



Title	触覚情報を付与したインタラクティブサーフェスに関する研究
Author(s)	中島, 康祐
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/34571
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

触覚情報を付与した
インタラクティブサーフェスに関する研究

2014 年 1 月

中島 康祐

研究業績目録

I. 学術論文

1. 中島康祐, 伊藤雄一, 築谷喬之, 藤田和之, 高嶋和毅, 岸野文郎. FuSA² Touch Display: 大画面毛状マルチタッチディスプレイ. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 3, pp. 1069–1081, Mar. 2012.
2. Ryusuke Endo, Yuichi Itoh, Kosuke Nakajima, Kazuyuki Fujita, and Fumio Kishino. Digital signage supporting collaborative route planning in real commercial establishment. *ICIC Express Letters*, Vol. 6, No. 12, pp. 1–6, Dec. 2012.
3. Yusuke Hayashi, Yuichi Itoh, Kazuki Takashima, Kazuyuki Fujita, Kosuke Nakajima, and Takao Onoye. Cup-le: cup-shaped tool for subtly collecting information during conversational experiment. *International Journal of Advanced Computer Science*, Vol. 3, No. 1, pp. 44–50, Jan. 2013.
4. 藤田和之, 高嶋和毅, 伊藤雄一, 大崎博之, 小野直亮, 香川景一郎, 津川翔, 中島康祐, 林勇介, 岸野文郎. Ambient Suite を用いたパーティ場面における部屋型会話支援システムの実装と評価. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J96-D, No. 1, pp. 120–132, Jan. 2013.
5. 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄. Emoballoon: ソーシャルタッチインタラクションのための柔らかな風船型インターフェース. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 3, pp. 255–265, Sep. 2013.

II. 國際會議

1. Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Ai Yoshida, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino. FuSA2 Touch Display. *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, p. 11:1, Jul. 2010.
2. Kazuyuki Fujita, Yuichi Itoh, Hiroyuki Ohsaki, Naoaki Ono, Keiichiro Kagawa, Kazuki Takashima, Sho Tsugawa, Kosuke Nakajima, Yusuke Hayashi, and Fumio Kishino. Ambient Suite: enhancing communication among multiple participants. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '11)*, pp. 25:1-25:8, Nov. 2011.
3. Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Takayuki Tsukitani, Kazuyuki Fujita, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino. FuSA² Touch Display: furry and scalable multi-touchable display. In *Proceedings of ACM International Conference on Interactive Tabletop and Surfaces 2011 (ITS '11)*, pp. 35–44, Nov. 2011.
4. Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Takayuki Tsukitani, Kazuyuki Fujita, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino. FuSA² Touch Display. In *Proceedings of ACM International Conference on Interactive Tabletop and Surfaces 2011 (ITS '11)*, p. 286, Nov. 2011.
5. Yusuke Hayashi, Yuichi Itoh, Kazuki Takashima, Kazuyuki Fujita, Kosuke Nakajima, Ikuo Daibo, and Takao Onoye. Cup-le: a cup-shaped device for conversational experiment. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Ambient Information Technologies (AMBIT '12)*, pp. 36–37, Mar. 2012.
6. Kazuyuki Fujita, Yuichi Itoh, Hiroyuki Ohsaki, Naoaki Ono, Keiichiro Kagawa, Kazuki Takashima, Sho Tsugawa, and Kosuke Nakajima. Ambient Suite: room-shaped information environment for interpersonal communication. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Ambient Information Technologies (AMBIT '12)*, pp. 18–21, Mar. 2012.
7. Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Takayuki Tsukitani, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino. FuSA² Touch Display: furry and scalable multi-touch display. In *Proceedings of the 1st International Workshop on*

- Ambient Information Technologies (AMBIT '12)*, pp. 35–36, Mar. 2012.
8. Ryusuke Endo, Yuichi Itoh, Kosuke Nakajima, Kazuyuki Fujita, and Fumio Kishino. Planning-capable digital signage system using multi-touch display. In *Proceedings of the 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (APCHI '12)*, Vol. 2, pp. 545–554, Aug. 2012.
 9. Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Yusuke Hayashi, Kazuaki Ikeda, Kazuyuki Fujita, and Takao Onoye. Emoballoon. In *Proceedings of the 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (APCHI '12)*, Vol. 2, pp. 681–682, Aug. 2012.
 10. Kazuki Takashima, Yusuke Hayashi, Kosuke Nakajima, and Yuichi Itoh. Cup-embedded information device for supporting interpersonal communication. In *Proceedings of Joint Virtual Reality Conference of ICAT, EGVE and EuroVR (JVRC '12)*, pp. 19–20, Oct. 2012.
 11. Kazuyuki Fujita, Yuichi Itoh, Kazuki Takashima, Kosuke Nakajima, Yusuke Hayashi, and Fumio Kishino. Ambient Party Room: a room-shaped system enhancing communication for parties or gatherings. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Ambient Information Technologies (AMBIT '13)*, pp. 1–4, Mar. 2013.
 12. Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Yusuke Hayashi, Kazuaki Ikeda, Kazuyuki Fujita, and Takao Onoye. Emoballoon: a balloon-shaped interface recognizing social touch interactions. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Ambient Information Technologies (AMBIT '13)*, pp. 13–16, Mar. 2013.
 13. Yohei Kojima, Kazuma Aoyama, Yuichi Itoh, Kazuyuki Fujita, Taku Fujimoto, and Kosuke Nakajima. Polka dot: the garden of water spirits. *ACM SIGGRAPH 2013 Posters*, Article No. 47, Jul. 2013.
 14. Simon Voelker, Kosuke Nakajima, Christian Thoresen, Yuichi Itoh, Kjell Ivar Øvergård, and Jan Borchers. PUCs: detecting transparent, passive untouched capacitive widgets on unmodified multi-touch displays. In *Adjunct Publication of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '13 Adjunct)*, pp. 1–2, Oct. 2013.
 15. Simon Voelker, Kosuke Nakajima, Christian Thoresen, Yuichi Itoh, Kjell Ivar Øvergård, and Jan Borchers. PUCs demo: detecting transparent, passive untouched

- capacitive widgets. In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS '13)*, pp. 325–328, Oct. 2013.
16. Simon Voelker, Kosuke Nakajima, Christian Thoresen, Yuichi Itoh, Kjell Ivar Øvergård, and Jan Borchers. PUCs: detecting transparent, passive untouched capacitive widgets on unmodified multi-touch displays. In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS '13)*, pp. 101–104, Oct. 2013.
 17. Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Yusuke Hayashi, Kazuaki Ikeda, Kazuyuki Fujita, and Takao Onoye. Emoballoon: a balloon-shaped interface recognizing social touch interactions. In *Proceedings of 10th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '13)*, pp. 182–197, Nov. 2013.
 18. Yohei Kojima, Yuichi Itoh, Taku Fujimoto, and Kosuke Nakajima. Polka dot: the garden of water spirits. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH ASIA 2013 Emerging Technologies*, Article No. 15, Nov. 2013.

III. 査読あり国内研究会

1. 中島康祐, 伊藤雄一, 山抱加奈, 吉田愛, 高嶋和毅, 北村喜文, 岸野文郎. FuSA² Touch Display: 光ファイバを用いた毛状マルチタッチディスプレイ. インタラクション 2010 論文集, pp. 115–122, Mar. 2010.
2. 中島康祐, 伊藤雄一, 築谷喬之, 藤田和之, 高嶋和毅, 岸野文郎. FuSA² Touch Display. インタラクティブ東京 デモンストレーション展示, Aug. 2010.
3. 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄. Emoballoon: ソーシャルタッチインタラクションのための柔らかな風船型インターフェース. インタラクション 2013 論文集, pp. 95–102, Mar. 2013.
4. 安藤正宏, 細井俊輝, 中島康祐, 伊藤雄一, 北村喜文, 尾上孝雄. ブロック型デバイスのための赤外線を用いた積み重ね形状認識におけるブロック間距離の影響に関する検討. 日本バーチャルリアリティ学会研究報告（サイバースペースと仮想都市研究委員会 第 16 回シンポジウム論文集）, Vol. 18, No. CS-4, pp. 11–14, Dec. 2013.
5. 中島康祐, 伊藤雄一, Simon Voelker, Christian Thoresen, Kjell Ivar Øvergård, Jan

- Borchers. PUCs: 静電容量方式マルチタッチパネルにおけるユーザの接触を必要としないウィジェット検出手法. インタラクション 2014 論文集, Mar. 2014 (採択決定).
6. 中島康祐, 伊藤雄一, 遠藤隆介, 岸野文郎. 複合商業施設での複数人によるタイムスロット考慮型プランニングを実現するデジタルサイネージシステム. インタラクション 2014 論文集, Mar. 2014 (採択決定).

IV. 国内研究会・全国大会

1. 中島康祐, 伊藤雄一, 築谷喬之, 藤田和之, 高嶋和毅, 岸野文郎. FuSA² Touch Display: 大画面毛状マルチタッチディスプレイ. インタラクション 2011 論文集, pp. 547–550, Mar. 2011.
2. 林勇介, 伊藤雄一, 中島康祐, 藤田和之, 高嶋和毅, 大坊郁夫, 尾上孝雄. カップ型デバイス Cup-le を用いた会話実験支援手法. ヒューマンインターフェースシンポジウム 2011 論文集, pp. 405–408, Sep. 2011.
3. 藤田和之, 高嶋和毅, 伊藤雄一, 大崎博之, 小野直亮, 香川景一郎, 津川翔, 中島康祐. Ambient Suite: 部屋型情報空間を用いた対人コミュニケーション支援. ヒューマンインターフェースシンポジウム 2011 論文集, pp. 395–400, Sep. 2011.
4. 池田和章, 林勇介, 中島康祐, 伊藤雄一, 尾上孝雄. 風精一気圧センサと風船を用いたタッチインタラクション検出. エンタテインメントコンピューティング 2011 論文集, pp. 187–192, Oct. 2011.
5. 池田和章, 伊藤雄一, 中島康祐, 尾上孝雄. 様々な椅子での重心・重量による姿勢識別率に関する検討. ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 13, No. 7, pp. 33–38, Oct. 2011.
6. 竹中拓也, 岸野文郎, 藤田和之, 中島康祐, 伊藤雄一. 二者間の着座状態と会話の活性度の関係に関する検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 220, A-14-2, Mar. 2012.
7. 中川雄太, 藤井佑一, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. 立体毛状マルチタッチディスプレイの一検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 261, A-16-12, Mar. 2012.

8. 川幡尚亮, 藤井佑一, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. インテリアへの適用を考慮した毛状ディスプレイの耐荷重に関する検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 262, A-16-13, Mar. 2012.
9. 金田征悟, 藤井佑一, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. 毛状ディスプレイのための吹きかけインタラクションの検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 263, A-16-14, Mar. 2012.
10. 藤枝智子, 岸野文郎, 中島康祐, 池田和章, 伊藤雄一. 着座姿勢の歪みを是正するシステムに向けたセンシングの基礎検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 266, A-16-17, Mar. 2012.
11. 菊地佑介, 岸野文郎, 石原のぞみ, 中島康祐, 伊藤雄一. 形容詞クエリを用いた連想意味関係の名詞抽出に関する検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 267, A-16-18, Mar. 2012.
12. 児島陽平, 伊藤雄一, 藤田和之, 中島康祐, 尾上孝雄. 空間内の複数人員配置のための指示位置提示手法に関する検討. ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 14, No. 4, pp. 17–22, Jun. 2012.
13. 遠藤隆介, 伊藤雄一, 中島康祐, 藤田和之, 岸野文郎. マルチタッチディスプレイを用いたプランニングができるデジタルサイネージシステムの提案. ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 14, No. 4, pp. 37–42, Jun. 2012.
14. 藤本拓, 伊藤雄一, 石原のぞみ, 中島康祐, 尾上孝雄. タブレットデバイスと目の位置関係を考慮した電子書籍表示手法に関する検討. ヒューマンインターフェースシンポジウム 2012 論文集, pp. 701–704, Sep. 2012.
15. 中川雄太, 藤井佑一, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. 半球状の毛状マルチタッチディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会第 17 回大会論文集, pp. 300–303, Sep. 2012.
16. 藤井佑一, 岸野文郎, 藤田和之, 中島康祐, 伊藤雄一, 菊池日出男. U-brella: 降り注ぐ情報を可振化するポータブル傘型インターフェース. 日本バーチャルリアリティ学会第 17 回大会論文集, pp. 652–655, Sep. 2012.
17. 池田和章, 伊藤雄一, 中島康祐, 尾上孝雄. 着座時の座面重心と重量を用いた個人識別に関する検討. ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 14, No. 8, pp. 11–16, Sep. 2012.

18. 藤田和之, 伊藤雄一, 高嶋和毅, 中島康祐, 林勇介, 岸野文郎. Ambient Party Room: パーティ場面における部屋型会話支援システムの構築. ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 14, No. 8, pp. 7–10, Sep. 2012.
19. 中川雄太, 藤井佑一, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. 立体形状の毛状マルチタッチディスプレイ. エンタテインメントコンピューティング 2012 論文集, pp. 195–198, Sep. 2012.
20. 根本祐輔, 中川雄太, 藤井佑一, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. 吹きかけインタラクションのための入力検出法の検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 213, A-16-7, Mar. 2013.
21. 富田健太郎, 中川雄太, 藤井佑一, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. 毛状ディスプレイの触感変化に関する検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 214, A-16-8, Mar. 2013.
22. 内田将太郎, 岸野文郎, 池田和章, 中島康祐, 伊藤雄一. SenseChair を用いた眠気検出に関する検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集（基礎・境界）, p. 215, A-16-9, Mar. 2013.
23. 藤本拓, 伊藤雄一, 中島康祐, 土方義徳, 尾上孝雄. ついでタスク推薦のためのコンピュータ作業のクラスタリングに関する一検討. ARG Web インテリジェンスとインタラクション研究会 第 2 回研究会予稿集, pp. 13–14, May 2013.
24. 中川雄太, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. 半球状の毛状マルチタッチディスプレイにおけるタッチインタラクション認識. 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会論文集, pp. 659–660, Sep. 2013.
25. 井藤佑哉, 岸野文郎, 中島康祐, 伊藤雄一. 毛状ディスプレイの特定領域内の触感変化に関する検討. 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会論文集, pp. 390–391, Sep. 2013.
26. 安藤正宏, 細井俊輝, 中島康祐, 伊藤雄一, 北村喜文, 尾上孝雄. 積み木型ブロックデバイスのための赤外線による積み重ね認識手法に関する検討. ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 15, No. 7, pp. 125–128, Sep. 2013.
27. 遠藤隆介, 伊藤雄一, 中島康祐, 岸野文郎. 複合商業施設における複数人でのタイムスロット考慮型プランニングを実現するデジタルサイネージシステム. 情報処理学会研究報告集, Vol. 2013-HCI-155, No. 9, pp. 1–8, Oct. 2013.

V. 解説記事

1. 伊藤雄一, 中島康祐. ~「ふさふさ」した触り心地～光ファイバによる毛状マルチタッチディスプレイ. In *MATERIAL STAGE*, Vol. 11, No. 8, pp. 13–16, Nov. 2011.

VI. 書籍

1. 伊藤雄一, 中島康祐. “ふさふさ”感触マルチタッチディスプレイの開発. 次世代ヒューマンインターフェース開発最前線, 株式会社エヌ・ティー・エス, pp. 523–531, Jun. 2013.
2. 伊藤雄一, 中島康祐. 「ふさふさ」した触り心地を実現する光ファイバによる毛状マルチタッチディスプレイ. スマートフォン・タッチパネル部材の最新技術便覧, 株式会社技術情報協会, pp. 570–574, Jun. 2013.

VII. 特許

1. 特願 2012-199760, 伊藤雄一, 中島康祐, 児島陽平. 情報表示装置および撥液加工基材. Sep. 2012.

内容梗概

コンピュータと人とのインタラクションは、コンピュータが理解しやすい表現を使ったインタラクションから、人が慣れ親しんできた表現を使ったインタラクションへと拡張されてきた。かつてはデータや命令を入力するための方法を学習しなければコンピュータは扱えなかつたが、今日では、年齢や技能に関わらず、多くの人々がコンピュータを通じて様々なサービスを享受している。この背景には、コンピュータのインターフェースがコマンド入力に基づくものから、実世界のメタファを導入したグラフィカルなインターフェース、さらには画面に直接触れて操作できるインタラクティブサーフェスへと発展し、人にとって理解しやすい方法で人とコンピュータがインタラクションできるようになってきた歴史がある。

しかし、人が人とコミュニケーションをしたり周囲の物体を操作したりする場合に比べると、人とコンピュータとのインタラクションに用いられる動作は非常に限られている。人ととのコミュニケーションにおいて、人が意図や感情を対象に表現する場合には、握手や抱擁、殴打のような身体的な接觸（タッチインタラクション）が用いられる。こうしたタッチインタラクションをコンピュータに対して入力できるインターフェースとして、タッチスクリーンに代表されるインタラクティブサーフェスがあるが、これらの多くは画面上でユーザが触れた座標を検出するだけのものであり、触れる圧力や面積などといった、握手や抱擁などのコミュニケーションに相当する重要な要素は考慮されない。また、多くのタッチスクリーンは入出力面が平面であり、感触も硬いために、人がコミュニケーションをする方法でインタラクションできるものではない。そのため、人とコンピュータとのインタラクションの様式は、人同士のコミュニケーションの様式から乖離してしまっている。人ととのコミュニケーションで用いられるタッチインタラクションをコンピュータとの対話に利用するためには、接触対象の形状や触覚的な特性を、人や動物の皮膚や毛髪などに近付けていくことが有効であると考えられる。

そこで、本論文では、人と人のコミュニケーションに学んだ方法によるコンピュータとのインタラクションの実現を目指し、触覚情報を付与したインタラクティブサーフェスを提案する。触覚情報として、特に動物や人の皮膚、および毛髪の感触に着目し、これらの物理的な特性を備えたインタラクティブサーフェスを実現する。これにより、人ととのコミュニケーションで用いられるタッチインタラクションに学んだ操作方法をユーザに提供でき、ユーザはより直感的に意図や感情を入力できるようになると期待される。

まず、毛髪を介した触れ合い方でインタラクションできるインタラクティブサーフェスとして、毛状物体の表面にマルチタッチ検出と視覚フィードバック提示の機能を統合した毛状マルチタッチディスプレイについて検討する。この毛状マルチタッチディスプレイは光ファイバでできた毛の上に映像を表示でき、また、マルチタッチ検出も可能となっている。これにより、ユーザは毛髪を触れたり撫でたりするような動作で表示された情報と触れ合えるようになる。

続いて、握手や抱擁、殴打などといった、皮膚を介したタッチインタラクションを入力できるインタラクティブサーフェスの実現に向けて、弾性体を利用したタッチインタラクション識別手法を提案し、これを適用した風船型インターフェースを実現する。特に、柔らかく、形状を変化させやすい弾性体である天然ゴムの風船を利用して検討を進め、その内気圧を利用したタッチインタラクション識別手法を提案する。また、その識別手法に基づいて風船型インターフェースを実装し、その識別性能を評価する。

本論文は、全 5 章で構成される。第 1 章にて序論を述べ、第 2 章では、マルチタッチスクリーンをはじめとするインタラクティブサーフェスや、それらとのインタラクション手法について述べる。まず、マルチタッチスクリーンをはじめとする基本的なインタラクティブサーフェスの構成と、タッチインタラクションを拡張する様々な手法について述べる。続いて、形状変化が可能な素材を用いたインタラクティブサーフェスであるオーガニックユザインターフェースについて述べる。特に柔らかな素材を入出力の界面に用いるインタラクティブサーフェスや、毛状物体を用いたインターフェースについて紹介する。最後に、物体を持った手が、どのようにそれを持っているかを認識する手法について述べる。

第 3 章では、毛髪を介した触れ合い方でインタラクションできるインタラクティブサーフェスとして、毛状マルチタッチディスプレイ “FuSA² Touch Display” について検討した結果を述べる。まず、屈曲した光ファイバを用い、奥行きのコンパクトな構成を適用した

毛状マルチタッチディスプレイについて検討する。続いて、赤外線によるタッチ検出手法を適用することで、表示映像を高コントラスト化しつつ、スクリーンの面積を拡張しやすいシステム構成を提案する。また、この構成に基づいて、大画面毛状マルチタッチディスプレイを実装する。実装した大画面毛状マルチタッチディスプレイを用いて、撫でたりかきむしったりする動作を入力できることを確認するほか、毛状マルチタッチディスプレイが誘発する入力動作を、ユーザスタディを通じて考察する。

第4章では、皮膚との触れ合い方である抱擁や殴打といった動作を入力できるインタラクティブサーフェスの実現に向けて、気体を封入した弾性体の特性を利用してタッチインタラクションを識別する手法と、それを用いて実装した風船型インターフェースについて検討する。タッチインタラクションの認識に重要と考えられる要件について検討したうえで、弾性体を用いたタッチインタラクションの識別手法を提案する。その後、把持や抱擁、殴打などのタッチインタラクションを認識するための風船型インターフェース“Emoballoon”を実装する。検討には天然ゴムの風船を用い、弾性体の物理的な特性の評価や、識別対象とする動作の抽出を行った上で、タッチインタラクションの識別手法を述べる。提案手法に基づいて実装した風船型インターフェースを用いて識別性能を評価し、提案手法によって、人の皮膚を介して行われる様々なタッチインタラクションが効果的に識別できることを確認する。

最後に第5章では、本研究で得られた成果を結論として要約する。

謝辞

本研究をまとめるにあたり，研究に対する考え方，研究者としての姿勢などについて懇切なる御指導，御支援を賜わりました大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻 尾上 孝雄 教授に深く感謝申し上げます。

本研究の全過程を通じて，研究に対する視点の持ち方，研究を進める上で背景となる技術動向の捉え方，研究の展望などについて懇切なる御指導，御支援を賜わりました関西学院大学理工学部 岸野 文郎 教授に深く感謝申し上げます。

本研究の全過程を通じて，直接の御指導，御助言，御討論を賜りました大阪大学クリエイティブユニット 伊藤 雄一 准教授に深く感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり，貴重なお時間を割いて頂き，懇切なる御指導と有益な御助言を賜りました大阪大学サイバーメディアセンター 竹村 治雄 教授，大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻 橋本 昌宜 准教授に心より感謝申し上げます。

大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻 今井 正治 教授，中前 幸治 教授，土屋 達弘 教授，中村 真 教授，山田 晃久 教授，吉田 育弘 教授には様々な面で御指導を頂き，厚く感謝申し上げます。

本研究を推進するにあたり，研究方針に関して御助言頂き，様々な場面で惜しみない御指導，御支援を頂きました東北大学電気通信研究所 北村 喜文 教授に心より感謝申し上げます。

本研究を推進するにあたり，日頃から惜しみない御支援，御討論を頂きました東北大学電気通信研究所 高嶋 和毅 助教に心より感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり，研究方針に関して御助言，御討論を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻 畠中 理英 助教，高知工科大学システム工学群 密山 幸男 講師，明治大学理工学部 宮本 龍介 講師に心より感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり，研究に対する考え方，研究者としての姿勢などについて御

指導を頂きました大阪大学 白川 功 名誉教授に心より感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり、研究方針に関して御討論を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 細田 耕 教授、清水 正宏 准教授、池本周平 助教、成岡 健一 特任助教に心より感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、デバイスの実装に懇切なるご指導を頂きました株式会社システムワット 菊地 日出男 氏に心より感謝致します。

共同研究者として、有益な御討論を頂き、多大なる御支援を頂きました宮城学院女子大学発達臨床学科 足立 智昭 教授、関西学院大学理工学部 大崎 博之 教授、静岡大学電子工学研究所 香川 景一郎 准教授、大阪大学大学院基礎工学研究科 土方 義徳 准教授、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 小野 直亮 助教、筑波大学システム情報工学研究科 津川 翔 助教に心より感謝申し上げます。

共同研究者として、対人社会心理学に関して有益な御助言、御討論を頂きました東京未来大学 大坊 郁夫 学長、東北大学電気通信研究所 横山 ひとみ 博士、京都大学経営管理大学院経営管理研究部 藤原 健 博士、平井（前田） 奈穂 さんに厚く御礼申し上げます。

海外インターンシップ中に、本研究への暖かい御助言を頂き、種々の面でご支援頂くとともに、共同研究者として御指導、御討論を頂きましたアーヘン工科大学 Jan Borchers 教授、Simon Voelker 氏に深く感謝致します。

海外インターンシップ中に、共同研究者として御助言、御討論を頂きました Vestfold University College の Kjell Ivar Øvergård 教授、Christian Thoresen 氏に深く感謝致します。

研究、私生活を通じ、惜しみない御指導、御助言、御協力を頂きました大阪電気通信大学 大西 克彦 准教授、株式会社ユニティ 村上 礼繁 氏、三菱電機株式会社 櫻井 智史 博士、大阪大学産業科学研究所 丹羽 真隆 博士、沖電気工業株式会社 山口 徳郎 博士、三菱電機株式会社 築谷 喬之 博士、株式会社イトーキ 藤田 和之 博士に深く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、著者の所属した研究チームの先輩として、多大なる御指導、御支援を頂きましたパナソニック株式会社 小川 兼人 氏、株式会社 NTT データ 山下（山抱） 加奈 さん、三菱電機株式会社 前川 拓也 氏、株式会社日立製作所 利國（吉田） 愛 さんに深く感謝の意を表します。

株式会社ゼネラルリソース 遠藤 隆介 氏、レノボ・ジャパン株式会社 石原 のぞみ さん、富士通株式会社 林 勇介 氏、株式会社ブリヂストン 池田 和章 氏、大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻 児島 陽平 氏、藤本 拓 氏、安藤 正宏 氏、宮崎 陽平 氏、東

北大学電気通信研究所 細井 俊輝 氏，明石市役所 藤井 佑一 氏，関西学院大学大学院理工学研究科人間システム工学専攻 菊地 佑介 氏，中川 雄太 氏にも研究を進める上で日頃から有益な御討論を頂いたことに感謝の意を表します。

パナソニック株式会社 岡田 雅司 博士，株式会社東芝 天木 健彦 博士，Dawood Alnajjar 博士，Igors Homjakovs 博士，大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻 劉 載勲 助教，郡浦 宏明 氏，原田 謙 氏，趙 文軍 氏，Twe Ta Oo 氏，高 永勲 氏にも研究を進める上で日頃から貴重な御支援を頂いたことに感謝の意を表します。

研究，私生活を通じ，多数の貴重な御助言，御支援を頂いた，大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻 尾上研究室，マルチメディア工学専攻 旧岸野研究室，細田研究室，ならびにアーヘン工科大学コンピュータサイエンス学部 Media Computing Group の諸氏に心から感謝致します。

多くのご支援を頂いた尾上研究室秘書 中村 万裕子 さん，近藤 友美 さん，細田研究室秘書 安永 美樹 さんに厚く御礼申し上げます。

最後に，研究生活を送る上で，暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた，両親を始めとする家族に心から感謝と御礼を申し上げます。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本論文の構成	6
第2章 インタラクティブサーフェスの構成手法とその拡張	9
2.1 インタラクティブサーフェス	9
2.1.1 タッチ検出手法	10
2.1.2 タッチインタラクションの拡張	13
2.2 オーガニックユーザインターフェース	18
2.2.1 柔らかな素材を用いたインタラクティブサーフェス	20
2.2.2 弹性体を用いたインターフェース	21
2.2.3 毛状物体を用いたインターフェース	24
2.3 把持や接触状況を認識するインターフェース	27
2.4 まとめ	29
第3章 毛状マルチタッチディスプレイ “FuSA² Touch Display”	31
3.1 はじめに	31
3.2 屈曲した光ファイバによるコンパクトな毛状マルチタッチディスプレイ .	33
3.2.1 概要	33
3.2.2 システム構成	33
3.2.3 タッチ検出手法	33
3.2.4 実装	36
3.2.5 特性評価	39

3.2.6	考察	41
3.3	赤外線によるマルチタッチ検出方式を適用した毛状マルチタッチディスプレイ	43
3.3.1	概要	43
3.3.2	システム構成	45
3.3.3	実装	46
3.3.4	特性評価	50
3.3.5	ユーザスタディ	55
3.3.6	インタラクションの様子	59
3.3.7	考察	60
3.4	応用例	65
3.5	おわりに	66
第4章	柔らかな風船型インターフェース “Emoballoon”	67
4.1	はじめに	67
4.2	風船の特性評価とソーシャルタッチインタラクションの抽出	69
4.2.1	風船による加圧検出	69
4.2.2	風船に対するソーシャルタッチインタラクション	70
4.3	柔らかな風船型インターフェース “Emoballoon”	72
4.3.1	システム構成	72
4.3.2	実装	75
4.3.3	識別処理	75
4.4	評価	78
4.5	考察	79
4.5.1	ソーシャルタッチインタラクションの認識	79
4.5.2	入力識別モジュールとしての識別性能	81
4.5.3	柔らかさと安全性	82
4.5.4	アプリケーション	82
4.6	おわりに	84
第5章	結論	85

表目次

3.1	日本人青年男女の手のひらの大きさの平均	41
3.2	設計パラメタとその影響について	64
4.1	観察された中で納得感の評点が4より高い動作	73
4.2	参加者内識別の平均識別率 (セル内の色が濃いほど識別率が高いことを意味する)	79

図目次

1.1	本研究が対象とする領域と提案内容の位置付け	5
2.1	SmartSkin	11
2.2	SmartSkin でのマルチタッチ検出	11
2.3	HoloWall でのタッチ検出原理	12
2.4	FTIR のタッチ検出原理	12
2.5	ThinSight の基本的な構成	13
2.6	BiDi Screen	13
2.7	Medusa	15
2.8	Z-touch でのタッチ検出	16
2.9	HACHIStack におけるタッチ速度検出原理	16
2.10	SmartSkin での実物体の利用	17
2.11	SLAP Widget	17
2.12	Harrison らによる凹凸制御が可能なタッチスクリーン	19
2.13	inFORM	19
2.14	Paper Windows	20
2.15	Gummi	20
2.16	GelForce	21
2.17	UnMousePad	21
2.18	Stevenson らによるゴム膜を用いた半球状のマルチタッチスクリーン	22
2.19	FuwaFuwa	24
2.20	InflatableMouse	24
2.21	Hairytop Interface	25

2.22	Sprout I/O	25
2.23	Fur-Fly	26
2.24	LightCloth	26
2.25	Graspables	28
2.26	Touch & Activate のシステム構成	28
3.1	屈曲した光ファイバを用いた毛状マルチタッチディスプレイのシステム構成	34
3.2	タッチ検出の原理	35
3.3	プロジェクタと液晶シャッタの動作	35
3.4	実装システムでのインタラクション	37
3.5	「イ」を表示する毛状ディスプレイ	37
3.6	実装した毛状マルチタッチディスプレイの外観	37
3.7	タッチ検出のための画像処理	39
3.8	スクリーン面における POF 露出長の変化	40
3.9	タッチ領域面積とタッチ認識率の変化	41
3.10	大画面毛状マルチタッチディスプレイ	44
3.11	大画面毛状マルチタッチディスプレイの構成	44
3.12	赤外線によるタッチ検出手法	45
3.13	POF 束	47
3.14	赤外線 LED を実装した基板	48
3.15	梯子状のフレーム	48
3.16	毛状ディスプレイモジュール	48
3.17	モジュール内の赤外線 LED	48
3.18	実装した毛状マルチタッチディスプレイの概観	49
3.19	タッチ検出の特性	52
3.20	様々なインсталレーション	57
3.21	アンケート結果	59
3.22	来場者がインタラクションする様子の一例。左から順に、複数人での同時インタラクションの様子、頬ずりする様子、指先でなぞる様子を示す。	60
3.23	文字列の表示例	62

4.1	Emoballoon の概念図	69
4.2	加圧時の風船内気圧の変化	70
4.3	行った動作に対する納得感と思いつきやすさの平均	72
4.4	風船を用いて実装した Emoballoon	74
4.5	システム構成	75
4.6	音を伴う動作によって生じた音響のスペクトル分布 (1,024 サンプル毎のスペクトル。青が低いパワー、赤が高いパワーを表す。)	76
4.7	各入力動作時の気圧の変化	77
4.8	アプリケーション例	83

第 1 章

序論

1.1 研究背景

コンピュータと人とのインタラクションは、コンピュータにとって理解しやすい方法を人が用いることで始まった。古くはパンチカードシステムに代表されるように、ユーザはコンピュータが解釈できる特殊な形式でデータや命令を入力する必要があった。Command Line Interface (CLI) が開発されると、ユーザはキーボードを用いた文字入力でデータや命令を入力できるようになり、ユーザの入力効率は大きく改善した。ユーザの入力とコンピュータの出力は画面にそれぞれテキストとして表示され、この画面を界面としてインタラクションが行われる。CLI は大量のデータを扱ったり似た処理を反復したりする処理に長けており、また、ユーザとコンピュータとのインタラクションが文字列のみで行われるため、インターフェースの表示にかかる負荷が少ない。こうした利点から CLI は現在でも Unix 系の Operating System (OS) で標準的に用いられている。一方で、CLI を扱うためにはユーザが専用のコマンドを習得する必要があり、その学習コストは非常に高い。そのため、コンピュータは高い学習コストに見合うだけの成果を挙げられる限的な用途に用いられてきた。

