混合する素材にエポキシ樹脂を選択した。これにより、割れにくく薄い磁性レイヤを制作することが可能になった。

磁性レイヤは比較的安価に製造できる。米ドルでおおよそ\$0.15 をかけることで、図 7.1 に示すようなポストイット大の紙に塗布することができる。しかしながら、これらのコストは研究室で製造する際のコストであり、材料の大量調達、工場での製造によってコストが大幅に下がると予想できる。

7.2.2 磁束による構造設計

磁性レイヤの磁束の様子と、磁束の結合によって可能になる紙の構造設計について説明する。

普通の磁石と FluxPaper の磁性レイヤのそれぞれの磁束について、図 7.2 に磁界シミュレータの結果を示した。磁石と磁束の画像は ‘ViziMag’¹ のシミュレーションの結果を用いて、独自に図を作成した。FluxPaper の磁性レイヤと、隣に示している磁石の性能は同じものを用いて、薄さのみを変更した。その結果、薄さは異なっても磁性レイヤから漏れ出す磁束は、磁石の磁束と同じ形状をしていることがわかる。そのため、磁性レイヤも磁石と同じ吸引と反発の操作を行うことができるかと予想できる。

磁性レイヤは紙に塗布されており、基本的には紙の表面の法線方向（垂直方向）に磁極がある。つまり、紙の表面に S 極があれば、裏面には N 極が着磁されている。しかし、この極性はどのような方向でもよく、紙の法線方向に垂直な着磁を行えば、紙の側面から磁束が漏れるような設計も可能である。

図 7.2 には、FluxPaper の磁性レイヤから漏れ出る磁束によって可能な 3 つの結合の方法を示している。着磁の方向が紙の表面の法線方向であるため、紙を重ねる（スタックする）ような垂直方向の結合が可能である。また、紙の端に磁性レイヤを塗布して着磁することで、水平方向への整列も可能である。このとき、2 面の FluxPaper の結合軸はの角度は 180° である。この水平方向に結合した 2 面を回転して、結合軸を任意の角度にすることで立体的な構造が可能である。

7.2.3 磁束の制御方法

次に、2 つの磁束の制御方法について説明する。図 7.3 にそれぞれの制御方法を示し、1 次元、2 次元、3 次元のそれぞれの構造について実例を挙げている。

Self-alignment FluxPaper の持つ磁束によってお互いに引き寄せ合う力、つまり吸引力と吸着力によって成立する方法である。外部の磁場は必要ではなく、手で組み合わせることで結合と分

¹有限要素法を用いて 2.5 次元の磁界解析を行う磁界シミュレータ ViziMag 3.18[7] を用いた。ViziMag に関する論文は [8] を参照。

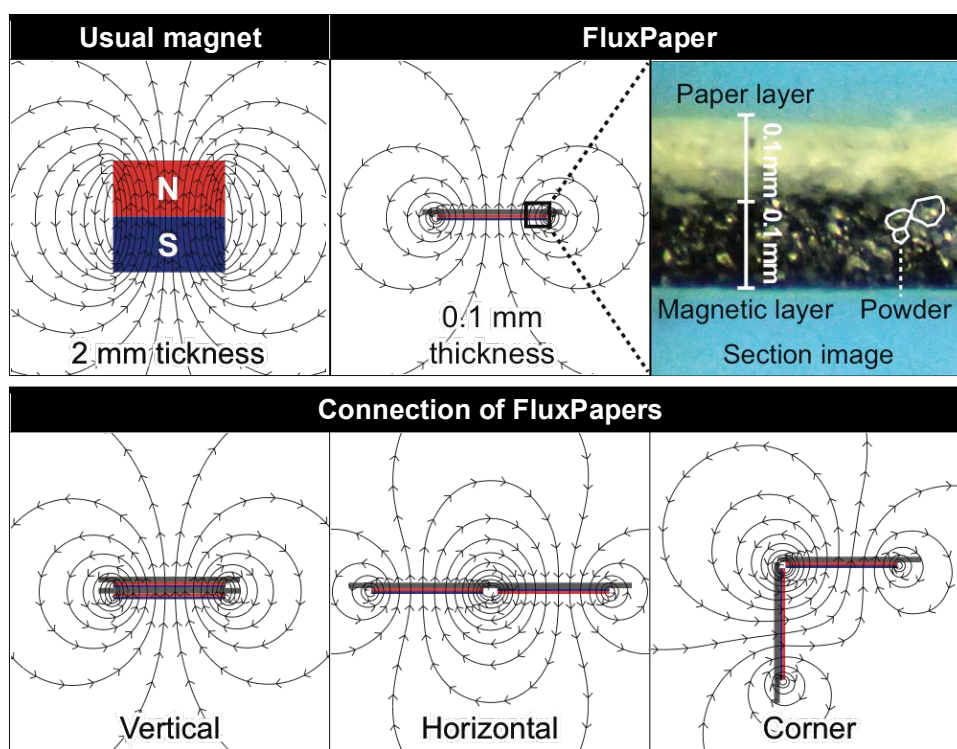


図 7.2: FluxPaper の磁束の視覚化とデザイン

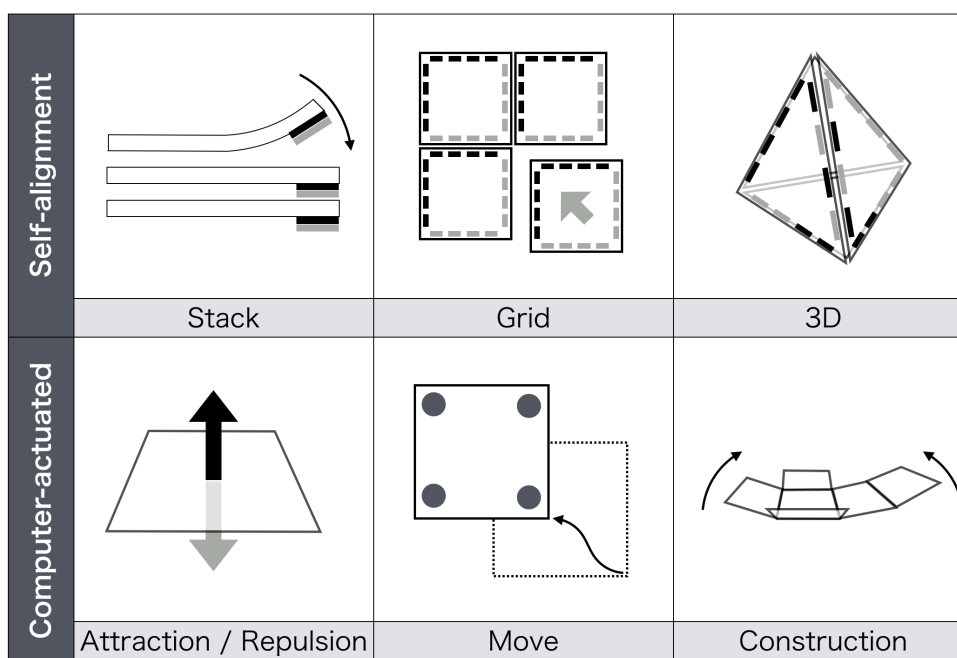


図 7.3: FluxPaper の構成とデザインの例

離が行われる。それぞれ、垂直方向への積み上げ（スタック）、水平方向への整列（グリッド）、3次元の形状を組むことが可能である。

Computer-actuated コンピュータに接続された電磁石装置によって制御する方法である。FluxPaper は外部の時間的、空間的に変化する磁束において受身的に作用を受け、複雑な動きや形状変化を可能にする。関連研究と比べると、紙には薄い磁性レイヤがあるのみなので、配線や紙の表面への改造が必要ない。それぞれ、上下への吸着と反発による動き、水平方向への移動、3次元形状の組み立てが可能である。

7.2.4 将来的な設計および実施方法

FluxPaper は紙に磁性レイヤを塗布し、硬化させ、着磁することで紙に電磁気学的な機能を持たせる方法である。この方法はインクプリンタに似ている。FluxPaper もプリンタの手法を模倣することで、生産方法を簡単にし、生産装置 (図 7.4) を配布することが可能である。しかしながら、本研究ではそこまでの実装と実施のための工業的な努力を行うことは、研究の目的から外れ、研究成果とは異なる労力を要する。ここでは、将来的な展望と実施方法を予測することで、これ以降の研究の方法に反映することを考える。

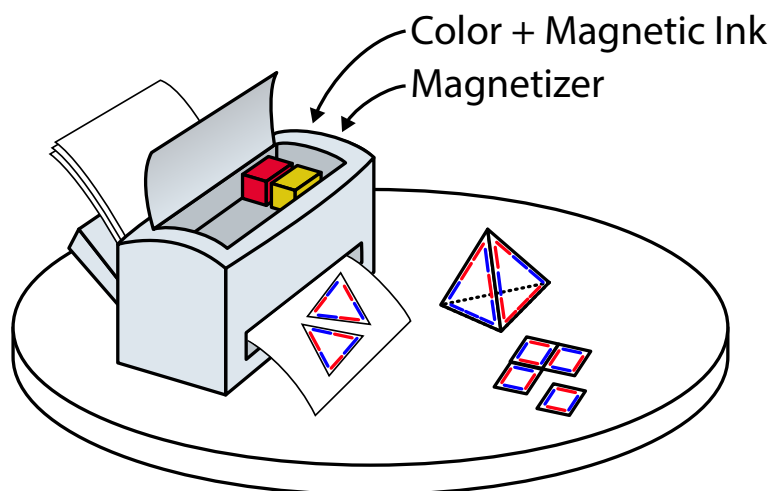


図 7.4: FluxPaper を出力するプリンタの将来的なイメージ

プリンタによる出力を行うためには、磁性レイヤはプリントしやすい形状である必要がある。ここでは、一般的な印刷技術に用いられている網点を用いた印刷を模倣して、ドット模様による印刷を前提とする。ドットの場合、紙の上に形成する磁性レイヤを面積的に最適な配置にすることができる。円を平面に並べる際には、正六角柱状のハニカム構造と同じ構造になり、平面充填になる。以上の理由により、FluxPaper の性能を検証するためのシミュレーションや実験では、ドットのデザインを用いて、平面充填した構成を考える。

7.3 磁性紙の製造方法

FluxPaper を実現するためには、表面に 0.1mm の厚さの磁性レイヤを持つ紙を製作する必要がある。この章では一般的な工場での製造ではなく、企業や大学の研究室で実践できる製造方法を説明する。FluxPaper を製作したのは中国・北京のマイクロソフトリサーチ・アジアの研究室だったため、工業用の機械を購入することもできず、着磁の工程も含めてすべてが手作業であった。着磁に関しても、電流を用いる着磁機は価格や安全性の点で使用できなかった。電源を用いない着磁機を製作して磁性紙の着磁を行った。

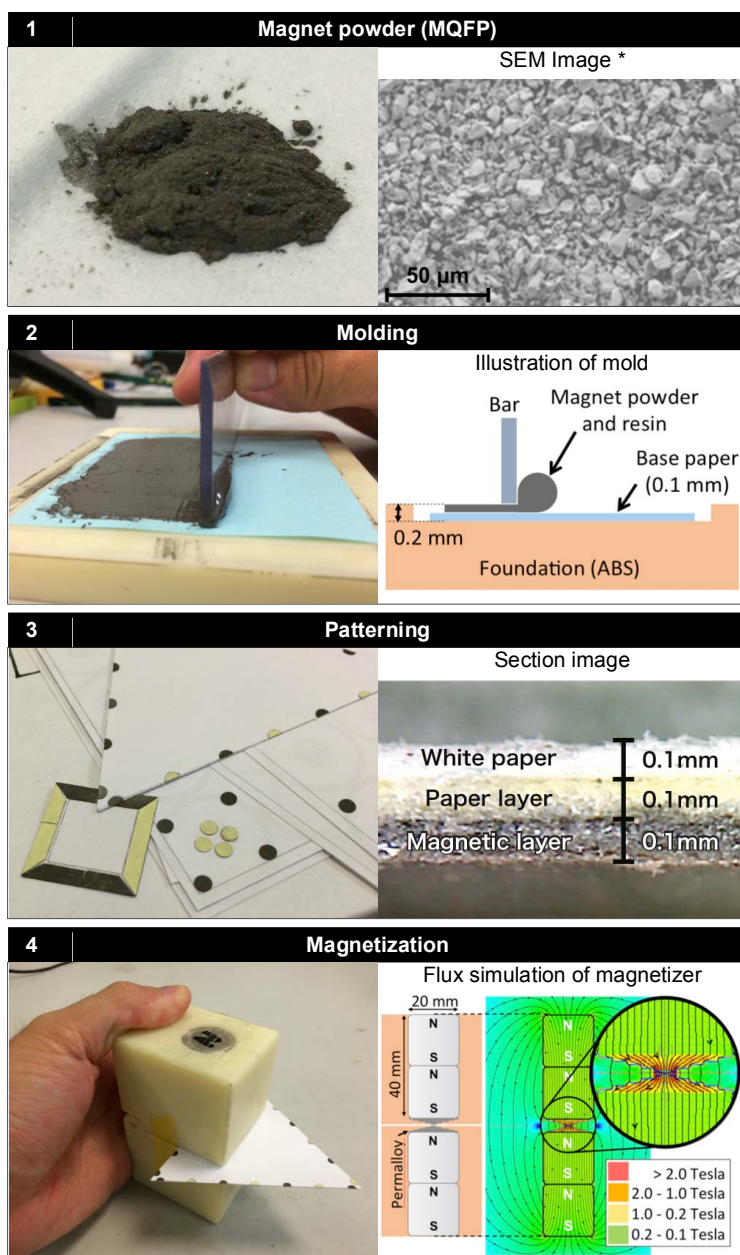


図 7.5: FluxPaper の製造方法

図 7.5 は一連の製造工程と最終的な磁性紙の断面を説明する写真である。製造の流れは次の通りである。このうち、4 番と 5 番の工程は入れ替わっても問題ない。

1. 磁石粉と樹脂を混合する
2. 混合物を紙に乗せて 0.1mm に伸ばす
3. 表面処理を加えて樹脂を硬化させる
4. 硬化した樹脂ごと紙を整形する
5. 紙を着磁する

7.3.1 磁石粉

磁石を製造するにはまず材料を用意する必要がある。プロトタイプを製作する段階では行っていたが、市販の磁石を粉砕して再利用するのは磁石としての性能が落ちるため避けたい。そこで、プラスチック磁石の原材料であるボンド磁石を調達した。ボンド磁石は磁石の粉末を樹脂でコーティングしたものである。表面の樹脂が酸化を防ぎ、磁性が低下しない。いくつかの種類があるボンド磁石のうち、ネオジム磁石を選んだ。磁束密度と保持力が高く、一般的に用いられる強力な永久磁石である。

磁石の原料を販売する Molycorp 社の子会社である Magnequench 社から、MQFP 14-12-20000 [26] を調達した。MQFP 14-12 という型番の磁石粉末は 780-840mT の磁束密度の特性があり、粒径が $5\ \mu\text{m}$ であるため、FluxPaper の磁性レイヤに適していると判断した。MQFP 14-12 の磁束密度は通常用いられている磁石に近い磁束密度であり、他のネオジムボンド磁石に比べても磁束密度と保持力が高い。

ネオジム磁石の原料には、等方性と異方性の 2 種類がある。異方性の原料は成形時に磁性体の結晶の方向を揃える必要があるが、磁束密度と保持力が高い。等方性の原料は結晶の方向を気にしなくて良いが、異方性に比べると性能は下がる。成形時の取り扱いの手間を考えて等方性を選択した。

7.3.2 樹脂との混合

磁石粉末を封入するために用いるのがエポキシ樹脂である。エポキシ樹脂はいくつかある固形物質の中でも、紙素材と磁石粉末素材を結合するのに適していると判断した。熱や紫外線などの外部エネルギーを用いずに硬化させたいため、混ぜあわせると次第に硬化していく 2 液混合タイプのエポキシ樹脂を用いた。