1960 年代には Douglas Engelbart らにより Graphical User Interface (GUI) の原型と呼べる oN-Line System (NLS) が開発された [1]。GUI とは、グラフィカルな表現を通じてコンピュータとユーザがインタラクションするインターフェースのことを指す。NLS では、画面に複数のウインドウとマウスカーソルが表示され、その上で Hypertext を操作するという作業環境が実現されている。その後、ウインドウ (Window), アイコン (Icon), メニュー

(Menu), ポインタ (Pointer) の 4 つの要素を備えた WIMP という概念を持つ GUI 環境が確立されていく。WIMP では、データやアプリケーションのまとまりがひとつのアイコンとして、また、ある命令セットがメニューとして画面に表示され、ユーザはそれらを画面上のポインタ（マウスカーソル）でポインティングしたり選択したりすることで、コンピュータを操作できる。画面に表示されるアイコンは実世界のオブジェクトを模倣した外観を備え、アイコンの見た目でその機能をユーザに想起させる。こうしてインターフェースに実世界のメタファが取り入れられたことで、コンピュータの機能がユーザにとって理解しやすくなり、学習コストは軽減された。現在では、WIMP に基づく GUI は Windows や Mac OS, Linux などの主要な OS で広く採用され、高度な知識や複雑なコマンドを知らないユーザでもコンピュータを操作することが可能になった。

GUI を採用したデスクトップ環境においては、入力インターフェースとして主にマウスとキーボードが用いられる。マウスはポインタを正確に素早く操作する上で非常に有効なデバイスであり、キーボードは高速な文字入力に適したデバイスである。一方で、携帯端末ではタッチスクリーンが盛んに導入されている。タッチスクリーンでは画面に表示されたオブジェクトに直接指で触れることでポインティングができる。これにより入力空間と出力空間を一致させることができるために、小型の端末でも広い面積を視覚ディスプレイにできる利点がある。このように、ユーザの入力空間とコンピュータの出力空間とが一致したインターフェースは、インタラクティブサーフェスと呼ばれる [2,3]。タッチスクリーンを指先で操作する場合、マウスでの操作に比べて精密なポインティングは難しいが、関心のある領域に触れれば操作できるため、操作方法が一層わかりやすい。現在では、スマートフォン [4] やタブレット [5]、銀行 ATM や空港等のターミナル端末、ゲーム機 [6] まで、多くの機器にタッチスクリーンが導入されている。

このように、コンピュータが持つ視覚ディスプレイを界面としたインタラクションは、コンピュータが解釈しやすいコマンドを入力とする CLI から、実世界のメタファを導入した GUI、さらには GUI に直接触れて操作できるインタラクティブサーフェスへと、人にとって理解しやすい操作体系へと拡張されてきた。

しかし、人が周囲の人とコミュニケーションしたり、周囲の物体を操作したりする場合には、発話やジェスチャ、また、握手や抱擁のような身体的な接触が意図や感情を表現するために用いられることに比べると、人とコンピュータとのインタラクションでは、非常に限られた入力方法しか利用されていない。もし人が意図や感情を伝達するために用いる

多彩な表現をコンピュータが認識できれば、ユーザはさらに直感的に自身の意図をコンピュータに入力できるようになると期待できる。

こうした背景のもと、これまでにも人ととのコミュニケーションで見られる表現を認識する技術が開発されてきた [7–10]。音声入力技術 [7] はその典型例といえる。これは人の音声発話を文字情報に変換する技術であるが、近年では精度よく発話を認識することが可能になり、携帯端末には文字入力の手段として音声認識機能が導入されるようになった。そのほかにも、音声入力と自然言語処理とを組み合わせることで、ユーザが音声で入力した指示や疑問を理解し、それらに適切に応答するエージェント型のサービス [8,9] も実現している。また、ユーザの身体動作を認識するモーションキャプチャ技術も開発されてきた。特に、画像と同時に深度情報を取得できるデプスカメラを用いた身体のトラッキング技術が普及しつつある [10]。このカメラを用いれば、ユーザは専用の装置を装着しなくとも、デプスカメラの前に立ってパントマイムをするように振る舞うだけで、腕や足のモーションをコンピュータに入力でき、ジェスチャや指差しを利用してコンピュータとのインタラクションを進められる。

こうした発話やモーションのほかにも、握手や抱擁などが親しみを伝える手段として利用されるように、身体的な接触を伴うインタラクション（タッチインタラクション）もコミュニケーションにおいて重要な役割を担っている。特に握手や抱擁、頭部への撫で、あるいは殴打など、意図や感情を伝えるためのタッチインタラクションはソーシャルタッチインタラクションと呼ばれる [11]。タッチスクリーンに代表されるインタラクティブサーフェスでは、主に画面に触れた指先の二次元座標が検出され [4–6]、ユーザはオブジェクトを指で触れたり、ある方向に引きずるように撫でたりしてコンピュータとのインタラクションを行える。複数のタッチ点を同時に検出できるマルチタッチスクリーンでは、ピンチインやピンチアウトのような複数の指でのジェスチャ操作が導入され [12,13]、指の動きと画面の変化が空間的に連動するインタラクションも可能となり、ますます直感的なインタラクションが可能となっている。

しかし、人ととのコミュニケーションにおけるタッチインタラクションにおいては、触れる位置だけでなく、触れる際に加わる圧力や触れる面積なども意図や感情を表現するために用いられている [14]。例えば、人が人と握手する場合には、伝えようとする意図や感情に応じて握る強さや握手を続ける時間を調整していると考えられる。これに対して、接触時の圧力や面積を検出できるインタラクティブサーフェスは少ない。また、圧力や接

触面積の広さなどを検出できるインタラクティブサーフェスにおいてもなお、それに対するユーザの入力動作は、人ととのコミュニケーションで見られる握手や抱擁、撫でる動作などのタッチインタラクションで用いられる表現とは乖離したものとなっている。

そこで、本研究では、こうした乖離を解消し、人ととのコミュニケーションで見られるタッチインタラクションに学んだ方法でコンピュータとインタラクションできるインターフェースの実現を目指す。これによって、ユーザはより直感的に自身の意図をコンピュータに対して表現できるようになると期待できる。特に、人ととのコミュニケーションで用いられる握手や抱擁、撫でなどのソーシャルタッチインタラクションが、毛髪や皮膚といった人の体表面を介して行われることに着目し、毛髪や皮膚を介した触れ合いに学んだコンピュータとのインタラクションを実現する。

人とコンピュータとのインタラクションと、人と周囲の物体との触れ合い方との乖離を縮め、人と周囲の物体との触れ合いを模擬した動作でコンピュータとインタラクションできるようにすることを指向したインターフェースとして、Organic User Interface (OUI) が提案されている [3, 15, 16]。OUI では、紙や粘土といった物体を介してコンピュータに入力できるようにすることで、身近な物体の操作方法を取り入れた直感的なインタラクションが実現されている [17, 18]。これにより、ユーザは、コンピュータに固有の操作方法を覚えなくても、複雑な三次元形状を入力したり、ウインドウを操作したりできる。OUI では、スクリーンの形状や感触といった触覚的な特性を適切に設計しているという特徴がある [15, 16]。周囲の物体に類似した形状や感触をインターフェースに付与することで、様々な触れ合い方がユーザに想起され、また、実際にその触れ合い方を使ってコンピュータとインタラクションできるようになっている。従って、本研究において、人ととのコミュニケーションで用いられるタッチインタラクションをコンピュータとのインタラクションに利用するためには、接触する対象の形状や触覚的な特性を人や動物の毛髪や皮膚に近付けていくことが有効であると考えられる。

そこで、本論文では、人と人のコミュニケーションに学んだ方法によるコンピュータとのインタラクションの実現に向けて、触覚情報を付与したインタラクティブサーフェスを提案する。触覚情報として特に動物や人の毛髪、および皮膚の感触に着目し、これらの特性を備えたインタラクティブサーフェスを実現することで、人ととのコミュニケーションで用いられるタッチインタラクションを入力可能とし、より直感的に意図や感情を入力できる操作方法をユーザに提供できると考えられる。

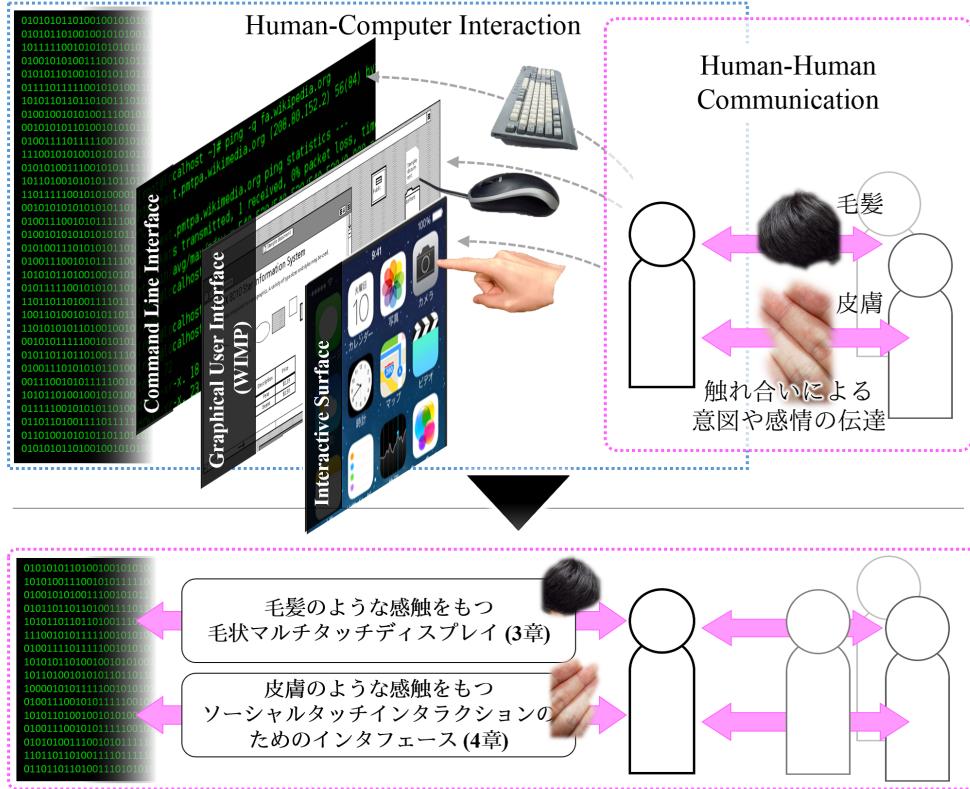


図 1.1: 本研究が対象とする領域と提案内容の位置付け

図 1.1 に本論文において検討する提案内容の位置付けを示す。毛髪のような感触を備えたインタラクティブサーフェスとして、毛状物体の表面にマルチタッチ検出と視覚フィードバック提示の機能を統合した毛状マルチタッチディスプレイについて検討する。特に、毛髪を介した触れ合い方である、撫でる動作やかきむしる動作をユーザが入力できるようすることを目指し、毛状表面においてマルチタッチ検出が可能なディスプレイとして実現する。このディスプレイでは、光ファイバを毛として利用することで入出力の機能を毛状物体の表面に統合し、毛髪を触れたり撫でたりする動作でコンピュータとインタラクションできるインターフェースを提案する。続いて、人の皮膚に見られるような柔らかさを備えたインタラクティブサーフェスの実現について検討する。特に、皮膚を介した触れ合い方である、握手や抱擁といったタッチインタラクションを入力できるよう、これらの動作を識別する技術を検討し、これを適用した柔らかなインターフェースを実現する。こうした柔らかなインターフェースの実現に向けて、動作の識別に有効な特性を備えた物体としてゴム風船のような内部に空間を持った密閉体に着目し、その特性を利用したタッチインタラクション識別手法を検討する。また、このタッチインタラクション識別手法に基づき、

把持や抱擁といったタッチインタラクションを識別可能なインターフェースをゴム風船を用いて実装し、これを評価する。

以上の研究を通じて、人ととのコミュニケーションにおいて用いられるタッチインタラクションを利用可能な、触覚情報を付与したインタラクティブサーフェスの構成方法や特性、および、それを用いた場合の効果について考察する。

1.2 本論文の構成

本論文は、全5章で構成される。

第2章では、マルチタッチスクリーンをはじめとするインタラクティブサーフェスや、それらとのインタラクション手法について述べる。まず、マルチタッチスクリーンをはじめとする基本的なインタラクティブサーフェスの構成について述べる。接触した指の二次元座標値以外の物理量や周囲のコンテキストを認識することで、インタラクション手法を拡張する技術についても紹介する。続いて、入出力の界面に柔らかな素材を用いたインタラクティブサーフェスであるオーガニックユーザインターフェースについて述べる。特に、弾性体を入出力面に用いたインターフェースや、毛状物体を用いたインターフェースについて紹介し、それらが可能にする新たなインタラクションについて論じる。最後に、物体を持った手が、どのようにそれを把持しているかを認識する技術について、ソーシャルタッチインタラクションの認識という観点から議論する。

第3章では、毛髪のような触覚的特性を備えたインタラクティブサーフェスとして、毛状マルチタッチディスプレイについて検討する。光ファイバを毛状物体に用い、その表面に映像表示とマルチタッチ検出の機能を統合する。ここでは屈曲した光ファイバを用いた奥行きの小さい構成と、赤外線によるタッチ検出を適用し、大画面化を容易にした構成の2つの構成を提案し、それぞれで毛状マルチタッチディスプレイを実装する。大画面可能な構成に基づいて実装した24インチの毛状マルチタッチディスプレイを用いて、その表示特性やタッチ入力の特性を評価するほか、毛状マルチタッチディスプレイが誘発する入力動作についてユーザを観察した結果から考察する。

第4章では、皮膚表面のような柔らかさを備えたインタラクティブサーフェスの実現に向けて、弾性体を利用して抱擁や殴打などのタッチインタラクションを認識する手法と、それを用いて実装した風船型インターフェースについて検討する。風船のような気体が封入された弾性体をソーシャルタッチインタラクションのためのインターフェースに用いること

の妥当性について基礎的な検討を行ったうえで、風船型インターフェース“Emoballoon”を実装する。また、実装した風船型インターフェースを用いて提案したソーシャルタッチインタラクション識別手法の精度を評価し、これを利用した応用例について述べる。

最後に第5章では、本研究で得られた成果を結論として要約する。なお、それぞれ第3章は文献[19–26]、第4章は文献[27–32]で公表した結果に基づき論述する。

第 2 章

インタラクティブサーフェスの構成 手法とその拡張

本章ではまず、マルチタッチスクリーンをはじめとする基本的なインタラクティブサーフェスについて述べた上で、タッチ時のコンテキストやタッチした指の状態を認識することでタッチ入力によるインタラクションを拡張する研究について述べる。次に、柔らかく、形状変化が可能な素材を用いたインタラクティブサーフェスである、オーガニックユーザインターフェースについて述べる。続いて、物体を持った手が、どのようにそれを保持しているかを認識する手法について述べる。手の保持状態認識は、携帯端末の操作を簡略化したり、ロボットとのインタラクションに利用したりする目的で盛んに検討されている。本研究で検討するソーシャルタッチインタラクションの認識においても、握手や殴打といった手指の接触状況の認識に取り組むことから、既存の保持状態認識手法についてここでまとめる。

2.1 インタラクティブサーフェス

入出力空間が統合されたインタラクティブサーフェスの歴史は古く、1952 年頃には CRT ディスプレイに直接触れてポインティングやドローイングが可能な LightPen と呼ばれる入力デバイスによってインタラクティブサーフェスが実現されている。これは、CRT ディスプレイが各画素を時間的に順次発光させて画面を表示することを利用し、ペン先が画面の発光を検出した時刻から CRT ディスプレイ上で発光していた画素の座標を求め

ることで、ペン先が触れていた座標を認識する。このペン型の入力デバイスは Whirlwind Computer Project の一部として開発され、CRT ディスプレイに表示された航空機を示す発光点を選択するために利用された。

このように、画面に表示されたオブジェクトにペンや指で直接触れてポインティングする入力形態は、直接指示と呼ばれる。これに対して、画面から空間的に離れた領域で画面上のポインタを操作してポインティングする入力形態は、間接指示と呼ばれる。マウスやトラックパッドなどの入力デバイスを用いる操作環境は、ユーザの操作空間とコンピュータの出力空間が分離するため、間接指示環境といえる。間接指示環境の場合には、ユーザが操作空間上で手を動かした距離に対して、画面上でポインタが動く距離を任意の割合で増減できるため、ユーザは手元の小さな動きでポインタを大きく動かせる。この特徴は、特に大画面のディスプレイ上でポインティングする場合に、ユーザの運動負荷を軽減できる利点に繋がる。これに対して、直接指示環境では、コンピュータの出力空間が広くなるほどユーザの操作負荷が一般的に高くなるものの、表示されたオブジェクトに直接触れて操作できるため、ユーザが運動計画を立てやすく、直感的な入力が可能となる。

LightPen が実現した直接指示環境は、その後もペンでの入力に限らず様々な入力方法が導入されながら発展している。本論文でもユーザが直接触れて入力できるインタラクティブサーフェスについて検討するが、そのために、まず、これまでのインタラクティブサーフェスの構成方法や、それらが認識するユーザのタッチインタラクションについて総括する。そこで本節では、タッチ検出の基本的な構成方法を、そのために利用する物理量で分類して紹介する。続いて、タッチ時のコンテキストやタッチした指の状態を認識することで、タッチ入力によるインタラクションを拡張する研究について述べる。

2.1.1 タッチ検出手法

指やペンデバイス、そのほかのオブジェクトが画面に接触したことを検出し、その接触座標を認識する手法が、様々に実現されている。利用する物理量によって認識できるオブジェクトの種類や、複数点の検出可能性、認識する座標の解像度がそれぞれ異なる。

抵抗膜方式では、加えた圧力によって電気的な抵抗が変化する特性を持った膜状の物体をディスプレイ面に重ねることで、ディスプレイ面にかかる圧力を計測し、タッチ入力を検出する。この方法は安価に実現でき、指以外の物体の接触も検出できるが、複数のタッ

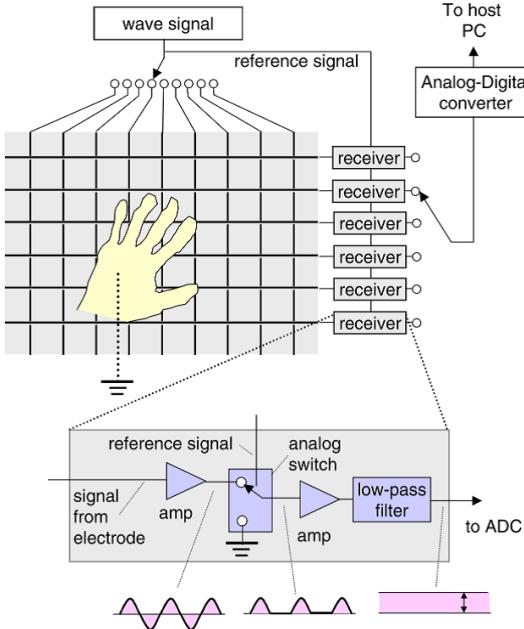


図 2.1: SmartSkin

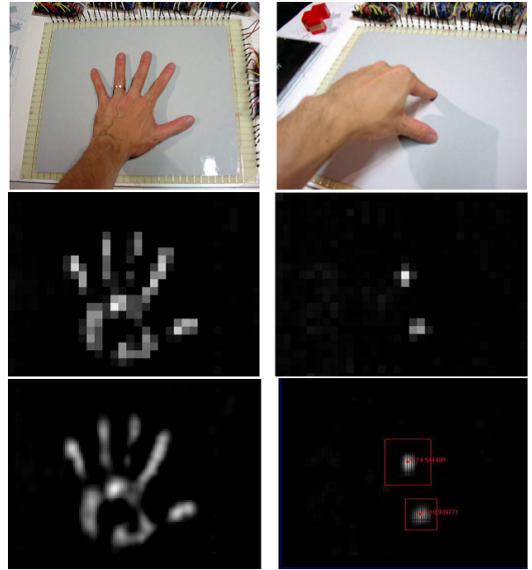


図 2.2: SmartSkin でのマルチタッチ検出

チ点を検出することが困難である。

Paradiso らはガラス表面に伝わる振動の減衰量が、タッチ時と非タッチ時で異なることを利用したタッチ検出手法を提案している [33]. これに類似したタッチ検出手法として、超音波表面弾性波方式がある。この方法では、ガラス基板の隅に配置した振動子から表面弾性波を発生させておき、そのガラス基板に指や柔らかな物体が接触した場合には表面弾性波が吸収され、受信子に到達する波が弱まることを利用してタッチ位置を検出する。ガラス基板自体には透明電極や抵抗膜などを重ねる必要が無く、ディスプレイ面に重ねて設置してもディスプレイの表示品質を損ねにくい。しかし、3 点以上のタッチ点の検出が困難で、また、表面にゴミが付着した場合にタッチを誤検出する恐れがある。

Rekimoto は静電容量の変化を検出するセンサでマルチタッチを検出するインタラクティブサーフェスとして SmartSkin を提案した [2]. 図 2.1, 図 2.2 に SmartSkin の構成とタッチ検出の様子を示す。ここで採用された原理に基づくタッチ検出手法は、一般的に投影型静電容量方式と呼ばれており、短冊状の電極を格子状に並べてタッチ検出に利用する。縦と横に並ぶ電極群のうち、片方向を送信側 (Transmitter: Tx) とし、もう片方の電極群を受信側 (Receiver: Rx) として扱う。タッチ検出においては、あるひとつの Tx 電極に信号が印加され、その Tx とある Rx との交差点に存在する静電結合がそれと交差する Rx に信号を伝搬する。こうして Rx に伝搬された信号を測定することで、システムは

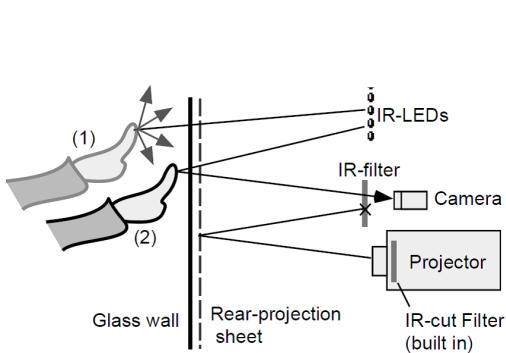


図 2.3: HoloWall でのタッチ検出原理

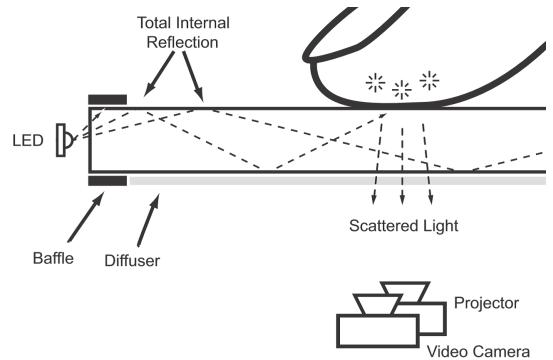


図 2.4: FTIR のタッチ検出原理

Tx と Rx 間の静電容量を計測している。人間の指のような接地した導電体が $Rx-Tx$ の交差点に接近した場合、 $Rx-Tx$ 間の電界は減少する [34]。どの交差点の計測において電界の変化が検出されるかを見ることで、タッチ位置の検出が可能である。この方法では、複数点のタッチを検出でき、ディスプレイ面に指がわずかに触れるだけで鋭敏に接触を検出できる。また、指のように接地した導電体の接触にしか反応しない。近年のスマートフォンやタブレットなどの小型携帯端末では、このタッチ検出方式を透明電極で実装したマルチタッチスクリーンが盛んに採用されている。

人の指が赤外線をよく反射することを利用して、光学的な方法でタッチ検出をする手法も様々な構成で実現されてきた。HoloWall [35, 36] というインタラクティブサーフェスでは、Diffused Illumination と呼ばれる方式が採用され、一枚のスクリーンと、その背面にプロジェクタ、赤外線投光器、および赤外線カメラを配置した構成でタッチ入力を検出する。図 2.3 に HoloWall で用いられたタッチ検出方式の基本的な構成を示す。この方式では、プロジェクタでユーザへの提示映像を投影しながら、同時に背面からスクリーンを赤外線で照らしておく。人の指がスクリーンに接近したり接触したりすると背面から照射された赤外線が指で反射するため、赤外線カメラでこの反射した赤外線を検出することでタッチ位置を検出できる。図 2.4 に示した FTIR [37] では、スクリーン面として透明なアクリル板を用い、背面から赤外線を照射する代わりにアクリル板の側面から赤外線を入射し、内部で赤外線が全反射を繰り返すことを利用して面全体に赤外線を満たす。ユーザが指で触れた領域では、アクリル板と指との間では屈折率の差が全反射に十分でないため、赤外線が全反射せず拡散反射する。どちらも、スクリーンの背面に配置した赤外線カメラで取得した画像に基づき、画像処理によってタッチ検出を行うため、投影型静電容量方式に比べても遥かに多くのタッチ点を同時に検出できる。一方で、プロジェクタやカメラをスク

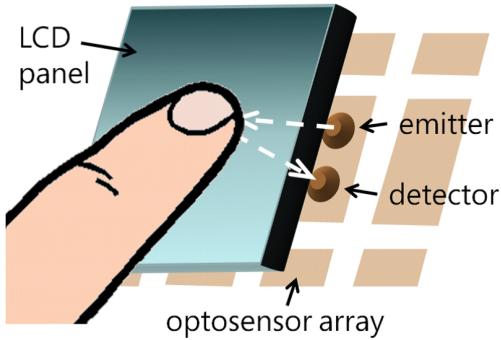


図 2.5: ThinSight の基本的な構成

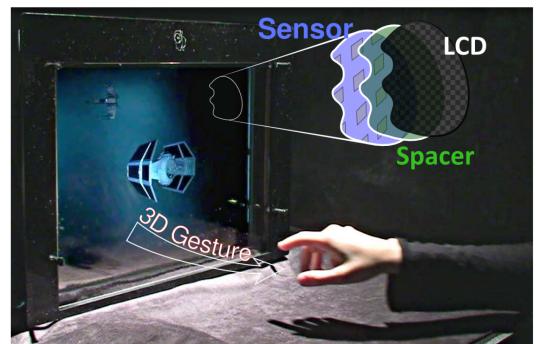


図 2.6: BiDi Screen

リーンの背面に配置するため、背面に広い空間が必要になる。FTIR の構成に光ファイバを加えることで手指から反射した赤外線を誘導し、背面に必要だった空間を小さくする工夫 [38] や、FTIR で用いるカメラをスクリーンの前面に配置したコンパクトな構成 [39] も提案されているが、基本的にカメラを用いた手法ではインタラクティブサーフェスの筐体がほかの手法に比べて大きくなりがちである。図 2.5 に示すように、液晶ディスプレイの内部に赤外線 LED と赤外線センサを埋め込んでしまうことで、薄さを保ったまま光学的なタッチ検出を導入する試みもなされている [40]。この方式は ThinSight と呼ばれ、光学式のマルチタッチスクリーンをコンパクトな構成で実現している。同様にイメージセンサアレイをディスプレイに埋め込むことで、ディスプレイにかざした手指の三次元形状を認識する技術として、BiDi Screen と呼ばれるインタラクティブサーフェスも開発されている [41]。その概要を図 2.6 に示す。こうしたディスプレイの内部に光学的なセンサを実装してタッチを検出する方法は、テーブル型マルチタッチスクリーンである PixelSense¹⁾にも利用されている。

2.1.2 タッチインタラクションの拡張

多くのタッチスクリーンでは、スクリーンに接触した指やペンの座標を認識し、これを入力に用いている。マルチタッチスクリーンでは、複数のタッチ点の移動軌跡からジェスチャを認識することで、インタラクション方法を増やすことが可能になった。これを更に

¹⁾ PixelSense, <http://www.microsoft.com/en-us/pixelsense/default.aspx> accessed on 25th Dec., 2013

発展させ、触れた指のより詳細な状態を認識し、インタラクティブサーフェスで利用できるインタラクション方法を増やそうとする研究がある。また、タッチスクリーンでは物理的なボタンやスライダに比べて触覚フィードバックが乏しいため、正確にポインティングするためには操作対象（タッチスクリーン）を強く注視しなければならず、さらに、適切な視覚フィードバックを提示しなければユーザがタッチを正しく入力できたのかどうか確信を持ちづらいという問題がある。この問題を解決するために、実物体をインタラクティブサーフェスの上に置いてインタラクションする方法が提案されている。

タッチ時のコンテキスト認識による拡張

インタラクティブサーフェスとのタッチインタラクションを拡張する手法として、タッチ入力時のコンテキストを利用する技術がある。コンテキストとしては、タッチした人やタッチした指、あるいはタッチする際に指や物体が接近するまでの速度などが用いられる。

Dietz らは、タッチ点毎にユーザ識別が可能な静電容量方式のマルチタッチ検出手法として DiamondTouch を提案している [42]。DiamondTouch では、スクリーン面に敷設したアンテナから送信された信号が、スクリーン面に触れた指を通じてそのユーザが持つレシーバに到達することでタッチを検出しており、ユーザごとに異なるレシーバを持つため、タッチ点毎に誰の指が触れたものであるかを特定できる。複数のユーザでひとつのマルチタッチスクリーンを操作する場合には、別のユーザのタッチによって意図せずマルチタッチジェスチャが認識される場合があるが、タッチしたユーザを特定できればこうした問題を回避できる。Annett らはテーブルトップ型のマルチタッチスクリーンの周囲に近接センサを並べ、タッチ点毎に触れたユーザを区別したり、左腕か右腕かを区別したりできる Medusa を提案している [43]。図 2.7 にその外観を示す。このマルチタッチスクリーンを用いれば左右の腕に異なる機能を割り当てられるため、ユーザは利き手と非利き手で役割を分担しながら作業できる。タッチ点毎にどのユーザ、あるいはどの指が接触したのかを識別する技術はこのほかにも提案があり、人体が持つ固有の交流信号特性を利用し、タッチした指に印加した交流信号の変化からユーザを識別するもの [44] や、タッチした指の指紋に基づいてユーザや指を識別するもの [45] がある。また、接触した際に生じる音響に基づいて、指先で触れたか爪で触れたかなど、触れた身体部位を識別する技術も提

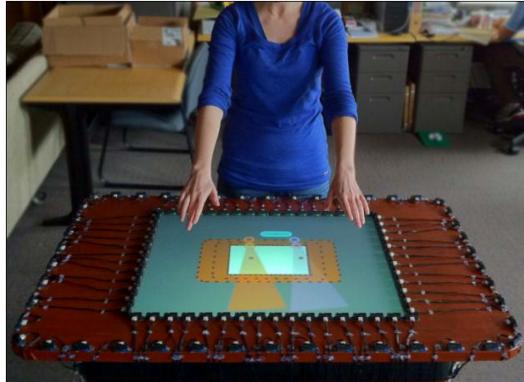


図 2.7: Medusa

案されている [46]. これらのような、インタラクティブサーフェスに触れた指の属性を認識してインタラクション方法を増やす技術は、複数のユーザでひとつのインタラクティブルサーフェスを操作する場合に意図しない誤操作を減らしたり、異なる身体部位に異なる機能を割り当てることで入力操作を効率化したりするために有効であると考えられる。

一方で、接触する物体の状態として、その速度や、指の角度などを認識してタッチインタラクションを拡張する技術もある。Takeoka らはタッチした指の傾きや形状を認識できるインタラクティブルサーフェスとして Z-Touch を提案している [47]. 図 2.8 にそれによるタッチ検出の様子を示す。スクリーン面と平行な 3 層の赤外線レーザ面と、スクリーン背面に設置したハイスピード赤外線カメラとを時間的に同期させて駆動し、各レーザ面における指の座標から、スクリーン面に対する指の傾きや、指の形状を認識する技術である。Hachisu らは赤外線の遮断により物体通過を検知するセンサを二層に重ね、これをタッチスクリーンの上に配置することで、スクリーンに触れようとする物体の接近速度を計測できるタッチスクリーン、HACHIStack を実現した [48]. 図 2.9 にその速度計測の原理を示す。上方にある 1 層目の赤外線レーザ面を指が通過した時刻 t_1 と、2 層目の赤外線レーザ面を通過した時刻 t_2 、既知のレーザ面間距離 d_1 から、タッチした指の速度を計算できる。これにより、打楽器を強く叩けば大きな音がなるように、タッチスクリーンでもユーザがタッチする速度に応じてコンピュータの応答を変化させられるようになる。

タンジブルユーザインタフェースによる拡張

インタラクティブルサーフェスのうち、スクリーン面が水平方向に広がるテーブル型の作

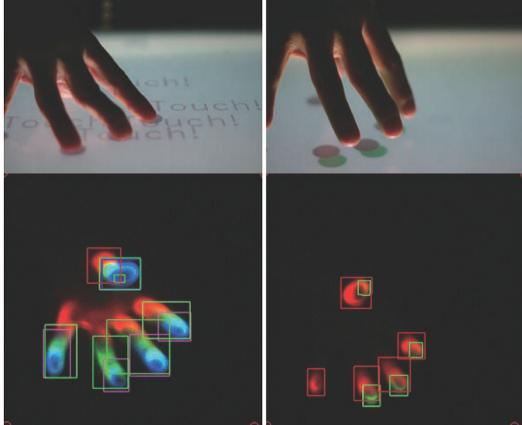


図 2.8: Z-touch でのタッチ検出

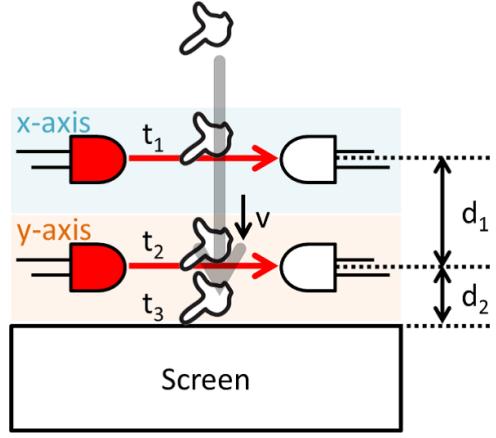


図 2.9: HACHIStack におけるタッチ速度検出原理

業環境はテーブルトップ環境と呼ばれる。このような環境では、テーブルの下に広い空間があるため、FTIR や Diffused Illumination のような赤外線カメラを利用したタッチ検出方式を採用しやすい。光学的なタッチ検出方式を採用した場合、非常に多数のタッチ点を同時に検出できるという特徴を持つため、複数人での協調作業を支援する環境を構築する際に盛んに利用される [49]。