実際に用いたのは、Loctite[®] E-20HP Hysol という 2 液混合タイプのエポキシ接着剤である。予備のテストで、エポキシ樹脂と粉末の最適な混合比率を推定した。その結果、重量比で 5 : 1 にすることが望ましいとわかった。また、重量比から計算できる体積比は 3.25 : 1 であり、磁性レイヤ中におけるネオジムボンド磁石の体積比率は約 76.5%であると計算された。

体積比の計算にあたっては、データシートの値からそれぞれエポキシ樹脂の密度を $1.10g/cm^3$ 、磁石粉末の密度を $1.69g/cm^3$ として計算した。ネオジム磁石の論理的な体積は $7.4g/cm^3$ だが、ネオジムボンド磁石が粉体であり、表面に樹脂のコーティング処理を施していることを考えると密度が低くなっていると考えられる。

7.3.3 鋳型と表面処理

磁性レイヤを紙の上に塗布することは、とりわけ課題があった。磁性レイヤを 0.1mm の厚みに成形する必要がある。研究室には樹脂を 0.1mm の厚みに成形するためのベルトやプレスのような装置がないため、整形のために特殊なケースを制作することで対処した。ABS 樹脂を NC 加工機で削り出すことで、中央に溝のついたケースを製作した。ケースには 0.2mm の溝があり、この溝の上に紙を乗せると、紙の厚みが 0.1mm のため 0.1mm の空間が空く。

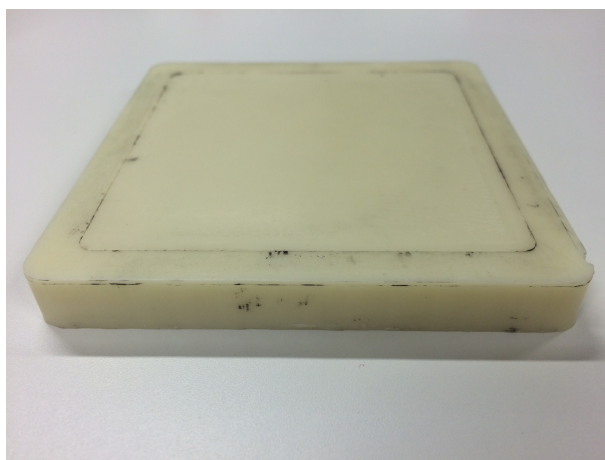


図 7.6: 溝付きケース

図 7.6 に溝付きケースを掲載した。今回用いる紙がポストイットと同じサイズの紙のため、80mm 四方の正方形の紙が入るように 85mm 四方の溝を作った。溝の周囲に擦り切りを行うための堤が必要なため、ケースの縦横サイズが 100mm 四方、厚みが 10mm の直方体とした。

この空間に磁性レイヤの材料となる磁石粉末とエポキシ樹脂の混合物を乗せ、樹脂が硬化する前に 0.1mm に整える。このとき定規のような直線の棒を用いて、ペースト状となった混合物を擦り切るようにして、ケース上部の高さに合わせる。この作業を繰り返し行い、紙の上全体に 0.1mm の樹脂ペーストが伸びるようにする。擦り切りの動作を繰り返して樹脂ペーストを 0.1mm の厚さに揃えたら、上からポリプロピレン製の平坦なシートをかぶせる。このとき、シートは溝付きケースの外周に合うようなサイズのものをを用いる。ポリプロピレンシートはエポキシ樹脂による接着が起きないため、硬化後に磁性レイヤの表面を滑らかにできる。シートには約 2 - 3mm のものを使うと良い。

7.3.4 着磁

磁性レイヤに含まれるエポキシ樹脂の硬化後に着磁を行う。着磁とは、磁束を持たない状態の強磁性体に磁束を持たせる操作である。原理的には、磁性体の結晶ごとに持っている電子のスピン²の方向を揃えることで磁束が発生する。これを行う前は、結晶区分ごとに異なる方向に磁束を持っているため、外部に漏れるような強い磁束を示していない状態である。着磁には通常大量の電流を用いる。パルス電流を導線に流すことで、その導線の近くまたは導線のコイルの中にある磁石が磁化される。しかし、この方法は1000A程度の大量の電流を扱うために危険が伴い、高電圧の電源装置は高価で危険である。

研究室で実施できる電源を用いない着磁の方法を選んだ。磁化に用いるのは、ABS樹脂を用いたケース、ネオジム磁石とパーマロイ合金である。ケースにネオジム磁石とパーマロイ合金を格納することで、合金によってネオジム磁石の磁束を一点に集中させ、部分的に強力な磁束密度を得ることができる。パーマロイ合金はPBパーマロイと呼ばれる、Ni-Fe(ニッケル・鉄)で構成されたものを用いた。PBパーマロイは透磁率²と飽和磁束密度³がともに高いため、通常の金属や磁石に比べて多くの磁束を透過させることができる。

ネオジム磁石はN35⁴と呼ばれる通常販売されているものと同じ種類のものを用いた。サイズは直径20mm、高さ40mmで、テストメーターを用いて計測した磁石の中央から0mm地点の空間磁束密度はおよそ500mTであった。この磁石をABS樹脂のケースの中央に配置する。磁石とパーマロイの配置は、図7.7の左のようにした。パーマロイは0.5mmの板状のものを調達したため、1枚毎に直径の異なる円形状に成形して、これを重ねあわせた。6層の構造にしたため、全体の厚みは3mmとなった。図7.7に着磁器の断面図を示した。

図7.7の色の分布は、断面図と同じ構成にした磁石とパーマロイを配置して、ViziMag[7]で磁束密度分布のシミュレーションを行った。着磁器の上下のブロックの間に1mmの隙間を設けた状態では、隙間の中央におおよそ3.5Tの磁束密度が集中することがわかった。今回使用してるネオジムボンド磁石を着磁するのに必要な磁束密度は1.2T - 2.0Tであるため、この条件を満たしている。製作した着磁器は、FluxPaperを製造する上で十分な性能を持っていると言える。

7.3.5 整形

着磁前の鋳型(印刷)の段階で紙の上にレイヤが配置されているのが理想的だが、製造の都合を考えると整形は最後に行うことにした。整形の段階では、磁性レイヤの硬化と着磁までが完了した状態で、任意の形状にカットしていく。このとき、磁性レイヤの下にある紙も一緒にカットして、他の紙の上に貼付する。最終的に完成するFluxPaperはもともとの磁性レイヤと紙の厚み0.2mmと、新たに土台にする紙0.1mmの合計0.3mmの厚みになることを注意しておく。厚みと反りを小さくするために、紙同士の接着にはスプレーのりを用いた。

鋳型の段階で工夫をすることで0.2mmのFluxPaperを作ることもできる。その際は、土台に

²磁束の通りやすさのこと

³物体中を通過できる最大の磁束のこと

⁴11900 gaussの性能を持つ一般的なネオジム磁石素材である。

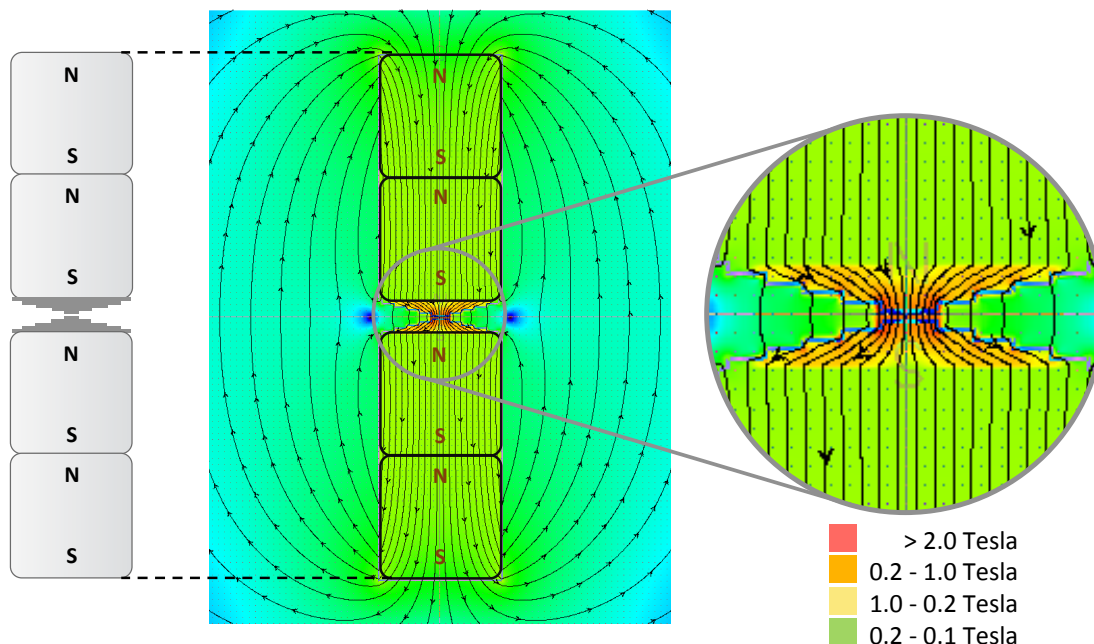


図 7.7: 着磁器の断面図と磁界シミュレーションの結果

する紙の上に、磁性レイヤを流し込みたい形を練り抜いた紙をもう一枚重ね、その上に磁石粉末と混合した樹脂を流しこんだ上で擦り切りをする。

7.4 FluxPaper の性能

7.4.1 現行品との比較

以上で FluxPaper を製造する手順を説明した。FluxPaper 以外にも、同様の製品がすでに存在するので、現行品との比較を行う。「ラバーマグネット」や「マグネットシート」という名称で売られているものがあり、ゴム製の素材に磁石の粉末を練りこんで着磁してある。これらは様々な厚みがあり、厚みのある製品はキーホルダーや飾りを冷蔵庫などの鉄板の上にくっつけるために用いられている。また、表面に写真や絵を印刷したものもある。

磁束密度 しかし、これらの製品は FluxPaper が想定している用途とアプリケーションには適していない。問題になるのは厚みと磁力である。たしかに現行品はコストが安く抑えられているが、そのぶん磁石の性能と含有量も低い。一般的なラバーマグネットに用いられているのはフェライト磁石の粉末である。フェライトもネオジムと同じく鉄系の合金であるが、ネオジムよりも性能は低い。また、ラバーマグネットの着磁方法にも違いがある。ラバーマグネットはシート状の磁石であり、鉄板に効率よく吸着させる工夫をしている。着磁はストライプ状になっており、N 極と S 極が交互に配置されているためシートの表面に細かい磁束が形成されている。これを鉄板に合わせることで、磁束が鉄板を通過してそれぞれの極との間に吸着力が起こる。

極性 一方、FluxPaper は磁性レイヤの平面に対して一様な着磁を行っている。磁性レイヤの磁束の方向を揃えることで、外部から受けた磁場に対する吸引力と反発力を最大化することができる。つまり、ストライプ状に着磁してあるラバーマグネットの場合、お互いの磁場を相殺しているので磁石の外側に漏れる磁束 (漏れ磁束⁵⁾) が少なくなってしまう。それに対し、磁束の方向が一定になっていれば相殺されること無く、外部の磁場と相互作用出来るだけの漏れ磁束を放出することができる。一定の方向に着磁した場合、鉄板への吸着力⁶は弱まる。しかしながら、紙同士の接続 (スタック、グリッド、立体) や、電磁石装置の制御で組み立てられた立体を維持するためには、十分な磁力と漏れ磁束を持っている。

保持力 FluxPaper をアプリケーションに使用するにあたって、磁石の磁力の大きさの指標である磁束密度以外にも重要な要素がある。保持力は、外部の磁場から受ける磁束密度に対する抵抗の力である。これが弱い場合、他の磁石にくっつけた際にその磁石の方向に磁化されてしまう。試しに直径 5mm、高さ 10mm のネオジム磁石をラバーマグネットに載せた結果、ラバーマグネットの磁極が変わってしまった。対して FluxPaper には変化がなかった。他の磁石と用いることを前提とする場合、また電磁石装置による磁場発生がある場合、保持力が高いほうが磁性素材としての耐久性が保たてる。

7.4.2 安全性

7.3 節の製造工程において、金属粉末や樹脂を用いている。これらは健康に対して被害を及ぼす可能性があるため、注意して取り扱う必要がある。

ネオジム磁石粉末 まず、通常販売されているネオジム磁石粉末は、粒径が 100 μm を下回る鉄をベースとした金属の粉である。これが肺に侵入すると、長期的に健康上の被害をもたらす可能性がある。作業の際には、防じんマスクの着用が必要である。特に、今回用いた MQFP14-12 は、スーパーファインと呼ばれる粒径が 5 μm のとても小さい粒子⁷である。金属粉末の取扱い後は手洗いと洗顔を行うと良い。

エポキシ樹脂 エポキシ樹脂は接着剤にも使われている化学薬品であるが、皮膚や人体に悪影響があるため取り扱いの際には手袋を装着すると良い。また、エポキシは PCB⁸ や、撥水性の紙コップにも用いられている素材である。硬化後には安全性や人体への影響が少なくなる。

FluxPaper 最終的にはネオジム磁石粉末はエポキシ樹脂に封入される。封入後は通常のラバーマグネットと同じように扱って構わない。粘度の高いエポキシ樹脂を用いることで、通常の樹脂

⁵leak flux

⁶ここまで書き分けてきたが、吸引と吸着は異なる。吸引力は距離の離れた磁石間に起こる作用力であり、吸着力は吸引によって引き寄せられた磁石同士の状態を維持する力である。

⁷PM5 と呼ばれるサイズの粒子である。PM10 以下は特に人体に悪影響があるとわかっている。

⁸Printed Circuit Board: プリント基板

よりも柔軟な変形が可能である。場合によって、FluxPaper を曲げすぎると磁性レイヤが折れて破片が落ちることがある。粉末に比べれば被害は少ないが、すぐに処分するのが望ましい。

7.5 最適な設計の検証

製作した FluxPaper について、7.8 節で説明するアプリケーションに用いることを前提として、磁性レイヤの最適な配置を調べて検証する。また、これと平行して電磁気学的な特性も検証する。同じ条件で作られた均一の磁性レイヤを用いて、磁力の強さや吸着力の特性を調べる。

ここでは2つの方法を用いる。1つはスリットを用いたデザイン (7.5.1 小節) によって、磁性レイヤの表面全体での反発力と吸着力を計測する。これにより、重ね合わせや鉄板などの強磁性体への貼り付けが可能かどうかを確かめる。2つ目は磁性レイヤの面積と反発力の関係 (7.5.2 節) を調べることで、ドットのデザインで配置する際の最適な配置方法を検証する。

FluxPaper の電磁気的性質について先に結論を述べておく。2つの方法の検証によって、FluxPaper の磁性レイヤは磁石と同様の素材として扱えると判明した。これ以外の結論については7.5.3 小節を参照のこと。

7.5.1 実験 1: スリットを用いたデザイン

効率的な磁性レイヤの印刷パターンを調査するため、スリットデザインの構成をテストする。スリットデザインとは、図 7.8 に示すように、磁性レイヤを分割して紙の上に貼付した設計を指す。この設計で実験を行う意義は2つある。1つは、ラバーマグネットと同様に鉄板にも吸着することを想定したデザインを検証するためである。もう1つは、FluxPaper の Self-alignment の設計で用いる際の上下への配置 (スタック) が効率よく行われるかどうかを確かめるためである。

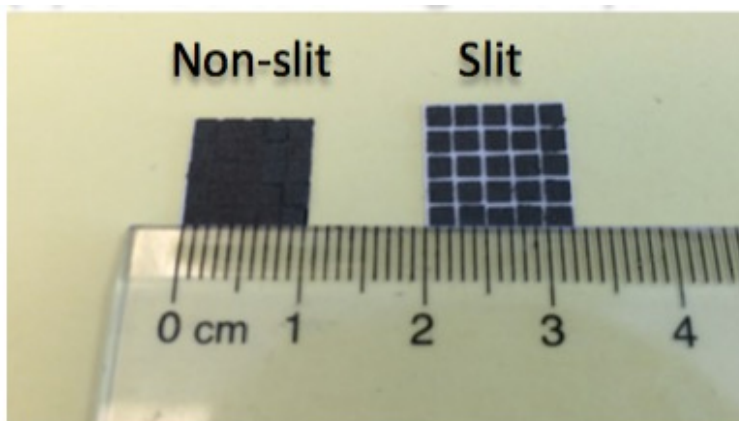


図 7.8: スリットデザインを用いた FluxPaper の試料

試料 図 7.8 に、実験に用いた試料を示す。磁性レイヤの厚みや磁石粉末の含有量などが均一の条件になるように、2mm 四方に分割した磁性レイヤを、2 種類の試料の上に交互に貼り付けて製作した。それぞれの試料の内容を以下に記す。

- スリットなし: 2mm 四方の磁性レイヤを隙間なく敷き詰めたものでサイズが 10mm
- スリットあり: 2mm 四方の磁性レイヤを上下に 0.5mm の間隔を開けて敷きつけたものでサイズが 12mm

器具 図 7.9 に、実験に用いた器具を示す。この器具の下に電子計量器を用いて、試料が受ける磁石からの反発力を計測する。電子計量器の上には変形の少ない硬質なスポンジ、試料を置き、一定の空間 (11mm) を設けた上に磁石を置くための透明なプレートを設置し、プレートの上に磁石を載せる。このとき、試料と磁石の極性はお互いに向かい合うようにして、反発するようにする。電子計量器は 0.1g 単位の計測が可能で、200g まで計測できるものを用いた。磁石は直径 20mm、高さが 20mm の円柱形の N35 ネオジム磁石を用いた。

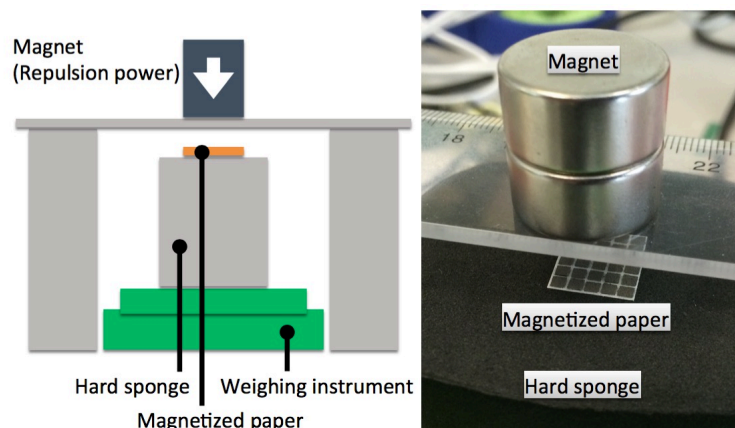


図 7.9: 実験機材

計測 計測はそれぞれの試料に対して 10 回行い、そのたびに磁石を持ち上げ、配置する作業を行った。磁石の位置は試料の上空になるように目視で行ったが、その際には電子計量器の示す値が最大になるように磁石の位置を調整した。

結果と考察 どちらの試料も同じ結果を示した。このことから、磁場がかかる場合の反発力は、スリットの有無にかかわらず一定であるとわかった。

- スリットなし: 6.7g (10 回平均)
- スリットあり: 6.7g (10 回平均)

また、正確に計測する手段がなかったため定性的な評価ではあるが、2つの資料の吸着力についても調べた。鉄板に載せた2つの試料を剥がす時の力を比較した。その結果、‘スリットあり’の

ほうが吸着力が強く、剥がすときに力を必要とした。この比較は、7.6 節のシミュレーションと、それを検証する作業でも定量的に明らかになる。

7.5.2 実験 2: 磁性レイヤの面積と反発力の関係

次に、試料の形や磁性レイヤの面積を変更して、同様の実験を試みる。器具は 7.5.1 小節と同じものを用いる。試料は異なるものを用意して比較した。

試料 試料は図 7.10 に示す通り、5 種類用意した。直径 13.65mm の範囲の中に、円形の磁性レイヤを敷き詰めた。この磁性レイヤの面積比率を 30%, 40%, 50%, 60%, 70% として設定した。すべての円形の磁性レイヤは直径 2mm であり、均一の性能になるようにした。

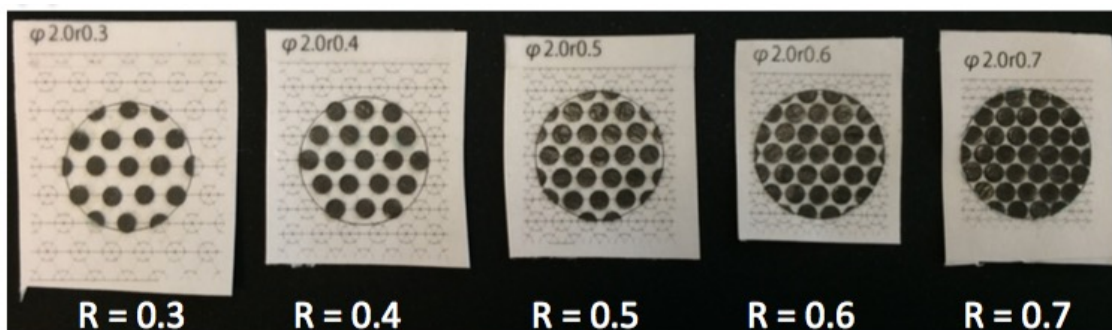


図 7.10: 面積比を変化させた FluxPaper の試料

比較 図??に、それぞれの試料を用いて計測した反発力の平均値 (10 回平均) を掲載した。その結果、面積比率に対して反発力が線形の関係であることがわかった。次に、FluxPaper 自体を持ち上げるのに必要な磁性レイヤの面積の計算を行う。例えば、試料と同じ磁性レイヤをポスト・イットと同じ大きさの紙 (76mm 四方) に塗布した場合、この紙を保持するのに必要な磁性レイヤの面積を計算する事ができる。図 7.11 に書かれている△のプロットは、紙の重量と磁性レイヤ 4 箇所の重量を足し合わせた FluxPaper の重量である。このグラフでは、前提条件としている磁性レイヤの厚み、面積、紙と磁性レイヤの重さに対して、磁性レイヤの面積比率が 0.62 のときに反発力が釣り合うと計算できる。

結果と考察 図 7.11 のグラフから、反発力が磁石の総量に対して比例しているとわかる。つまり、どのような磁性レイヤの配置や間隔の設計があったとしても、反発力は磁石の総量のみに関連する。これは、先の実験 1(7.5.1 小節) でも示されたのと同様に、磁性レイヤの間隔と反発力の間には相関がないことも示していると考えられる。

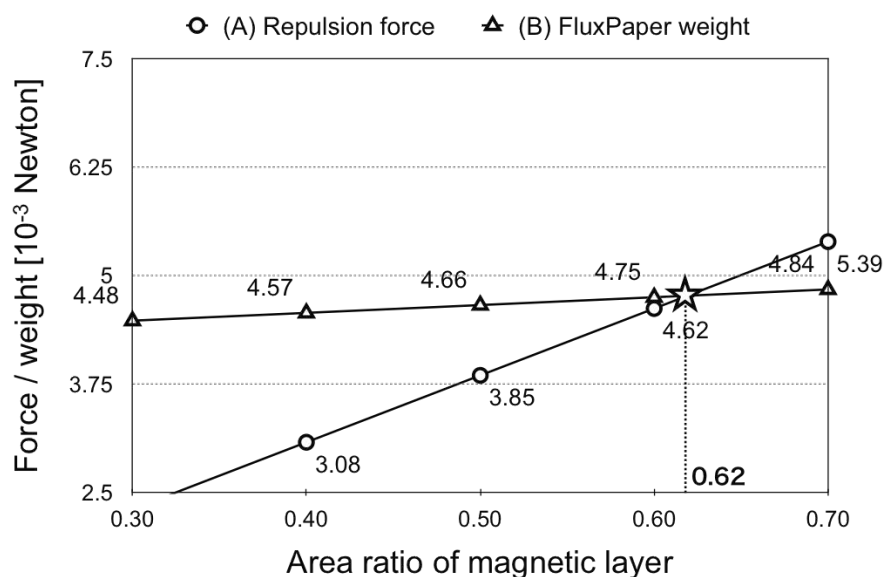


図 7.11: 面積比と反発力の関係

7.5.3 結論

以上、2種類の実験から、反発力が磁石の総量に対して比例していること、磁性レイヤの間隔と反発力の間には相関がないことが示された。これらは、一般的な磁石と同じ性質であり、FluxPaperも磁石と同じ性質であるという前提を用いて、磁性レイヤの設計や、アプリケーションを制作できるとわかった。

しかしながら、スリットがある磁性レイヤの吸着力については定量的に求めることができなかった。次の節では、定量的な評価を行うためのシミュレーションと、その懸賞を行う。

7.6 シミュレーションによる検証

実際の磁性レイヤを用いた実験では、実験精度や規模に制限があった。なぜなら、現段階ではFluxPaperの生産を効率的に行える機械を製造することが難しいためすべてを手作業で行わなくてはならず、また磁性レイヤのカット、整列、貼付に膨大な時間がかかるためである。

この節では、電磁界シミュレータソフトウェアを用いて、FluxPaperの構造をモデル化した磁石から発生する磁束密度について計算する。また、その計算結果の正しさを工作機械を用いて設計するFluxPaperに近い構造の磁性レイヤの配列を用いて検証する。検証は、次の2つの方法で行う。

- スリットデザインのシミュレーションによる検証
- ドットデザインの最適配置のシミュレーションと、計測機器を用いた吸着力の計測

これらの検証を行うことで、7.8 節で説明される FluxPaper のアプリケーションの設計について確証が得られるようになる。

7.6.1 シミュレータの性能

検証に用いた 2.5 次元の有限要素法を用いた磁界シミュレータ ViziMag の性能は以下のとおりである。

- 最大 800×800 のメッシュに分割できる。
- 磁石、ソレノイド、磁性体を配置できる。
- 最大の空間領域を設定できる。

シミュレータは 2.5 次元の有限要素法による解析を行うため、以下の制約がある。

- 3 次元方向には磁石を配置できない。

7.6.2 シミュレータの設定

シミュレータの設定は以下のようにした。

- メッシュ： 800×800
- 最大空間領域：200mm
- 磁石の磁束密度：647mT
- 磁石の比透磁率⁹：1.1

シミュレーションを行う前に、FluxPaper に用いている磁性レイヤの磁束密度を決定する必要がある。磁性レイヤの磁石としての性能は以下の式で計算できる。

- V は体積比、 m は重量 (g)、 d は比重 (g/cm^3) である。

$$\frac{V_{magnet}}{V_{epoxy}} = \frac{m_{magnet}}{m_{epoxy}} \times \frac{d_{epoxy}}{d_{magnet}} \quad (7.1)$$

$$B_{FluxPaper} = B_{MQFP14-12} \times \frac{V_{magnet}}{V_{magnet} + V_{epoxy}} \quad (7.2)$$

これを実際の数値を入れて計算する。

- 体積比は、磁石粉末とエポキシ樹脂で 5:1 である。

⁹Permeability: 空気に対する透磁率の比率。

- MQFP41-12 の磁束密度は 820-850mT¹⁰ である。
- 中央値をとって $B_{MQFP14-12} = 835mT$ として使用する。

$$\frac{V_{magnet}}{V_{epoxy}} = \frac{5}{1} \times \frac{1.10g\ cm^{-3}}{1.69g\ cm^{-3}} = 3.254 \quad (7.3)$$

$$B_{FluxPaper} = 810mT \times \frac{3.254}{3.254 + 1} \approx 647mT \quad (7.4)$$

以上の式より、FluxPaper に用いている磁性レイヤの磁束密度を 617mT として、シミュレータに登録した。

7.6.3 磁束密度分布の分析

ここでは、7.5.1 小節で製作したスリットのある磁性レイヤとスリットのない磁性レイヤについて、シミュレーション上で比較してみる。シミュレーションで確認できるのは、磁性レイヤに形成される磁束密度の分布である。外部の磁場からの影響による吸引力や吸着力は計測することはできない。代わりに、磁束密度分布を見ることで、磁性レイヤの表面に置かれた強磁性体への吸着力を推定することが可能である。

解析内容 図 7.12 の上段には、7.5.1 小節の図 7.8 をシミュレーター¹¹ 上でモデル化したものを掲載した。モデルの磁石は 0.1mm の厚み、2mm 四方の板状磁石として設計した。これをスリットあり、スリットなしの 2 つのパターンで並べている。シミュレータの制約のため、5 枚の磁石を横方向に並べている。ここでは簡易的に、1 方向に並べた磁石の配置の 1 面だけを切り取った断面図を用いて、空間磁束密度の分布を確かめる。

解析結果 解析の結果を図 7.12 の下段に示す。2 つのパターンの断面図において、それぞれ異なる磁束密度の分布が見られる。磁束線は黒い線として描画され、磁束密度の高さに応じて色が明るい赤色になっている。特徴的なのは、それぞれのデザインで磁束密度の高い部分が異なることである。スリットありのデザインではスリットの隙間に高い磁束密度の分布が見られる反面、スリットなしのデザインでは並べた磁石の両端にのみ高い磁束密度の分布が見られる。このことから、鉄板などの強磁性体に貼り付けた際、スリットありのデザインのほうが漏れ磁束が高く、吸着力が高くなる。なぜなら、スリットありとスリットなしのデザインにおける磁束密度のレベルはそれほど差がないが、磁束密度の高い箇所が異なるためである。吸着力は、磁束密度の濃度と、作用する面積の積によって計算される。

¹⁰Magnequench 社のオンラインのデータシート [] から参照した。

¹¹ViziMag

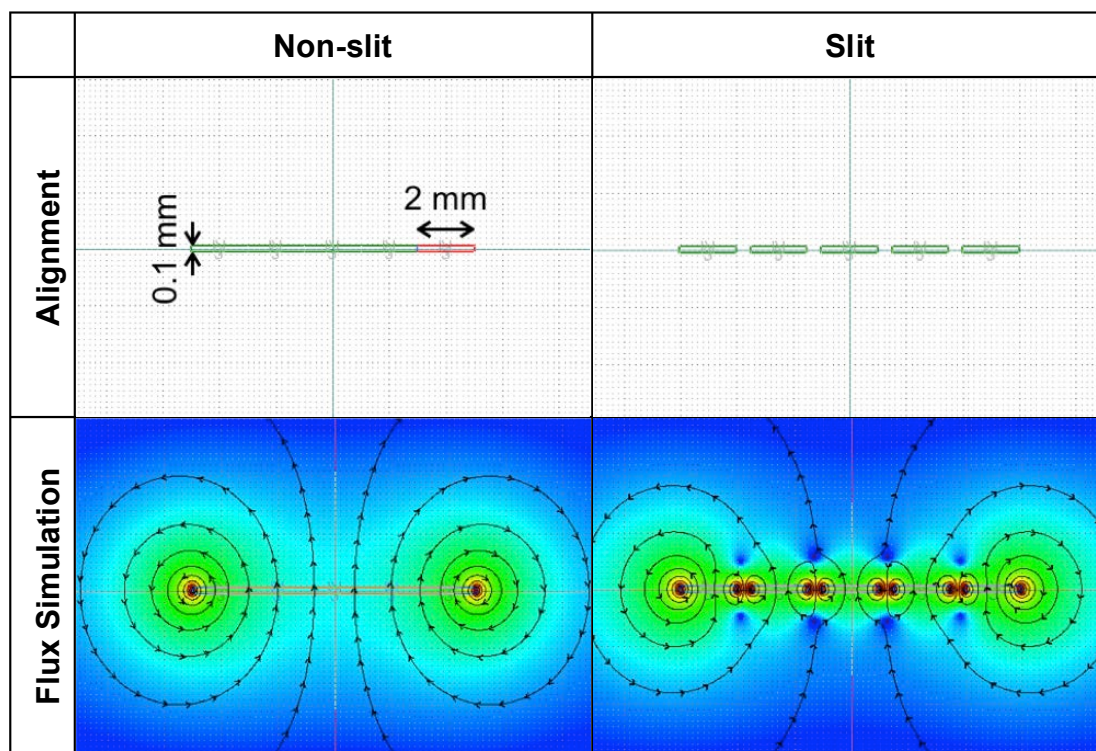


図 7.12: スリットデザインの磁界シミュレーション

7.7 シミュレーションによるデザイン探索

最終的な FluxPaper の生産方法のために、ドットデザインによる印刷を前提とした最適な配置を考える。先の??小節のシミュレーションモデルを拡張して、ドットデザインつまり円柱状の磁石の配列における空間磁束密度を求める。この検証により明らかにするのは、鉄板などの強磁性体への吸着力、および FluxPaper 同士が着磁方向（紙の法線方向）にスタックされた時の相互吸引力である。そのため、計測する空間磁束密度の地点は、紙の厚み 0.1mm と磁性レイヤ 0.1mm を基準したものになる。場合によって異なる材質、状況での吸引力も調べることから、磁性レイヤから数 mm 上空の磁束密度についても計算した。