テーブルトップ環境の重要な特徴のひとつは、スクリーン上に物体を置くことができる点である。この特徴によって、テーブルトップ環境にあるユーザは、タッチインタラクションに加えてテーブル上の実物体を介したインタラクションを利用できる。このような実物体を介したインタラクションに着目し、コンピュータ内の情報を実物体にマッピングして、実物体を操作することでコンピュータの操作を行おうとするインターフェースは、Tangible User Interface (TUI) と呼ばれる [50, 51]。ここでは、TUI によってインタラクティブサーフェスとのインタラクションを拡張する試みについて述べる。

インタラクティブサーフェスの上で実物体を用いるというコンセプトは、SmartSkinにおいて提案されている [2]。図 2.10 にその実物体利用の様子を示す。インタラクティブサーフェスの上に配置された実物体の座標と ID をコンピュータが認識し、これらをユーザからの入力として扱うことで、ユーザに実物体を介した操作方法を提供する。テーブルトップ上に配置された実物体がタッチ入力を擬似的に発生させることで、実物体の座標や ID をコンピュータが認識する。また、利用する実物体毎に、インタラクティブサーフェス上に設置した際に生じるタッチ点の空間的あるいは時間的なパターンが異なっていれば、

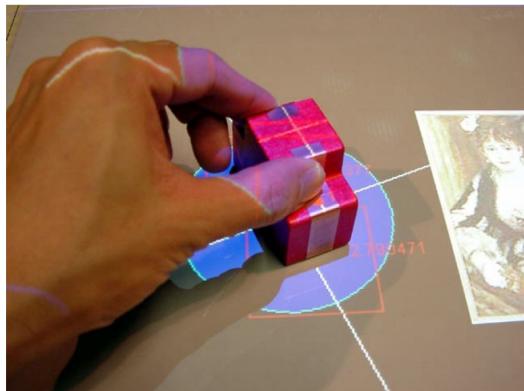


図 2.10: SmartSkin での実物体の利用

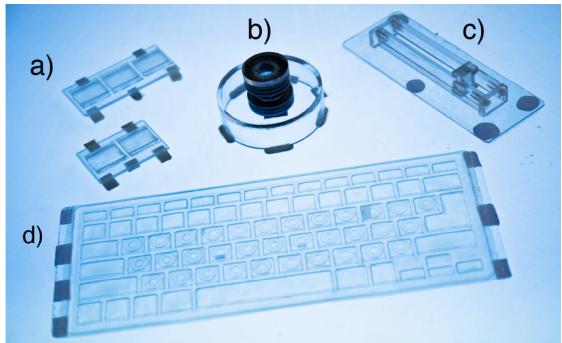


図 2.11: SLAP Widget

実物体の ID をコンピュータに認識させることも可能となる。こうしたテーブルトップ環境での実物体を介したインタラクションの実現に向けて、タッチ検出手法毎に様々な技術が提案されている [52–58]。

こうした技術は、インタラクティブサーフェスの任意の位置に物理的なボタンやスライダを一時的に配置し、それを介してコンピュータを操作することに利用される [52]。例えば SLAP Widget [52] では、図 2.11 に示すように、アクリル板で構成されたキーボードやボタンの模型を介してマルチタッチスクリーンにタッチ入力することを実現している。キーボードやボタン、スライダなどをインタラクティブサーフェス上に配置して入力できれば、操作対象に触覚的な手がかりを付与できるため、ユーザはスクリーンをそれほど注視しなくても操作できるようになる [59]。こうした特徴から、インタラクティブサーフェス上に配置した実物体を介して入力する手法は、手元のタブレット端末をリモコンとして利用する場合 [59] や、スマートフォンで複雑なキー操作が必要なゲームをする場合 [60] などで、操作性を改善する目的に利用されている。そのほかには、インタラクティブサーフェス上で三次元的な入力を可能にするために利用される場合もある [54, 58, 61]。一方で、基本的な GUI の操作であるポインティングやボタンの押下などを支援するために用いられることがほとんどであり、人と人のコミュニケーションに見られるような動作の認識までを指向したものではない。

2.2 オーガニックユーザインターフェース

操作対象の形状がインタラクションに伴って変化することで、ユーザにその機能や操作方法を直感的に伝達できるインターフェースとして、Organic User Interface (OUI) という概念が提案されている [3, 15, 16, 62–64]. OUI の設計指針は、Vertegaal と Poupyrev により提案されており、従来のインターフェースと比較して、次の 3 つの特徴を持つと定義されている [15].

- 入力面と出力面が同一である
- 形状が機能と同一である
- ユーザの入力に応じて形状が流動的に変化する

第一の特徴はインタラクティブサーフェスの概念を指しているといえ、第二の特徴である形状と機能の連動や、第三の特徴である形状の流動的な変化は、インタラクティブサーフェスの形状や感触が用途に応じて適切に設計されたり、インタラクティブサーフェスの形状が動的に変化することを示唆している。すなわち、OUI はインタラクティブサーフェスに形状や感触などの触覚的な情報が付与された、あるいは触覚的な情報を制御できるインターフェースを指していると理解できる。

こうした形状変化を伴うインタラクティブサーフェスの実現例として、Harrison らによるスクリーン面の凹凸形状を動的に制御できるインタラクティブサーフェスが挙げられる [65]. 図 2.12 にこの凹凸形状を制御可能なインタラクティブサーフェスを示す。タッチ入力が可能な領域をふくらませて凸形状に変形し、物理的なボタンのような形状を動的に出現させることで、入力可能な領域をユーザが理解しやすくなると期待できる。このほかの OUI の実現例として、敷き詰めたピン型のアクチュエータをそれぞれ上下に駆動することで動的に凹凸面を生成できるピンディスプレイが挙げられる [66–70]. 図 2.13 に示した inFORM [69] では、ピンの上下動による形状提示だけでなく、その凹凸形状でピンの上に置かれた物体を移動することによる情報提示手法が実装されている。また、PolkaDot [70] では、ピンディスプレイ上に撥水布を設置し、その上にある水滴の位置や形状をピンディスプレイで制御することによる情報提示が実現されている。これらのインタラクティブサーフェスでは、その形状を変えることでユーザに操作方法を想起させやすくしたり、形状そのものをユーザに対する出力として利用したりできるため、ユーザが直

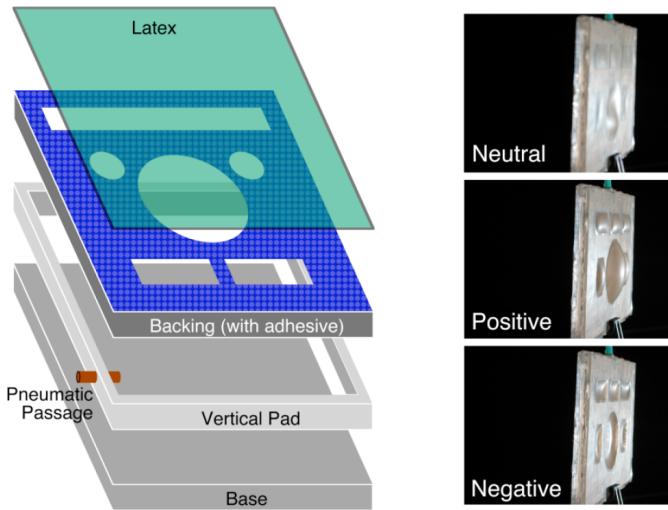


図 2.12: Harrison らによる凹凸制御が可能なタッチスクリーン

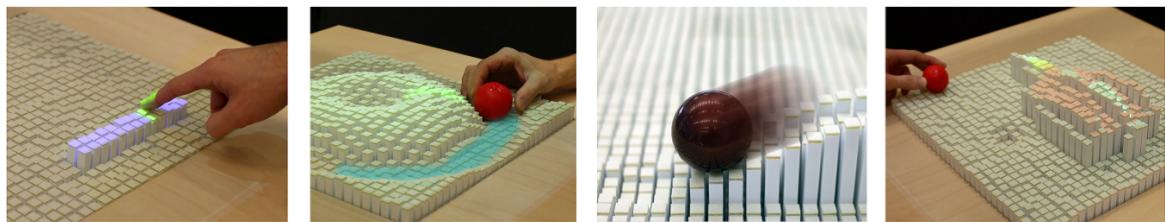


図 2.13: inFORM

感的に操作方法やコンピュータの出力結果を理解できるようになる。

一方で、Rekimoto は “From Stone to Skin” という表題でこれまでのインターフェースの変遷とこれからの中の OUI について論じている [3]. この中で、人類がかつて素手 (Skin) での生活から、道具 (Stone) を使って周囲の環境を切り拓く生活に行動様式を変えてきたことに対して、人とコンピュータとのインタラクションは、道具と同じ操作方法から、マルチタッチ入力のような人の皮膚に対する触れ合い方に類似した操作方法へと変化してきたことを指摘し、今後も人ととの触れ合いに見られる動作をコンピュータに入力するためのインターフェースが重要なことを見越している。本論文でも、こうした人ととのコミュニケーションに見られる動作を入力可能なインタラクティブサーフェスについて検討していく。

そこで本節では、OUI の実現例について紹介することで、触覚情報を備えたインタラクティブサーフェスが、人とコンピュータとのインタラクションにもたらす効果について述



図 2.14: Paper Windows



図 2.15: Gummi

べる。また、弾性体や毛状物体を用いたインターフェースについて紹介し、それらが人と人とのコミュニケーションに見られる動作をコンピュータとのインターフェースに用いるために有効なインターフェースとなりうることを述べる。

2.2.1 柔らかな素材を用いたインターフェース

紙や粘土といった身の回りのありふれた物体を利用してすることで、スクリーン面を曲げたり変形させたりして操作できるインターフェースが多数提案されている。これらも OUI の特性を備えたインターフェースの例と言える。Holman らによる Paper Windows [18] では、紙を積み重ねたり、移動させたり、掴んだりする様子を認識し、それに応じて紙の上に視覚フィードバックを投影することで、紙を介して情報を操作するインターフェーションが実現されている。これを図 2.14 に示す。Paper Windows では、指と紙に取り付けた赤外線反射マーカと赤外線カメラで構成したモーションキャプチャシステムを用いて、紙の位置や傾き、ユーザの指やペンデバイスと紙との交差を取得し、紙の上にプロジェクタで視覚フィードバックを投影している。紙や布を曲げたり折ったりする操作を利用したインターフェーションはほかにも多く試みられている [71–77]。Fordable Input Device [71] では、赤外線反射マーカを取り付けた黒画用紙と、赤外線カメラ、赤外線投光器による安価な構成で、紙の形状を取得してユーザの入力動作を認識することに成功している。Schwesig らによる Gummi では、ディスプレイを曲げて操作するインターフェーションが実現されている [78, 79]。これを図 2.15 に示す。Gummi は、クレジットカード程度のサイズをもつフレキシブルなディスプレイであり、ユーザはその形状を曲げることでディスプレイ内のコンテンツを操作できる。Tarun らも同様に、曲げる動作を入力可能なフレキシブルなディ

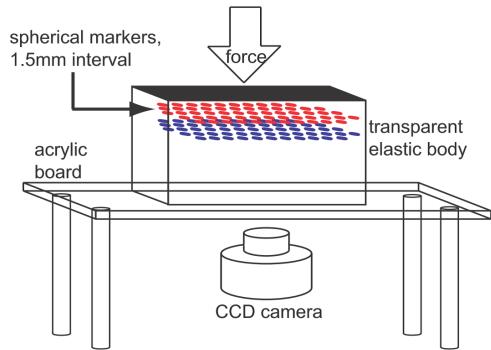


図 2.16: GelForce

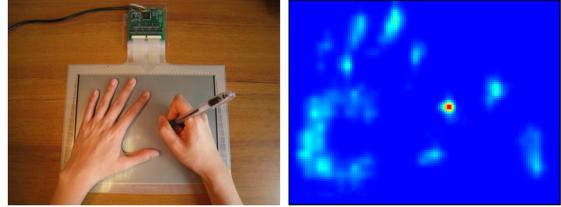


図 2.17: UnMousePad

スプレイを提案している [80]. Sugiura らは伸縮性の布の伸び縮みが赤外線の反射量で検出できることを利用して、ユーザが布を広げたり引っ張ったりする動作を入力として用いるインタラクティブサーフェスを提案している [81]. Illuminating Clay では、コンピュータ上の地形シミュレータに粘土を介して地形情報を入力する作業環境が実現された [17]. この例では、粘土が入力デバイスとして利用され、ユーザは粘土細工をするような操作方法で地形シミュレータ内に複雑な地形を入力することが可能となっている。粘土が置かれた作業環境の上方にはレーザスキャナが設置されており、これによって粘土の形状がコンピュータに入力される仕組みである。

こうした紙や粘土を使ったインターフェースでは、これらの素材から想起される動作によってコンピュータ内のデータを操作できるため、操作方法が理解しやすく、簡単に複雑なデータを扱える利点がある。

2.2.2 弹性体を用いたインターフェース

紙や粘土のほかに、インタラクティブサーフェスのスクリーンとして盛んに利用されている柔らかな素材に、シリコンのような弹性体がある。弹性体は柔らかく、復元力があるため、押し込んだり捻じったりする動作を繰り返し入力しても元の形状に戻り、スクリーンとしての機能を損ねることがない。こうした弹性体の特性を活かして、押し込みや捻じりといった動作を入力できるインタラクティブサーフェスを構成し、それらの動作の力の大きさや方向を検出する技術が開発されている。多くの研究では、スクリーンにゴムやシリコンのシートを利用し、そのスクリーンをユーザが押し込んだり摘んだりした際にかかる力を、弹性体の変位量を計測することで認識している [82–86]。図 2.16 に示し

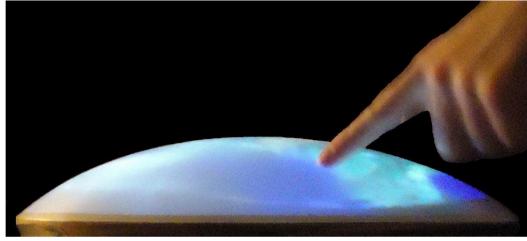


図 2.18: Stevenson らによるゴム膜を用いた半球状のマルチタッチスクリーン

た GelForce では、変位量の計測のために透明な弾性体の内部に色付きのマーカを封入し、マーカの変位をカメラで計測することで加わった力を認識する [82]。また、弾性体の変形によってその表面や内部で光の散乱が生じることを利用するもの [84] もある。これらはいずれも弾性体そのものにセンサを備えず、カメラをはじめとしたセンサを周囲に配置した環境において、精度よく、かつロバストに弾性体の変形を検出する。これに対して、UnMousePad [87] は、感圧抵抗性インクを特殊なパターンで印刷した柔らかなシート状センサであり、スクリーン自体がセンサとして機能し、スクリーンに対して垂直方向にかかる加圧を測定できる。図 2.17 に UnMousePad での圧力検出の様子を示す。Harrison らはタッチスクリーンの表示の柔軟性とボタンの凹凸形状との両立を目指して、ゴム素材のスクリーンを利用し、スクリーン背面に封入した気体の気圧制御により、その表面を隆起させたり沈降させたりできるタッチスクリーンを提案している [65]。図 2.12 に示したこのタッチスクリーンでは、表面が押し込まれた際にスクリーン背面の気圧が上昇することを利用し、タッチ時に加わる力の大きさを認識することもできる。Stevenson らも同様にゴム膜を表面に用いたタッチスクリーンを提案しており、円形のゴム膜スクリーンの背面側の気圧を変化させることで動的に半球状に隆起、あるいは沈降したスクリーンを生成できるシステムを実現している [88]。この半球状のマルチタッチスクリーンを図 2.18 に示す。

これらのタッチ時の力の大きさや方向を認識する手法は、スクリーンに表示されたオブジェクトに対して三次元的な入力を可能にする方法として非常に有効であると考えられる。また、人と人、人と動物などが触れ合う際にも接触時の圧力が意図や感情を表現するために用いられることから、力の計測が可能なインタラクティブサーフェスは、ソーシャルタッチインタラクションのような、コミュニケーションで用いられる動作の認識にも適性を持つと考えられる。

一方で、握手や抱擁のようなソーシャルタッチインタラクションを入力するためには、デバイスの形状も重要となる。把持や抱擁のようなタッチインタラクションの入力を想定したインターフェースは、タッチ時の力の強弱や入力面の変形の程度を検出する機能を持った、人が把持可能な大きさのデバイスとして提案されてきた。

FuwaFuwa [89] はクッション状の柔らかなインターフェースを実現する手法で、柔らかなデバイスの形状変化を内部に配置した赤外線センサモジュールによって検出する。図 2.19 にこれによる形状認識の様子を示す。この方法は纖維を封入した物体に適用でき、表面形状の変化を計測できる。これと同様に、纖維の圧縮の程度を光の反射量に基づいて計測する方法を利用し、クッション内にスマートフォンを封入してクッションが押し潰されたことを認識する方法も提案されている [90]。封入されたスマートフォンは、内蔵の LED を発光させながら同時にカメラでその光の反射量を計測することで、クッションが圧縮されている度合いを認識する。これらの技術はクッションを抱きしめる動作を認識することに利用できる。こうしたクッションのような纖維の塊のほかに、風船も押し潰す動作を認識できるインターフェースの実現のために活用されてきた。Balloon Messenger²⁾ は風船型のボイスレコーダであるが、音声再生時に風船を掴む強さによって再生速度を速められるという機能を持つ。掴む以外の操作を識別するものではないが、掴む動作の強弱を内部の気圧変化に基づいて認識している。Inflatable Mouse [91] は筐体をひとつの風船で構成したマウスであり、風船内の気圧検出や気圧制御により、握る強さを入力として検出することで、膨張収縮による力覚フィードバックの提示を可能としている。図 2.20 にこれを用いたインタラクションの様子を示す。ここでは WIMP での操作体系に沿って、風船内の気圧の変化によって認識できる入力動作が検討されている。ゴム素材の人形によるロボットのプロトタイピング技術 [92] では、人形の各部に気圧センサを内蔵しており、人形の変形度合いの取得に気圧変化を利用している。ぶよこん [93] と呼ばれるボール型コントローラでは、ボール内に多数のエアバッグを内蔵して、各エアバッグ内の気圧を計測することで、筐体の柔らかさを維持しながらボールの変形を検出可能にした。Volflex [94] は複数の風船内の気体の量をピストン制御して、様々な形状や任意の弾性力を提示するボリュームディスプレイである。風船内部の気圧を計測することによってユーザが風船を一定以上の力で押し込んだことを検出する機構も備えている。Interactive Balloon [95] は風船を筐体に利用したデバイスであるが、風船表面に貼り付けたピエゾフィルムによって音声の記

²⁾ Balloon Messenger, <http://projects.kumpf.cc/> accessed on 25th Dec., 2013

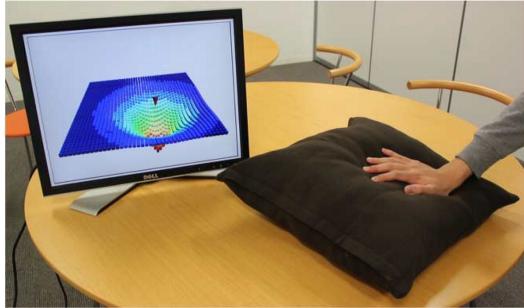


図 2.19: FuwaFuwa

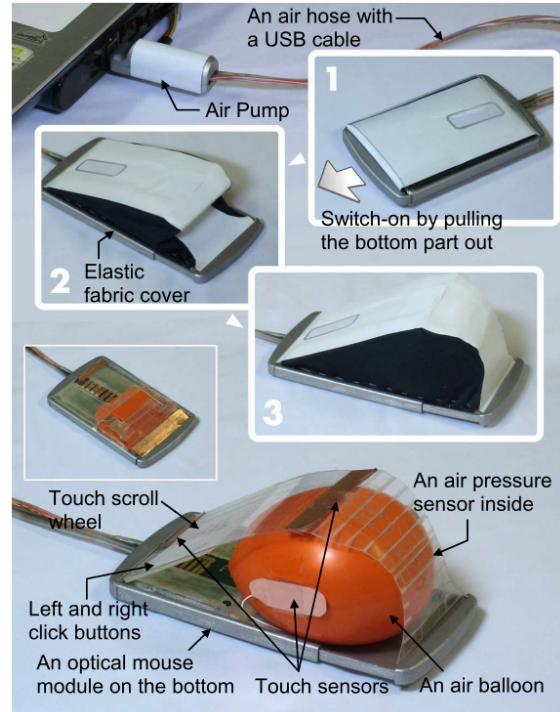


図 2.20: InflatableMouse

録再生が可能なボイスレコーダであり、ユーザからのタッチインタラクションの認識を指向したものではない。

これらのインターフェースは、繊維の塊や風船の内部で生じる物理現象を計測することで、デバイスの変形を検出している。ユーザが抱擁や握手などの動作をデバイスに入力したことを認識する目的にも、こうした変形の検出は有用といえる。また、クッションや風船のような柔らかな筐体を利用しているため、強く押し潰してもユーザやデバイスが傷つかないという特徴を備えている。しかし、こうした柔らかなインターフェースにおいて、ユーザからの様々なタッチインタラクションを区別して認識することは十分に検討されていない。

2.2.3 毛状物体を用いたインターフェース

人や動物には体毛があり、例えば子どもの頭を撫でるであるとか、犬の背中を撫でるといった体毛を撫でることによるコミュニケーションがよく見られる。毛状物体を利用したインターフェースを使うことで、このようなコミュニケーションと同じような方法でコンピュータとインタラクションできるようになることが期待されている。毛状物体を用いた

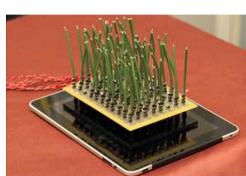


図 2.21: Hairytop Interface



図 2.22: Sprout I/O

インタフェースとしては、毛の動きを情報提示に用いるディスプレイや、毛状物体の上に表示した視覚的な情報に撫でたり触れたりしてインタラクションできる毛状のインタラクティブサーフェスがある。

まず、毛の動きを制御することで毛状物体をディスプレイとして用いるインタフェースについて述べる。Hairytop Interface [96] は、毛の 1 本 1 本を形状記憶合金で実装し、それを並べて駆動させることで毛の流れる方向を提示できる毛状インターフェースである。図 2.21 にその外観を示す。毛の 1 本 1 本がロッド状のデバイスとして実装されており、デバイスの底面に当たる光の強弱によって形状記憶合金の屈曲を制御する仕組みとなっている。また、静電容量方式のタッチスクリーンの上に配置すれば、ユーザが毛に触れたことを、形状記憶合金を介してタッチ入力として検出できる。Fur Display [97] は自然毛の毛皮の立毛を振動モータで制御するインターフェースで、毛を逆立てることで情報提示を行う。Super Cilia Skin [98] や Sprout I/O [99] も同様に立毛などの毛の動きによる情報提示を目指したインターフェースである。図 2.22 は Sprout I/O で実装された、形状記憶合金によって駆動するフェルト生地で、情報提示にはその形状変化が利用されている。いずれも触覚的な刺激や形状の変化による情報提示が可能なインターフェースであり、人とコンピュータとのインタラクションを、人が身の回りの物体や周囲の人と触れ合う際のインタラクションに近付けようという狙いがある。

こうした毛の形状変化をディスプレイに用いる毛状インターフェースに対して、映像や視覚フィードバックを毛状物体に重畠して表示し、ユーザと提示映像とが毛状物体を介してインタラクションする環境を実現する毛状インターフェースも提案されている。Fur-Fly [100] は、サーボモータに接続した毛を並べたスクリーンを用いたインストレーションで、毛を敷き詰めたスクリーンに映像を投影することで、映像による視覚的な情報提示と、毛の動きによる触覚フィードバックとを連動して提示できる。図 2.23 に Fur-Fly

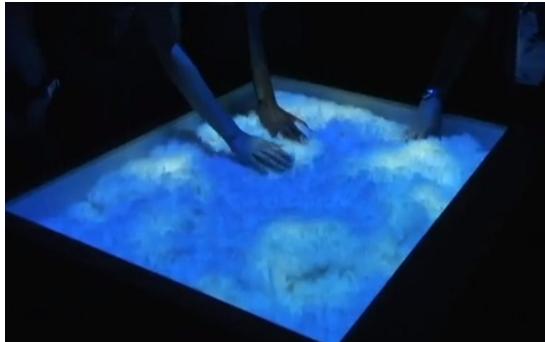


図 2.23: Fur-Fly

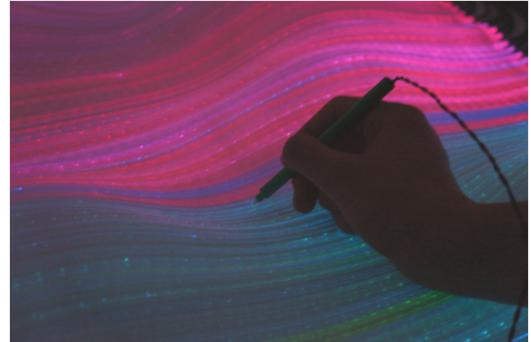


図 2.24: LightCloth

でのインタラクションの様子を示す。このシステムでは視覚と触覚のフィードバックが連動するように、毛の動きと投影される映像が設計されており、視覚障害者と健常者とがひとつのスクリーン上で同時に楽しめるインсталレーションを目指して開発されている。Hashimoto らは、ペン型デバイスでのポインティングが可能な、光ファイバ束による布状のインターフェースを実装している [101]。図 2.24 に実装された LightCloth を示す。この布状の柔らかなインターフェースは、ソファや衣服などを装飾する目的での利用が想定されている。Casalegno らにより制作された Fiber Cloud³⁾は、約 1 万 5000 本の光ファイバが表面に植えられたオブジェで、人の近接や接触を検知すると光ファイバの発光や音を出力する。このオブジェは、毛の根元に配置された近接センサで人や物体の接近を検出し、同じく毛の根元にある多数の静電容量センサで、光ファイバの間を通して毛に触れようとする人の手を検出している。これらのインタラクティブなシステムでは、映像や光の明滅といった視覚的な情報提示を毛状物体の表面に統合している。しかし、Fur-Fly では毛の上に映像を投影するため毛の動きと映像の動きとが完全には連動しないため、ユーザが毛を撫でて毛状物体が変形した場合に映像と毛の動きが乖離してしまい、不自然な印象をユーザに与えてしまう恐れがある。また、Fiber Cloud や LightCloth では、色や光の明滅などの抽象的な情報しか提示できない。

毛状物体へのタッチインタラクションを認識する方法としては、毛の根元にセンサを並べる方法と、毛そのもので接触を検出する方法とに大別できる。毛の根元にセンサを並べることで、毛に触れようとする手や物体を検出する方法は、Fiber Cloud や Fur-Fly [100] で用いられ、センサには主に静電容量センサや近接センサが利用されている。Fur Display

³⁾ Fiber Cloud, <http://mobile.mit.edu/portfolio/fiber-cloud/> accessed on 25th Dec., 2013

でも自然毛の内部に静電容量センサを設置して、手で撫でたり触れたりしたことを検出している。これらの方では、指先での接触のような入力が生じた座標を精度よく取得することは難しいが、掌のような大面積の物体で触れる動作は十分認識できる。毛そのものでタッチ入力を検出する方法としては、Fibratus tactile sensor [102] が提案されている。このセンサは、毛状突起物が撫でられた際に生じる毛根部分の変位を、光でこの原理を利用しながら計測することで、毛の動きを測定する。毛の駆動や視覚フィードバックの提示との統合までは検討されていないが、撫でる動作を高精度に計測できる触覚センサとなっている。Hairytop Interface では、導電体で構成した毛状物体が静電容量方式のマルチタッチスクリーンの上に設置されているため、タッチスクリーンが検出するタッチ点に基づいて、どの領域の毛状物体にユーザの手が触れたかを検出できる [96]。

これらの毛状物体を用いたインターフェースによって、ユーザは撫でたり触れたりして毛状物体やその上に投影された映像とインタラクションすることができる。しかし、毛状インターフェースにおける情報提示は、毛の動きのように抽象的であったり、映像を用いるものでも毛の動きと映像の動きが乖離して不自然に見えたりするという問題がある。

2.3 把持や接触状況を認識するインターフェース

人が手で道具を用いる際には、同じ道具であってもその利用目的に応じて異なる握り方をする場合がある。従って、握り方を知ることができれば、ユーザがどのような意図を持ってその道具を利用しようとしているかを推測できると考えられる。この考えに基づいて、コンピュータとのインタラクションにおいて、ユーザがどのように物体を持持しているかを認識することでユーザの意図を推測し、必要な操作支援を提供する技術が研究されている。本論文で検討する握手や抱擁のようなタッチインタラクションの認識でも、物体を手で持持したユーザを扱うことから、その認識方法には共通点を見出すことができる。そこで本節では、ユーザが物体を持持した際の、持持した手指の形状や持持の方法を識別する技術について述べる。

デバイスを持持する手指の状態を認識し、認識した手指の状態に合わせて自動的にデバイスの挙動を制御するようなインターフェースは、Graspable User Interface と呼ばれる [103–105]。携帯端末の握り方を認識し、その持持状態に応じて端末の機能を自動的に変化することで操作を簡単化しようとすることが、その主な目的となっている。Kim らは、64 個の静電容量センサとひとつの 3 軸加速度センサによって、小型端末の持持状態を

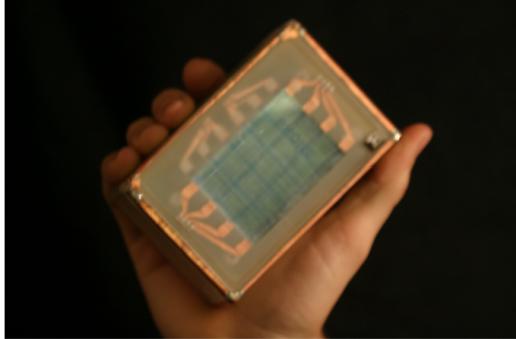


図 2.25: Graspables

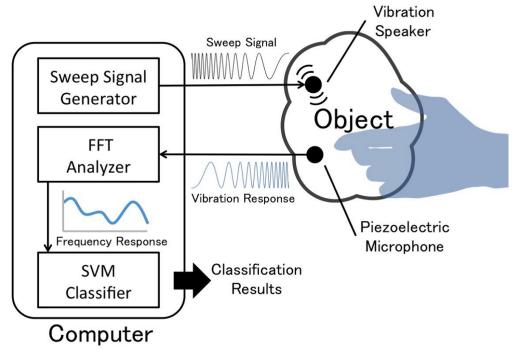


図 2.26: Touch & Activate のシステム構成

認識する手法を提案している [106]. この手法では、8つの把持状態を参加者間で90%の精度で認識できたと報告されている。同様に、Handsense [107] では、静電容量センサを用いて、左右の手の区別を含めた把持状態の認識を試みている。Graspables [108] では、静的な把持に加え、動的な動作も含めたジェスチャ認識が検討された。図 2.25 に、実装されたデバイスの外観を示す。72 個の静電容量センサとひとつの 3 軸加速度センサを用いたデバイスにより、5 つの把持状態を 13 名の参加者間で 80%，参加者内で 95% の精度で認識している。Ono らはアクティブ音響センシングによって把持状態を認識する手法として Touch & Activate を提案し、6 種のスマートフォンの握り方を参加者間で 71% の精度で認識できることを報告している [109]. 図 2.26 にそのシステム構成を示す。アクティブ音響センシングでは、把持される物体の表面にピエゾマイクと振動スピーカを取り付けておき、様々な周波数の振動を短時間に切り替えながら物体に加え、マイクでその振幅を計測することで、物体の振動に対する周波数特性を計測できる。この把持状態認識手法では、把持状態が変われば物体の周波数特性が変化することを利用し、アクティブ音響センシングによって物体をどのように握っているか、あるいはどの程度強く握っているかを認識する。この方法は振動が十分に伝達する硬い物体での把持状態認識に非常に有効な方法であるが、柔らかな物体では振動が伝達しにくいため識別精度が低下すると考えられる。ほかにも、ペン型デバイスの握り方を認識することで、ペンの機能を自動的に変更し、ユーザの操作手間を削減する手法も提案されている [110]. この方法ではペン型デバイスの周囲に静電容量センサを敷き詰めて、手とペンの接触領域の変化からペンがどのように握られているかを認識している。これらの Graspable User Interface では、いずれの場合も静的な把持や穏やかなジェスチャ操作が識別対象であり、抱擁や殴打のような強い

力を伴う動作への適性は不明である。

このような携帯端末の操作支援を目的とした把持状態認識のほかに、ロボットとのインタラクションのために把持状態を認識する技術も検討されている。Knightらは、セラピーのためのロボットとして、ソーシャルタッチインタラクションを認識するインタラクティブなぬいぐるみを実装している[111]。静電容量センサを用いた実装で5つのジェスチャ(tickle, pole, pet, hold, no touch)を認識することを試みている。それ以前の実装に基づく評価によれば、QTCセンサ、温度センサ、電界センサを用いた実装において、8つのジェスチャ(tickle, poke, scratch, pet, pat, rub, squeeze, contact)を54.3%の精度で識別している[112]。しかし、この方法では多数のセンサを利用した複雑な構成を用いており、また、その識別率は54.3%とまだ改善の余地が大きい。

2.4 まとめ

本章では、様々なインタラクティブサーフェスと、そのインタラクション手法について述べてきた。特に、オーガニックユーザインタフェースと総称されるような、柔らかな表面を持ったインタラクティブサーフェスでは、人と人、あるいは人と動物の間で行われるコミュニケーションに学んだインタラクション方法を人とコンピュータとのインタラクションに導入することが試みられている。毛状物体を用いたインターフェースでは、形状変化による情報提示が盛んに研究されているが、解釈しやすい文字や模様などの情報を提示するものは少ない。毛状物体の上に文字や模様などの視覚的な情報を提示できるものでも、表示する視覚的な情報とユーザが感じる触覚的な情報とがうまく連動せず、違和感を与えてしまう問題があった。本研究では、毛状物体そのものを発光させることによる情報提示と、マルチタッチ検出とを統合することで、こうした違和感のない毛状インターフェースについて検討していく。また、人が意図や感情を伝える際に用いるソーシャルタッチインタラクションの認識については、多数のセンサを用いたロボットやぬいぐるみにおいて検討されているものの、構成は複雑で、その認識性能はまだ改善の余地が大きい。ソーシャルタッチインタラクションの入力に適した、弾性体のような柔らかな素材を用いたインタラクティブサーフェスでも、インタラクション方法を拡張することが検討されているが、殴打や抱擁のように強い力が加わるソーシャルタッチインタラクションを指向したものではない。本研究では、弾性体を用いた簡便な構成によって効果的にソーシャルタッチインタラクションを認識する手法について検討する。

第3章

毛状マルチタッチディスプレイ “FuSA² Touch Display”

3.1 はじめに

毛に覆われた道具や物体、動物やぬいぐるみといった存在に対して、人は毛の流れる方向に沿って撫でたりかきむしったりして、インタラクションを試みようとする。この時、毛の流れる方向に沿って撫でる行為は自然に想起されて行われ、撫でた対象からのフィードバックやその手触りなどを通じて、様々に感情的な影響を受けたり、あるいは相互に与え合ったりしていると考えられる。また、毛状物体とのインタラクションには、指や掌といった比較的小さな身体部位での動作のみでなく、腕全体で撫でたり抱いたり、頬ずりしたりするように、多彩な触れ合い方が含まれる。こうした毛状物体との触れ合い方をコンピュータとのインタラクションに導入することで、撫でる、かきむしるといった新しい方法による提示情報とのインタラクションが実現できるほか、ユーザからの様々な入力動作を引き出すようなデバイスを実現できると考えられる。

毛状物体を用いたインターフェースは、ユーザへの情報提示方法で2つに大別できる。ひとつは毛状物体の形状や、毛の流れる方向を制御し、その変化によって情報を提示するものである[96, 98, 99, 113]。もうひとつは映像を毛状物体の上に重畠表示するものである[100, 101]。形状変化で情報提示をするものでは、ユーザは視覚でも触覚でもその提示情報を感じ取ることができる。しかし、多くの毛状インターフェースではアクチュエータとして形状記憶合金を用いているため、変形速度は緩やかでユーザの入力に素早く応答しづ

らい。それに対して、映像提示が可能な毛状インターフェースでは文字や模様といった意味を解釈しやすい情報を素早く提示できる。一方で、形状変化を提示する毛状インターフェースに比べて視覚的な情報と触覚的な情報が十分に連動せず、ユーザが撫でたり触れたりした場合に違和感を与える場合があった。Fur-Fly [100] は毛状物体を敷き詰めたスクリーンの上方からプロジェクタで映像を投影しつつ、スクリーンを構成する毛状物体を映像に連動して動かすことで、スクリーンに手をかざしたユーザに与える視覚と触覚の刺激を連動させていた。しかし、ユーザがスクリーンを撫でたり押し込んだりして毛状物体の形状が変化しても提示映像がそれに追従しなかったり、スクリーンにかざしたユーザの手が影を作り映像が欠けてしまったりするため、ユーザが能動的に撫でたり触れたりするほど違和感を与える。毛状インターフェースを構成する毛そのものの色を変化させて視覚的な情報を提示すれば、ユーザが撫でたり触れたりして毛が屈曲した場合にもそれに連動して提示映像が自然に歪み、ユーザの視覚と触覚に与える刺激がよく調和した毛状インターフェースを実現できると考えられる。

そこで本章では、毛状物体の表面において映像提示とマルチタッチ検出が可能な毛状マルチタッチディスプレイ “FuSA² Touch Display” を提案する。本ディスプレイでは、毛状物体として、柔軟で細長いという毛状物体の特徴を備える素材であるプラスチック製光ファイバ (POF) を使用する。束ねた光ファイバの片方の断面をスクリーンとし、もう一方のファイバ断面からプロジェクタによって映像を投影することでスクリーンに映像を表示する。毛状ディスプレイの表面にユーザが触ると、光ファイバからの光が手の表面で反射することを利用して毛状表面に対するマルチタッチ入力を検出する。これによりユーザは毛状表面を撫でたりかきむしたりする動作で提示映像とインタラクションできるようになり、また、ディスプレイそのものが持つ毛状の見た目やその手触りから、ユーザが様々な入力動作を想起することが期待できる。

本章では2つのシステム構成によって毛状マルチタッチディスプレイを実現する。ひとつ目は、スクリーン面の背後で POF を屈曲させて奥行き方向に必要な空間を小さくしたコンパクトな構成である。屈曲に必要な POF で構成された毛状ディスプレイのうち、一部のファイバをタッチ検出専用に、残りを映像提示に用いる。スクリーン面からの奥行きが小さいこの構成は、椅子やソファなどの身近な物体に適用することに向いていると考えられる。もうひとつの構成では、タッチ検出に赤外線を用い、タッチ検出用の光と情報提示用の光とを波長多重化することで、全ての光ファイバで映像提示とタッチ検出を行う。こ

の構成では提示画像の表示品質を高められる。

3.2 屈曲した光ファイバによるコンパクトな毛状マルチタッチディスプレイ

3.2.1 概要

毛状インターフェースはロボットの体表面に用いられたり [114], 椅子やソファの表面に用いられたり [101] するように、周囲の空間に埋め込まれて利用されることがある。こうした用途に用いるためにには奥行きの小さいシステム構成であることが望ましい。本節では毛状マルチタッチディスプレイのスクリーン背面にある光ファイバを曲げて側方に伸ばすことで、光学式のタッチ検出方式を導入しながらも奥行きの小さい構成で毛状マルチタッチディスプレイを実現する。また、実装した毛状マルチタッチディスプレイを用いて、そのタッチ入力の認識精度について評価する。

3.2.2 システム構成

図 3.1 にシステム構成を示す。POF の束を並べて、その断面を毛状ディスプレイのスクリーン面として用いる。それぞれの束は、スクリーン面の後方で 2 つに分割されて、それぞれ別の方に向に曲げられる。ひとつの束に含まれる POF のうち、半数をカメラに向かうように、残りの半数をプロジェクタに向かうように曲げて配置する。カメラの正面にあるファイバ断面の集合をカメラ撮影面、プロジェクタの正面にあるファイバ断面の集合をプロジェクタ面と呼ぶ。全ての POF 束に分割と屈曲を施し、分割した半数をカメラ撮影面やプロジェクタ面に向けるが、この時、カメラ撮影面でも、プロジェクタ面でも、スクリーン面での束の位置関係に合わせて分割した束を並べておく。このように束ごとの位置関係を各面の間で保つように構成することで、プロジェクタ面に投影された画像は大きく崩れることなくスクリーン面に表示されることになる。

3.2.3 タッチ検出手法

毛状物体へのタッチ検出には、光が手指表面において拡散反射する原理を利用する。図 3.2 にタッチ検出の仕組みを示す。スクリーン面のうち、プロジェクタ面から入射した光

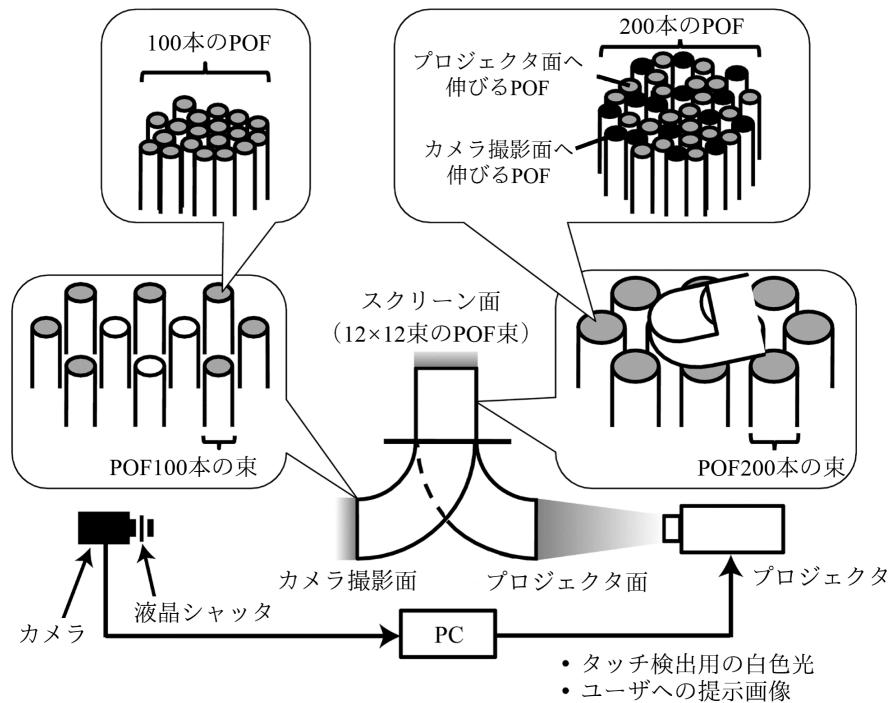


図 3.1: 屈曲した光ファイバを用いた毛状マルチタッチディスプレイのシステム構成

によって発光している領域に手指が触れると、その光が手指表面で拡散反射され、カメラ撮影面に繋がる POF に入射する。このとき、カメラ撮影面ではスクリーン面から入射した光によって対応する POF 断面が発光する。この発光をカメラで検出することで、システムはスクリーン面上のタッチされた領域を認識できる。

この手法によるタッチ検出の場合、スクリーン面のうち発光している領域でしかタッチを検出できないため、スクリーン面の全面においてタッチを常に検出するためには、スクリーン面の全面が常に光っていなければならない。実際にはユーザに提示する画像によってスクリーン面の輝度分布は変わり、全面が常に高い輝度で発光しているとは限らないため、この手法では安定してタッチ入力を検出できない恐れがある。そこで本システムでは、タッチ検出用の光とユーザへの情報提示のための光を時分割多重化し、カメラの前に液晶シャッタを設置することで、画像提示とタッチ検出を両立させる。図 3.3 に、プロジェクタとカメラの前に設置する液晶シャッタの動作を示す。プロジェクタは、タッチ検出用の均一な光と、ユーザに提示する画像とを交互に切り替えて出力し、液晶シャッタはプロジェクタの出力切り替えに同期して開閉する。具体的には、プロジェクタがタッチ検出用の均一な光を投影している間は、カメラの前にある液晶シャッタを開き、プロジェク

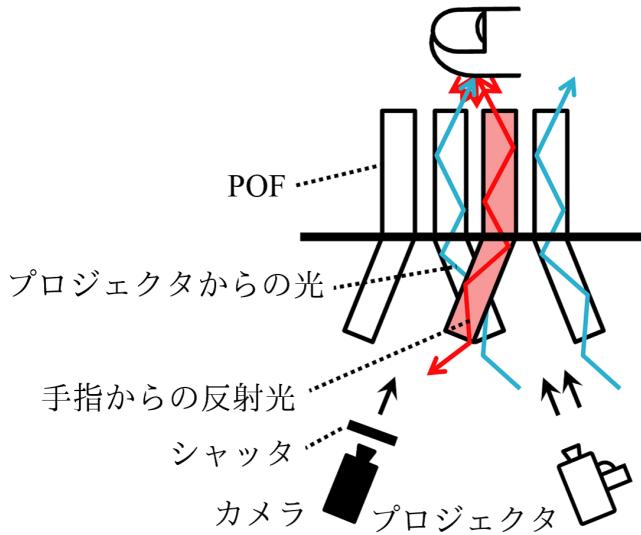


図 3.2: タッチ検出の原理

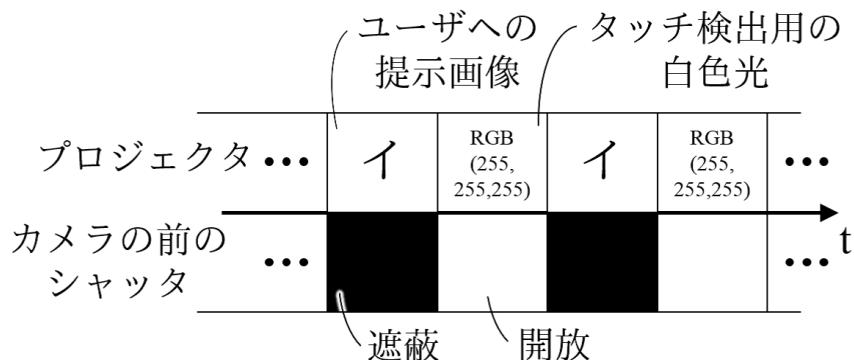


図 3.3: プロジェクタと液晶シャッタの動作

タがユーザへの情報提示のための画像を投影している間は、液晶シャッタを閉じる。このようにスクリーン面全面を発光させる均一な光を時分割多重化して投影することで、どのような画像をユーザに提示している場合でもスクリーン全面で安定してタッチ入力を検出できる。また、ユーザへの提示画像を投影している際にはスクリーン面の輝度分布が不均一なため、この間にカメラに到達する光はタッチされた領域を正確に反映したものではない。そこでプロジェクタと同期した液晶シャッタによってこの時の光を遮断し、タッチされた領域を画像処理で検出しやすくする。

なお、タッチ検出のために用いる光を時分割多重化ではなく波長多重化し、タッチ検出用に赤外線を用いる方法も検討できる。しかし、実装したシステムでプロジェクタ面から

赤外線投光器で赤外線を照射しながらスクリーン面をタッチし、カメラ撮影面に手指で反射した赤外線が到達するかを赤外線カメラで観察したところ、タッチ入力に十分な輝度が観察されなかった。これは、50 cm の長さの POF 束を伝搬するうちに赤外線が強く減衰したことが原因と考えられる。使用した POF は可視光に比べて赤外線が大きく減衰する特性を持っており、プロジェクタ面からスクリーン面まで、また、スクリーン面からカメラ撮影面に到達するまでに光量が大きく損なわれているものと考えられる。

このほか、円偏光フィルタを利用した構成も検討した。この構成では、束ねた POF を分割せず、束の片方の断面の側にプロジェクタとカメラを設置し、それぞれのレンズに同じ円偏光フィルタを被せる。タッチ検出用にプロジェクタから投影した光のうち、POF 束の断面で鏡面反射した成分が円偏光フィルタで遮断され、手指で反射した成分だけをカメラに撮影することを狙った構成であるが、予備実験の結果、円偏光フィルタを通過する光量が乏しく、カメラ画像からタッチ入力を検出できないことが確認された。そのため本節では可視光を時分割多重化する手法を用いている。

3.2.4 実装

これまでに述べた構成により、マルチタッチを検出可能な毛状ディスプレイを実装する。実装に使用した POF は直径 0.25 mm の POF（エスカ、三菱レイヨン製）である。POF は 50 cm の長さにカットして用い、ひとつの POF 束は約 200 本の POF からなるように実装した。実装したスクリーン面は正方形で、大きさは 85 mm × 85 mm である。1 辺に 12 束の POF 束を使用しており、POF 束は合計で $12 \times 12 = 144$ 束を用いた。使用した POF の総数は、概算すると $144 \times 200 = 28,800$ 本であり、それらの総距離は 14.4 km になる。

POF 束を固定するために、スクリーン面、カメラ撮影面、プロジェクタ面のそれぞれに金網を設置し、その隙間に POF 束を挿入している。スクリーン面では、金網の固定位置を変えられるようにしてあり、金網で固定される部分から POF の毛先までの長さは、30 mm, 60 mm, 80 mm, 110 mm の 4 段階に調節できる。実装したシステムとインタラクションする様子を図 3.4 に、実装したシステムでカタカナの「イ」を表示する様子を図 3.5 に示す。また、実装したディスプレイの外観を図 3.6 に示す。

図 3.6 でも確認できるように、スクリーン面から下方に伸びた POF は、半分がプロジェクタ面に向かっており、残り半分はカメラ撮影面に向かっている。従って、プロジェクタ



図 3.4: 実装システムでのインタラクション

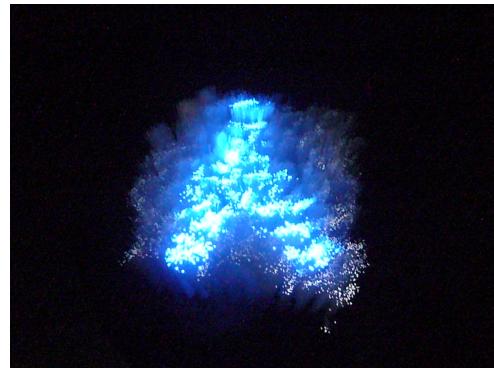


図 3.5: 「イ」を表示する毛状ディスプレイ

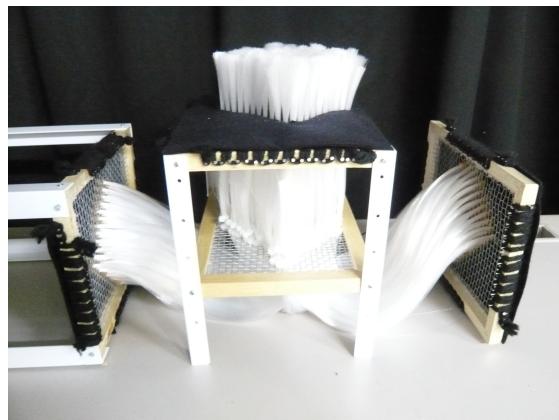


図 3.6: 実装した毛状マルチタッチディスプレイの外観

からの光で発光する POF はスクリーン面に露出している POF のうち半数だけであり、カメラ撮影面に向かう残り半数の POF が発光することはない。このことは、画像の解像度を低下させることに繋がる。また、カメラ撮影面に繋がる発光しない POF の断面がスクリーン面の一部分に集中した場合には、ドット抜けのように常に暗く見えてしまう恐れがある。しかし実際には、各 POF 束の中でカメラ撮影面に向かう POF と画像投影面に向かう POF が偏らないように実装したため、ユーザの目にはドット抜けのような不自然さは知覚されない。

提案システムの実装にあたっては、時分割表示をするために 120 Hz のフレームレートが保証されている両眼立体視用の DLP プロジェクタ (DepthQ HD, Lightspeed Design 社, InFocus Corporation 製) を利用し、カメラは IEEE-1394b 接続で高速に画像を転送できるハイスピードカメラ (Grasshopper, Point Grey Research 社) を利用する。液晶シャッタには、赤外線エミッタ (EPRO, StereoGraphics 社), および、液晶シャッタ眼鏡

(CrystalEyes3, StereoGraphics 社) を利用する。プロジェクタの画像の切り替えは 120 Hz で実行する。情報提示のための画像とタッチ検出用の単色光を 120 Hz で切り替えることで、単色光を全面に投影している状態があることをユーザに気付かせない。また、提示画像自体のリフレッシュレートは 120 Hz の半分の 60 Hz となるため、投影画像自体にフリッカを感じる可能性も小さい。

タッチ検出を精度よく行うためには、手指からの反射光が高い輝度でカメラ撮影面に到達することが望ましいため、タッチ検出のために投影する均一光はできる限り高輝度であることが望ましい。しかし、あまりに高輝度の光を投影すると、時分割で重畠している情報提示用の画像に対して入力検出用の光が強くなりすぎ、提示画像を打ち消してしまう恐れがある。また、タッチ検出用の均一光の強度は、周囲の明るさや、実装に用いる光ファイバの光損失特性に合わせて調整する必要がある。本実装においてはタッチ検出用の均一光の輝度は経験的に決定している。

実装したシステムでは、次のような画像処理によってカメラで取得した画像からタッチされた位置や範囲を特定する。まず、スクリーン面に指で触れた場合には、図 3.7a のような画像がカメラで撮影される。システムはこの画像に動的背景差分処理を施し、移動体を抽出する。次に、前景を白に、背景を黒にする 2 値化処理を行う。その結果を図 3.7b に示す。なお、動的背景差分における閾値は周囲の明るさや投影する均一光の強度によって調整する必要があり、実装システムの運用時には経験的に決定している。

実装した提案システムでは、スクリーン面の根本にある金網で POF 束が拘束されているが、それより上方では POF は自由に入り混じってひとつのスクリーン面を構成している。そのため、ユーザがタッチした際に手指で反射した光は、ユーザがタッチした領域にある POF 束だけに入射するわけではなく、ユーザがタッチした領域より外側にある POF 束から伸びた POF にも入射してしまう。その結果、カメラ撮影面ではタッチされていない POF 束にもわずかに発光が生じる。この発光はタッチ検出においてはノイズとなる。こうしたノイズは小さな発光点として撮影されるため、モルフォロジ変換によって収縮と膨張の処理を 1 回ずつ行うことで除去する。ノイズを除去した結果を図 3.7c に示す。こうして得られた画像を最終的なタッチ検出用の画像として用いる。

実装した提案システムはタッチ入力を検出するための画像処理に動的背景差分を用いているが、静的背景差分を利用してもよい。静的背景差分を適用すれば、移動体だけでなく静止している物体も検出できるため、スクリーン面にタッチしたまま静止している手指を

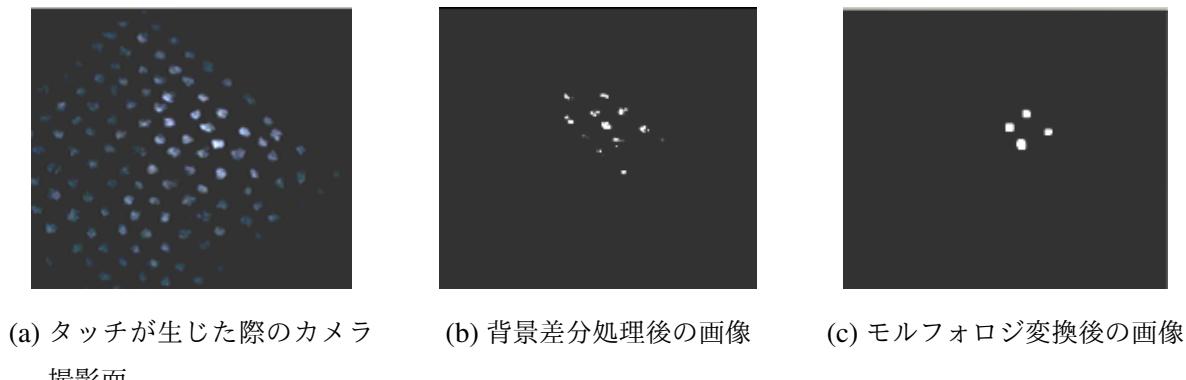


図 3.7: タッチ検出のための画像処理

検出できるようになる。

実装した毛状マルチタッチディスプレイでのインタラクションを体験できるように、タッチ入力に応じて画像出力が変化するようなインсталレーションを構築した。このインсталレーションでは、毛状ディスプレイを白色に発光させておき、ユーザからのタッチ入力が検出されると、タッチされた領域がランダムに決定された色に変わっていき、タッチせずに放置していると、色が時間とともに薄まってまた白色に戻る。毛状のスクリーン面を撫でると、撫でる手を追いかけるように、触れた部分が順に着色していき、また少しずつ白色に戻る様子が提示される。なお、今回の実装では、カメラで撮影した 640×480 pixel の画像を、 64×48 の領域に分割し、それぞれについてタッチを検出している。

3.2.5 特性評価

本節で述べた毛状表面でのタッチ検出手法について、実装したシステムを用いてその特性を評価する。毛状ディスプレイではスクリーン面において POF が自由に伸びているため、タッチされた領域とカメラ撮影面で発光する領域が完全には対応しない。また、指先で触れるような小さな領域へのタッチでは、反射光の量が足りず、タッチ検出に必要な輝度の発光がカメラ撮影面に生じない可能性もある。そこで、システムがタッチとして検出できる最小のタッチ面積を評価し、手や指で撫でる動作のような、毛状物体に特有のタッチインタラクションが実装したシステムで十分に認識できることを確認する。

評価ではまず、毛状ディスプレイのスクリーン面に穴の開いたマスクを被せる。次に、マスクに開いた穴の全体を覆うように指でスクリーン面に触れ、タッチ検出用のアプ

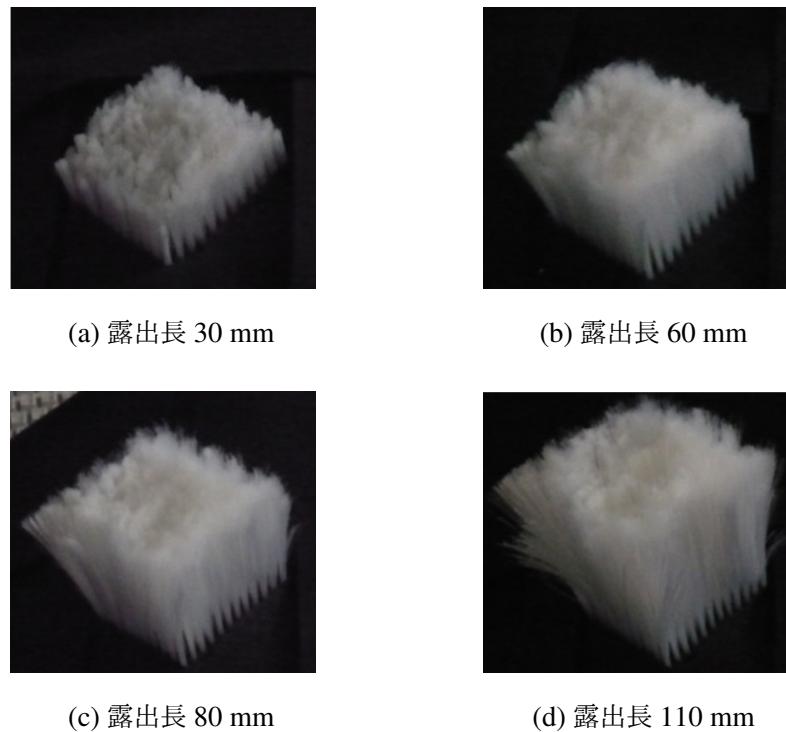


図 3.8: スクリーン面における POF 露出長の変化

ケーションでタッチを検出できるか測定する。このタッチ検出の有無と同じ条件で 10 回繰り返し、タッチ入力を検出できた回数の割合を算出する。本評価ではこの割合を認識率と呼ぶ。実験条件として、ディスプレイの金網からスクリーン面までの POF の長さは、図 3.8 のように 30, 60, 80, 110 mm の 4 段階を用い、マスクに開けた穴の直径は、5, 7, 10, 15, 20, 25 mm の 6 段階を用いた。なお、実験に用いた手指検出用のアプリケーションは Microsoft の Visual Studio .NET 2005 を用いて作成しており、画像処理には OpenCV¹⁾を用いる。実験に用いるコンピュータは、デスクトップ PC (OS : Windows XP Pro, RAM : 2 GByte, GPU : NVIDIA Quadro FX3450, CPU : Xeon Quad Core 2.33 GHz) とした。

得られた実験結果を図 3.9 に示す。図からわかるように、タッチ領域の直径が大きくなると認識率が向上し、全ての高さにおいてタッチ領域の直径が 15 mm 以上の場合に 90% 以上の認識率が得られた。また、スクリーン面の POF 露出量が長いほど認識率が低くなる傾向が見られた。

¹⁾ OpenCV, <http://opencv.org/> accessed on 25th Dec., 2013

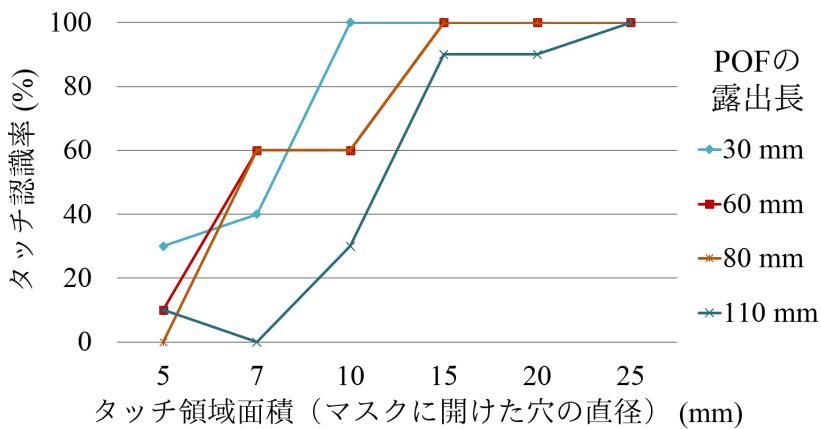


図 3.9: タッチ領域面積とタッチ認識率の変化

表 3.1: 日本人青年男女の手のひらの大きさの平均

	縦 (mm)	幅 (mm)
男性	189.1	81.8
女性	177.1	73.6

3.2.6 考察

検出可能なタッチインタラクション

図 3.9 によれば、実装した毛状マルチタッチディスプレイは直径 15 mm 以上のタッチを 90% 以上の認識率で検出できる。表 3.1 に日本人青年男女の一般的な掌の大きさの平均を示す [115]。これによれば、平均的な手のひらは直径 15 mm の円よりも十分に大きいため、実装システムでは手のひらで撫でるようなインタラクションを十分に認識できるといえる。しかし、1 本の指で触れるようなタッチ入力に関しては、指と毛状表面の接触面の直径が 15 mm 以上になるとは考えにくく、高い認識率で検出することが難しい。本節で実装した毛状マルチタッチディスプレイにおいて、指でのインタラクションを用いる場合には、毛状ディスプレイに指を差し込んだり、指を素早く移動させたりするような、広い面積で接触する操作をユーザに促す必要があると考えられる。

また、図 3.9 から、スクリーン面に露出する POF の長さが長いほどタッチの認識率が低下することもわかった。スクリーン面に露出した POF が長くなるほど毛状ディスプレ

イ内で POF が入り乱れやすくなり、スクリーン面での POF 端の位置と、スクリーン面の根本で固定された POF 束の位置とが一致しなくなる。その結果、手指からの反射光が異なる POF 束に由来する POF にも分かれて入射してしまい、カメラ撮影面ではまとまった領域に輝度の増加が現れず、タッチを検出できないものと考えられる。また、スクリーン面に露出する POF が長くなるほど、毛状ディスプレイが広がりやすくなり、スクリーン面における POF の密度が低下することも、認識率低下の原因と考えられる。スクリーン面で POF 端の密度が低下すると、手指からの反射光が POF 断面に入射しにくくなり、カメラ撮影面に現れる発光が弱まってしまうためである。

露出した POF が長い場合でも精度よくタッチを検出するためには、カメラ撮影面での小さな発光点もタッチとして検出するようなアルゴリズムの開発と、スクリーン面の POF 端が低密度な場合でも反射光の輝度が十分になるような高輝度のプロジェクタの利用が有効と考えられる。

設置の自由度と光ファイバ長の影響

毛状インターフェースはロボットの体表面に用いられたり [114]、椅子やソファの表面に用いられたり [101] するように、周囲の物体に埋め込まれて利用されることがある。提案した毛状ディスプレイでも、スクリーン面からの奥行きが小さいほど空間中に埋め込みやすい。本節で述べた屈曲した POF による構成は、POF を側方に曲げることでカメラやプロジェクタをディスプレイの側方に設置でき、奥行きを抑制できることから、こうした空間中への埋め込みに向いていると考えられる。光ファイバを用いて光学的な方法でのタッチ検出を小さな奥行きで実装した例としては、FiberBoard [38] があるが、本節の構成も、これと同様に光ファイバを用いることでディスプレイ全体の奥行きを小さくしている。なお、実装した毛状マルチタッチディスプレイでは、スクリーン面の根本から筐体の設置面までの奥行きが 18.5 cm だけであった。

ただし、このように光ファイバを屈曲させた構成では、ディスプレイサイズが大きくなるほど長い光ファイバを利用する必要がある。本節で実装した毛状マルチタッチディスプレイでも使用した POF の長さは 50 cm となっている。光ファイバが長くなるほど光の伝送損失は大きくなり、特に減衰しやすい波長の光では、光ファイバの長さが減衰に与える影響は顕著となる。実装で使用した POF では、赤外線が可視光に比べて減衰しやすい。そのため、ディスプレイのサイズに関わらず安定してタッチ入力を検出するためには、本