7.7.1 単一磁石による空間磁束密度

ドットデザインとして円柱状の磁性レイヤをハニカム構造、つまり最密充填する方法に先立って、まずは単体の磁性レイヤを用いた場合の空間磁束密度を求める。

空間磁束密度は磁石などの磁性体から外部に漏れる磁束のことを指し、磁石の場合はその形状に応じて漏れ磁束の大きさが決定される。図 7.13 は磁石の縦横比に相関するパーミアンスと、漏れ磁束の大きさを図式化している。

これを極めて薄い 0.1mm 厚の単一磁石として考えると、磁界シミュレータ上でも FluxPaper の磁性レイヤの磁束密度分布をシミュレートできる。

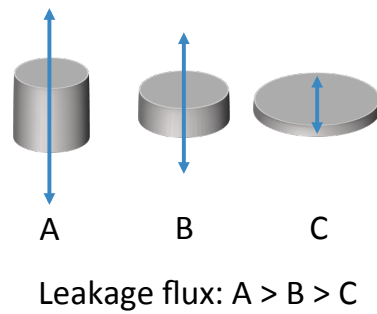


図 7.13: 磁石の形状と漏れ磁束の大きさ (パーミアンス) の関係

シミュレータの設定は以下の通りである。

- メッシュ：800 × 800
- 最大空間領域：10mm (但し、磁石の直径が 2.5mm 以上の時は 20mm)
- 磁石の磁束密度：647mT
- 磁石の比透磁率¹²：1.1

磁石の形状および探索に用いる変数は以下の通りである。

- 磁石は中央に配置
- 磁石の厚みを 0.1mm として固定
- 磁石の直径を $D(\text{mm})$ として $D = 0.10 \sim 4.00$ の間で 24 段階で可変。
- 空間磁束密度の Y 座標の計測位置を $H(\text{mm})$ として $H = 0.15, 0.55, 1.05, 2.05$ の 4 段階で可変。

以上の情報を図式化したものを図 7.14 に示す。

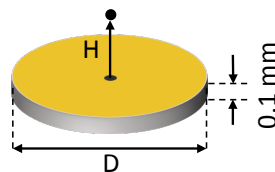


図 7.14: 単一磁石の空間磁束密度の計算に用いる変数

変数 H は紙の厚みを考慮して 0.15mm の位置での空間磁束密度を求める。以降、様々な状況での吸引力を調べるため、0.5mm 刻みで設定した。

¹²Permeability: 空気に対する透磁率の比率。

以上の設定と変数を用いて、D の 24 段階と H の 4 種類をかけあわせた 96 種類のシミュレーションを行った。その結果を図 7.15 に示す。それぞれの表面からの高さに対して、空間磁束密度が最大となる磁石の直径が求まる。特に、 $H = 0.15mm$ のとき、空間磁束密度が最大になるのは $D = 0.20mm$ の場合であると求められた。

7.7.2 最密充填磁石による空間磁束密度

次に、磁石 1 個の状態から、平面に敷き詰めた場合を考える。このとき、理想的には円柱状の磁石が最密充填されている状況を考えたい。しかしシミュレータの制限で断面のみの解析しかできないため、1 列に並べた円柱状の磁石をモデル化する。シミュレータの設定は以下の通りである。

- 最大空間領域：10mm
- その他の設定は前回 (7.7.1 小節) のものを引き継ぐ。

磁石の形状および探索に用いる変数は以下の通りである。

- 磁石は中央 X 軸に沿って配置、中心の磁石は中央に配置する
- 磁石の厚みは 0.1mm として固定
- 磁石の直径を $D(mm)$ として $D = 0.10 \sim 3.00$ の間で 14 段階で可変。
- 磁石間の間隔を $G(mm)$ として可変、 G は面積比の変数 R によって求められる。 $G = D \times R$
- 面積比の変数 R は $R = 0.20, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.60, 1$ の 8 段階で可変。
- 空間磁束密度の計測位置 (Y 座標成分) を 0.15mm として固定

シミュレーションによって算出された空間磁束密度 B_{Result} は、面積比の効果を考慮して除算される。単位面積あたりの真の空間磁束密度 B_{Real} は、次の計算式で求められる。

$$B_{Real} = B_{Result} \times \frac{\sqrt{3}}{6} \times 3.1415 \times \left(\frac{D}{D+G}\right)^2 \quad (7.5)$$

これらのモデルと式を図式化すると、図 7.15 のようになる。

以上の設定と変数を用いて、D の 14 段階と R の 8 種類をかけあわせた 112 種類のシミュレーションを行った。その結果を図 7.16 に示す。

それぞれの面積比 R に対して、空間磁束密度が最大となる磁石の直径 D が求まる。また、これを言い換えると面積比 R と磁石の直径 D の 2 変数における空間磁束密度 B_{Real} の最適解が求まる。空間磁束密度 B_{Real} が最大になるのは、 $D = 0.40 \sim 0.45$ および $G = 0.16 \sim 0.18mm$ の場合であると求められた。

以上の結果は、 R を X 軸、 D を Y 軸、 B_{Real} を Z 軸とした 3 次元のグラフ 7.17 から読み取ることができる。この 3 次元グラフの頂きが最適解である。つまり、実際に FluxPaper を製造するための装置を開発する場合、また製造する過程において、最適解の条件に合うように直径と面積比、面積比から求まる磁石間の間隔を決定すれば良いことがわかる。

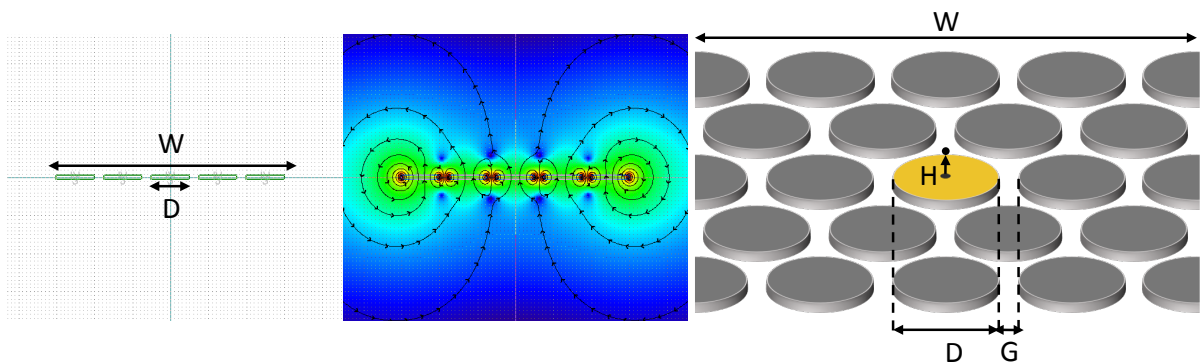


図 7.15: 複数のドットパターンのモデル化とシミュレーション

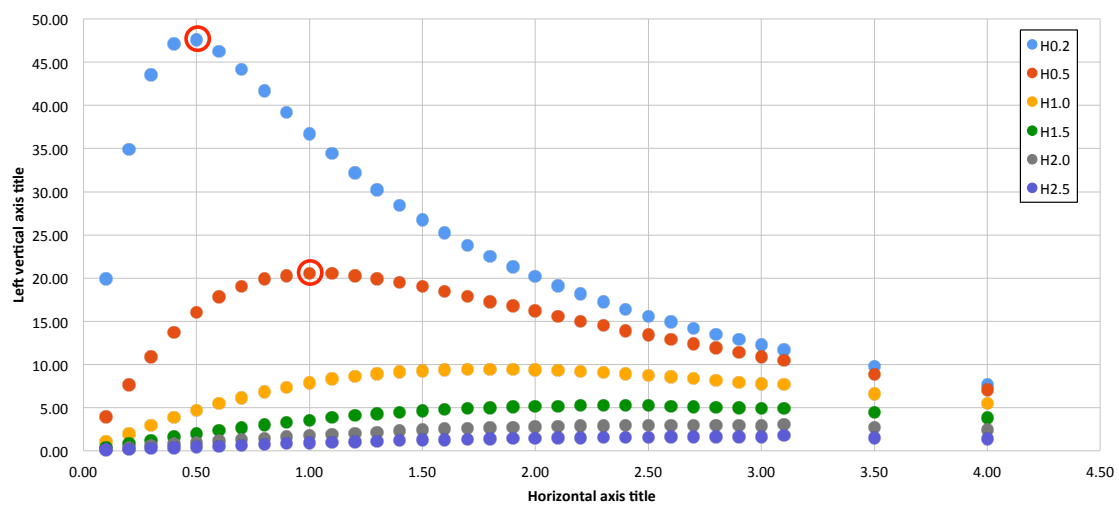


図 7.16: 単一磁石の空間磁束密度のプロット

7.7.3 物理計測による最密充填デザインの検証

ここまでで最適なドットデザインの設計における、磁石の配置と形状の最適解がわかった。しかしながら、最適解によって作られた磁性レイヤを用いて FluxPaper を検証することは難しい。そこで、磁性レイヤを模した別の構造の試料を用いて検証することを考える。板状のアクリル樹脂（アクリル板）に微細で薄い穴を空け、そこに磁性レイヤを形成することで最適解に近い状態の試料を作ることを目指す。

試料作成 アクリル板に CNC とエンドミルによって微細な穴を空ける。CNC には Roland 社の MDX-40A を選んだ。使用したエンドミルには数種類あるが、穴の処理には直径 0.2mm の直角の鋼鉄製のものを選び、それ以外は汎用的な直角のエンドミルを用いた。シミュレーションで用いた 112 種類の試料を製作することは困難である。とくに違いの顕著にでると思われる範囲を対象に、18 種類の試料を作成した。

計測装置と方法 作成した試料の吸着力を計測するために、独自に計測装置を設計、製作した。計測装置は、精密電子計量器を改造し、計量器のテーブルの上部に紐で試料を釣り上げる機構を取り付けた。これにより、計量器のテーブルに接着した鉄板と、鉄板に載せた試料との間に生じる吸着力を計測する。鉄板に載せた試料を紐で引っ張る際の計量器の重量を吸着力として記録する。

試料におけるファクタ 試料は、非常に細かい穴に磁性レイヤのペーストを流しこむことで作られた。すべての穴と箇所でも均一なエポキシ樹脂と磁石粉末の比率を保証することは難しい。アクリル板を加工する際に位置によってエンドミルの歯が十分深く入らないなどの状況も考えられる。また、CNC の最小移動距離である 0.01mm に近いため、エンドミルの加工精度にも限界がある。すべての加工が理想的に行われたと保証することはできない。結果を考察する際には、以上の点を考慮に入れる必要がある。

計測におけるファクタ 計測装置は吸着力を計測するための専用の装置ではない。そのため、吸着力は試料が鉄板から離れる際の最後の引張力のみが得られる。数回の試行を行って、十分に引張力が高いと認められた値を用いた。しかしながら吸着と解離は、紐を引き上げる方向やかすかな手の動作によって偶発的に起こり、引張力が変化してしまう。計測方法においても、ファクタがあることを考慮する必要がある。

結果 図 7.17 に計測装置を用いて 18 種類の試料の吸着力を計測した結果を示す。3 種類の R の変数のうち、シミュレーションの結果に対して良好な近似を描いているのが 2 種類ある。そして 1 種類は近似とは言いがたい形状である。試料の種類によっては理想的な近似にはならなかったが、シミュレーションの結果を検証するという目標は達成できたと考える。

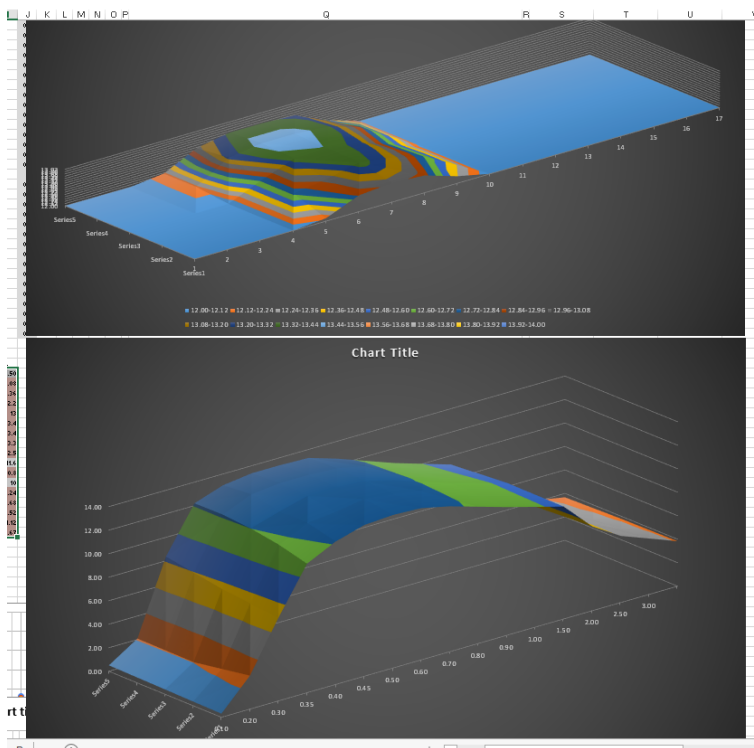


図 7.17: ドットデザインの空間磁束密度の3次元グラフ

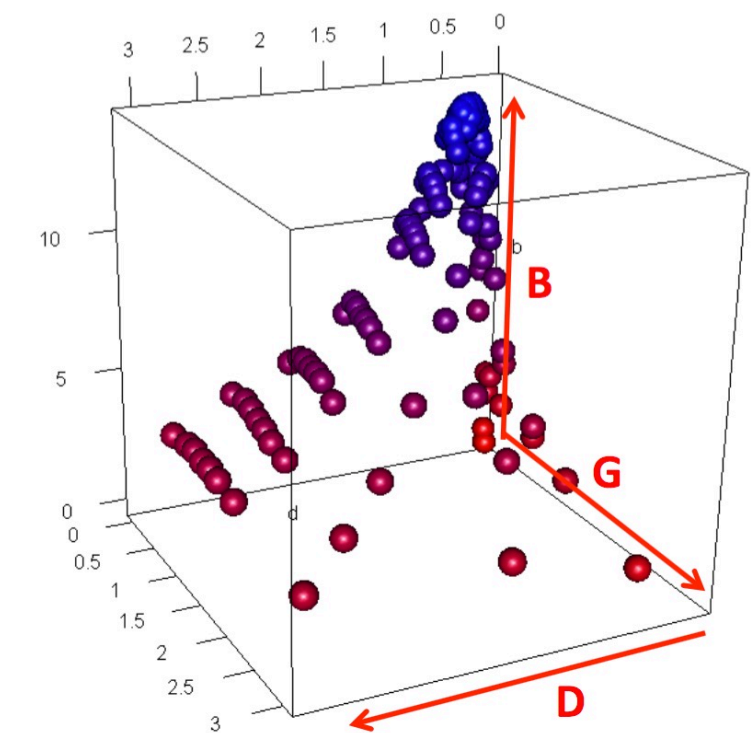


図 7.18: ドットデザインの空間磁束密度の3次元プロット

7.8 アプリケーション

FluxPaper は柔軟な設計と強力な電磁気学の性質により、手を用いた紙のインタラクションにおいても、電磁石装置を用いた制御においても、多様なアプリケーションとユーザ体験を提供する。これまでの FluxPaper の設計、製造、検証の手順を以って、アプリケーションの製作に応用する。