節で述べたように時分割多重化した可視光を用いることが望ましいと考えられる。一方で、可視光を時分割多重化して投影すると、スクリーン面での表示画像の品質を劣化させてしまう。

このように、光ファイバを屈曲させた構成では、カメラやプロジェクタなどの設置位置を自由に決められる設置性の良さを持つものの、光ファイバが長くなりがちであり、また、可視光を時分割多重化して投影するために表示できる画像の品質が低くなるという短所を持っている。

3.3 赤外線によるマルチタッチ検出方式を適用した毛状マルチタッチディスプレイ

3.3.1 概要

屈曲した光ファイバを用いた構成では、光ファイバを曲げることで自由な位置にプロジェクタやカメラを設置することができた。また、光ファイバを曲げることでカメラやプロジェクタの光路を側方に伸ばすことができるため、システム全体の奥行きを小さくすることができた。一方で、表示できる画像のコントラストは低くなっていた。原因としては、スクリーン面に露出した POF の半数はカメラにだけ向いているため発光しないこと、また、スクリーン全面に時分割多重化した白色光を提示しなければならなかったことが挙げられる。それに加えて、スクリーン面を大型化しようとする場合には、スクリーン面の背後で膨大な量の POF 束を分割してカメラ撮影面とプロジェクタ面とに誘導しなければならず、配線の手間が問題となりうる。毛状インターフェースを大面積の空間に適用する場合には、より簡素で大面積に実装が可能な構成が望まれる。

そこで本節では、画像の表示品質を改善しつつ、画面サイズを拡張可能とした構成による大画面毛状マルチタッチディスプレイを提案する。図 3.10 に本節で実装する大画面毛状マルチタッチディスプレイでのインタラクションの様子を示す。本節で述べる構成では、赤外線を用いた毛状表面でのタッチ検出手法を適用することにより、提示画像の品質を高めているほか、POF を用いた毛状ディスプレイの構造も単純化し、画面サイズを拡大しやすくしている。

実装したシステムを用いて、ディスプレイとしての基本的な要素である表示特性として、表示の解像感や歪みの傾向について評価する。タッチ検出に関しても狭小なタッチの



図 3.10: 大画面毛状マルチタッチディスプレイ

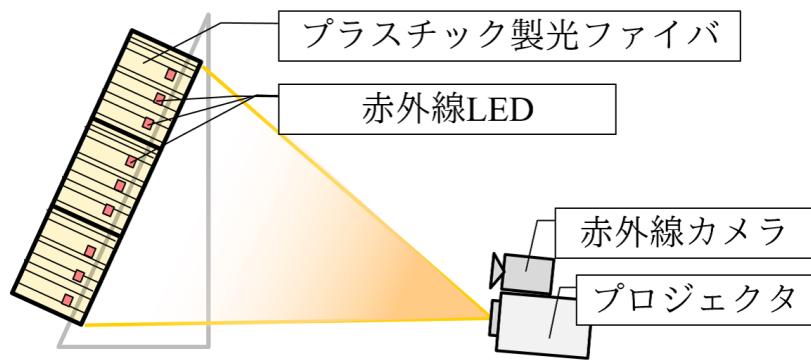


図 3.11: 大画面毛状マルチタッチディスプレイの構成

検出能力や誤検出の程度を評価する。また、実装した毛状ディスプレイを実際に体験したユーザの様子から、どのようなインタラクションが行われるかを確認し、アンケート調査によってディスプレイがユーザに与える印象についても評価する。

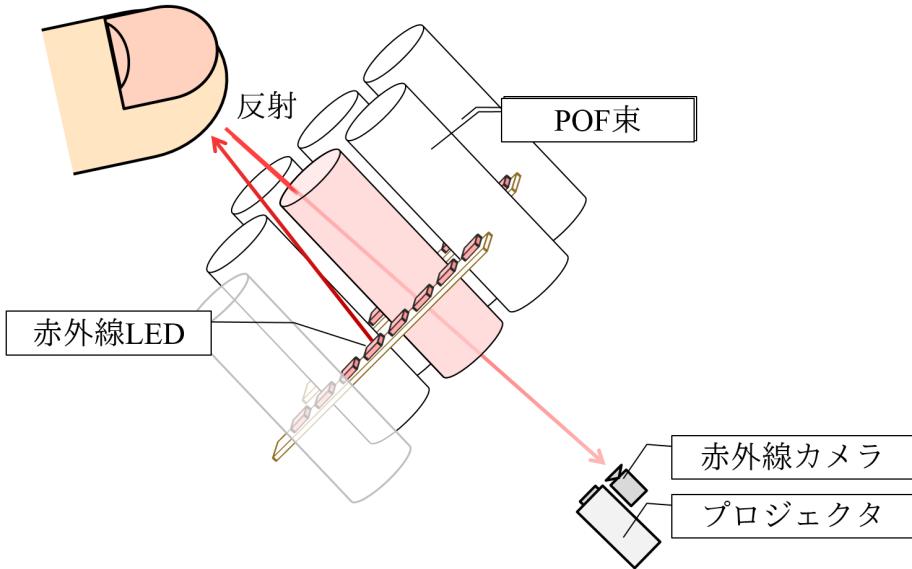


図 3.12: 赤外線によるタッチ検出手法

3.3.2 システム構成

提案するディスプレイは、図 3.11 に示すように、主として POF による毛状ディスプレイと、映像投影のためのプロジェクタ、タッチ検出のための赤外線 LED と赤外線カメラから構成される。毛状ディスプレイとして、同じ長さの POF を数十本束ねた POF 束を大量に並べることで、ファイバ断面が無数に露出した毛状表面を構成する。ディスプレイへの映像提示には、毛状ディスプレイの後方に設置するプロジェクタを用いる。タッチ検出には赤外線を用い、手指に向かって照射した赤外線の反射を利用してタッチ入力を検出する。本構成では映像提示のための光とタッチ検出のための光を波長多重化して同時に照射するため、毛状ディスプレイを構成する全ての POF が情報提示にもタッチ検出にも利用される。

タッチ検出の原理を図 3.12 に示す。毛状ディスプレイの毛束間に配置した赤外光源（赤外線 LED アレイ）から、スクリーンの表面に向けて赤外線を照射する。ユーザがスクリーン面にタッチすると、赤外線がユーザの手指で反射され、POF 内を通ってスクリーン背面へ伝搬する。この時、スクリーン背面の赤外線量の分布を赤外線カメラによって撮影すると、タッチされた領域だけに赤外線量の増加が見られるため、それを検出することで

タッチ入力を検出できる。

ここで、赤外光源となる LED を毛束の間に配置しているのは、スクリーン面に向けて照射した赤外線がタッチとは無関係に赤外線カメラに到達することを防ぐためである。Diffused Illumination 方式 [35] のように、スクリーン後方の離れた位置から毛状ディスプレイに向けて赤外線を照射した場合、赤外線は POF 内を通る以外にも、POF の側面や POF を包む保護層の断面によってタッチとは無関係に拡散反射してしまう。この場合、ユーザが毛状ディスプレイに触れていなくてもスクリーン背面が赤外線で強く発光してしまふため、ユーザのタッチにより手指からの反射光がスクリーン背面に現れても、タッチしていない時との差が現れにくく、タッチ検出が難しくなる。毛束の内部に赤外光源を挿入することで、スクリーン背面が非タッチ時に赤外線で照らされにくくなり、タッチ検出が容易となる。ただし、赤外光源となる LED を POF 束の隙間に配置する場合、スクリーン面の毛並みにも隙間が生じてしまい、提示情報が読み取れなくなるという問題が懸念される。この問題に対しては、3.3.3 項で詳細を述べるが、実装の段階で小さな赤外線 LED を利用して隙間を可能な限り小さくすること、そして、スクリーン表面に向かう POF の自然な広がりによってこの隙間が埋められるように POF に十分な長さを持たせることで対応する。

また、毛状マルチタッチディスプレイではその面積が重要な要素となる。例えば、掌ほどの大きさしかない毛状ディスプレイであれば、それに入力できる動作は指先や掌で触れたり撫でたりする程度に限定されるが、大画面であれば、前腕全体を使って撫でたり、頬やそのほかの身体部位を用いて触れ合ったりできるようになる。容易に大きさを変えられ、大面積での実装が可能な構成にすることで、毛状マルチタッチディスプレイは様々なタッチインタラクションを受け付けられるようになり、その有用性を高められると考えられる。そこで、POF 束と赤外線 LED からなる毛状ディスプレイの部分をモジュール化し、これを並べることで画面サイズを拡張できるように設計し、実装する。

3.3.3 実装

毛状ディスプレイの部分は、POF 束と赤外線 LED を統合したモジュールとして実装し、このモジュールを並べることで容易に画面サイズを拡張できるようにする。実装には図 3.13 に示すような直径 8 mm、長さ 85 mm の POF 束を用い、これを多数並べて毛状ディスプレイを構築する。実装した POF の内部は赤外線が減衰しやすいため、予備実験

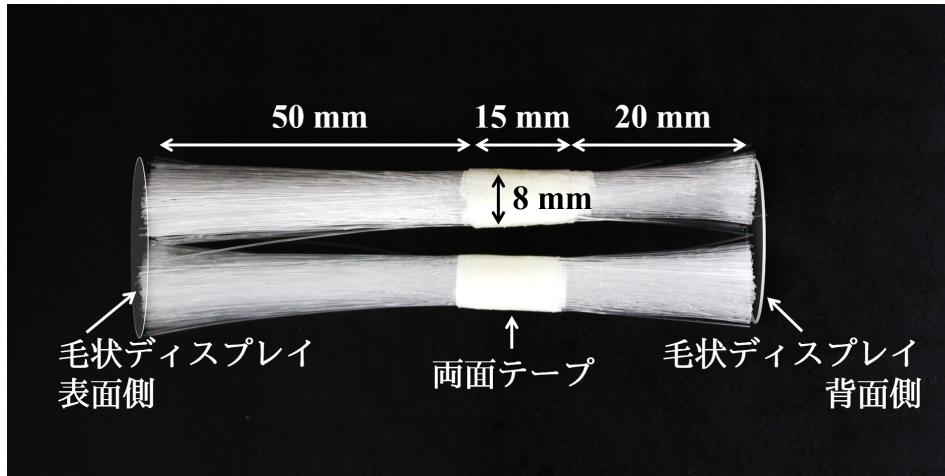


図 3.13: POF 束

によりタッチ検出を行える POF の長さを調査し, 85 mm で実装することとした。POF 束は, 毛筆の作り方に倣い, POF を薄い粘着テープに巻き込んで束状に固定してから切りそろえることで作成する。実装では幅 15 mm, 厚さ 0.09 mm の両面テープを 160 mm の長さに切り, その全面に切り揃えた POF を貼り付けた後, その両面テープを巻いて POF 束を作成した。これにより POF は両面テープの粘着力で固定され, POF を引っ張っても容易には抜けない程度の強度を確保できる。なお, テープを POF 束に貼る位置は, スクリーン面側の端点から 50 mm の位置とした。両面テープの固定位置からディスプレイ表面まで 50 mm の長さがあれば, 両面テープで拘束した位置に LED を挿入しても毛状ディスプレイ表面では隙間があるように見えないことを予備的な調査で確認している。こうして作成した 1 束に含まれる POF の数はおよそ 300 本であった。この POF 束を集合し, 並べることで毛状ディスプレイを構築する。

赤外光源には, 櫛状のごく細い基板上に実装した赤外線 LED を用いる。実際に実装した基板を図 3.14 に示す。赤外線 LED が実装された幅 0.8 mm, 長さ 120 mm の基板を, 長さ 160 mm の電源供給用の基板に 10 mm 間隔で 16 本差し込み, 櫛の形状にしている。この櫛状の基板を POF 束と POF 束の間に挿し込むことで毛状ディスプレイの内部に赤外光源を配置する。ここで, 赤外線 LED の密度は, タッチしたユーザの手指で反射した赤外線が赤外線カメラによって検出できるだけの光量になるよう考慮して決定した。赤外線 LED には OSRAM 社の SFH4050 を用いた。この LED が発する赤外線の中心波長は, 実装に使用した POF でも比較的減衰しにくい 850 nm となっている。

POF 束と赤外線 LED 基板を統合するため, 図 3.15 に示す 160 mm × 120 mm の梯子

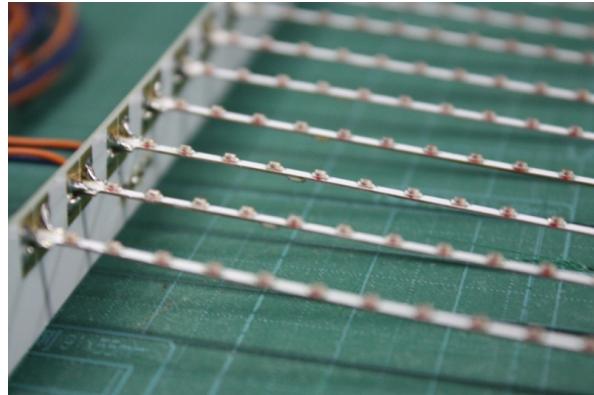


図 3.14: 赤外線 LED を実装した基板



図 3.15: 梯子状のフレーム

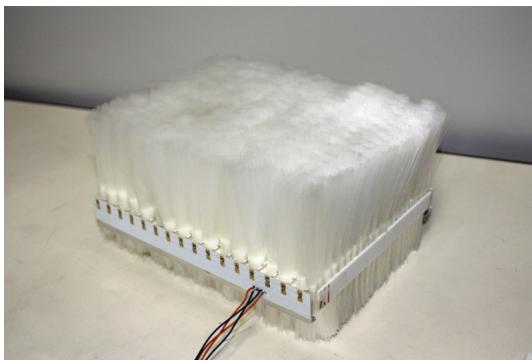


図 3.16: 毛状ディスプレイモジュール

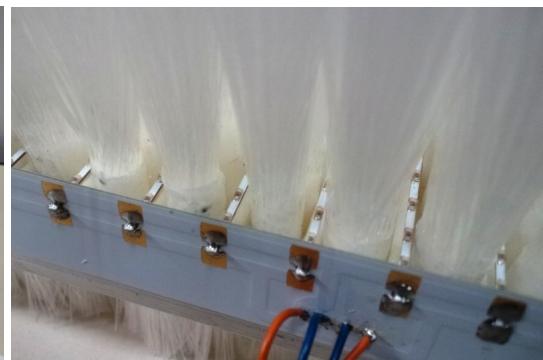


図 3.17: モジュール内の赤外線 LED

状のフレームを用いる。これは 10 mm の等間隔に 2 mm 幅のプラスチック板を並べたもので、梯子の段の部分に POF 束を入れて接着すると、束と束の間にあるプラスチック板の厚みだけ POF 束の間に隙間が生まれる。このフレームによって LED 基板を挿入するための隙間を毛状ディスプレイ内部に確保することで、ユーザとのインタラクションの過程で LED 基板に負荷がかかり、LED 基板が破損することを防ぐ。



図 3.18: 実装した毛状マルチタッチディスプレイの概観

以上 3 つの構成要素（直径 8 mm の POF 束，櫛状の赤外線 LED 基板，梯子状フレーム）を統合することで、図 3.16 に示すような毛状ディスプレイのモジュールとなる。このモジュールを並べることでアスペクト比が 4:3 や 16:9 の毛状ディスプレイを構築できる。実装したモジュールの内部には、図 3.17 に示すように LED 基板を挿入するための 2 mm の隙間があるが、前述のように、POF がディスプレイ表面に向かって自然に広がるよう十分に長い POF で毛束を実装したため、ディスプレイに対峙した際に毛並みに隙間があるとは感じられない。

実装した毛状ディスプレイの概観を図 3.18 に示す。実装した毛状ディスプレイのサイズは、9 つのモジュールを 3×3 に並べた 24 インチ相当 ($48 \text{ cm} \times 36 \text{ cm}$) とし、腕全体で撫でる動作を無理なく行えるものとした。

こうして実装した毛状ディスプレイにおいてタッチ検出を行うため、ディスプレイの背面に赤外線カメラを設置する。赤外線カメラには、GR-CAM130N2 (Groovy 社) のレンズに赤外線透過フィルタ IR-76 (富士フィルム) を被せたものを用いる。この赤外線カメラで取得した画像は PC 上で背景差分処理を含む処理にかけられ、タッチ領域を特定するために用いられる。また、誤検出抑制のためにモルフォロジ変換によって小さな発光点は排除する。なお、背景差分の処理において、差分を検出する輝度差の閾値を変えることでタッチ検出の感度を調節できる。

3.3.4 特性評価

概要

実装した大画面毛状マルチタッチディスプレイによって、表示特性やタッチ検出の特性について評価する。表示特性としては表示の解像感や歪みの傾向について評価する。タッチ検出については狭小なタッチ領域の検出能力や誤検出の程度についてそれぞれ評価し、POFの特性を利用した赤外線によるタッチ検出手法で触れる、撫でるといったインタラクションを認識できるかを確認する。また、実際に本ディスプレイをユーザに体験してもらい、どのようなインタラクションが見られるかを観察するほか、実装した毛状ディスプレイにユーザがどのような印象を持ったかについてアンケートを通じて評価する。

表示特性

実装した毛状ディスプレイは画面全体がファイバ断面で満たされており、プロジェクタから投影された画像はそのファイバ断面の発光点の集合として表現されるため、毛状ディスプレイの表面では POF の屈曲に従って歪んで見える。ユーザのタッチインタラクションによって POF が搔き分けられた場合には、POF の先端が移動することに伴って提示画像も自然と変形する。このように毛の変形に連動して自然に提示画像が歪むことで、提示画像はあたかも毛の模様であるかのように表示されることになる。しかし、画面を構成する発光点（POF 先端）の位置が固定されていないため、ユーザが触れていない時でも表示画像は歪んだり、解像感に乏しい表示になったりすると考えられる。

そこで毛状ディスプレイの表示特性として、その解像感を評価する。この評価では、投影した縞模様を縞模様として視認できる最小の縞間隔を測定する。プロジェクタから白と黒の等間隔な縞模様を、縞幅を徐々に変化させながら投影し、縞模様が視認できなくなる縞幅を 3 人の評価者に回答してもらう。太い縞模様を徐々に細くしていく場合に縞が見えなくなる段階と、細い縞模様を徐々に太くして縞が見えるようになる段階とをそれぞれ回答してもらい、縞を視認できる最大の縞幅を得ることで実装した毛状ディスプレイでの解像感を評価する。なお、毛状ディスプレイの表面から評価者までの距離は 50 cm に設定する。これはユーザが手を伸ばして毛状マルチタッチディスプレイと触れ合える距離として設定した。

その結果、縦縞を投影した場合は評価者間で平均して約 11 mm 幅の縦幅まで、横縞を

投影した場合は評価者間で平均して約 13 mm 幅までの横縞であれば縞模様として視認できるという結果を得た。横縞よりも縦縞の方が視認しやすいのは、POF 端の位置が上下方向には不揃いになっていたことが原因であると考えられる。実装した毛状ディスプレイでは梯子状のフレームに POF 束を挿入しているが、最終的に組み上げたディスプレイ内では、梯子状フレームのプラスチック板はディスプレイ面に対して上下方向に伸びている。そのため、プラスチック板に挟まれた POF 束は、左右には動きにくく上下には動きやすい状態にある。結果として実装した毛状ディスプレイでは POF の先端が上下にばらつきやすく、投影された映像は左右方向よりも上下方向に波打ったように歪みやすくなっていた。

POF 束の拘束方法を変更することでその歪みの傾向も変化するといえ、より解像感の高い表示が必要な場合には、ひとつの POF 束を細くしつつ、各 POF 束を上下左右から挟むように拘束して並べればよいものと考えられる。一方で、画像の歪みの原因となっている POF 先端の位置のばらつきは、POF が長くなるほど顕著に現れる。実装した毛状ディスプレイでは POF が自重で大きくなってしまうことはなかったが、POF を長くするほどに自重での変形が大きくなり、それに伴って提示画像も変形しやすくなる。このほかに POF の太さや密度によっても表示特性は変化する。これらの設計パラメタが毛状マルチタッチディスプレイの特性に与える影響については 3.3.7 項でまとめて述べる。

なお、POF の変形によって POF 内の光の伝搬が阻害されて輝度が減少したり、発色に変化が生じたりする現象は視認されなかった。

タッチ検出特性

毛状表面でのタッチ検出の特性として、2 つの項目について評価する。ひとつ目は、どの程度まで小さなタッチを検出できるか、すなわち、タッチ検出が可能な最小のタッチ領域の大きさである。ふたつ目は、どれほどスクリーン面から離れた掌をタッチとして誤検出するか、すなわち、誤検出が生じる掌からスクリーン面までの最大距離である。本節で述べた赤外線によるタッチ検出では、毛状ディスプレイの内部から照射した赤外線がディスプレイに近接した手指の表面でも反射し、このときの反射光によってタッチ入力が誤検出されてしまう場合がある。誤検出が発生する掌とスクリーン面との最大距離を測定することで、実装したシステムにおけるタッチ検出の正確性を評価する。

最小タッチ領域の測定では、3.2.5 項と同様に、毛状のスクリーン面に穴を開いたマス

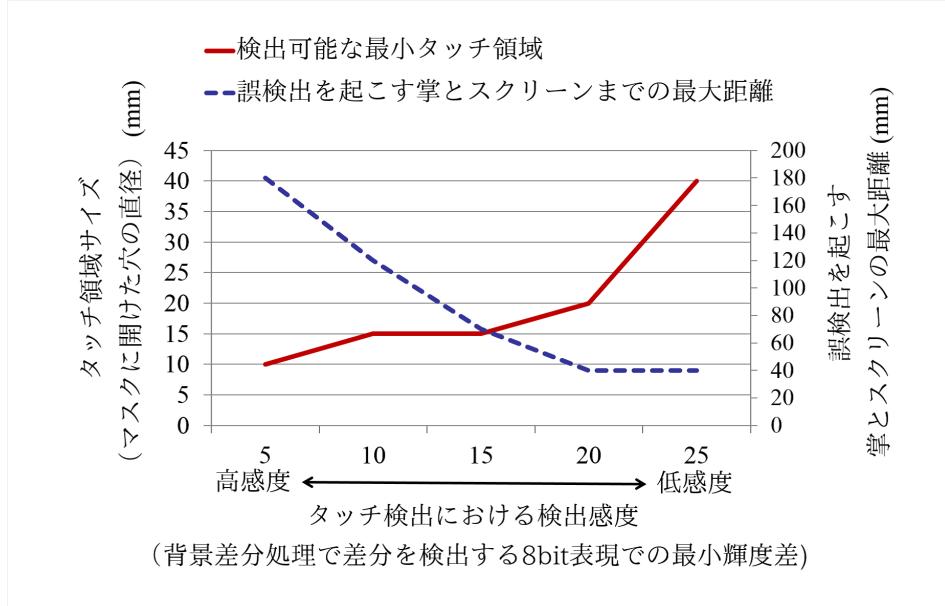


図 3.19: タッチ検出の特性

クを被せ、その穴を塞ぐように手指でタッチを行う。この時、システムがその穴の開いた領域にタッチを検出するかどうかを見ることで、タッチ検出が可能かを判定する。測定条件には、マスクに開けた穴の大きさと、タッチ検出の感度を用い、それぞれを変化しながら安定してタッチ入力を検出できる条件について検討する。穴の大きさは直径 10 mm から 40 mm まで、5 mm 刻みで 9 段階に変化させる。タッチ検出の感度は、カメラ画像からタッチされた領域を特定するための背景差分処理における、差分を検出する輝度差の閾値を変えることで調整する。ある大きさの穴について測定を 10 回繰り返し、そのうち 9 回以上でシステムがタッチを検出できた場合、その大きさのタッチは安定して検出できるものとする。

誤検出を生じる最大距離の測定では、タッチ検出されない程度に十分遠くから掌をスクリーン面に近づけていき、タッチ入力が誤検出された時点の掌とスクリーン面との間の距離を測定する。掌はスクリーン面に対して垂直な方向から接近させることとする。

なお、どちらの評価についても、タッチ検出における背景差分処理には静的背景差分を用いる。また、評価には成人男性 1 名の掌を用い、その大きさは、手首から中指の先までが約 230 mm、掌の幅は約 100 mm である。

これらの評価の結果を図 3.19 に示す。図 3.19 より、タッチ入力の検出感度が最も高い時には最小で直径 10 mm のタッチも検出可能であった。しかし、この場合には 180 mm

もスクリーン面から離れた手に対してタッチ入力を誤検出していた。一方で検出感度を低くした時には、誤検出は抑制される代わりに小さなタッチが検出できない。これらの結果から、検出可能なタッチの最小サイズと、誤検出する掌とスクリーン面までの最大距離との間にトレードオフの関係が確認された。実装した毛状マルチタッチディスプレイでは、指1本で触れるような微細なタッチ入力の検出と、スクリーン面から遠くにある手指での誤検出の抑制を両立することは難しいといえるが、その一方で、タッチ入力の検出感度を直径20mmのタッチを検出できる程度に設定した場合には、誤検出が生じる掌までの最大距離を40mmに抑制できていた。指2, 3本を揃えて触れれば接触領域の大きさは直径20mmの円形に達するといえ、タッチ検出感度を適切に設定すれば、タッチ検出する最大距離を40mmにまで抑制しつつ、指2, 3本を揃えて触れるようなタッチインタラクションを安定して検出できることが分かる。

誤検出をさらに抑制しながらタッチ検出の空間解像度を高めるためには、ユーザとのインタラクションの状況に応じて動的に赤外線量を増減したり、ディスプレイの領域毎にタッチ検出の感度を変化したりするような適応的な制御も利用できると考えられる。例えば、スクリーン面に手指が触れた場合だけを検出したい場合には、ユーザが手指を接触させるまで赤外線量を減らしたりタッチ入力の検出感度を抑えたりして接近する手指を誤検出しないようにし、その後、ユーザがスクリーン面にタッチしたことを検出してからは、検出感度を高めてユーザの手指の動きを精度よくトラッキングするような制御が検討できる。また、赤外線カメラに写る赤外線量は、理想的には手指がスクリーン面に近いほど多くなるため、カメラ画像中の輝度によって接触と接近を区別して認識できる可能性もある。

なお、これらの評価は蛍光灯が点灯した室内で行われており、明るい環境下でも十分にタッチ検出が可能であることを同時に確認した。ただし、日光のように赤外線を多量に含む光源がある環境では、周囲からの赤外線によって手指で反射した赤外線が検出しづらくなり、タッチ入力を検出できない場合がある。

POFの屈曲がタッチ検出に与える影響

実装した毛状マルチタッチディスプレイにおいて、毛状ディスプレイ表面で静止した手指に対するタッチ検出の特性を評価したが、毛状インターフェースならではのタッチインタラクションである撫でる動作やかきむしる動作をユーザが入力した場合には、手指が毛状

ディスプレイを押下しながら移動していくため、POF が曲げられることでその光学特性が変化し、タッチ検出の特性が変化する可能性がある。また、手指が毛状ディスプレイ内に挿入され、手指と POF の先端とが十分に接触せず、タッチ検出が難しくなる懸念もある。そこで、動く手指を想定した場合のタッチ検出の特性を評価、考察し、撫でる動作やかきむしる動作に対するタッチ検出の可能性について述べる。

まず、手指の押下に伴う POF の変形によってタッチ検出の特性が変化することについて、ここでは、撫でた際の POF の変形を測定し、その後、強い押下を伴う撫で動作による POF の変形が与える影響を、POF の光学特性に照らして検討する。毛状ディスプレイのモジュールひとつに対して撫でる動作を入力した場合、押下する方向に最大で約 500 g の力がかかると測定された。そこで最も圧力のかかる状態を想定し、安定して認識できる最小のタッチ面積である直径 20 mm の円柱状の棒に重りを装着してモジュールを押下し、POF の変形を観察したところ、500 g の力で押下しても棒は毛状表面から最大で 23 mm しか沈み込まず、POF 先端は倒れこむことはあっても POF 先端が転回して背面方向を向く様子は見られなかった。これは POF の固さや POF 同士の相互の支持により、大きく曲がるにつれて曲がりにくくなるためであると考えられる。実装に使用した POF は、90° 静置屈曲の条件下で曲げ半径が 5 mm までの変形であれば光の伝送損失の増加が 0.5 dB 以下になるという特性を持つ。ユーザの操作による変形でもこの範囲内であれば光の伝搬に大きな影響はなく、十分にタッチ検出できると考えられる。撫でた際の POF 変形の測定から、POF が 90° 以上屈曲することはなかったため、撫でる動作で POF が曲げ半径 5 mm よりも強く屈曲する場合があるかどうかを調べる。POF が最も強く変形する仮想的な条件として、500 g の力を POF 束 1 束に加え、このときの変形からタッチ検出に十分な光学特性を保てているかを評価する。束の直径は 8 mm で、成人の指先と同程度の大きさであり十分に小さい。測定では POF 束 1 束の先端を量りに押し付けて、そのまま約 500 g の力で押し付けて変形を確認する。その結果、POF 束は固定した両面テープ部分の上端で強く変形したが、その変形は曲げ半径 5 mm よりも緩やかであり、光学特性にほとんど影響を与えないことが確認された。このことから、実装したディスプレイにおいて押下による POF 変形がタッチ検出に与える影響はごくわずかであるといえる。ただし、毛束の密度を疎にしたり POF を細くしたりするとより大きく屈曲しやすくなるため、獣毛のように柔らかな POF を実現し、これを用いる場合には、POF 先端が転回して背面を向く可能性を考慮する必要がある。また、POF は太いものほど屈曲に対して伝送損失が増

加しやすいため、太い POF を実装に用いる場合には十分な光学特性を保てるかどうかを同様に評価すべきであると考えられる。

次に、手指が毛状ディスプレイ内に差し込まれる場合のタッチ検出精度について評価する。ここでは、直径 20 mm の ABS 樹脂製の円柱状の棒を、実装したディスプレイ内に差し込んだ状態から撫でるように移動させ、これを正しくタッチ検出できるかどうか評価する。樹脂製の棒はタッチする物体の形状を一定に保つために用いている。この棒を様々な角度で約 20 mm の深さまで挿入し、棒の傾いている方向に向かってディスプレイ面と並行に移動させてから静止させることで、移動中の指と POF の状態を再現し、この状態についてシステムが正しい位置にタッチを検出しているかを確認する。表面でのタッチ検出の評価の場合と同様に、10 回の入力に対して 9 回検出できれば検出可能なものとして評価する。その結果、ディスプレイ面に対して 70° 以下の角度で差し込まれた場合は検出可能であった。差し込まれた樹脂棒の先端は POF 先端に触れていないが、移動に伴い屈曲する POF の先端が樹脂棒に接近することで、棒の側面で反射した赤外線がカメラに検出されているものと考えられる。このように、POF をかき分けて内部に挿入した指でも、指の移動により POF 先端の位置が変化することで指の側面から赤外線を受けられるため、多くの場合でタッチ位置を検出できると考えられる。これにより、撫でる動作やかきむしる動作が提案する毛状ディスプレイ上で検出可能であるといえる。一方で、ディスプレイ面に対してほぼ垂直に手指を挿入した場合については、POF 先端に反射した赤外線が入射しにくくタッチ検出が難しい。この改善には、毛状ディスプレイ内により短い POF を混入して内部に挿入した指を検出する方法が考えられる。

3.3.5 ユーザスタディ

概要

実装した毛状マルチタッチディスプレイがユーザに与える影響や、ユーザが毛状マルチタッチディスプレイに対して抱く印象について評価する。

ここでは、複数のユーザに実装した毛状マルチタッチディスプレイを体験してもらい、その際の行動を観察するほか、毛状マルチタッチディスプレイでの体験についての印象を問うアンケートに回答してもらう。

多数の多様な人々に体験してもらいフィードバックを得るため、SIGGRAPH 2010²⁾ Emerging Technologies にて展示した際の来場者を対象にアンケートを実施した。本ディスプレイのデモンストレーション展示では 600 名以上の体験者に体験してもらい、42 件のアンケート回答を得た。以下ではまず、この展示において来場者が体験したインスタレーションについて述べ、その後、これらのインスタレーションを体験した来場者が回答したアンケートの内容とその結果について述べる。さらに、来場者のインタラクションの様子を観察し、来場者が行ったインタラクションのバリエーションについて確認する。これらにより、実装システムについてユーザがどのような印象を抱いていたかを検討する。

インスタレーション

本ディスプレイの特徴である毛の触感や画像提示の特性がよく感じられるよう、複数のインスタレーションを実装している。以下にそれらの内容を述べる。

Aura (図 3.20a)

体から発せられるオーラをモチーフとし、体験者はディスプレイに自身のオーラを写し取るような体験ができる。ユーザがディスプレイに触れると、触れた領域が発光し始め、触れ続けるとその光の色が変化していく。本ディスプレイにおけるタッチ検出や画像提示の特性を体感しやすいインスタレーションとなっている。実装では、タッチとして認識されている領域内を塗りつぶした画像を投影し、図 3.20a のような表示を実現している。

Splash (図 3.20b)

朝露に濡れた芝生を撫でた時に水飛沫が飛び散る様子を模擬したインスタレーションである。ユーザがディスプレイを撫でると、触れた領域から撫でた方向に光の粒が飛び散る。撫で方の変化が飛沫の変化として現れるため、撫でる動作が認識されていることを体験者に感じさせやすい。光の粒としてディスプレイ上の大きさで 20 mm ほどの円が複数投影されており、POF 先端のばらつきによって図 3.20b のような表示となる。