アプリケーションは大きく分けて 2 つの種類にわけられる。1 つは Self-alignment であり、手を用いた操作において磁石同士の吸着と吸引または反発力を組み込んだプログラマブルなインタラクション設計である。もう 1 つは Computer-actuated であり、コンピュータによって制御された電磁石装置を用いることで、紙には触れずに自動的にタスクをこなしたり、インタラクティブな体験をユーザに提供する。

7.8.1 Self-alignment 志向によるインタラクション設計

Self-alignment を用いたアプリケーションとして、1 次元に積み上げるスタック、2 次元に並べるグリッド、3 次元に組み立てる立体の 3 つを紹介する。これらは外部エネルギーなしに、磁束の力のみでインタラクションを行う。FluxPaper は吸着と反発の力を持つため、複数の結合部分や可動部分を設計できる。また、FluxPaper の磁束密度が十分に高いため、磁性レイヤは 2 枚の紙の間に重ねても、紙同士を接続するなどのアプリケーションで機能する。

(1) 自己スタック

FluxPaper を重ねあわせることで、同じ極性を持つ箇所が磁力によって吸引される。2 枚の紙に同じ磁性レイヤのパターンを塗布しておくことで、例えば書類を同じ向きに揃えることが容易になる。また、FluxPaper を用いた書類を別の同じ磁性レイヤのパターンがある書類の上に投げると、自動的に同じ向きに積み会えることも可能である (図 7.19)。この機能はデスクの上に散らばった書類を片付けるときに便利である。背面には図 7.19 の右図のように端に磁性レイヤを構成している。

(2) 水平グリッド

FluxPaper は平坦な磁性レイヤを持つことで、紙の端に強力な漏れ磁束を発生させることができる。これらの紙の端同士を組み合わせて、紙同士を連結させることができる。例えば紙が十分に小さく 20mm 四方程度であれば、紙を近づけただけで吸引力が働いて紙が自然に吸い寄せられる。逆に、極性の違う端同士を近づければ反発力が起き、片方の紙が逃げるように動く。こうして紙同士を組み合わせたのが図 7.20 に示す 25 枚の FluxPaper で作った写真のパズルである。最後に、このパズルは一番上の列を鉄製の棒で支えることで持ち上げることができる。

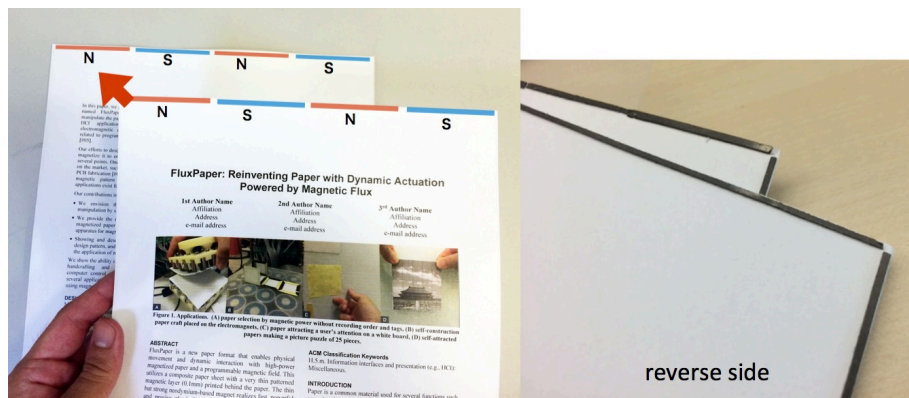


図 7.19: 書類をまとめるための自己スタック機能



図 7.20: 複数の紙片を用いたグリッド機能

(3) 複雑な 3 次元構造

FluxPaper の端に発生する漏れ磁束は、横方向だけではなく直角や他の角度でも FluxPaper の端同士を接続することができる。そのため、端に発生する吸引と反発の力は 3 次元の形状でも用いることができる。ここでは例として、図 7.21 に示した正四面体を設計した。この例では 4 枚の紙がそれぞれの辺で接続されており、辺の結合は磁力によって保持されている。

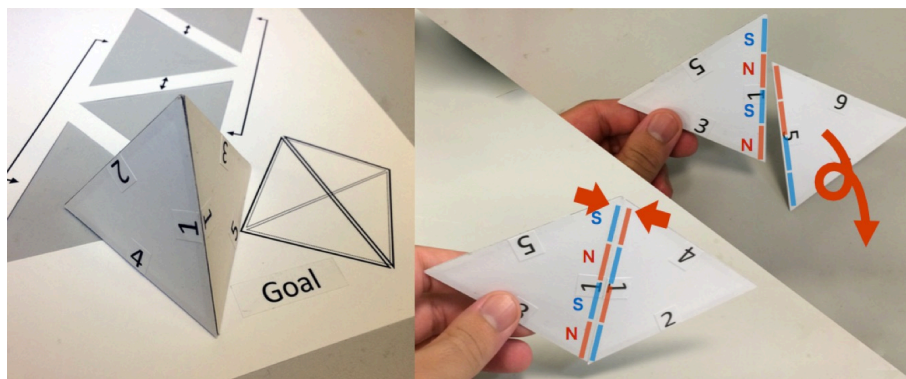


図 7.21: 3 次元の構造組み立てと吸引・反発力によるプログラマブルな接続

それぞれの辺には番号が書かれており、同じ番号の辺同士だけが接続できる。これは、辺ごとに異なる着磁パターンを行っているためである。1つの辺を4つの部分に分けて、辺ごとに異なるパターンでNとSの極性を決定した。異なる番号の辺をつなげようとしても、必ずどこかの部分で反発する力が起こり、うまく接続できないようになっている。これにより、ユーザはFluxPaperのプログラマブルな着磁によって組み立てをガイドされるようになる。

7.8.2 自動化ホワイトボード

自動化ホワイトボード (図 7.22) は FluxPaper の機能を説明する上で良い例の一つである。FluxPaper と、背面に可動する電磁石装置を組み込んだ独自のホワイトボード装置を用いることで、自律的に紙が移動しているように振る舞わせる。ホワイトボードの内部に組み込まれた XY テーブルが 2 次元方向に動き、XY テーブルによって電磁石装置が動かされる。FluxPaper は、電磁石装置によってホワイトボードの背後から磁力で引っ張られることで、縦横無尽に動くことができる。ここでは、ホワイトボードの装置と、自動化ホワイトボードのための FluxPaper のパターン設計、電磁石装置の制御方法について説明する。

(1) ハードウェア構造

自動化ホワイトボードは FluxPaper をボード上で移動、通知のための振動、ゴミ箱への削除を行うために、背後に機械的な仕掛けを持っている。実際に製作した機械は、アルミニウムフーレ

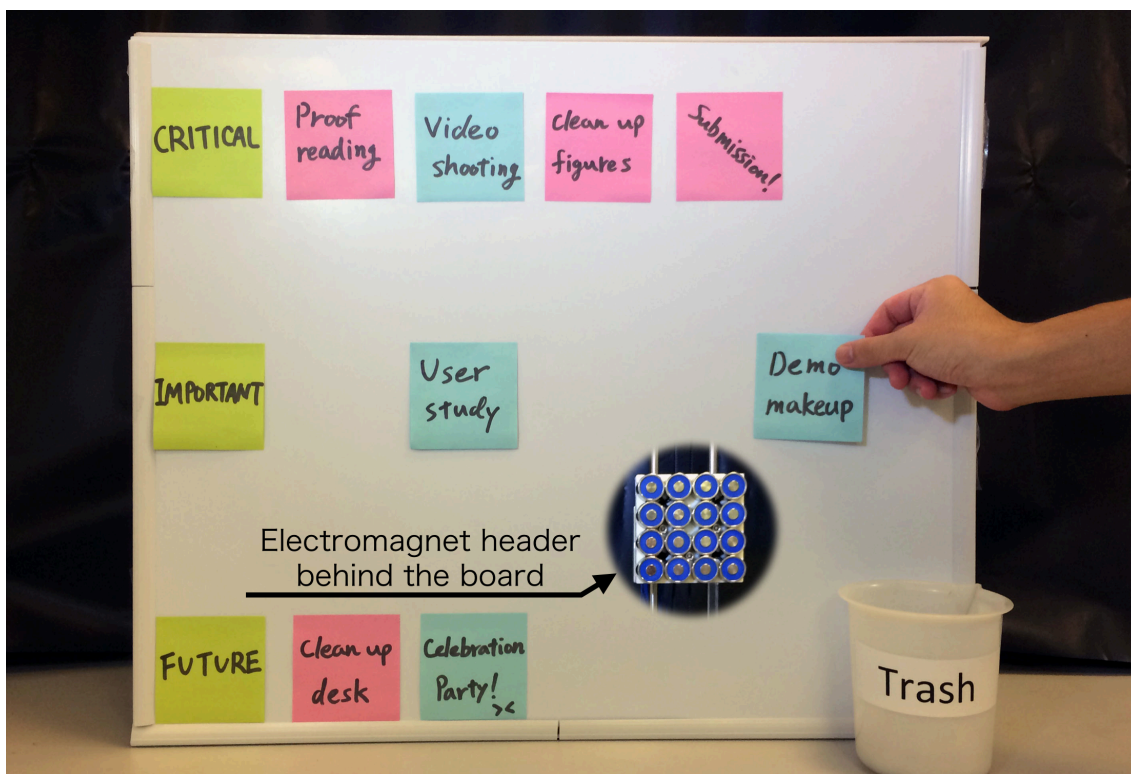


図 7.22: FluxPaper を用いた自動化ホワイトボード

ム、2つのステッピングモータ、モータによって動かされる滑車とベルト、Arduino¹³をベースとしたステッピングモータ制御ボードと電磁石制御ボードによって構成されている。

図 7.22 に示したホワイトボードは 600mm × 500mm (W×H) のサイズで、内側のモータによって動かされる電磁石装置は 400mm × 320mm の距離を 0.1mm の距離精度で移動できる。(電磁石装置は 80mm × 80mm のため、実際の有効範囲は 480mm × 400mm である。) 電磁石装置は直径 20mm の電磁石を 4 × 4 で構成した 16 個の電磁石アレイで作られている。電磁石は吸盤型と呼ばれる形であり、鉄製の筐体内部にコイルが巻かれている。表面には直径 8mm の鉄心を持ち、周囲の 2mm のヨーク¹⁴との間に磁束を発生させる。

16 個の電磁石はすべて電磁石制御ボードに繋がれている。電磁石制御ボードは 12V 電源で駆動するモータドライバ IC を用いており、各電磁石に 0.25A の電流を流す。この時の電磁石に発生する表面から 0mm 地点での空間磁束密度は平均的に約 50mT である。実際のホワイトボードで用いる天板を 3mm として、表面から 3mm 地点で計測すると平均的に約 20mT となる。

(2) FluxPaper の移動方法

ホワイトボードの上に貼り付けられた FluxPaper は、ボード上を撮影するカメラによって認識される。カメラによるトラッキングで紙の位置、色を認識する。OpenCV を用いて、ボードの白

¹³ オープンソースのマイクロプロセッサハードウェアとそのプロジェクトの名称

¹⁴ 電磁石などの電磁気学的な装置において磁束をリターンするための強磁性体の部分

い領域から彩度の高い部分を抽出して紙を検出した。FluxPaper の紙の部分には、ポストイットの糊の部分を取り除いた紙を用いたため、通常のポストイットの検出と同じ原理で検出が可能である。

このとき、紙は糊によってボードに貼り付けられている。この糊はポストイットに使用されているものに近づけて作られており、紙の上部にスプレーのりで塗布されている。貼り付けられた紙の位置をカメラで認識したあと、電磁石装置が紙の裏側に移動し、電磁石制御によって紙上の糊の塗られた部分を剥がす。紙全体は電磁石によって吸引されるため、ボードから落ちてしまうことはない。(図 7.23)

逆に、電磁石制御によって紙のすべての箇所に関力をかけることで、紙を落とすことができる。ホワイトボードの右下にゴミ箱を設置しておき、タスクが完了したり、要らなくなった紙はゴミ箱の上まで運ばれたあと、反発力によってボードから剥がされゴミ箱に落とされる。

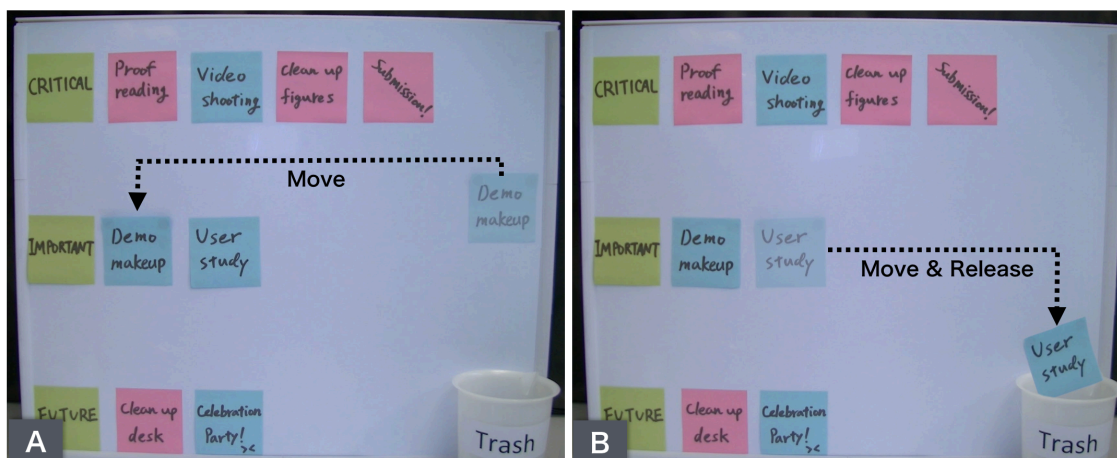


図 7.23: FluxPaper の移動

(3) 磁性レイヤのデザインと糊の構成

紙の裏面に構成された磁性レイヤと糊の設計を、図 7.24 に掲載している。8 箇所の磁性レイヤと、2 箇所の糊の部分がある。糊は磁性レイヤの上に塗られており、電磁石制御によって生じた反発力によって糊を剥がすことを可能にしている。その瞬間はその他の磁性レイヤの部分は吸引力によって保持される。一旦、糊の部分を反発で浮かせることでボード上での移動を可能にする。目的の場所に移動したあと、糊のある磁性レイヤを吸引力によってボードに惹きつけることで、目的の位置に糊付けする。電磁石制御による糊付けで、電磁石装置に流れる電流が切れても紙がボードに貼り付けられた状態を維持できる。