Ripple (図 3.20c)

このインスタレーションではディスプレイを水面に見立て、タッチに応じて次々に

²⁾ SIGGRAPH 2010, <http://www.siggraph.org/s2010/> accessed on 25th Dec., 2013

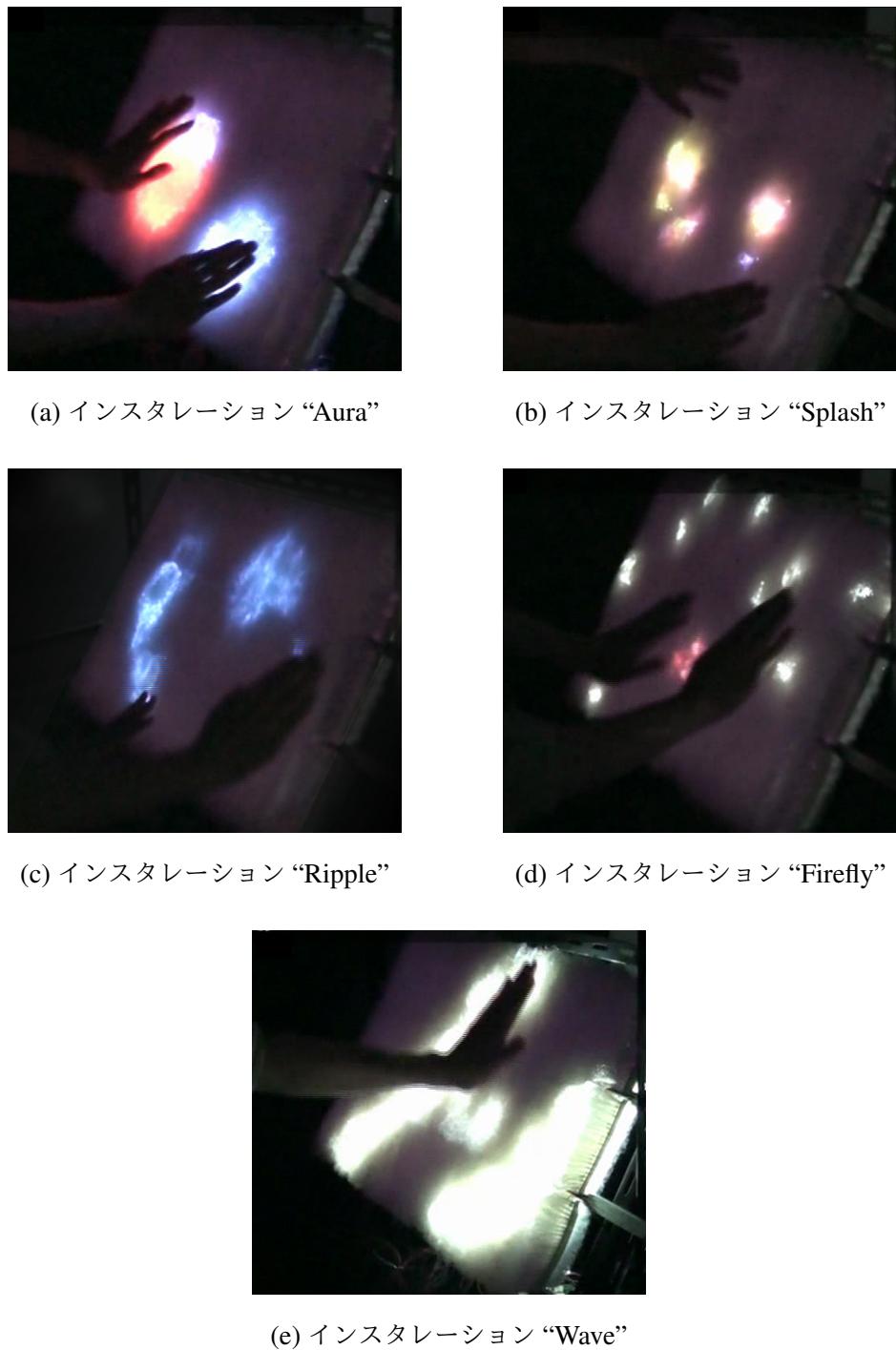


図 3.20: 様々なインスタレーション

波紋が生じる体験を提供する。水面に触れたり撫でたりすると次々と波紋が生じては消えていく。触れたところからは波紋が広がり、撫でれば連続的に波紋が生じる。波紋の表示のため、プロジェクタからはタッチ位置を中心にしてドーナツ型の図形が投影される。

Firefly (図 3.20d)

螢のような小さな虫を捕まえようと草むらの中に手を伸ばした時の体験を提供するインスタレーションである。ディスプレイには小さな点状の光が飛び回るように動いており、ユーザがその光を捕まえようと手で触れると、光の色や動きが変化し手の中から逃げ出そうとする。ディスプレイに触れた時の毛の触感は、草むらに手を触れたときのような感覚を連想させる上で効果的と考えられる。

Wave (図 3.20e)

波打つ水面に手を挿し込むとその波の形状が崩れていく。このインスタレーションでは、こうした波とのインタラクションを毛状表面の上で模擬的に体験できる。ディスプレイには波のように縞模様が流れており、これに触ると模様が崩れていく。ユーザは実際にディスプレイに指を差し込むことができ、指全体に触覚を感じられるインスタレーションとなっている。

アンケート

アンケート内容は、次の 5 項目である。

- Q1** 体験したディスプレイでのインタラクションは、フラットなタッチディスプレイに比べて楽しかったか？
- Q2** 体験したディスプレイの手触りは柔らかかったか？
- Q3** 体験したディスプレイの表示は美しかったか？
- Q4** 体験したディスプレイの表示は魅力的だったか？
- Q5** 視覚フィードバックは毛状の表面にふさわしかったか？

これらについて、「5：とてもそう思う」から「1：全く思わない」までの 5 段階評価で 42 名（男性 31 名、女性 11 名、21 歳～60 歳、平均 33.1 歳）に対してアンケートを実施した。

このアンケートから、図 3.21 のような結果を得た。この結果の詳細については 3.3.7 項にて考察する。

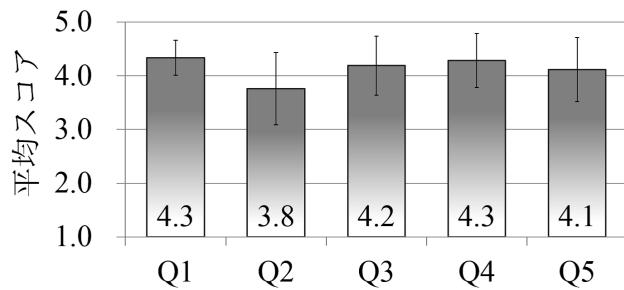


図 3.21: アンケート結果

3.3.6 インタラクションの様子

SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies³⁾において、来場者が実装したシステムと 3.3.5 項で述べたインсталレーションを体験する様子を観察した。特に、来場者がどのような動作でインタラクションするかに注目した。これにより、24 インチ相当のサイズで実装したシステムに対して、ユーザがどのようなインタラクション手法を想起し、試みようとするかを確認し、大画面毛状マルチタッチディスプレイがユーザに対して、身近な毛状物体との触れ合いと同じような触れ合い方を誘発しているかを検討する。

その結果、次に示すような動作が確認された。その内の一部を図 3.22 に示す。

- 両手で撫でる
- 手の甲で逆撫でる
- 軽く表面に掌をあてて撫でる
- 強く掌を押し付けて毛を大きく曲げながら撫でる
- 表面をなぞるように指先で触れる
- 頬ずりをする、顔を押し付ける
- 毛束を指でつまむ

一般のマルチタッチディスプレイでは撫でるというインタラクションに似た行為は、コンテンツのドラッグ操作などに見られるが、指先で行われるのが一般的であり、本システムのように掌全体を使って撫でたり、手の甲を使って撫でたりするインタラクションは見

³⁾ SIGGRAPH 2010, <http://www.siggraph.org/s2010/> accessed on 25th Dec., 2013

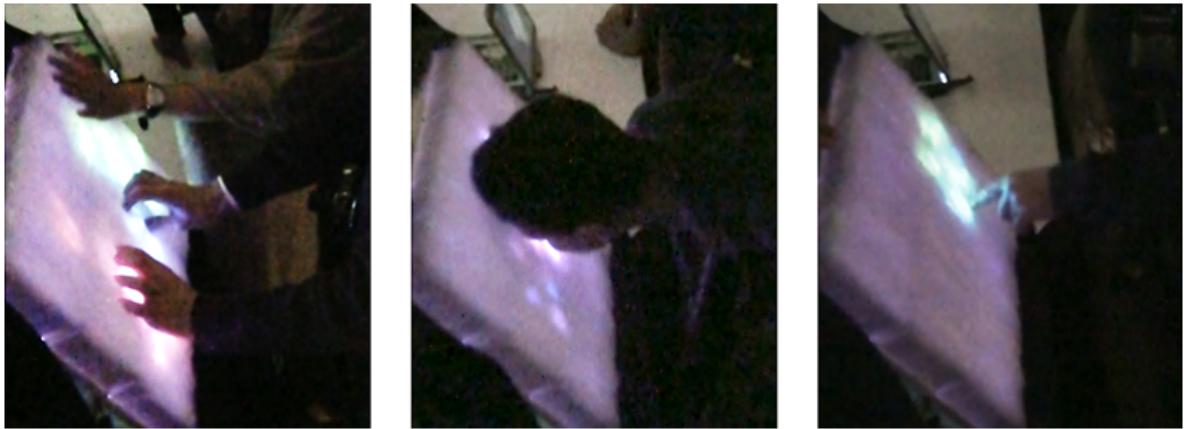


図 3.22: 来場者がインタラクションする様子の一例。左から順に、複数人での同時インタラクションの様子、頬ずりする様子、指先でなぞる様子を示す。

られない。このことから、実装したシステムが撫でる対象であることを感じさせる見た目や手触りを備えており、一般的なフラットなマルチタッチディスプレイとは異なるインタラクションを誘発できたといえる。また、手の甲で逆撫でる動作は、柔らかな毛皮に触れる際に見られる行動のひとつであり、身近な毛状物体とのインタラクション方法がこの毛状マルチタッチディスプレイ上で試みられていることを示している。さらに、腕全体を使って撫でる動作をしたり、頬ずりしたりする姿も見られ、実装した毛状マルチタッチディスプレイから柔らかな毛皮やタオルなどとの触れ合い方が想起されていたようであった。そのほか、強く掌を押し付けながら撫でる動作については、動物のように押し込む力によってシステムからのフィードバックが変わることが期待されていたものと推察される。こうした来場者のインタラクションの様子から、この毛状マルチタッチディスプレイを目にし、体験する中で、ユーザは様々な毛状物体との触れ合い方を想起し、試みていたと考えられ、一般的なマルチタッチディスプレイにはない、多様な触れ合い方をユーザに促せる可能性があることを確認できた。

3.3.7 考察

ユーザスタディについて

まず、ユーザが感じたディスプレイそのものに対しての印象について、3.3.5 項のアンケート結果を用いて考察する。

図 3.21 に示したアンケート結果により、いずれの項目においても平均で 4 点近いスコ

アを得ており、好意的な印象を体験者に与えられていたことが推測される。本アンケートについては、ほかの毛状物体との比較やフラットなタッチディスプレイとの比較ではないため、このスコアが持つ意味については慎重な解釈が必要であるが、これらのインスタレーションでの体験を通じて、視覚フィードバックの美しさや手触り、インタラクションの楽しさなどを 5 段階評価したときに、中央よりもポジティブなスコアが得られていることは、本システム、および本システムによるインタラクションそのものにポジティブな印象を抱いていたことが十分に窺える。

特に Q3、Q4 の結果について、視覚ディスプレイとしての解像度は必ずしも高くない本システムにおいて、表示の美しさのスコアが高かったことは注目に値する。本システムが文字列や様々なモチーフを模擬した模様を表示できていることに加えて、POF の先端の発光集合として視覚フィードバックが提示されることについて、ユーザは独特の美しさを感じているようであった。

表示特性について

表示の特性としては、ユーザが美しさを感じていたことのほかに、提示画像が歪む傾向について 3.3.4 項において確認した。実装したディスプレイでは、正面から見て左右方向よりも上下方向に毛が曲がりやすく、提示した画像もそれに伴って上下方向により強く歪む傾向が確認できた。特に、POF 束の固定が上下方向には弱く、POF 束が個々に違った程度曲がっていることが、提示画像が歪む原因となっている。この歪みがどの程度可読性に影響するかを見るため、情報伝達のために正確な描写が求められる情報として文字情報を取り上げ、これを投影した結果を図 3.23 に示す。この表示において、全ての文字は約 10 cm × 10 cm の領域に収まるように投影されている。平仮名の「ぬ」と「め」、「ね」と「わ」など微細な違いを表現することが必要な文字は識別が難しく、平仮名の「き」のように判読に横画が重要と考えられる文字も可読性が低くなっていることが窺える。一方で、アルファベットは概ねどれも可読性を保っているように、ある一定の面積に対して提示可能な文字もあることが認められる。このことから、実装した毛状マルチタッチディスプレイは、毛状ディスプレイ独特の歪みはあるものの、画面サイズによっては様々な文字を十分に表示可能であるといえる。モジュールの増加による拡張可能な構成を活かし、より大面積なディスプレイを実装すれば、さらに多くの情報を一度に表示できる。さらに、この毛状ディスプレイ独特の歪みについても、その原因である POF の曲がり具合を予めシス

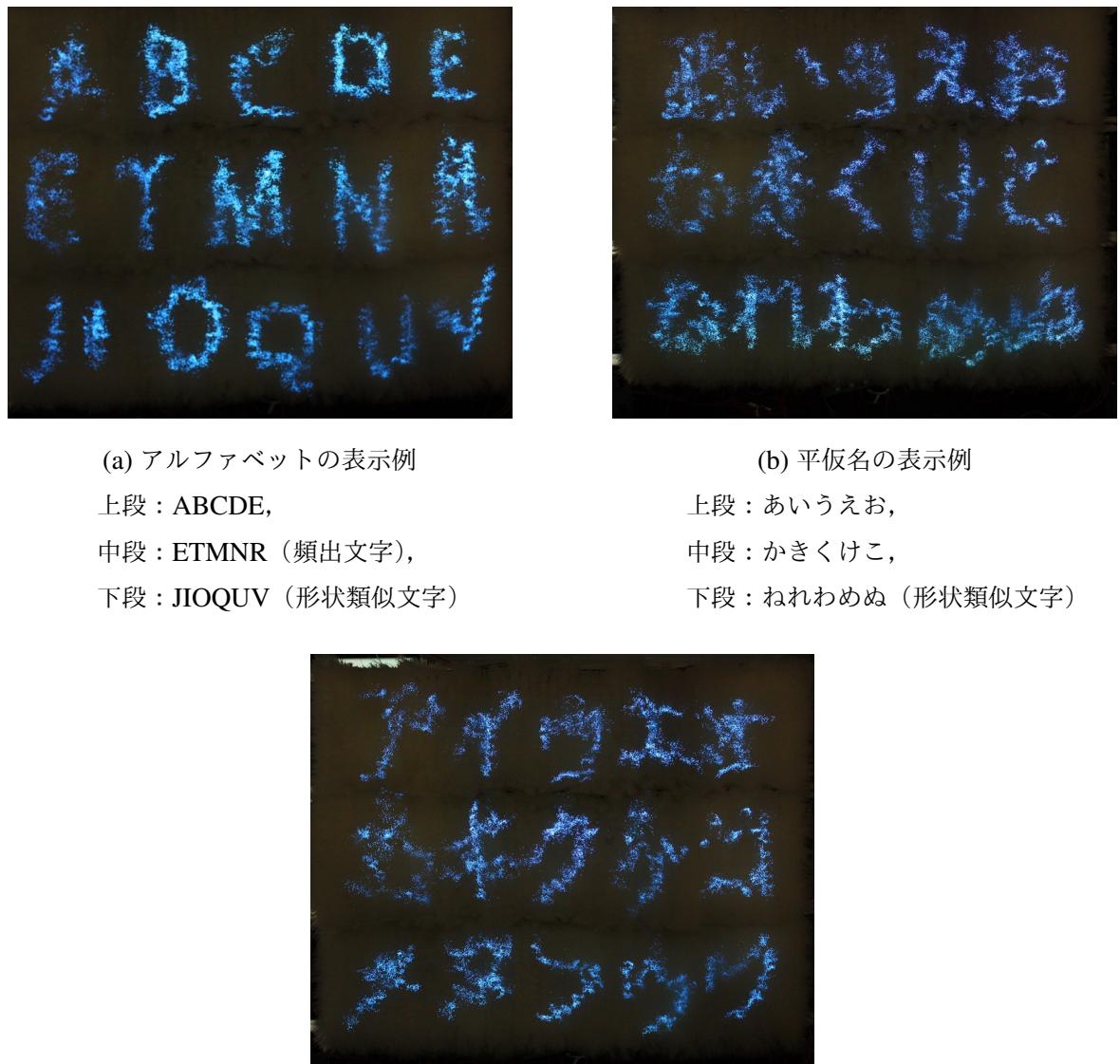


図 3.23: 文字列の表示例

テムが学習し、提示する画像が毛状ディスプレイに投影した時に可読性を維持できるように画像を補正するような処理を加えることで、表示の正確性を高められると考えられる。

手触りの特性について

続いて、手触りの特性についてであるが、アンケート項目 Q2 の結果より、柔らかさに関してポジティブなスコアを得た。このことから、POF を用いて毛状物体を構成した場合にも、手触りが柔らかいと感じさせられることを確認できた。一方で、実装したディスプレイの手触りについて複数の体験者から歯ブラシのような硬さであるというコメントが聞かれたが、提案するディスプレイの構成においては、設計を変更することで様々に手触りを変更できる。様々な柔らかさに対応するために変更できるパラメタについては、提案する毛状ディスプレイのほかの特性に影響するパラメタと合わせて 3.3.7 項にてまとめる。

ユーザのインタラクションと入力検出について

ユーザのインタラクションと入力検出手法について考察する。アンケート項目 Q1 の結果より、インタラクション自体に楽しさを感じられるディスプレイとなっていることが窺える。また、ユーザがインタラクションする場面を観察したところ、そのインタラクションの様子からは、一般的なフラットなマルチタッチディスプレイとは異なった掌全体を使ってのインタラクションなどが見られ、身近な毛状物体との触れ合い方をユーザが試みようとしていたことが確認できた。また、この観察の中で、掌で毛状ディスプレイを強く押しこんで撫でるような動作が、掌で表面を撫でる動作とは別に行われていることが確認できた。これは、ユーザが押しこむ強さに応じて異なるフィードバックが返ってくることを期待していたり、こうした毛状の表面との触れ合いにおいてユーザが撫でる強度を無意識に変えていたりしたものと考えられる。実装したディスプレイではユーザが毛を押し込む力は検出しておらず、撫でる強さはユーザに提示する視覚フィードバックとは無関係であったが、この力の変化を検出できれば、ユーザが画面を弱く撫でるか強く撫でるかを区別するなど、さらに多様なインタラクションを認識できることに加え、ユーザが自然と想起したインタラクション手法に対して適切に応答できるインターフェースを実現することに繋がると考えられる。こうした複雑な入力の識別のためには、赤外線による光学的なタッチ検出手法のほかに、毛の曲がり具合や、毛の根元にかかる力の大きさを検出するセンシング手法を導入することを検討する必要がある。

表 3.2: 設計パラメタとその影響について

設計の変更方針	ディスプレイの特性の変化			
	柔らかさ	解像感	隙間	タッチ検出感度
POF 光特性の最適化	-	-	-	向上
POF が固くなる	硬化	-	-	-
POF が太くなる	硬化	低下	-	-
POF の全長を長くする	-	-	-	低下
POF の自由長を長くする	柔化	低下	減少	低下
POF 束の直径を大きくする	-	低下	-	-
POF 束内の POF 密度を高める	硬化	向上	減少	向上
赤外線 LED の密度を高める	-	-	増加	向上

設計パラメタについて

実装した毛状マルチタッチディスプレイはアンケートや評価実験を通じて、手触りの柔らかさ、ディスプレイの表示特性、タッチ入力特性を評価した。感触や表示についてはユーザから好印象を得ていたほか、タッチ入力についても触れたり撫でたりする毛状物体ならではのインタラクションを認識するために十分な性能を備えていることを確認したが、これらの要素については実装時の設計によって調整することが可能である。そこで本ディスプレイにおける設計可能なパラメタと、それらの変化によってディスプレイの特性がどのように変化するかの関係を表 3.2 に示す。

この表ではディスプレイとしての基本的な特性である、手触りの柔らかさ、表示の解像感、タッチ検出感度に加え、LED の挿入や POF 束の形状によってディスプレイ表面に生じる隙間についても記している。ここでは、POF を固定するテープの上端からディスプレイ表面に向かう POF の先端までの、POF を自由に曲げられる部分の長さを、POF の自由長と呼ぶ。

感触の柔らかさには、主に、毛となる POF 自体の固さや太さ、POF の自由長、POF 束の POF 密度が関係する。細い POF を用いて自由長を長く、かつ、POF を疎に並べれば柔らかな手触りとなるが、自由長が伸びたことでディスプレイ表面に向けて POF がばらつきやすく、表示の解像感が低下するほか、POF の密度が低下するため、提示画像の可読性

が低下する。また、その解像感を向上するには POF の密度を高めることが効果的であるが、POF を隙間なく固定することは手触りを硬くすることに繋がる。また、タッチした手指から反射する赤外線がディスプレイ背面に伝搬するよう、POF の光伝送損失に応じて POF の全長には上限を設ける必要がある一方で、毛状ディスプレイ内に挿入する LED 基板によって生じる隙間を隠せるように POF に十分な長さを持たせる必要がある。これらのように、自由に設計できるパラメタには対立した影響を及ぼすものがある。所望の柔らかさ、表示の解像感、タッチ検出感度をもった毛状ディスプレイを得るために、パラメタの適切な設定方法を明らかにすることが必要といえ、今後の課題である。

3.4 応用例

本章で提案した毛状マルチタッチディスプレイには、様々な応用が期待できる。

例えば、ぬいぐるみ型のロボットの表面に毛状タッチディスプレイを設置し、ユーザが撫でた時の方向や速さを取得すれば、ユーザは動物に撫でたり触れたりする際と同じような自然な振る舞いでロボットに入力を与えられるようになる。さらに、撫でた部分の色を変化させたり、毛状表面に模様を表示したりすることでロボットの内部状態を表現することも可能である。こうしたロボットなどの擬人的な対象に適用することで、ユーザは撫でたりかきむしったりといった触れ合い方でそれらとインタラクションできるようになる。

なお、提案した毛状マルチタッチディスプレイをロボットの体表面に適用するためには、奥行きの小さな構成で実現することや、曲面を表現することが必要となる。3.2 節で検討したファイバを屈曲させる構成では、カメラやプロジェクタの設置位置が自由に設定でき、適用する領域の広さにもよるが、奥行きを小さくしつつ設置できる。3.3 節で検討した赤外線によるタッチ検出を用いた構成では、プロジェクタや赤外線カメラを毛状ディスプレイの後方に配置したために大きな奥行きが必要となっているが、表示用の可視光源とタッチ入力検出用のフォトセンサを毛束に統合し、毛束単位で入出力を統合した新たな構成を検討して奥行きを小さくできる可能性がある。毛状表面を曲面にすることに関しては、どちらの構成においても毛の表面を刈ることで曲面を表現することが可能である。

また、提案したディスプレイは、擬人的な対象以外にも応用できる。例えば、美術館の床に設置して、毛並の方向や毛状表面での画像提示により順路を提示することが考えられる。本ディスプレイはユーザスタディを通じて、その表示にユーザが美しさを感じていると確認できたことから、美術館やホテルなどの空間に応用しても、その場の雰囲気を損ね

にくいと考えられる。そのほか、撫でたり触れたりすることで表面の色や模様が変化するインタラクティブな家具への応用も考えられる。ベッドや椅子の表面を毛状マルチタッチディスプレイにし、身体の触れる部分を認識できれば、普段の眠り方や座り方を記録し、記録した行動を家具の上に視覚的に直接表示できるようになる。こうしたデータの記録と再現は、眠り方からの健康診断や座り方の改善のために利用できる。

実装したディスプレイを実際に体験したユーザからは、手指動作のリハビリテーションや、音楽インターフェースに応用できそうだといった意見も聞かれた。

3.5 おわりに

本章では、毛状マルチタッチディスプレイ “FuSA² Touch Display” を提案し、実装した。毛状ディスプレイには光ファイバ束を用い、プロジェクションによる映像提示と、光学的なマルチタッチ検出手法を統合することで、毛状物体を介して提示画像とインタラクションすることを実現した。POF を屈曲させた奥行きの小さい構成と、赤外線によるマルチタッチ検出による構成という2つの構成について検討し、それぞれの特性を評価した。赤外線によるマルチタッチ検出による構成では、画面サイズを任意に拡張可能な構成とすることで24インチ相当の大きさのディスプレイを実装した。また、実装した24インチの毛状マルチタッチディスプレイでは、表示やタッチ検出の特性について評価し、可読な文字を表示できることや、毛状物体との独特的の触れ合い方を認識できることを確認した。実装したディスプレイを体験したユーザからフィードバックを得たところ、その手触りや提示情報について好印象を与えられていることがわかり、そのインタラクションの様子についても、触れる、撫でるといった動作に加えて、かきむしったり、頬ずりをしたりと、毛状物体ならではの触れ合い方が試みられていることを確認できた。

このように、提案した毛状マルチタッチディスプレイによって、撫でる、かきむしといった行為をはじめとした多彩な動作で提示映像と触れ合う新しいインタラクションを実現できた。

第4章

柔らかな風船型インタフェース “Emoballoon”

4.1 はじめに

人ととのコミュニケーションでは、言語を用いたコミュニケーションに加えて、タッチインタラクションが用いられる。例えば、親しみを込めた挨拶には握手や抱擁が、怒りや不満を表すためには殴打などの動作が用いられるように、こうした皮膚を介したソーシャルタッチインタラクションは感情や意図の伝達に重要な役割を担っている。こうしたタッチインタラクションは、人とコンピュータとのインタラクションにおいても、ユーザが意図をコンピュータに伝えたり、感情を表現したりするために利用されてきた。ロボットの体表面に設置したセンサで撫でられたり叩かれたりしたことを認識するロボット [116] や、精神的なセラピーを目的として様々なソーシャルタッチインタラクションを認識できるぬいぐるみ [111] が開発されている。これらの事例に見られるように、ロボットやぬいぐるみなど、ユーザが対象を擬人化して扱う場合にソーシャルタッチインタラクションを認識する技術が応用されてきている。擬人的な見た目や機能を持った対象に限らず、様々な形態のコンピュータとのインタラクションや、コンピュータを介した他者とのコミュニケーションにおいても、ソーシャルタッチインタラクションを認識する技術はユーザに利便をもたらすものと考えられる。

しかし、握手や殴打のような、皮膚を介したソーシャルタッチインタラクションを認識するような汎用的な技術は存在せず、実現すればコンピュータにソーシャルタッチイン

タラクションを用いてユーザの感情や意図を知らせたり、遠隔地に存在する別のユーザに感情を伝えたりすることが可能となると期待できる。

ソーシャルタッチインタラクションに伴う動作を入力するためには、硬い表面を持つインターフェースは不適切である。抱擁や握手のような強い力を伴う動作を硬いインターフェースに入力すれば、デバイスそのものやユーザを傷つける可能性がある。こうした人と人の触れ合いを模したインタラクションのためには、柔らかく、タッチした際に加わる力の強弱を検出できるインターフェースが求められる。タッチした際に加わる力は、抱擁や殴打などの動作の識別や、動作の強弱の検出に有効な指標となる [112, 116]。また、柔らかさは触り心地の良さだけでなく、抱擁や殴打のような強い力を伴う動作を入力してもユーザやデバイスを傷つけないために重要な特性である。

こうした特性を備えたインターフェースの実現にあたって、内部に気体を封入した弾性体に着目する。このような弾性体では、弾性体に加わる力の強弱によって内部の気体の気圧が変化するため、気圧を計測することで物体に加わった力の強さを検出できる。また、柔らかな弾性体をインターフェースの筐体として用いれば、ユーザの触れる対象を柔らかくでき、ユーザが快適にソーシャルタッチインタラクションを入力できると期待できる。

そこで本章では、内部に気体を封入した弾性体を用いたソーシャルタッチインタラクションの識別手法を検討する。ここでは、弾性体をインターフェースの筐体に用い、ユーザはその弾性体に対して掴んだり抱擁したりする動作を入力する。システムは弾性体内部の気圧の高低や時間的な変化に基づいて、ユーザが行った動作を識別する。例えば、ユーザが弾性体を抱擁した場合には内部の気圧は高くなり、殴打した場合には気圧が短時間だけ急激に上昇する。こうした気圧の変化を利用してことで、システムはユーザが弾性体に対して行うソーシャルタッチインタラクションを認識する。これによってユーザは、抱擁や殴打といった、皮膚を介して行われるソーシャルタッチインタラクションをコンピュータに入力できるようになる。

内部に気体を封入した弾性体を構成するにあたっては、様々な素材が利用できる。また、外力と気圧の関係や柔らかさといった弾性体の特性は、弾性体の大小にかかわらず保持されるため、様々な大きさや形状のインターフェースを構築できると考えられる。本章では、形状や大きさを変えやすく、十分に柔らかいという特徴を持つ物体である、天然ゴムでできた風船を用いて、提案するソーシャルタッチインタラクション識別手法を検討する。まず、気体を封入した弾性体において、外部から加わる力の強弱と気圧の関係を風船

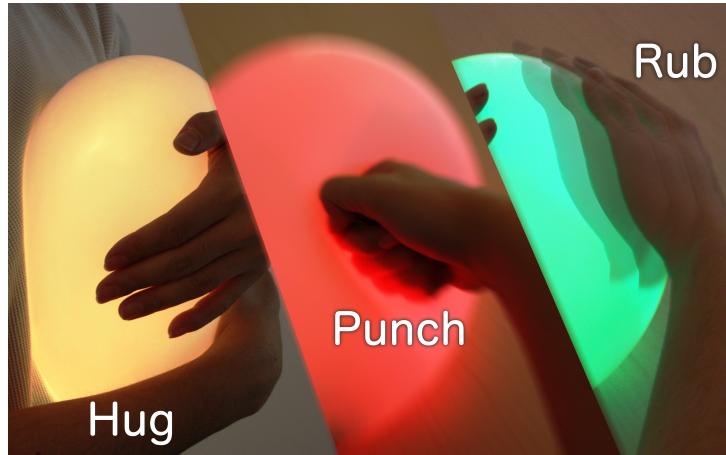


図 4.1: Emoballoon の概念図

を用いて評価する。次に、提案手法において優先的に識別するべき動作を列挙するために、ユーザのインタラクションの観察実験を行う。また、風船を用いて検討することの妥当性についてもこの実験から評価する。これらの結果に基づいて、気体を封入した弾性体によるソーシャルタッチインタラクション識別手法を提案し、また、これを風船に適用したインターフェースとして“Emoballoon”を実装し、評価する。

4.2 風船の特性評価とソーシャルタッチインタラクションの抽出

4.2.1 風船による加圧検出

握手や抱擁、あるいは殴打といった入力の認識において、その接触時の加圧の強弱は重要な特徴量になりうる。風船のような気体を封入した弾性体において、こうした加圧の強弱を気圧の変化から計測できることを確認する。これによって、風船のソーシャルタッチインタラクションの認識に対する適性を評価する。

評価では、風船の内部に気圧センサを配置した上で、風船を様々な強さで外部から加圧し、この時の内気圧の変化を計測する。計測には、最大で直径 40 cm まで膨張可能な風船 (Qualatex 16 インチ・白色, Pioneer Balloon Company) と、気圧センサ BMP085 (Bosch Sensortec) を用いる。センサは風船内に挿入し、風船の口は円筒に成形した粘土を挿入して閉じる。風船は非膨張時から長辺が 1.5 倍になるまで膨張させ、長辺を 15 cm にした状態で用いる。なお、1.5 倍は破裂の危険のない膨張率として設定した。センサを内包した

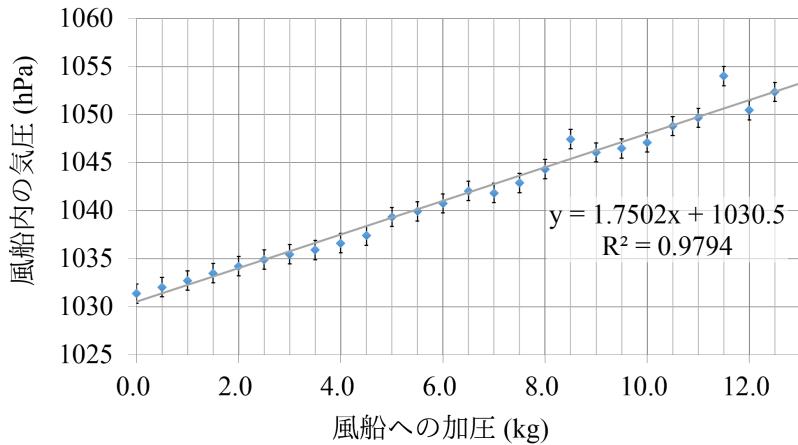


図 4.2: 加圧時の風船内気圧の変化

風船は水平面に置き、上から風船より十分大きい平板で加圧する。加圧の強さは平板に乗せる重りで調整し、風船の下に敷いた重量計で加圧の強さを確認しながら風船内の気圧を計測する。

図 4.2 に計測結果を示す。ここでは 6 秒間の平均気圧を記した。この結果から、風船内部の気圧は加圧の増加に連動しており、気体を封入した弾性体において、内気圧が外部からの加圧の強弱を測定するために利用できることが確認できた。

4.2.2 風船に対するソーシャルタッチインタラクション

風船はソーシャルタッチインタラクションを入力する上で重要な、柔らかさや加圧の強弱を検出できる特性を持つ。その上で、風船がソーシャルタッチインタラクションの入力対象として違和感が少ないことが一層望ましい。また、提案するソーシャルタッチインタラクション識別手法を詳細に検討するために、認識する必要性の高い動作を抽出しておく必要がある。予め必要性の高い動作を抽出し、これを踏まえて詳細な識別方法を検討することで、典型的なソーシャルタッチインタラクションを効果的に識別できるインターフェースが実現できると期待できるからである。

そこで、人が風船に対してどのような動作を入力するかを観察する調査を行う。この調査では、風船の感触や軽さが、ソーシャルタッチインタラクションを入力する対象として、総合的にユーザに違和感を生じさせていないかについて検討する。また、観察を通じて、風船に加えるソーシャルタッチインタラクションとして識別の必要性が高い動作を抽出し、識別動作の選定を行う。

実験では、風船を持った参加者にある感情を表現する動作を考えてもらい、その動作と、それに対する納得感を、それぞれビデオとアンケートで取得する。実験は主に練習、本番、アンケートの3つを繰り返して構成される。まず実験参加者に、風船に対してある感情を表現するよう教示を与える。参加者に教示で与えた感情は、喜び、愛情、安心、怒り、悲しみ、嫌悪、恐れ、興奮、驚きの9つである。これらは、文化に関わらず共通して認識できる人間の感情を示した Ekman の6感情（怒り、嫌悪、恐れ、喜び、悲しみ、驚き）[117] に、ポジティブな感情とネガティブな感情の数が拮抗するように3つの感情（愛情、安心、興奮）を加えた集合となっている。教示を受けた参加者は、教示された感情を表現するための練習時間として1分間が与えられ、その間に風船を持って様々な動作を試みる。この間は参加者をひとりだけにし、風船に対して自由に感情を表現できるように配慮する。次に、その感情を最もうまく表現できていると思う行動を任意の数だけ選んで披露してもらう。その後、最も納得している動作について、次の2項目のアンケートに回答してもらう。

- 最終的に適切だと選択した動作に対して、どのくらい納得しているか（1: 納得していない、7: 納得している）
- 最終的に選択した動作は、どれくらい思いつきが容易であったか（1: 思いつきにくかった、7: 思いつきやすかった）

このアンケートは各感情の試行が終わる度に、7段階で回答してもらう。この一連の手続きを9つの感情について繰り返す。なお、練習と本番の動作はビデオで記録する。動作の観察は記録した映像を用いて行う。実験には男女8名（男性7名、女性1名、平均23.0歳）が参加し、風船は基礎検討1と同じ風船を直径25cmまで膨張させたものを用いた。

アンケート結果を図4.3に示す。愛情や怒りの表現は納得感が高く、思いつきやすかったと回答している。愛情では抱きしめる動作が7名の参加者に共通して見られ、同じく大半の参加者が怒りの表現として殴る動作を行った。これらの動作は風船に対して感情を表現する際の身体動作として典型的で、風船自体に違和感なくこうした動作を行ったものと考えられる。一方で、それ以外の感情については個人間で動作に大きな差異が見られた。そこで、表1に示すように各参加者（A～H）の動作のうち、納得感が参加者自身の評点で5以上（中央の4より高い）の動作を、風船に対して自然に入力されやすい動作とみなして抽出した。

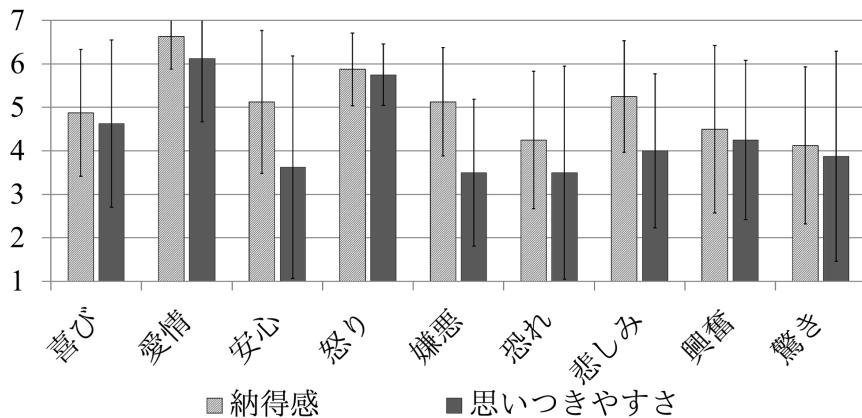


図 4.3: 行った動作に対する納得感と思いつきやすさの平均

表 4.1 から、納得感の高い動作では、抱擁や、撫でる動作、頬ずり（頬で撫でる）などの、人間や動物に対して行う表現が観察された。参加者に思いついた理由を問うと、「頭を撫でるイメージが思いついたから」、「赤ちゃんのイメージで抱きかかえた」などの回答が聞かれた。これらは人間や動物に対して行う身体動作を想起したこと示しており、この時、風船をソーシャルタッチインターフェースの入力対象として受け入れていたことを示唆している。感情によっては表現しにくかったことがアンケート結果からもわかるが、悲しみや恐れといった感情では、感情そのものが動作を想起しにくいものだったとも考えられ、風船自体にはソーシャルタッチインターフェースを入力する対象としての一定の適性があるものと考える。

次に、表 4.1 で見られた動作から識別で用いる基本的な動作を抽出する。参加者に共通していない動作についても動作主自身の納得感が高いものは識別対象として含め、幅広い動作を対象に検討する。表 1 から、抱擁、殴打、撫でる、平手で叩く、掴む、押しこむ、の 6 つを基礎的な動作として抽出した。なお、キスについては衛生面を考慮し今回の識別対象から除外している。

4.3 柔らかな風船型インタフェース “Emoballoon”

4.3.1 システム構成

4.2.2 項で述べた観察実験を通じて、風船とのインターフェースにおいてソーシャルタッチインターフェースとして自然に表現されやすい 6 つの基礎動作を抽出した。基礎動

表 4.1: 観察された中で納得感の評点が 4 より高い動作

教示した感情	観察された動作	参加者／納得感
喜び	抱きかかえながらキスをする	B/5
	抱きかかえながら撫でる	D/5
	頬ずりする	E/7
	抱きかかえる	G/6
愛情	抱きかかえながら撫でる	A/7, B/7, C/7, D/7, H/7
	抱きかかえる	E/7, G/7
安心	穏やかに平手で叩く	A/5
	抱きかかえる	C/5, G/7
	頭を押し付ける	E/7
	抱きかかえながら穏やかに手で叩く	H/5
怒り	殴打する	A/7, B/7, C/7, D/7
	10 指で強く掴む	E/6, H/5
	平手で強く叩く	F/5, G/5
嫌悪	片手で強く掴む	C/5
	平手で強く叩く	E/7
	殴打する	H/7
悲しみ	抱きかかえながら頭を押し付ける	B/5
	抱きかかえる	C/7, E/6
	頭を押し付ける	D/5
興奮	平手で叩く	A/7, F/6

作のうち、抱擁、掴む、押し込む、では継続的に同じ姿勢がとられ、風船に力を加えた状態が続く。抱擁では腕全体で抱えるように力がかかるため、変形の程度も大きくなりやすい。一方で、押し込む動作では指先で表面を押していたため、風船からの反発力もあって凹みの程度は小さくなりがちである。こうした形状変化の違いは、4.2.1 項で確認したように、風船内の気圧の変化から検出できる。撫でる動作も継続的に行われる動作ではあるが、風船の形状変化は乏しく、その代わりに表面と手のこすれる音が生じる特徴を持つ。

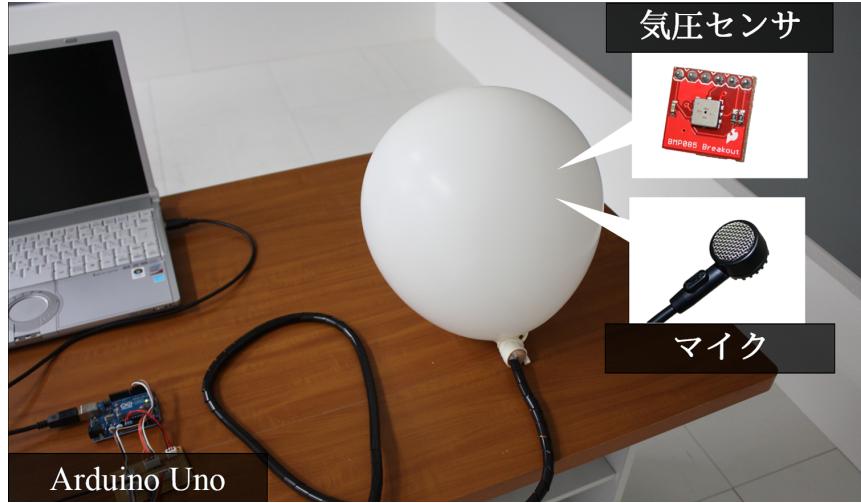


図 4.4: 風船を用いて実装した Emoballoon

継続的でない動作として、殴打、平手で打つ、の 2 つの動作があるが、殴打の方が風船に大きな変形を伴う様子が観察において確認され、この 2 つの動作においては風船内の気圧に違いが現れるものと期待できる。また、殴打と平手では、撫でる動作と同様にそれぞれ音響を生じるが、接触時間や接触領域の広さの違いなどから音響にも違いが生じると考えられる。こうした基礎動作の特徴に基づいて、識別のために必要なセンシングとして、風船内の気圧と、音響の 2 つを用いることとした。

これらの検出のため、気圧センサとマイクを密閉した風船内部に封入する。図 4.5 にシステム構成を示す。気圧センサはユーザが風船を変形した際に、接触位置に無関係に形状の変化の程度を検出する。マイクは風船表面に手がこすれた時に生じる音を検出する。気圧は抱擁や殴打のような強い力を伴う動作の認識に、音響は表面への撫でる動作のような穏やかな接触動作の認識に有用であると考えられる。気圧の変化は 2.2.2 項で述べたように形状変化の検出に様々に用いられてきた。また、音響も人の動作や状態の識別に盛んに用いられている [118, 119]。本論文でもこれら 2 つを組み合わせることで効果的な識別を試みる。動作の識別は、気圧センサのデータとマイクの音響データを用い、汎化能力が高いとされる Support Vector Machine (SVM) によって行う。また、風船内にはフルカラー LED を封入し、入力した動作に応じて様々な風船の色を変えることで視覚フィードバックを提示できる。このように、Emoballoon では、風船のような弾性体からなる密閉容器がもつ特性を活かし、加圧時の気圧の変動と表面で生じる音を利用した簡便な構成によって、入力動作の識別を試みる。

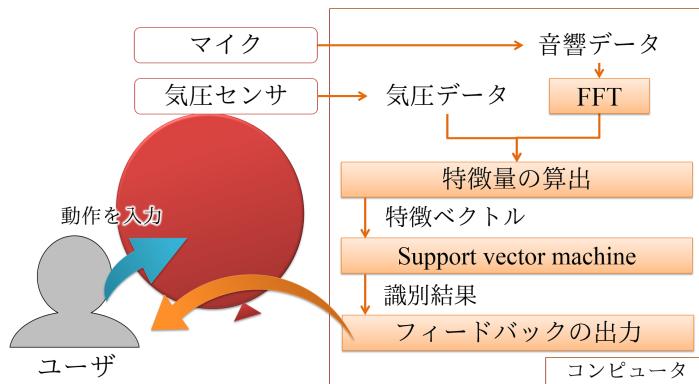


図 4.5: システム構成

4.3.2 実装

Emoballoon には、4.3.1 項で述べたように風船内部に気圧センサとマイクを組み込む。風船の内部の気圧センサには、BMP085 (Bosch Sensor tec) を、マイクにはダイナミックマイクである AT810F (Audio-Technica) を用いる。気圧センサは Arduino UNO を介してコンピュータに気圧のデータを送信し、マイクはコンピュータの音声入力端子に接続する。気圧は 25 Hz で測定し、マイクからの音声は 44,100 Hz でサンプリングする。音響データは 1,024 サンプル毎に平均化してフーリエ変換し、識別に用いる。識別には LIBSVM [120] を用いる。視覚フィードバックのためのフルカラー LED も Arduino UNO を介してコンピュータから制御する。今回の実装では、風船内のデバイスは PC と有線で接続しており、その配線は風船の口の部分で束ねて筒状の粘土に埋め込み、口の密閉に利用している。今後、マイクや Arduino と PC との接続を無線化し、小型のモジュールに統合すれば風船内への組み込みがより容易になるとを考えている。

4.3.3 識別処理

風船に対して 1 人の参加者が先に抽出した基礎動作を加えた時の、内部に封入したマイクと気圧センサが検出した音響のスペクトルと内気圧の変化をそれぞれ図 4.6 と図 4.7 に示す。「掴む」、「押下」、「抱擁」では手が止まっておりほとんど音が生じないため、これらの音響スペクトルは図 4.6 からは省いている。図 4.6 から、「殴打」と「平手で叩く」

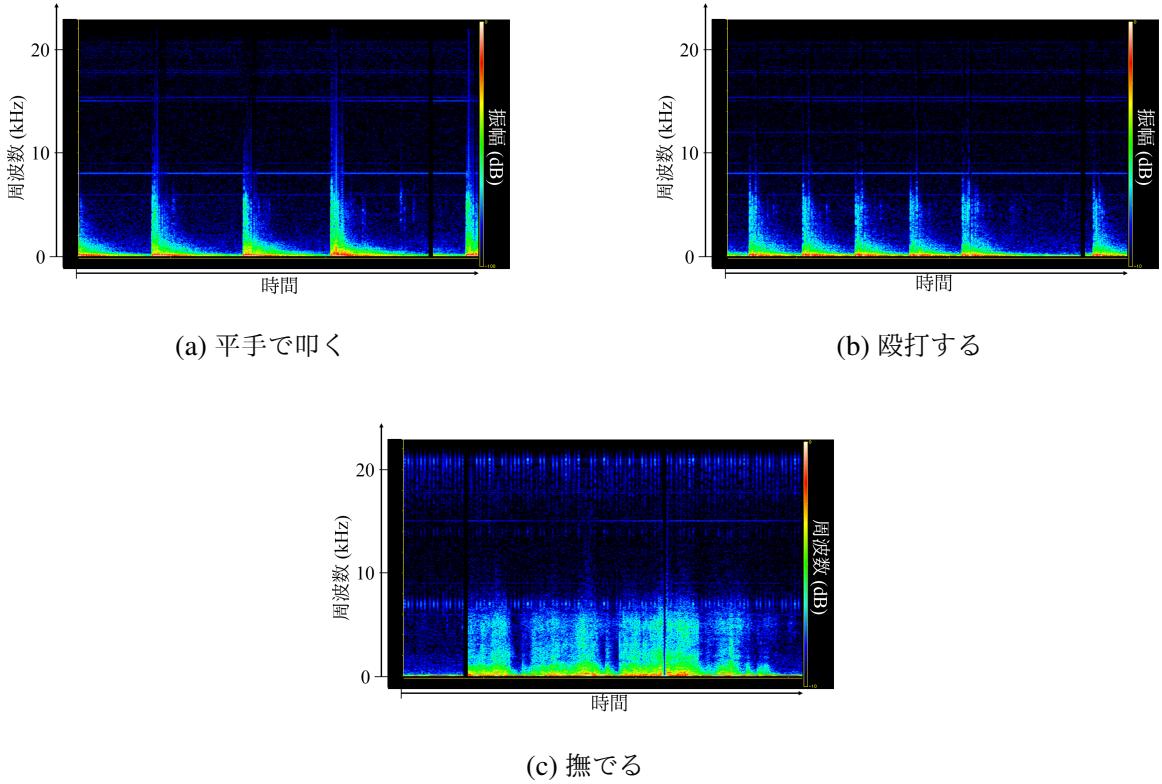


図 4.6: 音を伴う動作によって生じた音響のスペクトル分布

(1,024 サンプル毎のスペクトル。青が低いパワー、赤が高いパワーを表す。)

の音響には幅広い周波数帯にまたがる鋭い立ち上がりが見られる一方で、「撫でる」では低い周波数領域に比較的集中している様子がわかる。こうした音の違いは動作の識別に有効である。また、大きな音を伴う「撫でる」、「殴打」、「平手で打つ」と「何もしない」の時の内気圧の変化を図 4.7a に示した。「殴打」では短時間に急激に内気圧が上昇し、その後、急激に減少している。また、図 4.7b には大きな音を伴わない、「掴む」、「抱擁」、「押下」と「何もしない」の時の内気圧の変化を示した。ここでは変形の程度に応じて内気圧が上昇していることが分かる。こうした大きな音の伴わない動作でも、内気圧の変化を検出することによって識別に有効な特徴量が得られるものと期待できる。

入力動作の識別は、気圧センサとマイクでセンシングしたデータから特徴量を算出し、SVM で行う。内気圧は、測定値から「何もしない」の時の内気圧を減算してから特徴量算出に用いる。これは、風船の膨張率の違いからくる影響を吸収するためである。各々のデータは最も識別率が高くなるよう予備実験によって決定したウインドウ幅 150 msec, 重複率 33.3% で区切り、特徴量をウインドウ毎に算出する。特徴量には、人物の行動識

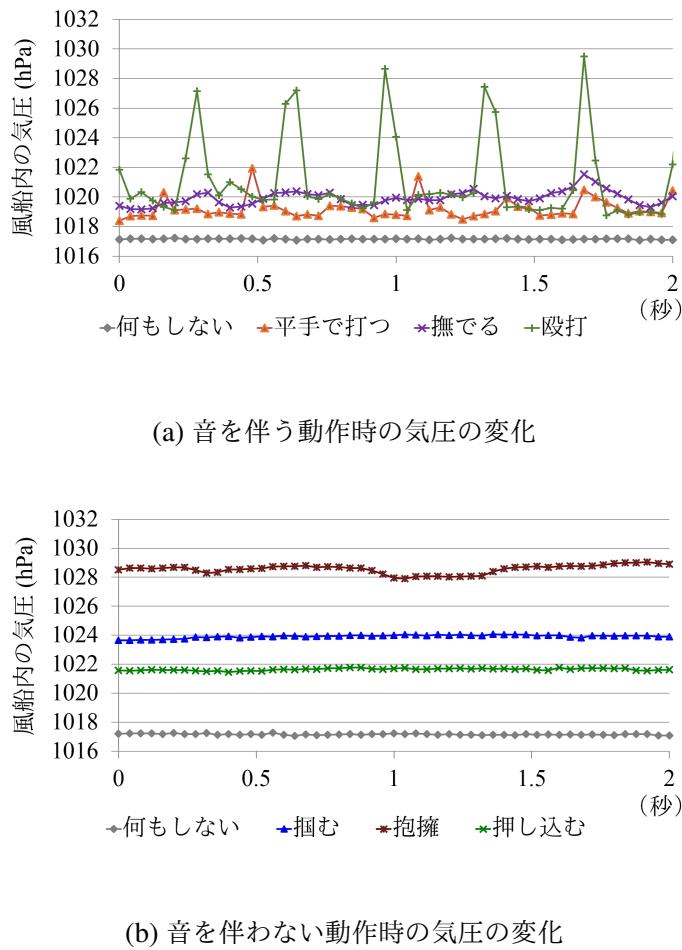


図 4.7: 各入力動作時の気圧の変化

別において利用されている特徴量 [121, 122] を参考にしつつ、内気圧や音の変化に基づいて、次に示す値を用いる。

- 気圧の平均
- 気圧の分散
- 気圧の最大値・最小値
- ウィンドウ内の各気圧値の全組み合わせにおける、気圧の差分値
- 平均音量
- 音響の最大パワースペクトル (Maximum Power Spectrum; MPS)
- 音響の周波数領域エントロピー (Frequency Domain Entropy; FDE)
- 音響スペクトルの分布

気圧の全組み合わせにおける差分値は、それぞれ時間的に後に計測された値から、時間的に先に計測された値を引いて求める。音響スペクトルの分布には、120 Hz から 8 kHz までの成分を用いる。MPS は、FFT 成分を $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ とすると、式 4.1 によって求められる。FDE は、全成分の総和で各成分を正規化した上で、式 4.2 で確率分布 p を求め、そのエントロピーを式 4.3 によって求めることで得られる。

$$MPS = \max_{2 \leq i \leq n} [F_i] \quad (4.1)$$

$$p(i) = \frac{|F_i|^2}{\sum_{j=2}^n |F_j|} \quad (4.2)$$

$$FDE = - \sum_{i=2}^n p(i) \log p(i) \quad (4.3)$$

4.4 評価

本手法による動作識別の精度を評価するため、実装した Emoballoon に対して、先に抽出した風船とのタッチインタラクションに見られる基礎動作（抱擁、殴打、撫でる、平手で叩く、掴む、押しこむ、何もしない）を 9 名の参加者に入力してもらい、データを収集した。データの収集には、9 名（男性 8 名、女性 1 名、21 才から 26 才まで、平均年齢 23.6 歳）に参加してもらった。参加者には各動作を 7 秒ずつ継続してやってもらい、その間、音響と気圧のデータを記録する。各動作でこれを 5 回繰り返す。動作の教示では「撫でる」、「叩く」などの動作名と、それを 7 秒間繰り返すように伝え、実験者が手本を示すことはしない。ただし、参加者の想起した動作が風船を破裂させないことを確認するため、計測前に各動作を数回ずつやってもらい、実験者で破裂の恐れがないことを確認する。なお、今回の実験では破裂を回避するために教示を追加することはなかった。実験中は風船内の LED での視覚フィードバックは提示しない。これらの収集したデータから特徴量を算出する。識別時には各参加者の各動作の各回のデータから 50 個の特徴量ベクトルをランダムに抽出し、合計で 15,750 ベクトル (=50 ベクトル × 9 名 × 7 動作 × 5 回) を評価に用いる。これらを用いて 10-fold 交差検定で識別率を求めた。SVM のカーネルは Radial basis function (RBF)，予備実験から RBF のパラメタ C には 2^{15} を、γ には 2^{-5} を用いる。なお、予備実験では 5-fold 交差検定のもと、C には $2^{-5}, 2^{-3}, \dots, 2^{15}$ を、γ

表 4.2: 参加者内識別の平均識別率
(セル内の色が濃いほど識別率が高いことを意味する)

		識別率 (%)						
		なし	掴む	抱く	殴打	押下	撫で	平手
入力動作	なし	94	0	1	0	3	1	0
	掴む	0	85	1	0	13	0	0
	抱く	1	1	97	0	1	0	0
	殴打	0	0	0	74	0	8	18
	押下	3	12	0	0	83	1	0
	撫で	2	0	1	9	1	83	4
	平手	0	0	0	21	0	6	72

には 2^{-5} , 2^{-3} , …, 2^7 をそれぞれ組み合せて試行しており, 最も識別率が高いパラメタを本評価に適用した.

表 4.2 に参加者内識別率の平均を示す. 参加者内での平均識別率は 83.5% であった. 一方で, 参加者間での識別率は平均 74.7% となった. この結果から, 気圧と音響の変化に基づく識別が, 抽出した風船とのタッチインタラクションに見られる基礎動作の認識に有効であることがわかる.

4.5 考察

4.5.1 ソーシャルタッチインタラクションの認識

風船の特性を利用した簡便な構成により実装した Emoballoon において, 「何もしない」を含む 7 つの動作を参加者内で平均 83.5% の精度で識別できることが確認できた. 一方で, 表 4.2 からは誤識別の傾向が確認できる. 特に, 「掴む」と「押下」, 「殴打」と「平手で打つ」の間で相互に誤識別が生じている. これらを正確に識別するためには, それぞれの間で手とデバイス表面との接触面積が異なることから, タッチ位置の検出やタッチ領域の広さの検出を組み合わせることが有効であると考えられる. これには, 密閉容器内に全周囲カメラを配置し, ゴム膜に映る指の影を検出することでタッチ位置を認識する方法が考えられる. また, 大きく形状が変化するゴム膜のような表面への適用可能性は明らかではないものの, タッチ位置を検出できるフレキシブルなセンサ [123, 124] の提案がなさ

れ、曲面でもタッチ位置の検出が可能になりつつある。こうした技術を組み合わせることでも識別性能を高めることが可能になると考えられる。

一方で、「押下」、「平手で打つ」を除いた5つの動作の識別では、参加者内で平均93.7%，参加者間でも88.1%の高い識別率が得られており、現在の実装でもこうした5つの動作について高い精度で識別可能である。気圧センサとマイクを組み合わせた簡便な構成によって、ソーシャルタッチインターフェースの識別に有効な特徴量が得られることが示された。また、この識別率はウインドウに区切ったデータ毎に識別した結果であり、実際に連続的に得られる識別結果に対して平滑化などのフィルタリングを行えば、より正確で安定した結果を得られるものと考えられる。

提案した識別手法では、マイクを用いているため、環境音によって誤識別が増える可能性がある。これまでの複数回の展示を通じて、環境音により「何もしない」を「撫でる」に誤識別しやすくなること、また、その環境で学習データを作成すれば誤認識を減らせるなどを確認している。こうした環境音への対応として、音響データから環境音の特徴を差し引いて識別に使う方法が考えられる。環境音の特徴は、風船内のマイクで事前に取得して算出しておく方法や、デバイス外部に配置したもうひとつのマイクでデバイス内のマイクと並行して環境音を取得し、その都度差分を算出する方法が利用できる。後者では突発的なノイズの影響も相殺しやすいと期待できる。

環境音以外に識別率を低下させる要因として、ユーザの筋力の差が考えられる。子供やお年寄りでは同じ動作でもデバイスに加える力が小さくなり、識別精度に影響したり、余りにも力が弱い場合は動作検出自体が困難になったりする懸念がある。いずれも年齢の多様な参加者で計測した結果に基づいて検討する必要がある。ただし、評価実験で計測したデータによれば、風船は「撫でる」動作のような小さな形状変化でも気圧の変化を検出しておらず、加圧が弱いために動作を全く検出できない場合は少ないと考えられる。一例として、「抱擁」での加圧が最も小さかった参加者でも、「撫でる」での気圧値の標準偏差は0.23 hPaで、これは「何もしない」時の気圧値の標準偏差の4倍以上であった。このように、わずかな形状変化も気圧の変化として検出できており、入力動作を全く検出できないケースは少ないと考えられる。次に、ユーザ間の筋力差による識別精度への影響は個々にキャリブレーションすれば適応できる。キャリブレーションには全動作を入力してもらう方法が確実ではあるが、手間が大きい。そこで、少数の動作から個人の入力特性を推定してそのほかの動作の入力を省略したり、システムに複数の識別モデルを用意しておき、少

数の動作から最も適合するモデルを選択してキャリブレーションを短縮したりして、その手間を削減する方法を検討していく必要がある。

現在の実装では、気圧センサは動作の認識のために用いているが、それだけでなく、タッチ時の加圧の強さを検出することにも利用できる。タッチインタラクションの種類を識別することに加えて、その動作がどの程度の強さで入力されているかを同時に認識できる可能性がある。これにより、穏やかな抱擁と力強い抱擁とを区別したり、軽く小突いたことと殴打したことを区別したりできる。Huggable では各動作の穏やかな場合と強い場合を混ぜてひとつのクラスとして扱い、識別率を評価しているが、識別率は 54.3% と高くない [112]。一方で、風船のように気体を密閉した弾性体が備える、内気圧で加圧の強弱を検出できる特性は、動作の種類と動作の強弱を同時に認識することにも利用できると考えられ、こうした入力認識を実現することは今後の課題である。

4.5.2 入力識別モジュールとしての識別性能

ここまでに、気圧センサとマイクを用いて柔らかな筐体を持つデバイスへのソーシャルタッチインタラクションの識別を実装し、評価した。気圧センサとマイクの 2 つから、6 つの基礎的なソーシャルタッチインタラクションの識別に有効な特徴量が得られることを確認した。本章で提案した風船のような弾性体からなる密閉容器と気圧センサの組み合せは、柔らかな表面にかかる力を検出するセンサモジュールとして機能する。これを別の柔らかな物体の内部に封入して、簡単にソーシャルタッチインタラクションを識別できるインターフェースを構成できる可能性がある。

そこで、実装した Emoballoon を綿のクッション内に封入した即席のクッション型センシングデバイスを構築し、先の評価実験と同様に 6 つの基礎動作の識別によって性能評価を行う。ここでは、参加者 4 名（男性 4 名）、識別率は 5-fold 交差検定で算出する。その結果、参加者内識別での識別率が 84.4% となり、参加者間では 76.8% となった。なお、SVM の諸パラメタは参加者間で共通とし、識別率が最大となるものを選んでいる。参加者数は少ないものの、先の評価実験と比べて遜色ない識別率を得られており、気圧センサを封入した密閉物をモジュールとして、これに外皮を装着した場合でも入力動作の認識に有効であることが示された。弾性体内の気圧を用いた本手法は、風船（密閉物）の大きさや形状を様々に変えて適用できると考えており、小型化したモジュールをひとつの物体に複数封入したり、クッションだけでなく、ぬいぐるみなどに組み込んだりしてインタラク

ションを認識できる可能性がある。

4.5.3 柔らかさと安全性

提案した Emoballoon では、風船を用いることで柔らかな表面を持った入力インターフェースを実現した。ソーシャルタッチインタラクションの認識においては様々な動作を快適に入力するために、こうした柔らかなデバイスが重要となる。評価実験の参加者からも、「殴打などの強い動作を入力する時でも柔らかく快適だった」とのコメントがあり、柔らかさが入力に重要であると考えられる。また、デバイス全体が柔らかいため、例えばぬいぐるみのような別の柔らかな物体の中に挿入したとしても、ぬいぐるみ本来の柔らかさを損ねること無く、センシングすることが可能である。

Emoballoon の実装では、一般的な風船を用いることで柔らかな入力インターフェースを実現したが、風船には破裂の恐れがある。今回はすべての実験を通じて十分な厚みを残すように膨張率を調整し、一度も破裂させずに実験を行った。しかし、参加者の中には殴打などの動作を行う際に破裂を心配した者もあった。実際には本手法は風船に限らず様々な弾性体に適用可能と考えており、例えば、ビニール製のボールのような耐久性を十分に備えたもので実装できれば、破裂や損傷の心配の少ない、より安心して入力できるインターフェースを実現できる。

4.5.4 アプリケーション

Emoballoon では、殴打や抱擁などのソーシャルインタラクションを入力できる。これを使いいれば、人ととの触れ合いを模擬した直感的な方法でユーザの意図を入力できる新しいゲームコントローラを実現できる。例えば、コントローラをキャラクタに見立て、ソーシャルタッチインタラクションで交流し、そのキャラクタの内部状態がコントローラの色のフィードバックで表現されるような応用が考えられる。キャラクタに対してより感情移入できるインタラクションとなる可能性がある。実装した Emoballoon でもフルカラー LED を内蔵したが、入力動作に対応した色を出力するのみでなく、操作の状況に応じて色を変えたり、LED の数や構成を変更してデバイス単体でより多彩な出力を可能にしたりすることも、アプリケーションの要求に応じて必要になると考えられる。

また、今後のアプリケーションとして、Emoballoon によりユーザの感情をコンピュータに入力しやすくすることが考えられる。Emoballoon を用いれば、ユーザはコンピュー



図 4.8: アプリケーション例

タの出力に対して、例えば抱擁や撫でる動作で満足の意思を、あるいは殴打によって不満足の意思を簡単に表現し、入力できる。こうして入力された満足・不満足は、コンピュータの出力結果に対する評価として学習に利用でき、Web検索や、テキスト入力時のオートコンプリート、eコマースにおける商品推薦など、ユーザに合わせた学習を必要とするアプリケーションにおいて、有用なデータとなりうる。身体動作は感情が発露する時の典型的な表現であり、これを認識できる提案手法によってユーザの満足・不満足の情報を得やすくなると期待できる。

また、Emoballoonを用いた入力は、遠隔コミュニケーションにも活用できる。inTouch [125] ではローラー型のデバイスの回転を相互に伝達し合うことにより触覚コミュニケーションを実現していた。こうした触覚的なコミュニケーションでも、握手や抱擁のようなソーシャルタッチインタラクションでの交流が可能となれば、親しみや感情を伝えやすくなると期待できる。図 4.8a に Emoballoon を用いた触覚を伴う遠隔コミュニケーションの概念図を示す。ユーザは Emoballoon を介して動作を入力し、相手には触覚ディスプレイを介してその動作で生じる触覚が知覚される。現在も動作の種類を識別した結果を伝送することができるが、今後、動作の種類と強度をそれぞれ認識できれば、さらに豊かな表現で交流する手段をユーザに提供できる。

このほかにも、アバターの身体として、また、インタラクティブなぬいぐるみのためのデバイスとしての応用も考えられる。風船そのものを用いたアバター [23] も提案されて