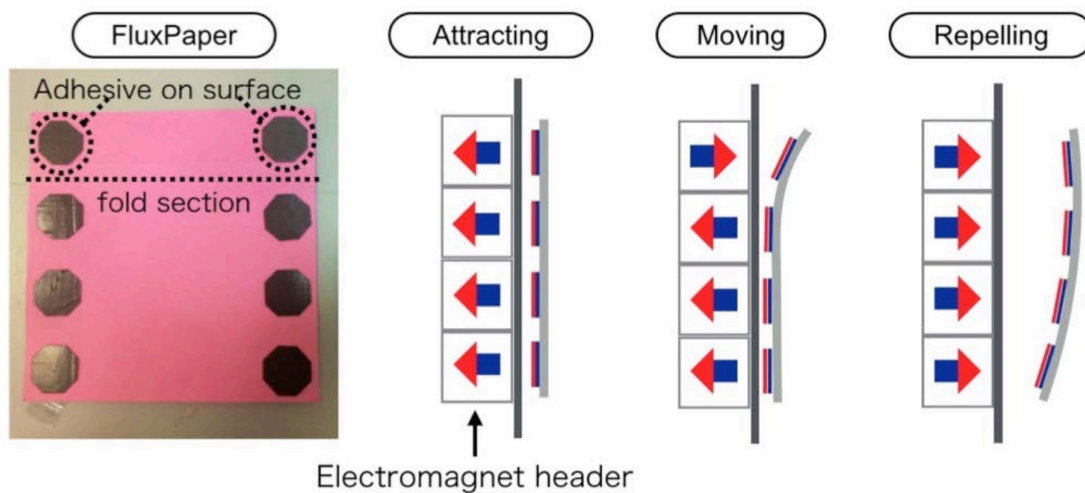


図 7.24: FluxPaper の背面デザインと動作

(4) 動きの表現

FluxPaper が持つ磁力と電磁石制御を組み合わせることで、ホワイトボード上で磁力を用いた新しいインタラクションの様式を作ることができる。電磁石によって吸着と反発を繰り返すことで、図 7.25 のような動きを可能にする。例えば、ユーザに注意を促してタスクを通知したり、紙をめくり上げるような動作で操作する対象を示したりする。また、ユーザが紙に触れようとしたり触れた場合、紙に対して高速に吸引と反発を与えるとバイブレーションさせることができる。これはユーザが誤った紙を選びとった時などに有効である。また、すべての磁性レイヤを吸引することで、ユーザが紙を剥がせないように意図的に移動を禁止することも可能である。

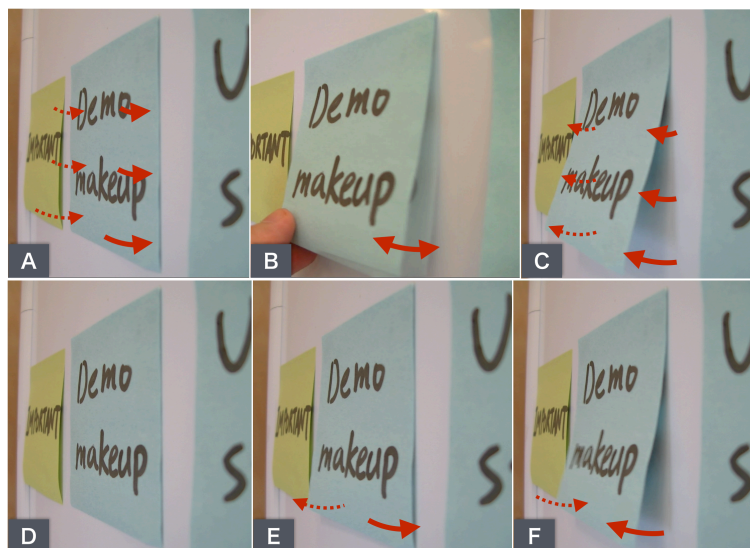


図 7.25: FluxPaper の電磁石を用いた動きの表現

(5) 実用的なタスク

自動化ホワイトボードと FluxPaper を用いた物理的なインタラクションの例の中で、2つの実用的なアプリケーションとタスクを示す。

To-do 管理 To-do リストはユーザにとってコンピュータに処理して欲しいと思っているタスクの一つである。FluxPaper とホワイトボードを用いると、物理的な環境でのユーザとコンピュータのコラボレーションを実現できる。紙を用いた To-do の場合、ユーザは紙にタスクややるべきことのメモを書き、自分でその整理やチェックを行っている。FluxPaper を用いると OCR など内容を読み取ったあと、コンピュータがタスクに内容や時刻を理解し、スケジュールを知らせてくれる。また、その内容に合わせて移動、並び替え、時間に合わせた通知などを複数のインタラクションの様式を組み合わせることが可能である。

共同作業 会社や学校でブレインストーミングやコラボレーションのように共同作業を行う際、紙は便利な道具であり、FluxPaper はそこに利便性を付け加え、グループの中のインタラクションを向上することができる。カメラによる認識を使うことで、色ごとに紙をグルーピングして並び替え、整列することが可能である。紙同士がなさなったりぶつからないように紙を移動させる際の軌道を計算すれば、衝突なく動かす事ができる。これらの作業は物理的に行われるが、ここにテレビ会議で参加しているユーザも、自分で紙をポインティングして動かすことが可能になる。遠隔のユーザも物理的な議論に参加するための道具になる。

7.8.3 スタックからの任意選択

紙に磁性レイヤを印刷できるということは、紙の任意の箇所を磁石又は電磁石に反応するようにプログラムすることが可能になる。このアプリケーションでは、FluxPaper の特徴を用いて、複数枚の紙の中から、任意の紙を選択する方法を提供する。バーコードや QR コードのような光学式センサを用いるもの、磁気テープのように磁気センサで ID を読み取るもの、RFID のように無線通信を用いるものは、どれも紙がかさばっている状態では使用不可能になってしまう。この点、FluxPaper を用いると紙に割り振られた磁性レイヤのパターンさえわかっているならば、図 7.26 のように簡単に磁気の吸引力によって選び出すことが可能である。

(1) 磁性レイヤの設計

16 個の電磁石を用いた装置で紙を選択するため、紙を 16 領域に分けて磁性レイヤを配置する。経験的に、紙を持ち上げるには少なくとも 2 点の作用点が必要であるとわかった。そのため、16 箇所のうち 2 箇所を重なりの内容に配置する方法を考える。図 7.27 のように重なり合わず、2 箇所での吸引力による保持ができるパターンを構成した。この構成により、吸引力によって選ばれる紙と電磁石の間に他の紙が挟まっていたとしても問題なく持ち上げられる。

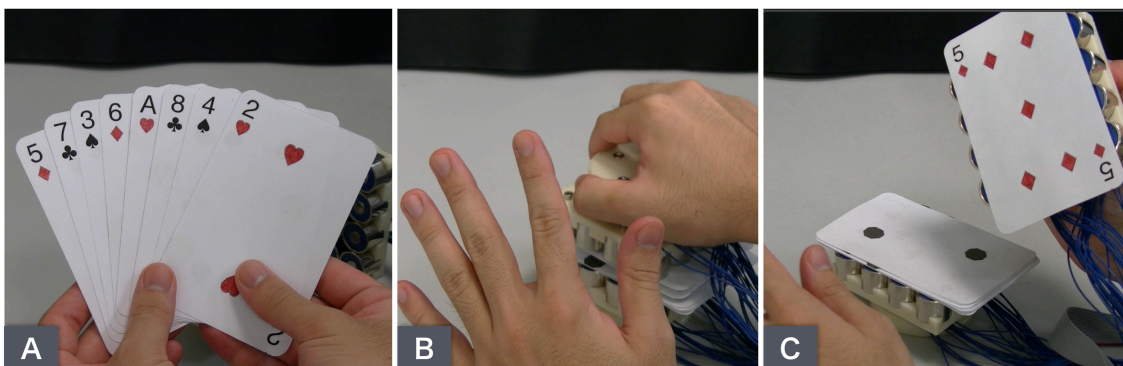


図 7.26: カードの選択

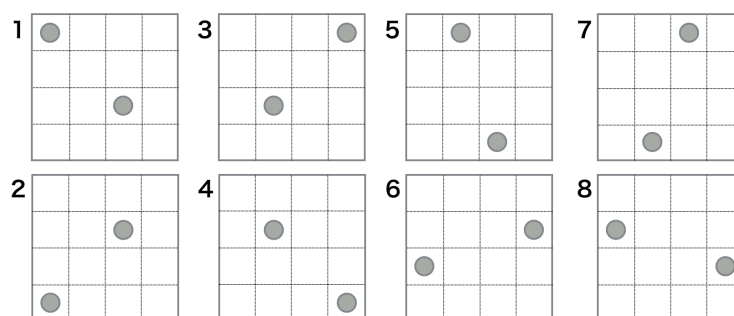


図 7.27: カードの背面デザイン

この場合、電磁石の数と紙の面積によって持ち上げられる紙の枚数と、使用できる紙の枚数に制限がある。電磁石の形状や磁性レイヤの配置を工夫することで、より多くの枚数に対応することができると考えられる。

(2) ハードウェアと制御

図 7.28 に、電磁石装置によって対応する磁性レイヤを吸引する様子を描画した。上下の2方向から磁束をかけることで、上の電磁石からは吸引力を、下の電磁石からは反発力を与えることができる。電磁石装置は図 7.28 のように取っ手がつけられており、容易に持ち上げられる構成にした。

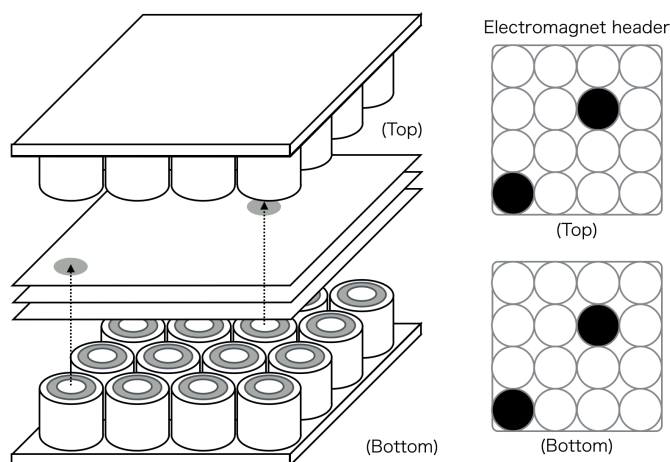


図 7.28: 電磁石装置による制御イメージ

7.8.4 自己組み立て

FluxPaper を自由な形に整形して着磁することで、電磁氣的に平面的な形状を立体に組み立てることができる。磁性レイヤに対してそれぞれ吸着と反発の2つの方向の力を同時に、時系列的にかけることで、紙を立体的に組み上げる。ここでは、サイコロ状の正六面体を用いて製作した。

図 7.29 には、正六面体の折りたたみの手順を示している。磁性レイヤはそれぞれ電磁石と同じ間隔に並べられ、電磁石の鉄心 (8mm) からの磁力を受けやすいような円形的设计にした。電磁石のヨーク部分から受ける磁力を受けること、また紙を折りたたんだあとにその形状を保持するため、紙の端には棒状の磁性レイヤも加えた。

7.9 リミテーション

現在の FluxPaper の製造工程は自動化されていないため、手動で製作する点が難点である。また、使用している素材も現時点で研究室で用いることができる最適なものを選んでいるため、他

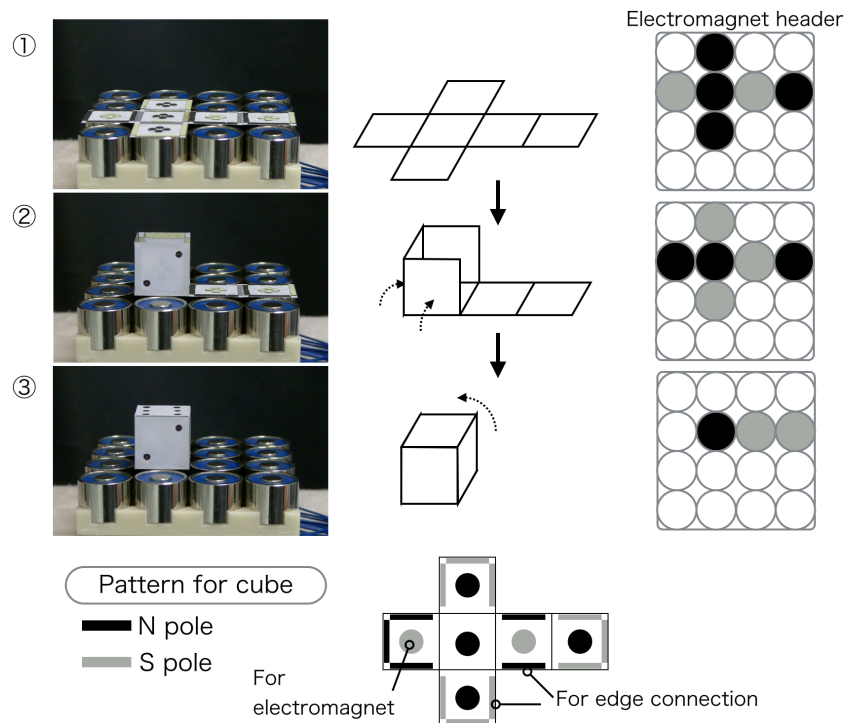


図 7.29: 組み立ての手順と電磁石装置による制御

の選択肢も当然ありうる。エポキシ樹脂ではなく、紫外線硬化素材や熱可塑性のある素材であれば、3D プリンタのような構成の機械で印刷できるようになる。

またアプリケーションにおいて、いくつかのリミテーションがある。第一に、紙の大きさと重さには限界がある。磁力で保持、または移動できるのは紙の重さよりも磁力が高い場合のみである。これを超えるような設計では、動かすことはできない。

電磁石は入手可能なものを選択したが、これにかぎらず小型や、強力な磁界を発生させる電磁石も選択、または製造可能である。性能の高い電磁石を選択できれば、スタックからの任意選択 7.8.3 や、紙の自己組み立て 7.8.4 に対して、高速で精度の高いデモンストレーションを可能にする。使用できる紙の枚数や、立体の大きさ、面の数も増やすことができる。

7.10 本章の結論

これまで、FluxPaper と呼ばれる紙と磁力を組み合わせた新しい提案に対して紹介した。Flux-Paper によって、紙を用いた実用的なアプリケーションばかりではなく、新しいインタラクションの可能性を模索することができた。紙という普遍的な素材はオフィスや家庭における様々な面で使用することができ、身近で扱いやすい素材である。それに加えて、コンピュータで制御可能な電磁気学的現象を組み合わせることで、物理的な環境でのコンピュータの設計が促進されると考える。Self-alignment と Computer-actuated という 2 種類のデザインとアプリケーションの方法を示すことで、身体性メディアとしての可能性と有用性を示すことができた。

第8章 結論

以上の章から、コンピュータとインタフェースの設計について議論し、ネイキッドインタラクションとこれを介在させる身体性メディアを定義した。また、ネイキッドインタラクションを具現化するための研究の方向性と先行研究、そして3つの身体性メディアにおける研究の実現方法を具体的に説明した。

ネイキッドインタラクションはこれからも、人とコンピュータの関係性について身体の視点から考えると同時に、身体と環境、そしてコンピュータに続く一連の相互作用の関係を強固にする方向に進むだろう。その意味で、私の技術的な分野でもある HCI やヒューマンインタフェースに対して新しい視野を提供できると考えている。

身体性メディアとして身の回りにあるモノや、アプリケーションを考えた時にネイキッドインタラクションの設計を適用できるものは多い。その中でも特に注目できるのは、「衣・食・住」のように生活に密着したテーマとして適用していくことも可能である。「衣」はウェアラブルが役割を担っており、この分野は市場が活発になっているので研究の余地は少なくなっているが、身体性メディアの視点から再設計が可能であると考えられる。「食」は計測や提示の手段が乏しいためコンピュータにはまだ難しい分野であるが、大きな研究領域に成長すると考えられる。そのためには、食べるという行為全般や、食事、盛り付けといった食事にまつわる一連の行動について観察し、課題を捉えていく必要がある。「住」はこれまで建築が担ってきた分野で、もっとも歴史の長い研究テーマである。ユーザが影響の受ける期間が長く、注意深い考察と設計が必要であるが、ユーザの生活している時間のほとんどを見守ることができる。このように「衣・食・住」は形は違えど、すべての人間との密接な関係を作る概念である。ネイキッドインタラクションと身体性メディアの今後の発展は、衣食住に関連したテーマに見いだせると考える。