いるが、こうしたアバターにユーザからのタッチ動作を認識する機能を付加することに利用できる。また、Emoballoon の柔らかさを活かし、ぬいぐるみの内部にこれを挿入することで、触り心地を維持しながら、撫でる動作や抱擁などの動作を検出し、それらに反応するインターラクティブなぬいぐるみを構築できる可能性もある。図 4.8b にこれを適用したぬいぐるみのコンセプトを示す。ぬいぐるみの各身体部位に Emoballoon を挿入し、ユーザがどの部位にどのような触れ方をしたかを検出し、入力に応じて反応するものである。こうしたぬいぐるみはセラピーやエンタテインメントなどの分野で利用できると考えられる。

4.6 おわりに

本章ではソーシャルタッチインタラクションを認識するための風船型のインタフェース “Emoballoon” を提案し、これを評価した。風船の特性の調査や、識別対象とするべき動作の抽出のために予備実験を行い、6 つの基礎動作を定義した上で、ソーシャルタッチインタラクションの認識に重要なデバイスの柔らかさ、そして加圧の検出を考慮して、風船のような気体を密閉した弾性体を用いたシステム構成を提案した。気圧センサとマイクを用いた簡便な構成のもと、風船を用いてシステムを実装した。実装システムにて入力動作の識別率を評価したところ、7 つの入力を参加者内で 83.5% の精度で識別できた。提案した構成は風船に限らず、衝撃に対して堅牢な物体にも適用可能と考えており、より安心して利用できる実装を実現していくことが今後の課題である。入力識別の側面からは、動作の種類とその強さをそれぞれ同時に認識する方法について検討し、どの動作をどの程度の強度で入力したかを取得する手法を検討していく。

第 5 章

結論

本論文では、人と人のコミュニケーションに見られるタッチインタラクションを人とコンピュータとのインタラクションに導入することを目指し、触覚情報を付与したインタラクティブサーフェスを提案し、検討した結果について述べてきた。人ととの触れ合いで、毛髪や皮膚を介したタッチインタラクションが行われることに着目し、毛を撫でる動作や、抱擁や殴打のような動作を認識できるインターフェースを実現してきた。

まず、毛髪を介した触れ合い方でインタラクションできるインタラクティブサーフェスとして、毛状マルチタッチディスプレイ “FuSA² Touch Display” を提案し、これを 2 つの構成によって実現した。どちらの構成でも POF を用いることで毛状物体の表面での情報提示とマルチタッチ検出を統合することに成功している。それぞれの構成に基づいて実装した毛状マルチタッチディスプレイについて、タッチ検出の特性を評価した。また、大画面に実装した毛状マルチタッチディスプレイを用いてユーザスタディもを行い、その特性について評価した。

続いて、皮膚を介したタッチインタラクションである握手や抱擁、殴打などの動作を入力できるインタラクティブサーフェスに向けて、気体を封入した弾性体を利用した識別手法を提案し、これを適用した柔らかな風船型インターフェース “Emoballoon” について検討した。弾性体の物理的な特性や、ユーザがこうした弾性体に対して典型的に行うタッチインタラクションを、実験を通じて確認した。その上で、弾性体内部の気圧を用いたタッチインタラクション識別の手法を提案し、これを適用した構成で Emoballoon を実装し、評価した。以下では、本論文の内容を要約し、今後の展望についてまとめる。

第 2 章では、過去のインタラクティブサーフェスの構成手法や、インタラクティブサー

フェスとのインタラクションを拡張した研究について述べた上で、形状や触覚的な情報を用いたり、人と人のコミュニケーションに学んだインタラクションを実現するインタラクティブサーフェスとして、オーガニックユーザインタフェースという概念とその実現例を紹介した。また、ユーザが物体を把持する様子を認識する技術についても、ソーシャルタッチインタラクションの認識に関連してここで紹介した。インタラクティブサーフェスの構成手法としては、特にマルチタッチスクリーンに着目し、ユーザが触れたスクリーン上の座標を認識するためのセンシング方法について述べ、これまで提案してきた方法を利用する物理量によって分類して紹介した。オーガニックユーザインタフェースに関しては、柔らかな物体を利用したインタフェースとして、紙や粘土を用いたものから、本論文でも検討した弾性体や毛状物体を用いたインタフェースについて述べた。弾性体を用いたインタフェースがその柔らかな表面を活かして、入力にも出力にも新たな表現を可能にしていること、また、ソーシャルタッチインタラクションのような表現を認識することは十分に検討されていないことについて指摘した。毛状物体を用いたインタフェースでは、形状変化のみを出力として用いるものと、映像提示を利用したものとに大別し、これまでの毛状インタフェースを紹介した上で、ユーザの視覚と触覚に与える情報が十分に連動し、ユーザに違和感を与えない構成がまだ実現されていないことを述べた。また、把持状態を認識する技術については特に携帯端末での把持状態の識別に関する研究を紹介したが、ソーシャルタッチインタラクションを想定し、柔らかなデバイスに適用可能な方法として検討されているものではない点を指摘した。

第3章では、毛を撫でたりかきむしたりする動作で提示映像とインタラクションすることが可能な毛状マルチタッチディスプレイとして“FuSA² Touch Display”を提案した。このディスプレイでは、POFを毛として用いることで毛そのものの発光でユーザに情報提示しており、これによってユーザが撫でたり触れたりして毛が屈曲したり毛並みが変形した場合でも、それに連動して提示映像が自然に歪むという違和感の少ない表現が可能となった。また、POFを介して掌からの反射光を検出するという新しいマルチタッチ検出手法を提案し、ユーザが毛状物体の上で表示された映像を撫でたりかきむしたりしてインタラクションすることを可能にした。毛状マルチタッチディスプレイの構成として、POFをスクリーン背面で屈曲することで奥行きを小さくした構成と、短いPOF束を並べた上で赤外線によるマルチタッチ検出手法を適用した構成の2つについて検討した。まず、奥行きの小さな構成では、毛状ディスプレイを構成するPOF束を映像提示用とタッチ検出

用の 2 つに分け、可視光を用いたマルチタッチ検出手法を適用した。常にスクリーン全面を発光させる必要があること、また、ユーザに提示するための画像を表示している間は安定したタッチ検出ができないことについて述べ、これを解決するために、時分割多重化した光を投影しながら、それに同期してカメラの正面に配置したシャッタを開閉する方法を提案した。続いて、POF 束による毛状ディスプレイに赤外線によるマルチタッチ検出手法を組み合わせた構成では、大画面化が可能なように毛状ディスプレイ部分をモジュールとして設計し、多数のモジュールを並べることによって 24 インチ相当の大画面毛状マルチタッチディスプレイを実装した。実装した大画面毛状マルチタッチディスプレイを用いて、POF による毛状ディスプレイの表示特性を評価したところ、POF 先端のばらつき方向によって縦横の解像感に違いがあること、また、アルファベットのような比較的単純な文字であれば $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ の領域に提示して十分に人が判読できることを確認した。また、提案したタッチ検出手法の特性として、タッチ検出が可能な最小の接触領域と、誤検出を生じる掌とスクリーン間の距離について評価を行った。検出可能な最小領域の評価から、実装した毛状マルチタッチディスプレイにおいて、指 2, 3 本をまとめて触れた場合には安定してタッチ検出が可能であり、掌で撫でたり、片手でかきむしったりする毛状物体に特有のタッチインタラクションを十分に認識できることを確認した。また、タッチ検出の特性に関する評価から、触れていない物体でタッチ入力が発生するという誤検出を完全に抑制することは難しいものの、タッチ検出の感度によって誤検出を大幅に抑制できることを示し、適応的な感度調整の可能性について議論した。これらの評価によって、実装した毛状マルチタッチディスプレイの性能を明らかにした。その上で、ユーザスタディを行い、ユーザが毛を撫でたりかきむしったりする動作のほか、頬ずりのようなタッチインタラクションまでを行うことを確認し、毛状マルチタッチディスプレイの上で行われる様々なタッチインタラクションについて議論した。

第 4 章では、握手や抱擁のような皮膚を介した触れ合いを認識できるインターフェースの実現に向けて、内部に気体を封入した弾性体を利用したタッチインタラクション識別手法を提案し、これを適用した風船型インターフェース “Emoballoon” について検討した。まず、ソーシャルタッチインタラクションを認識できるインターフェースに求められる特徴として、ユーザが触れた時の加圧の強弱を検出すること、また、インターフェース自体が柔らかさを持つことが重要であることを述べ、これらを踏まえた基本的な識別原理を提案した。次に、基礎検討として、弾性体に加わる力と内部の気圧の関係を、風船を用いた実験

によって明らかにした。また、人が風船と触れ合う様子を観察することで、認識対象とするべき基礎的なタッチインタラクションを抽出した。これらの基礎検討を踏まえて、気圧と音響の変化に基づくタッチインタラクション識別手法を提案し、これを適用した風船型インターフェースを実装した。実装した Emoballoon を用いて提案手法の識別性能を評価したところ、7つの基礎動作を参加者内で平均 83.5% の精度で識別できており、効果的にソーシャルタッチインタラクションを識別できることを確認した。また、風船型インターフェースを入力動作識別のためのモジュールとして利用できる可能性について言及し、その場合の識別率についても別途評価したほか、提案した風船型インターフェースの応用可能性についても議論した。

以上の研究を通じて、人とコンピュータとのインタラクションの様式を人と人のコミュニケーションの様式に近づけるために必要な、様々なタッチインタラクションを認識できるインタラクティブサーフェスを実現してきた。さらに、これら 2つのインタラクティブサーフェスを統合すれば、毛状物体に対する抱擁や殴打などの動作を認識できるようになったり、毛状インターフェースのマルチタッチ入力を利用して、掴んだり殴打したりした際の動作識別の精度を高めたりできると考えられる。また、その手触りも、より動物や人の体表面に似たものとなる。このように、提案した 2つのインタラクティブサーフェスは、個々に用いるだけではなく、統合してそれぞれの機能を補強しあうことで、人や動物の体表面において行われるソーシャルタッチインタラクションにますます近い方法で、ユーザがコンピュータとインタラクションすることを実現するものと期待される。

これまで、人がコンピュータを操作するためには、人がコンピュータの表現を理解し、コンピュータが理解できる表現で情報を入力する必要があった。しかし、コンピュータとのインタラクションが CLI から GUI、そしてインタラクティブサーフェスへと拡張されていく中で、コンピュータは人の用いる言語やジェスチャなどの表現を認識するようになってきた。また、それに伴ってコンピュータの役割も拡大し続けている。こうした変遷に見られるように、人がコンピュータに意図や目的、感情を伝達する上で、人ととのコミュニケーションに学んだコンピュータとのインタラクションを実現することはますます重要になっていくものと考えられる。

本研究で提案してきたインタラクティブサーフェスでは、人が人に握手をしたり抱擁をしたり、あるいは毛髪を撫でたりする際に用いる動作によって、コンピュータとインタラクションすることが可能となっており、コンピュータとユーザが人ととのコミュニケーション

ションの様式に則ってインタラクションできる。これによって、ユーザはコンピュータの理解できる範囲の表現に縛られることなく、対象への指示や自身の意図、あるいは感情といった高次の情報をコンピュータに入力したり、あるいはコンピュータを介して他者に伝達したりできるものと期待される。今後もコンピュータが担う役割が拡大していく中で、ますます多くの人が明示的であれ暗黙的であれ多くの場面でコンピュータの操作を行うようになっていくものと考えられる。こうした環境において、コンピュータが用いる表現と人が慣れ親しんできた表現との違いによって、人に誤解を生じたり、人が思うように意図を伝達できなかったりする問題が懸念されるが、本研究で検討してきた人の表現を理解できる柔らかなインタラクティブサーフェスが、人とコンピュータの間を取り持ち、豊かな情報環境の実現に寄与することを期待したい。

参考文献

- [1] Douglas C. Engelbart and William K. English. A research center for augmenting human intellect. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, pp. 395–410, 1968.
- [2] Jun Rekimoto. SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 113–120, 2002.
- [3] Jun Rekimoto. Organic interaction technologies: from stone to skin. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 38–44, 2008.
- [4] iPhone. <https://www.apple.com/jp/iphone/>. accessed on 9th Dec., 2013.
- [5] iPad. <https://www.apple.com/jp/ipad/>. accessed on 9th Dec., 2013.
- [6] Nintendo DS. <http://www.nintendo.co.jp/ds/index.html>. accessed on 9th Dec., 2013.
- [7] M. A. Anusuya and S. K. Katti. Speech recognition by machine, a review. *International Journal of Computer Science and Information Security*, Vol. 6, No. 3, pp. 181–205, 2009.
- [8] しゃべってコンシェル. https://www.nttdocomo.co.jp/service/information/shabette_concier/. accessed on 10th Dec., 2013.
- [9] Siri. <http://www.apple.com/jp/ios/siri/>. accessed on 10th Dec., 2013.
- [10] Kinect. <http://www.xbox.com/en-US/kinect>. accessed on 10th Dec., 2013.
- [11] Stephen Thayer. *Tactual perception: a sourcebook*, chapter Social touching, pp. 263–304. Cambridge University Press, 1982.
- [12] 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*, UIST '91, pp. 27–33, 1991.
- [13] Tactile manipulation on a digital desk. <http://www.youtube.com/watch?v=1aApNiNpnvI>. accessed on 29th Dec., 2013.
 - [14] Antal Haans and Wijnand IJsselsteijn. Mediated social touch: a review of current research and future directions. *Virtual Reality*, Vol. 9, No. 2-3, pp. 149–159, 2006.
 - [15] Roel Vertegaal and Ivan Poupyrev. Organic user interface. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 26–30, 2008.
 - [16] 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.
 - [17] Ben Piper, Carlo Ratti, and Hiroshi Ishii. Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 355–362, 2002.
 - [18] David Holman, Roel Vertegaal, Mark Altosaar, Nikolaus Troje, and Derek Johns. Paper windows: interaction techniques for digital paper. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 591–599, 2005.
 - [19] 中島康祐, 伊藤雄一, 築谷喬之, 藤田和之, 高嶋和毅, 岸野文郎. FuSA² Touch Display: 大画面毛状マルチタッチディスプレイ. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 3, pp. 1069–1081, 2012.
 - [20] 中島康祐, 伊藤雄一, 山抱加奈, 吉田愛, 高嶋和毅, 北村喜文, 岸野文郎. FuSA² Touch Display: 光ファイバを用いた毛状マルチタッチディスプレイ. インタラクション 2010 論文集, pp. 115–122, 2010.
 - [21] 中島康祐, 伊藤雄一, 築谷喬之, 藤田和之, 高嶋和毅, 岸野文郎. FuSA² Touch Display: 大画面毛状マルチタッチディスプレイ. インタラクション 2011 論文集, pp. 547–550, 2011.
 - [22] Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Ai Yoshida, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino. FuSA2 Touch Display. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, p. 11:1, 2010.
 - [23] Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Takayuki Tsukitani, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino. FuSA² Touch Display: A furry and scalable multi-touch display. In *Proceedings of the ACM International Conference*

- on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 35–44, 2011.
- [24] Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Takayuki Tsukitani, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino. FuSA² Touch Display: furry and scalable multi-touch display. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Ambient Information Technologies*, pp. 35–36, 2012.
- [25] 伊藤雄一, 中島康祐. “ふさふさ” 感触マルチタッチディスプレイの開発. 次世代ヒューマンインターフェース開発最前線, 株式会社エヌ・ティー・エス, pp. 523–531, 2013.
- [26] 伊藤雄一, 中島康祐. ~「ふさふさ」した触り心地~光ファイバによる毛状マルチタッチディスプレイ. *MATERIAL STAGE*, Vol. 11, No. 8, pp. 13–16, 2011.
- [27] 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄. Emoballoon: ソーシャルタッチインタラクションのための柔らかな風船型インターフェース. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 3, pp. 255–265, 2013.
- [28] 池田和章, 林勇介, 中島康祐, 伊藤雄一, 尾上孝雄. 風精一気圧センサと風船を用いたタッチインタラクション検出. エンタテインメントコンピューティング'2011 論文集, pp. 187–192, 2011.
- [29] 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄. Emoballoon: ソーシャルタッチインタラクションのための柔らかな風船型インターフェース. インタラクション'2013 論文集, pp. 95–102, 2013.
- [30] Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Yusuke Hayashi, Kazuaki Ikeda, Kazuyuki Fujita, and Takao Onoye. Emoballoon. In *Proceedings of the 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction*, Vol. 2, pp. 681–682, 2012.
- [31] Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Yusuke Hayashi, Kazuaki Ikeda, Kazuyuki Fujita, and Takao Onoye. Emoballoon: a balloon-shaped interface recognizing social touch interactions. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Ambient Information Technologies*, pp. 13–16, 2013.
- [32] Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Yusuke Hayashi, Kazuaki Ikeda, Kazuyuki Fujita, and Takao Onoye. Emoballoon: a balloon-shaped interface recognizing social touch interactions. In *Proceedings of 10th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 182–197, 2013.

- [33] Joseph A. Paradiso, Che King Leo, Nisha Checka, and Kaijen Hsiao. Passive acoustic knock tracking for interactive windows. In *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 732–733, 2002.
- [34] Thomas G. Zimmerman, Joshua R. Smith, Joseph A. Paradiso, David Allport, and Neil Gershenfeld. Applying electric field sensing to human-computer interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 280–287, 1995.
- [35] Nobuyuki Matsushita and Jun Rekimoto. HoloWall: designing a finger, hand, body, and object sensitive wall. In *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 209–210, 1997.
- [36] Jun Rekimoto, Masaaki Oka, Nobuyuki Matsushita, and Hideki Koike. HoloWall: interactive digital surfaces. In *ACM SIGGRAPH '98 Conference Abstracts and Applications*, p. 108, 1998.
- [37] Jefferson Y. Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. In *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 115–118, 2005.
- [38] Daniel Jackson, Tom Bartindale, and Patrick Olivier. FiberBoard: compact multi-touch display using channeled light. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 25–28, 2009.
- [39] Florian Echtler, Andreas Dippon, Marcus Tönnis, and Gudrun Klinker. Inverted FTIR: easy multitouch sensing for flatscreens. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 29–32, 2009.
- [40] Steve Hodges, Shahram Izadi, Alex Butler, Alban Rustemi, and Bill Buxton. Thin-Sight: versatile multi-touch sensing for thin form-factor displays. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 259–268, 2007.
- [41] Matthew Hirsch, Douglas Lanman, Henry Holtzman, and Ramesh Raskar. BiDi Screen: a thin, depth-sensing LCD for 3D interaction using light fields. In *ACM SIGGRAPH Asia 2009 Papers*, pp. 159:1–159:9, 2009.
- [42] Paul Dietz and Darren Leigh. DiamondTouch: a multi-user touch technology. In *Pro-*

- ceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 219–226, 2001.
- [43] Michelle Annett, Tovi Grossman, Daniel Wigdor, and George Fitzmaurice. Medusa: a proximity-aware multi-touch tabletop. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 337–346, 2011.
- [44] Chris Harrison, Munehiko Sato, and Ivan Poupyrev. Capacitive fingerprinting: exploring user differentiation by sensing electrical properties of the human body. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 537–544, 2012.
- [45] Christian Holz and Patrick Baudisch. Fiberio: a touchscreen that senses fingerprints. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 41–50, 2013.
- [46] Chris Harrison, Julia Schwarz, and Scott E. Hudson. TapSense: enhancing finger interaction on touch surfaces. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 627–636, 2011.
- [47] Yoshiki Takeoka, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Z-touch: an infrastructure for 3D gesture interaction in the proximity of tabletop surfaces. In *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 91–94, 2010.
- [48] Taku Hachisu and Hiroyuki Kajimoto. HACHIStack: dual-layer photo touch sensing for haptic and auditory tapping interaction. In *Proceedings of the 2013 ACM Annual Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1411–1420, 2013.
- [49] Andrew Clayphan, Anthony Collins, Christopher Ackad, Bob Kummerfeld, and Judy Kay. Firestorm: a brainstorming application for collaborative group work at tabletops. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 162–171, 2011.
- [50] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 234–241, 1997.
- [51] Hiroshi Ishii. Tangible bits: beyond pixels. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, pp. xv–xxv, 2008.

- [52] Malte Weiss, Julie Wagner, Yvonne Jansen, Roger Jennings, Ramsin Khoshabeh, James D. Hollan, and Jan Borchers. SLAP widgets: bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops. In *Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 481–490, 2009.
- [53] Sven Kratz, Tilo Westermann, Michael Rohs, and Georg Essl. CapWidgets: tangible widgets versus multi-touch controls on mobile devices. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1351–1356, 2011.
- [54] Liwei Chan, Stefanie Müller, Anne Roudaut, and Patrick Baudisch. CapStones and ZebraWidgets: sensing stacks of building blocks, dials and sliders on capacitive touch screens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2189–2192, 2012.
- [55] Neng-Hao Yu, Li-Wei Chan, Seng Yong Lau, Sung-Sheng Tsai, I-Chun Hsiao, Dian-Je Tsai, Fang-I Hsiao, Lung-Pan Cheng, Mike Chen, Polly Huang, and Yi-Ping Hung. TUIC: enabling tangible interaction on capacitive multi-touch displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2995–3004, 2011.
- [56] Rong-Hao Liang, Kai-Yin Cheng, Liwei Chan, Chuan-Xhyuan Peng, Mike Y. Chen, Rung-Huei Liang, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussBits: magnetic tangible bits for portable and occlusion-free near-surface interactions. In *Proceedings of the 2013 ACM Annual Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1391–1400, 2013.
- [57] Simon Voelker, Kosuke Nakajima, Christian Thoresen, Yuichi Itoh, Kjell Ivar Øvergård, and Jan Borchers. PUCs: detecting transparent, passive untouched capacitive widgets on unmodified multi-touch displays. In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 101–104, 2013.
- [58] Patrick Baudisch, Torsten Becker, and Frederik Rudeck. Lumino: tangible blocks for tabletop computers based on glass fiber bundles. In *Proceedings of the 28th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1165–1174, 2010.
- [59] Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic, and Jean-Daniel Fekete. Tangible remote controllers for wall-size displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human*

- Factors in Computing Systems*, pp. 2865–2874, 2012.
- [60] Neng-Hao Yu, Sung-Sheng Tsai, I-Chun Hsiao, Dian-Je Tsai, Meng-Han Lee, Mike Y. Chen, and Yi-Ping Hung. Clip-on gadgets: expanding multi-touch interaction area with unpowered tactile controls. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 367–372, 2011.
- [61] Haipeng Mi and Masanori Sugimoto. HATs: Interact using height-adjustable tangibles in tabletop interfaces. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 71–74, 2011.
- [62] Eli Blevis. Sustainability implications of organic user interface technologies: an inky problem. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 56–57, 2008.
- [63] Amanda Parkes, Ivan Poupyrev, and Hiroshi Ishii. Designing kinetic interactions for organic user interfaces. *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 58–65, 2008.
- [64] Carsten Schwesig. What makes an interface feel organic? *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 67–69, 2008.
- [65] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Providing dynamically changeable physical buttons on a visual display. In *Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 299–308, 2009.
- [66] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, and Ryo Kawamura. Project FEELEX: adding haptic surface to graphics. In *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 469–476, 2001.
- [67] Daniel Leithinger and Hiroshi Ishii. Relief: a scalable actuated shape display. In *Proceedings of the 4th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 221–222, 2010.
- [68] Daniel Leithinger, David Lakatos, Anthony DeVincenzi, Matthew Blackshaw, and Hiroshi Ishii. Direct and gestural interaction with Relief: a 2.5D shape display. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 541–548, 2011.
- [69] 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, 2013.
- [70] Yohei Kojima, Taku Fujimoto, Yuichi Itoh, and Kosuke Nakajima. Polka dot: the garden of water spirits. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies*, pp. 15:1–15:2, 2013.
- [71] David T. Gallant, Andrew G. Seniuk, and Roel Vertegaal. Towards more paper-like input: flexible input devices for foldable interaction styles. In *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 283–286, 2008.
- [72] Mohammadreza Khalilbeigi, Roman Lissermann, Wolfgang Kleine, and Jürgen Steimle. FoldMe: interacting with double-sided foldable displays. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 33–40, 2012.
- [73] Julian Lepinski and Roel Vertegaal. Cloth displays: interacting with drapable textile screens. In *Proceedings of the 5th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 285–288, 2011.
- [74] 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 2011 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1303–1312, 2011.
- [75] Gero Herkenrath, Thorsten Karrer, and Jan Borchers. Twend: twisting and bending as new interaction gesture in mobile devices. In *CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3819–3824, 2008.
- [76] Jürgen Steimle, Andreas Jordt, and Pattie Maes. Flexpad: highly flexible bending interactions for projected handheld displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 237–246, 2013.
- [77] Mohammadreza Khalilbeigi, Roman Lissermann, Max Mühlhäuser, and Jürgen Steimle. Xpaaand: interaction techniques for rollable displays. In *Proceedings of the 2011 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2729–2732, 2011.
- [78] Carsten Schwesig, Ivan Poupyrev, and Eiji Mori. Gummi: user interface for de-

- formable computers. In *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 954–955, 2003.
- [79] Carsten Schwesig, Ivan Poupyrev, and Eiji Mori. Gummi: a bendable computer. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 263–270, 2004.
- [80] Aneesh P. Tarun, Peng Wang, Audrey Girouard, Paul Strohmeier, Derek Reilly, and Roel Vertegaal. PaperTab: an electronic paper computer with multiple large flexible electrophoretic displays. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3131–3134, 2013.
- [81] 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, 2012.
- [82] Kevin Vlack, Terukazu Mizota, Naoki Kawakami, Kazuto Kamiyama, Hiroyuki Kajimoto, and Susumu Tachi. GelForce: a vision-based traction field computer interface. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1154–1155, 2005.
- [83] Yasuaki Kakehi, Kensei Jo, Katsunori Sato, Kouta Minamizawa, Hideaki Nii, Naoki Kawakami, Takeshi Naemura, and Susumu Tachi. ForceTile: tabletop tangible interface with vision-based force distribution sensing. In *ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos*, p. 17:1, 2008.
- [84] Toshiki Sato, Haruko Mamiya, Hideki Koike, and Kentaro Fukuchi. Photoelastic-Touch: transparent rubbery tangible interface using an LCD and photoelasticity. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 43–50, 2009.
- [85] Sean Follmer, Micah Johnson, Edward Adelson, and Hiroshi Ishii. deForm: an interactive malleable surface for capturing 2.5D arbitrary objects, tools and touch. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 527–536, 2011.
- [86] Parinya Punpongsanon, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. DeforMe: projection-based visualization of deformable surfaces using invisible textures. In *SIGGRAPH Asia 2013*

- Emerging Technologies*, pp. 8:1–8:3, 2013.
- [87] Ilya Rosenberg and Ken Perlin. The UnMousePad: an interpolating multi-touch force-sensing input pad. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 65:1–65:9, 2009.
 - [88] Andrew Stevenson, Christopher Perez, and Roel Vertegaal. An inflatable hemispherical multi-touch display. In *Proceedings of the 5th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 289–292, 2011.
 - [89] 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 photoreflectivity measurement. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 509–516, 2011.
 - [90] Suzanne Low, Yuta Sugiura, Kevin Fan, and Masahiko Inami. Cuddly: Enchant your soft objects with a mobile phone. In *SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies*, pp. 5:1–5:2, 2013.
 - [91] Seoktae Kim, Hyunjung Kim, Boram Lee, Tek-Jin Nam, and Woohun Lee. Inflatable mouse: volume-adjustable mouse with air-pressure-sensitive input and haptic feedback. In *Proceeding of the 26th Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 211–224, 2008.
 - [92] R. Slyper and J. Hodgins. Prototyping robot appearance, movement, and interactions using flexible 3D printing and air pressure sensors. In *RO-MAN, 2012 IEEE*, pp. 6–11, 2012.
 - [93] 中津留義樹, 平松良介, 星野准一. ボール型軟体ゲームコントローラ:ぶよこん. エンタテインメントコンピューティング 2011 論文集, pp. 1–6, 2011.
 - [94] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, and Naoto Ono. Volflex. In *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies*, p. 31:1, 2005.
 - [95] Joseph A. Paradiso. The interactive balloon: sensing, actuation and behavior in a common object. *IBM Systems Journal*, Vol. 35, No. 3/4, pp. 473–487, 1996.
 - [96] Yoshiharu Ooide, Hiroki Kawaguchi, and Takuya Nojima. An assembly of soft actuators for an organic user interface. In *Proceedings of the Adjunct Publication of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 87–88,

- 2013.
- [97] Masahiro Furukawa, Yuji Uema, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Fur interface with bristling effect induced by vibration. In *Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference*, pp. 17:1–17:6, 2010.
 - [98] Hayes Raffle, Mitchell W. Joachim, and James Tichenor. Super Cilia Skin: an interactive membrane. In *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 808–809, 2003.
 - [99] Marcelo Coelho and Pattie Maes. Sprout I/O: a texturally rich interface. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, pp. 221–222, 2008.
 - [100] 串山久美子, 笹田晋司. 生物感覚を提示する毛状視触覚ディスプレイ「fur-fly」. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 3, pp. 459–462, 2010.
 - [101] Sunao Hashimoto, Ryohei Suzuki, Youichi Kamiyama, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. LightCloth: sensible illuminating optical fiber cloth for creating interactive surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 603–606, 2013.
 - [102] Satoshi Saga, Shinobu Kuroki, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Fibratus tactile sensor using reflection on an optical lever. In *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, p. 3:1, 2007.
 - [103] George W. Fitzmaurice and William Buxton. An empirical evaluation of graspable user interfaces: towards specialized, space-multiplexed input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 43–50, 1997.
 - [104] George W. Fitzmaurice, Hiroshi Ishii, and William A. S. Buxton. Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 442–449, 1995.
 - [105] Dinesh K. Pai, Eric W. VanDerLoo, Subarna Sadhukhan, and Paul G. Kry. The Tango: a tangible tangoreceptive whole-hand human interface. In *Eurohaptics Conference 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2005. World Haptics 2005 First Joint*, pp. 141–147, 2005.
 - [106] Kee-Eung Kim, Wook Chang, Sung-Jung Cho, Junghyun Shim, Hyunjeong Lee,

- Joonah Park, Youngbeom Lee, and Sangryong Kim. Hand grip pattern recognition for mobile user interfaces. In *Proceedings of the 18th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence - Volume 2*, pp. 1789–1794, 2006.
- [107] Raphael Wimmer and Sebastian Boring. HandSense: discriminating different ways of grasping and holding a tangible user interface. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, pp. 359–362, 2009.
- [108] Brandon T. Taylor and V. Michael Bove, Jr. Graspables: grasp-recognition as a user interface. In *Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 917–926, 2009.
- [109] Makoto Ono, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Touch & Activate: adding interactivity to existing objects using active acoustic sensing. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 31–40, 2013.
- [110] Hyunyoung Song, Hrvoje Benko, Francois Guimbretiere, Shahram Izadi, Xiang Cao, and Ken Hinckley. Grips and gestures on a multi-touch pen. In *Proceedings of the 2011 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1323–1332, 2011.
- [111] Heather Knight, Robert Toscano, Walter D. Stiehl, Angela Chang, Yi Wang, and Cynthia Breazeal. Real-time social touch gesture recognition for sensate robots. In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3715–3720, 2009.
- [112] Walter Stiehl and Cynthia Breazeal. Affective touch for robotic companions. In *Affective Computing and Intelligent Interaction*, Vol. 3784, pp. 747–754. Springer Berlin / Heidelberg, 2005.
- [113] Masahiro Furukawa, Naohisa Nagaya, Takuji Tokiwa, Masahiko Inami, Atsushi Okoshi, Maki Sugimoto, Yuta Sugiura, and Yuji Uema. Fur display. *Proceedings of ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies*, p. 70, 2009.
- [114] Patrizia Marti. Bringing playfulness to disabilities. In *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 851–856, 2010.
- [115] 河内まき子, 持丸正明, 岩澤洋, 三谷誠二. 日本人人体寸法データベース 1997-98, 2000.

- [116] Noriaki Mitsunaga, Takahiro Miyashita, Yuichiro Yoshikawa, Hiroshi Ishiguro, Kiyoshi Kogure, and Norihiro Hagita. Robovie-iv: a robot enhances co-experience. In *Proceedings of the Workshop on Ubiquitous Experience Media at ISWC '05*, pp. 17–23, 2005.
- [117] Paul Ekman and Wallace V. Friesen. *Unmasking the Face: A Guide to Recognizing Emotions from Facial Clues*. Malor Books, 2003.
- [118] Pedro Lopes, Ricardo Jota, and Joaquim A. Jorge. Augmenting touch interaction through acoustic sensing. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 53–56, 2011.
- [119] Koji Yatani and Khai N. Truong. BodyScope: a wearable acoustic sensor for activity recognition. In *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 341–350, 2012.
- [120] Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, Vol. 2, No. 3, pp. 27:1–27:27, 2011.
- [121] 小川兼人, 伊藤雄一, 安部登樹, 岸野文郎. 実物体によるモーションクエリを用いた3次元形状モデル検索. インタラクション 2009 論文集, pp. 9–16, 2009.
- [122] Ling Bao and Stephen S. Intille. Activity recognition from user-annotated acceleration data. In *Pervasive Computing*, Vol. 3001 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 1–17, 2004.
- [123] Christian Rendl, Patrick Greindl, Michael Haller, Martin Zirkl, Barbara Stadlober, and Paul Hartmann. PyzoFlex: printed piezoelectric pressure sensing foil. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 509–518, 2012.
- [124] Shenwei Liu and François Guimbretière. FlexAura: a flexible near-surface range sensor. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 327–330, 2012.
- [125] Scott Brave and Andrew Dahley. inTouch: a medium for haptic interpersonal communication. In *CHI '97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 363–364, 1997.