今後も、コンピュータシステムやテクノロジーによって整備された仕組みの中から、身体の視点と身体性をテーマとして HCI、ヒューマンインタフェースの分野に対して新しい視点と研究の貢献を続けていきたい。

謝辞

はじめに、学部時代の研究室の配属から博士課程の修了まで6年間ご指導いただいた今井倫太先生に心から感謝いたします。私の自由奔放な研究生活に対しても寛容に認めていただき、大学の研究室以外でも多くの発見と学びを得ることができました。私の学部4年から修士2年までの間、ご多忙な今井先生に代わって論文執筆と研究をご指導くださった筑波大学の大澤博隆先生（当時、情報工学科助教）に感謝いたします。東京大学の稲見昌彦先生には多くの叱咤激励とともにご指導いただきました。心から感謝いたします。

次に、ERATO 五十嵐プロジェクトの関係者のみなさん（特に東京大学の五十嵐健夫教授、稲見昌彦教授、東京大学五十嵐研究室の坂本大介先生、東京大学開研究室の石井健太郎先生、産業技術総合研究所の杉浦裕太さん）に出会えたことが、博士課程に進学するにあたって影響を与えてくれました。ERATO で研究活動に携わった経験が研究者としての指針を与えてくれました。ERATO の所属に際し、稲見昌彦先生（当時、メディアデザイン研究科教授）に研究室に招いていただき、5年半の間に多くの方に出会いました。とくに東京大学篠田研究室の牧野泰才先生（当時、SDM 前野研究室）には皮膚計測の研究においてご教授頂きました。

修士課程の期間に情報処理推進機構 (IPA) の未踏プロジェクトにもご支援いただきました。未踏関係者の方々と、プロジェクトマネージャを担当した頂いた石黒浩先生に感謝申し上げます。最初のインターン先である国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) の知能ロボット研究所では篠沢一彦さん、杉山治さんにお世話になりました。次の北京でのインターンではマイクロソフトリサーチアジア (MSRA) の福本雅朗さんにご指導いただきました。心から感謝いたします。

今井研究室の先輩、同期、後輩のみなさんから刺激を受けました。とくに担当した後輩はそれぞれ自己の能力を持って進めていた研究を見守ることができ、とても幸運だったと思います。今井研究室の秘書の立平さんに多くの点でサポートしていただきました。矢上キャンパスでは私の専門分野の先輩が少なかったため、稲見研究室の博士課程だった多くの先輩方にご指導いただきました。KMD では稲見研究室の秘書の佐藤さん、杉本さんには多くの点で助けられました。また KMD の同期や後輩からも多くの刺激を受けました。ありがとうございます。

また、名前は書ききれませんが、これまでの研究と活動について多くの方々と共同研究をしたり、ご支援とご協力を頂きました。本当にありがとうございます。そして本論文を書くにあたり、設計論について貴重なご意見をくださった渡邊淳司様にも感謝いたします。

最後に、「やりたいことをやれば良い」と言ってみ守ってくれた両親と弟に感謝します。ありがとう。

研究業績

定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

1. Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, Michita Imai. Pygmy: A Ring-shaped Robotic Device for Storytelling, International Journal of Innovative Computing (IJICIC), Information and Control, Vol. 9, No. 12, pp.4619–4629 (December 2013)
2. Masa Ogata, Masaaki Fukumoto. FluxPaper: Reinventing Paper with Dynamic Actuation Powered by Magnetic Flux, Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'15), pp.29–38. (4/18/2015) (*Best Paper Honorable Mention Award*)

査読付き国際会議論文（主論文に関連する原著論文）

1. Masa Ogata, Yuta Sugiura, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami, Michita Imai. SenSkin: Adapting Skin as a Soft Interface, Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST'13), pp.539–544. (10/8/2013)
2. Masa Ogata, Michita Imai. SkinWatch: Skin Gesture Interface for SmartWatch, Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference (AH'15), pp.21–24. (3/9/2015)
3. Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. Pygmy: a ring-shaped robotic device that promotes the presence of an agent on human hand. In APCHI '12: Proceedings of the 10th asia pacific conference on Computer human interaction, pp. 85 – 92. (8/28/2012)

査読付き国際会議論文

1. Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura, Masa Ogata, Kai Kunze, Masahiko Inami, Maki Sugimoto. Facial Expression Recognition in Daily Life by Embedded Photo Reflective Sensors on Smart Eyewear, IUI'16, Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces. (3/7/2016)
2. Hirofumi Okazaki, Yusuke Kanai, Masa Ogata, Komei Hasegawa, Kentaro Ishii, Michita Imai. Building Pedagogical Relationships Between Humans and Robots in Natural Interactions, iHAI'15, Proceedings of the 3rd International Conference on Human-Agent Interaction, pp.115–120. (10/21/2015)

3. Masa Ogata, Ryo Teramura, Michita Imai. Attractive Telepresence Communication with Movable and Touchable Display Robot, ROMAN'15, Proceedings of the 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 179-184. (8/31/2015)
4. Masaaki Takahashi, Masa Ogata, Michita Imai, Keisuke Nakamura, Kazuhiro Nakadai. A Case Study of an Automatic Volume Control Interface for a Telepresence System, ROMAN'15, Proceedings of the 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp.517-522. (8/31/2015)
5. Masa Ogata, Masahiko Inami and Michita Imai. Sweat Sensing Technique for Wearable Device Using Infrared Transparency, HCII'14, Proceedings of 16th International Conference, HCI International 2014, Part III, pp.323-331. (6/22/2014)
6. Masa Ogata, Yuta Sugiura, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami and Michita Imai. Augmenting a Wearable Display with Skin Surface as an Expanded Input Area, HCII'14, Proceedings of 16th International Conference, HCI International 2014, Part II, pp.606-614. (6/22/2014)
7. Shunsuke Koyama, Yuta Sugiura, Masa Ogata, Anusha Withana, Yuji Uema, Makoto Honda, Sayaka Yoshizu, Chihiro Sannomiya, Kazunari Nawa, Masahiko Inami. Multi-touch steering wheel for in-car tertiary applications using infrared sensors, AH'14, Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference, Article No. 5. (3/7/2014)
8. Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, Michita Imai. FlashTouch: Data Communication through Touchscreens, CHI'13, Proceedings of the 31st Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.2321-2324. (4/27/2013)
9. Yasutoshi Makino, Yuta Sugiura, Masa Ogata, Masahiko Inami. Tangential Force Sensing System on Forearm, AH'13, Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference, pp.29-34. (3/7/2013)
9. Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, Michita Imai. iRing: Intelligent Ring Using Infrared Reflection, Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST'12), pp.131-136. (10/7/2012)
10. Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, Michita Imai. Pygmy: A ring-shaped robotic device that promotes the presence of an agent on human hand, APCHI'12, Proceedings of the 10th asia pacific conference on Computer human interaction, pp.85-92. (8/28/2012)
11. Yuta Sugiura, Calista Lee, Masayasu Ogata, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami, Takeo Igarashi. PINOKY: A Ring That Animates Your Plush Toys, CHI'12, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.725-734. (5/5/2012)

他 査読付きデモンストレーション、査読付きポスター発表 8 件

国内学会発表

1. 尾形正泰, 杉浦裕太, 大澤博隆, 今井倫太 “ iRing: 赤外線反射を用いてジェスチャ認識する指輪型インタフェース ”, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2012) (学術奨励賞)

他 21 件

参考文献

- [1] *interactions*, Vol. 19, No. 1, 2012.
- [2] 3M. Post-it notes. <http://www.post-it.com/>.
- [3] Kota Amano and Akio Yamamoto. An Interaction on a Flat Panel Display Using a Planar 1-DOF Electrostatic Actuator. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 258–259, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [4] Kota Amano and Akio Yamamoto. Tangible Interactions on a Flat Panel Display Using Actuated Paper Sheets. In *Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 351–354, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [5] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr, and Chris Harrison. TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces. In *UIST '10: Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 283–292, New York, New York, USA, October 2010. ACM Request Permissions.
- [6] Patrick Baudisch and Gerry Chu. Back-of-device Interaction Allows Creating Very Small Touch Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1923–1932, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [7] J.S. Beeteson. Vizimag 3.15.
- [8] J.S. Beeteson and John Stuart. *Visualising Magnetic Fields: Numerical Equation Solvers in Action*. Academic Press, Inc., Duluth, MN, USA, 2001.
- [9] Richard A Bolt. "Put-that-there": Voice and Gesture at the Graphics Interface. *SIG-GRAPH Comput. Graph.*, Vol. 14, No. 3, pp. 262–270, July 1980.
- [10] Marcelo Coelho, Lyndl Hall, Joanna Berzowska, and Pattie Maes. Pulp-based Computing: A Framework for Building Computers out of Paper. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3527–3528, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [11] Stelian Coros, Bernhard Thomaszewski, Gioacchino Noris, Shinjiro Sueda, Moira Forberg, Robert W Sumner, Wojciech Matusik, and Bernd Bickel. Computational Design of Mechanical Characters. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 83:1–83:12, July 2013.

- [12] Douglas C Engelbart. AUGMENTING HUMAN INTELLECT: A CONCEPTUAL FRAMEWORK. *SRI Summary Report AFOSR-3223*, 1962.
- [13] S Felton, M Tolley, E Demaine, D Rus, and R Wood. A method for building self-folding machines. *Science*, Vol. 345, No. 6197, pp. 644–646, 2014.
- [14] Charith Lasantha Fernando, Takeo Igarashi, Masahiko Inami, Maki Sugimoto, Yuta Sugiyura, Anusha Indrajith Withana, and Kakehi Gota. An Operating Method for a Bipedal Walking Robot for Entertainment. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies: Adaptation*, pp. 79–79, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [15] Ana Carina Figueiredo, Ana L u cia Pinto, Pedro Branco, Nelson Zagalo, and Eduarda Coquet. Bridging Book: A Not-so-electronic Children’s Picturebook. In *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children*, pp. 569–572, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [16] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Nadia Cheng, and Hiroshi Ishii. Jamming User Interfaces: Programmable Particle Stiffness and Sensing for Malleable and Shape-changing Devices. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 519–528, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [17] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints Through Shape and Object Actuation. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 417–426, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [18] Audrey Girouard, Aneesh Tarun, and Roel Vertegaal. DisplayStacks: Interaction Techniques for Stacks of Flexible Thin-film Displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2431–2440, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [19] Matthew G Gorbet, Maggie Orth, and Hiroshi Ishii. Triangles: Tangible Interface for Manipulation and Exploration of Digital Information Topography. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 49–56, New York, NY, USA, 1998. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [20] Sidhant Gupta, Daniel Morris, Shwetak Patel, and Desney Tan. SoundWave: Using the Doppler Effect to Sense Gestures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1911–1914, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [21] Chris Harrison and Scott E Hudson. Abracadabra: Wireless, High-precision, and Unpowered Finger Input for Very Small Mobile Devices. In *Proceedings of the 22Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 121–124, New York, NY, USA, 2009. ACM.

- [22] Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skinput: Appropriating the Body As an Input Surface. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 453–462, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [23] David Holman and Roel Vertegaal. Organic user interfaces: designing computers in any way, shape, or form. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 48–55, 2008.
- [24] Christian Holz, Tovi Grossman, George Fitzmaurice, and Anne Agur. Implanted User Interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 503–512, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [25] Yingdan Huang and Michael Eisenberg. Easigami: Virtual Creation by Physical Folding. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 41–48, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [26] Molycorp Inc. Very fine powder (mqfp) datasheet. http://www.mqitechnology.com/downloads/brochures_PDF/MQFP-Overview.pdf.
- [27] Yoshio Ishiguro and Ivan Poupyrev. 3D printed interactive speakers. In *CHI '14: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1733–1742, New York, New York, USA, April 2014. ACM Request Permissions.
- [28] Hiroshi Ishii. The tangible user interface and its evolution. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 32–36, 2008.
- [29] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 234–241, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [30] Tatsuya Kaihou and Akira Wakita. Electronic Origami with the Color-changing Function. In *Proceedings of the Second International Workshop on Smart Material Interfaces: Another Step to a Material Future*, pp. 7–12, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [31] Mustafa Emre Karagozler, Ivan Poupyrev, Gary K Fedder, and Yuri Suzuki. Paper Generators: Harvesting Energy from Touching, Rubbing and Sliding. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 23–30, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [32] Tadakazu Kashiwabara, Hirotaka Osawa, Kazuhiko Shinozawa, and Michita Imai. TEROOS: A Wearable Avatar to Enhance Joint Activities. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2001–2004, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [33] Jun Kato and Masataka Goto. Form Follows Function(): An IDE to Create Laser-cut Interfaces and Microcontroller Programs from Single Code Base. In *Adjunct Proceedings*

- of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 43–44, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [34] Jun Kato, Daisuke Sakamoto, and Takeo Igarashi. Surfboard: Keyboard with Microphone As a Low-cost Interactive Surface. In *Adjunct Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 387–388, New York, NY, USA, 2010. ACM.
 - [35] Yoshihiro Kawahara, Steve Hodges, Benjamin S Cook, Cheng Zhang, and Gregory D Abowd. Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices. In *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 363–372, New York, NY, USA, 2013. ACM.
 - [36] Mohammadreza Khalilbeigi, Roman Lissermann, Wolfgang Kleine, and Jürgen Steimle. FoldMe: interacting with double-sided foldable displays. In *TEI '12: Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 33–40, New York, New York, USA, February 2012. ACM Request Permissions.
 - [37] Wolf Kienzle and Ken Hinckley. LightRing: always-available 2D input on any surface. In *UIST '14: Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 157–160, New York, New York, USA, October 2014. ACM Request Permissions.
 - [38] Scott R Klemmer, Mark W Newman, Ryan Farrell, Mark Bilezikjian, and James A Landay. The Designers’ Outpost: A Tangible Interface for Collaborative Web Site. In *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2001. ACM.
 - [39] Sachiko Kodama. Dynamic ferrofluid sculpture: organic shape-changing art forms. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 79–81, 2008.
 - [40] Naoya Koizumi, Kentaro Yasu, Angela Liu, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Animated Paper: A Toolkit for Building Moving Toys. *Comput. Entertain.*, Vol. 8, No. 2, pp. 7:1–7:16, December 2010.
 - [41] V Kostov, J Ozawa, and S Matsuura. Wearable accessory robot for context aware apprise of personal information. In *Robot and Human Interactive Communication, 2004. ROMAN 2004. 13th IEEE International Workshop on*, pp. 595–600. IEEE, September 2004.
 - [42] Yuki Koyama, Shinjiro Sueda, Emma Steinhardt, Takeo Igarashi, Ariel Shamir, and Wojciech Matusik. AutoConnect: Computational Design of 3D-printable Connectors. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 6, pp. 231:1–231:11, October 2015.

- [43] Myron W Krueger, Thomas Gionfriddo, and Katrin Hinrichsen. VIDEOPLACE—an Artificial Reality. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 35–40, New York, NY, USA, 1985. ACM.
- [44] Ryota Kuwakubo. Nikodama. <http://www.mediascot.org/lefttomyowndevices/ryotakuwakubo/>.
- [45] Byron Lahey, Audrey Girouard, Winslow Burleson, and Roel Vertegaal. PaperPhone: Understanding the Use of Bend Gestures in Mobile Devices with Flexible Electronic Paper Displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1303–1312, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [46] Gierad Laput, Robert Xiao, Xiang 'Anthony Chen, Scott E Hudson, and Chris Harrison. Skin Buttons: Cheap, Small, Low-powered and Clickable Fixed-icon Laser Projectors. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 389–394, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [47] Brenda Laurel. *The Art of Human-Computer Interface Design*, 1990.
- [48] Jinha Lee, Rehmi Post, and Hiroshi Ishii. ZeroN: Mid-air Tangible Interaction Enabled by Computer Controlled Magnetic Levitation. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 327–336, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [49] Daniel Leithinger and Hiroshi Ishii. Relief: A Scalable Actuated Shape Display. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 221–222, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [50] I Scott MacKenzie. *Human-Computer Interaction: An Empirical Research Perspective*, 2013.
- [51] T Maeda and H Ando. Wearable robotics as a behavioral interface - the study of the Parasitic Humanoid. In *Wearable Computers, 2002. (ISWC 2002). Proceedings. Sixth International Symposium on*, pp. 145–151. IEEE, 2002.
- [52] Yasutoshi Makino, Yuta Sugiura, Masa Ogata, and Masahiko Inami. Tangential force sensing system on forearm. In *AH '13: Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference*, pp. 29–34, New York, New York, USA, March 2013. ACM Request Permissions.
- [53] Steve Mann. "Smart Clothing": Wearable Multimedia Computing and "Personal Imaging" to Restore the Technological Balance Between People and Their Environments. In *Proceedings of the Fourth ACM International Conference on Multimedia*, pp. 163–174, New York, NY, USA, 1996. ACM.

- [54] Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura, Masa Ogata, Katsuhiro Suzuki, Fumihiko Nakamura, Sho Shimamura, Kai Kunze, Masahiko Inami, and Maki Sugimoto. AffectiveWear: Toward Recognizing Facial Expression. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, pp. 4:1–4:1, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [55] Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura, Katsuhiro Suzuki, Sho Shimamura, Kai Kunze, Masa Ogata, Masahiko Inami, and Maki Sugimoto. AffectiveWear: Towards Recognizing Affect in Real Life. In *Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 357–360, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [56] Stephen A Mascaró and H Harry Asada. Photoplethysmograph fingernail sensors for measuring finger forces without haptic obstruction. *IEEE T. Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 5, pp. 698–708, 2001.
- [57] David A Mellis, Sam Jacoby, Leah Buechley, Hannah Perner-Wilson, and Jie Qi. Microcontrollers As Material: Crafting Circuits with Paper, Conductive Ink, Electronic Components, and an "Untoolkit". In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 83–90, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [58] Pranav Mistry and Pattie Maes. SixthSense: A Wearable Gestural Interface. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies: Adaptation*, pp. 85–85, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [59] Adiyanto Mujibiyanto, Xiang Cao, Desney S Tan, Dan Morris, Shwetak N Patel, and Jun Rekimoto. The Sound of Touch: On-body Touch and Gesture Sensing Based on Transdermal Ultrasound Propagation. In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 189–198, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [60] Yu Nagao, Haruka Yamaguchi, Kazuhiro Harada, Kaori Omura, and Masa Inakage. Whadget: Interactive Animation Using Personification Gesture Expression of Hand. In *ACM SIGGRAPH 2008 Posters*, pp. 102:1–102:1, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [61] Masashi Nakatani, Tomoyuki Kawasoe, Kouzo Shiojima, Kazumi Koketsu, Satoshi Kinoshita, and Jun Wada. Wearable contact force sensor system based on fingerpad deformation. *World Haptics*, pp. 323–328, 2011.
- [62] Kei Nakatsuma, Hiroyuki Shinoda, Yasutoshi Makino, Katsunari Sato, and Takashi Maeno. Touch Interface on Back of the Hand. In *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, pp. 19:1–19:1, New York, NY, USA, 2011. ACM.

- [63] Ian Oakley and Doyoung Lee. Interaction on the Edge: Offset Sensing for Small Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 169–178, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [64] Masa Ogata and Masaaki Fukumoto. FluxPaper: Reinventing Paper with Dynamic Actuation Powered by Magnetic Flux. In *CHI '15: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 29–38, New York, New York, USA, April 2015. ACM Request Permissions.
- [65] Masa Ogata and Michita Imai. SkinWatch: skin gesture interaction for smart watch. In *AH '15: Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, pp. 21–24, New York, New York, USA, March 2015. ACM Request Permissions.
- [66] Masa Ogata, Yuta Sugiura, and Michita Imai. FlashTouch: Touchscreen Communication Combining Light and Touch. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, pp. 11:1–11:1, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [67] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami, and Michita Imai. SenSkin: adapting skin as a soft interface. In *UIST '13: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 539–544, New York, New York, USA, October 2013. ACM Request Permissions.
- [68] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami, and Michita Imai. Augmenting a Wearable Display with Skin Surface as an Expanded Input Area. *HCI*, Vol. 8518, No. Chapter 57, pp. 606–614, 2014.
- [69] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. iRing: intelligent ring using infrared reflection. In *UIST '12: Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 131–136, New York, New York, USA, October 2012. ACM Request Permissions.
- [70] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. Pygmy: a ring-shaped robotic device that promotes the presence of an agent on human hand. In *APCHI '12: Proceedings of the 10th asia pacific conference on Computer human interaction*, pp. 85–92, New York, New York, USA, August 2012. ACM Request Permissions.
- [71] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. Pygmy: A ring-shaped robotic device for storytelling. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 9, No. 12, pp. 4619–4629, December 2013.
- [72] Masa Ogata, Ryosuke Totsuka, and Michita Imai. SkinWatch: Adapting Skin As a Gesture Surface. In *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, pp. 22:1–22:2, New York, NY, USA, 2015. ACM.

- [73] Masayasu Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. Pygmy: a ring-like anthropomorphic device that animates the human hand. In *CHI EA '12: Proceedings of the 2012 ACM annual conference extended abstracts on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts*, p. 1003, New York, New York, USA, May 2012. ACM.
- [74] Simon Olberding, Michael Wessely, and Jürgen Steimle. PrintScreen: fabricating highly customizable thin-film touch-displays. In *UIST '14: Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 281–290, New York, New York, USA, October 2014. ACM Request Permissions.
- [75] H Osawa, J Mukai, and M Imai. "Display Robot" - Interaction between Humans and Anthropomorphized Objects. In *Robot and Human interactive Communication, 2007. RO-MAN 2007. The 16th IEEE International Symposium on*, pp. 451–456. IEEE, August 2007.
- [76] Gian Pangaro, Dan Maynes-Aminzade, and Hiroshi Ishii. The Actuated Workbench: Computer-controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces. In *Proceedings of the 15th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 181–190, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [77] Amanda J Parkes, Ivan Poupyrev, and Hiroshi Ishii. Designing kinetic interactions for organic user interfaces. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 58–65, 2008.
- [78] James Patten and Hiroshi Ishii. Mechanical Constraints As Computational Constraints in Tabletop Tangible Interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 809–818, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [79] Roshan Lalintha Peiris and Suranga Nanayakkara. PaperPixels: a toolkit to create paper-based displays. In *OzCHI '14: Proceedings of the 26th Australian Computer-Human Interaction Conference on Designing Futures: the Future of Design*, pp. 498–504, New York, New York, USA, December 2014. ACM Request Permissions.
- [80] Kathrin Probst, Michael Haller, Kentaro Yasu, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Move-it Sticky Notes Providing Active Physical Feedback Through Motion. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 29–36, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [81] Jie Qi and Leah Buechley. Animating Paper Using Shape Memory Alloys. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 749–752, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [82] Jie Qi and Leah Buechley. Sketching in Circuits: Designing and Building Electronics on Paper. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1713–1722, New York, NY, USA, 2014. ACM.

- [83] Raf Ramakers, Kashyap Todi, and Kris Luyten. PaperPulse: An Integrated Approach for Embedding Electronics in Paper Designs. In *CHI '15: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2457–2466, New York, New York, USA, April 2015. ACM Request Permissions.
- [84] Jun Rekimoto. Organic interaction technologies: from stone to skin. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 38–44, 2008.
- [85] Jun Rekimoto. Squama: Modular Visibility Control of Walls and Windows for Programmable Physical Architectures. In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pp. 168–171, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [86] Jun Rekimoto. Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation. In *UIST '13: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 427–432, New York, New York, USA, October 2013. ACM Request Permissions.
- [87] Christian Rendl, David Kim, Sean Fanello, Patrick Parzer, Christoph Rhemann, Jonathan Taylor, Martin Zirkel, Gregor Scheipl, Thomas Rothländer, Michael Haller, and Shahram Izadi. FlexSense: a transparent self-sensing deformable surface. In *UIST '14: Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 129–138, New York, New York, USA, October 2014. ACM Request Permissions.
- [88] T Scott Saponas, Desney S Tan, Dan Morris, Ravin Balakrishnan, Jim Turner, and James A Landay. Enabling Always-available Input with Muscle-computer Interfaces. In *Proceedings of the 22Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 167–176, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [89] Munehiko Sato, Ivan Poupyrev, and Chris Harrison. Touché: enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects. In *CHI '12: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 483–492, New York, New York, USA, May 2012. ACM Request Permissions.
- [90] Greg Saul, Cheng Xu, and Mark D Gross. Interactive Paper Devices: End-user Design & Fabrication. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 205–212, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [91] Christian Schumacher, Bernd Bickel, Jan Rys, Steve Marschner, Chiara Daraio, and Markus Gross. Microstructures to Control Elasticity in 3D Printing. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 4, pp. 136:1–136:13, July 2015.
- [92] Carsten Schwesig. What makes an interface feel organic? *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 67–69, 2008.

- [93] Michael Shorter, Jon Rogers, and John McGhee. Enhancing Everyday Paper Interactions with Paper Circuits. In *Proceedings of the 2014 Conference on Designing Interactive Systems*, pp. 39–42, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [94] Rajinder Sodhi, Ivan Poupyrev, Matthew Glisson, and Ali Israr. AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 134:1–134:10, July 2013.
- [95] Jürgen Steimle, Andreas Jordt, and Pattie Maes. Flexpad: highly flexible bending interactions for projected handheld displays. In *CHI '13: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 237, New York, New York, USA, April 2013. ACM Request Permissions.
- [96] D J Sturman and D Zeltzer. A survey of glove-based input. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 14, No. 1, pp. 30–39, 1994.
- [97] Chao-Huai Su, Liwei Chan, Chien-Ting Weng, Rong-Hao Liang, Kai-Yin Cheng, and Bing-Yu Chen. NailDisplay: bringing an always available visual display to fingertips. In *CHI '13: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1461–1464, New York, New York, USA, April 2013. ACM Request Permissions.
- [98] Yuta Sugiura, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. A Thin Stretchable Interface for Tangential Force Measurement. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 529–536, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [99] 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 Photorefectivity Measurement. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 509–516, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [100] Yuta Sugiura, Calista Lee, Masayasu Ogata, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. PINOKY: a ring-like device that gives movement to any plush toy. In *CHI EA '12: Proceedings of the 2012 ACM annual conference extended abstracts on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts*, pp. 1443–1444, New York, New York, USA, May 2012. ACM.
- [101] Yuta Sugiura, Calista Lee, Masayasu Ogata, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. PINOKY: a ring that animates your plush toys. In *CHI '12: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 725–734, New York, New York, USA, May 2012. ACM Request Permissions.

- [102] Ivan E Sutherland. Sketchpad: A Man-machine Graphical Communication System. In *Proceedings of the May 21-23, 1963, Spring Joint Computer Conference*, pp. 329–346, New York, NY, USA, 1963. ACM.
- [103] Ivan E Sutherland. A Head-mounted Three Dimensional Display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, pp. 757–764, New York, NY, USA, 1968. ACM.
- [104] Kohei Tsuji and Akira Wakita. Anabiosis: An Interactive Pictorial Art Based on Polychrome Paper Computing. In *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 80:1–80:2, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [105] Y Tsumaki, Y Fujita, A Kasai, C Sato, D N Nenchev, and M Uchiyama. Telecommunicator: a novel robot system for human communications. In *Robot and Human Interactive Communication, 2002. Proceedings. 11th IEEE International Workshop on*, pp. 35–40. IEEE, 2002.
- [106] Roel Vertegaal and Ivan Poupyrev. Introduction. (Special Issue: Organic User Interfaces). *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 26–30, 2008.
- [107] Akira Wakita, Akito Nakano, and Nobuhiro Kobayashi. Programmable Blobs: A Rheologic Interface for Organic Shape Design. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 273–276, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [108] Martin Weigel, Vikram Mehta, and J u rgen Steimle. More Than Touch: Understanding How People Use Skin As an Input Surface for Mobile Computing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 179–188, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [109] Malte Weiss, Florian Schwarz, Simon Jakubowski, and Jan Borchers. Madgets: Actuating Widgets on Interactive Tabletops. In *Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 293–302, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [110] Malte Weiss, Chat Wacharamanotham, Simon Voelker, and Jan Borchers. FingerFlux: near-surface haptic feedback on tabletops. In *UIST ’11: Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 615–620, New York, New York, USA, October 2011. ACM Request Permissions.
- [111] Pierre Wellner. The DigitalDesk Calculator: Tangible Manipulation on a Desk Top Display. In *Proceedings of the 4th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 27–33, New York, NY, USA, 1991. ACM.

- [112] Norbert Wiener. *Cybernetics, Second Edition: Control and Communication in the Animal and the Machine*. The MIT Press, 1965.
- [113] Karl Willis, Eric Brockmeyer, Scott Hudson, and Ivan Poupyrev. Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices. In *UIST '12: Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 589–598, New York, New York, USA, October 2012. ACM Request Permissions.
- [114] Andrew D Wilson. PlayAnywhere: a compact interactive tabletop projection-vision system. In *UIST '05: Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 83–92, New York, New York, USA, October 2005. ACM Request Permissions.
- [115] Robert Xiao, Chris Harrison, and Scott E Hudson. WorldKit: Rapid and Easy Creation of Ad-hoc Interactive Applications on Everyday Surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 879–888, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [116] Robert Xiao, Gierad Laput, and Chris Harrison. Expanding the Input Expressivity of Smartwatches with Mechanical Pan, Twist, Tilt and Click. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 193–196, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [117] Lining Yao, Ryuma Niiyama, Jifei Ou, Sean Follmer, Clark Della Silva, and Hiroshi Ishii. PneuUI: Pneumatically Actuated Soft Composite Materials for Shape Changing Interfaces. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 13–22, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [118] Kentaro Yasu and Masahiko Inami. POPAPY: Instant Paper Craft Made Up in a Microwave Oven. In *Proceedings of the 9th International Conference on Advances in Computer Entertainment*, pp. 406–420, Berlin, Heidelberg, 2012. Springer-Verlag.
- [119] Shunsuke Yoshimoto, Yoshihiro Kuroda, Masataka Imura, and Osamu Oshiro. Superimposed Skin Pressure Sensor. In *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, pp. 23:1–23:4, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [120] Kening Zhu, Hideaki Nii, Owen Noel Newton Fernando, and Adrian David Cheok. Selective Inductive Powering System for Paper Computing. In *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 59:1–59:7, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [121] Kening Zhu and Shengdong Zhao. AutoGami: A Low-cost Rapid Prototyping Toolkit for Automated Movable Paper Craft. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 661–670, New York, NY, USA, 2013. ACM.

- [122] ドナルド・A・ノーマン, 野島久雄 (翻訳). 誰のためのデザイン?—認知科学者のデザイン原論. 新曜社, 1990.
- [123] ドナルド・A・ノーマン, 岡本明 (翻訳), 安村通晃, 伊賀聡一郎, 上野晶子. エモーショナル・デザイン. p. 105. 新曜社, 2004.
- [124] ブレンダ・ローレル, 上条史彦 (翻訳). ヒューマンインターフェースの発想と展開—人間のためのコンピューター, 2002.
- [125] 田村博. ヒューマンインタフェース. オーム社, 1998.
- [126] 暦本純一. 情報メディアから身体的メディアへ. 情報処理学会情報メディア研究会 (情報メディアシンポジウム講演資料), 1998.
- [127] 暦本純一. 情報メディアから身体的メディアへ. 建築雑誌, Vol. 114, No. 1437, pp. 60–61, April 1999.
- [128] ノーバート・ウィーナー (著), 池原 止戈夫 (翻訳), 彌永 昌吉 (翻訳), 室賀 三郎 (翻訳), 戸田 巖 (翻訳). ウィーナー サイバネティックス —動物と機械における制御と通信. 岩波文庫, 2011.