

位相に基づく指輪型入力デバイスの検討

船越 南斗^{1,a)} 池川 航史^{2,b)} 志築 文太郎^{3,c)} 高橋 伸^{3,d)}

概要: 我々は手形状を認識するためのアプローチを検討している。我々の手法は2つの電極（接触電極および非接触電極）を持つ指輪型デバイスを用いる。接触電極は、ユーザの肌に直接接触し、交流電圧が印加される。これに対して非接触電極は、指輪型デバイスの内部に組み込まれているためユーザの肌に直接接触しない。本手法は、指輪型デバイスが指に取り付けられることによってコンデンサが形成される。身体に交流電圧を印加することにより、このコンデンサの静電容量およびコンデンサに印加される交流電圧の位相を測定し、指の曲げおよび指輪をタッチに用いられた手を認識する。本稿において、提案システムのプロトタイプを用いて、印加する交流電圧の周波数の違いにおけるタッチの認識率を調査した。結果、4 MHz、8 MHz、9 MHz および 10 MHz の場合において、90% 以上の認識率を得た。

1. はじめに

手形状のリアルタイム認識は手形状に基づくジェスチャ入力インタフェースあるいは指文字認識の実現に必要である。この手形状の認識手法はこれまで数多く研究されてきた。例えば、カメラ画像を用いた手法 [13] および手に取り付けたセンサを用いた手法 [10] が代表例として挙げられる。しかし、前者にはオクルージョンが発生するという問題、後者には手の表面の多くの部分をセンサが覆うという問題がある。一方で、筋電位センサを用いた手法 [21] はこれら2つの手法の問題を解決できる。特に、この手法は腕に取り付けた筋電位センサにより腕の筋肉の活動をセンシングする。そのため、センサが手を塞がないという特徴を持つ。

現在、我々は手形状を認識するための異なるアプローチを検討している。我々の認識手法は指輪型デバイスをセンシングに用いる。指輪は多くの人々によって日常的に身につけられている。また、指輪は筋電位センサを用いた手法と同様に手を塞がない。そのため、指輪型のデバイスを用いることによってユーザは手軽に入力ができるようになる。



図1 提案システムのプロトタイプ: 左) 指の曲げ, 右) タッチした手を認識

図1に指輪型デバイスを用いた指の曲げとタッチを行った手を認識するシステムのプロトタイプを示す。将来的に、提案システムはユーザの全ての指に指輪型デバイスを装着することによって手形状（個々の指の曲げとタッチ）の認識ができるようになる。今回、我々は指輪型デバイスと、これを用いて指の曲げとタッチを認識するシステムのプロトタイプを作製したのでこれを報告する。

2. 関連研究

本節では、既存の手形状認識手法および指輪型の入力デバイスについて述べる。

2.1 手形状認識手法

手形状を認識する手法には、カメラ画像を用いたものや身体にセンサを取り付けたものなどがある。

カメラ画像を用いた手法として、Leap Motion [14] は、2基の赤外線カメラを用いることにより実世界空間内における手および指の位置を認識する。また CyclopsRing [2] は手に取り付けた魚眼カメラを用いて手形状を認識する。またカメラを身体に取り付けることによって手形状を認識す

¹ 筑波大学情報メディア創成学類
College of Media Arts, Science and Technology, University of Tsukuba
² 筑波大学コンピュータサイエンス専攻
Department of Computer Science, University of Tsukuba
³ 筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba
a) funakoshi@iplab.cs.tsukuba.ac.jp
b) ikegawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp
c) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp
d) shin@cs.tsukuba.ac.jp

る研究がある。[6,16,23]は頭に,[3,8,15]は胸部に,[9]は肩に,[12,20]は手首に,[11,17]は指にカメラを取り付け、手のジェスチャを認識する。また、スマートフォンおよびラップトップPCなどカメラを搭載したデバイスは広く普及しており、ユーザはカメラ画像を用いた手形状認識を手軽に利用することができる。しかし、カメラ画像を用いた手法にはオクルージョンや手がカメラに映る範囲内のみでの認識しか行えない問題がある。

手にセンサを取り付けることによって手形状認識を実現する手法もある。DigitSpace [10]は、人差し指および中指に取り付けた磁気センサと親指に取り付けた磁石によって、親指の位置を認識をしている。Ubi-Finger [24]は曲げセンサと速度センサによって手によるジェスチャを認識している。FingerPad [4]は人差し指に取り付けた磁気センサを利用し、人差し指先端上のタッチ位置を検出する。TIMMi [25]はシリコンと導電性の糸で作られた布状のデバイスを指に装着させることによって指上のタッチされた位置を検出している。uTrack [5]は親指に永久磁石、それ以外の指に磁気センサを付け、親指の3次元位置を追跡する。また、センサを取り付けた手袋(データグローブ)によって手形状を認識する手法もある [29]。これらの手法にはオクルージョンの問題が発生しない。しかし、指にセンサを取り付けると手の動きや皮膚感覚が妨げられるという問題がある。

また、腕にセンサを取り付ける手法もある。Saponasら [21]は筋電位センサを用いて手のジェスチャを認識した。WristFlex [7]は手首に取り付けた圧力センサのセンサ値の変化を用いてピンチジェスチャを検出した。Touché [22]はスイープ信号を利用して手首に取り付けた電極の静電容量を測定し、数種類のジェスチャの認識を行った。また、ThumbSlide [28]は手首にフォトリフレクタが取り付けられたベルトを取り付け、親指の動きを検出した。これらの手法は、手にセンサを取り付ける必要が無いため手を妨げない。しかし、手にセンサを取り付けた手法ほど細かな手の動きの認識は行えない。

2.2 指輪型入力インタフェース

指輪型の入力インタフェースには手の動きを妨げにくく取り付けやすい利点がある。iRing [19]は指輪型のデバイスであり、赤外線距離センサを利用して装着対象の指の曲げ、指輪の回転、外部から指輪に加えられる力を認識する。加速度センサを用いて指の動きを認識する手法もある [1,18]。FingOrbits [26]は、親指に取り付けられた慣性計測装置およびマイクを用いて親指が擦った指とその速度を検出する。

我々の手法は指輪型のデバイスによって指の曲げおよびタッチの認識を行う。

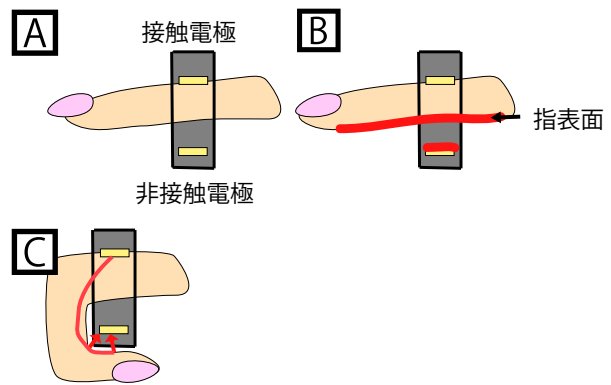


図 2 指輪型デバイスと指の側面図

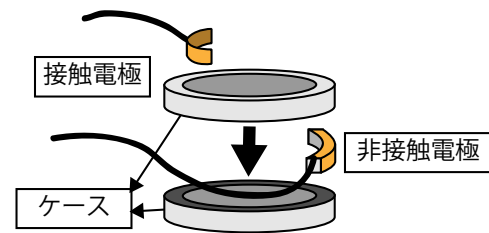


図 3 指輪の構造

3. 検出原理

本節では指の曲げおよびタッチに用いられた手の認識の原理を示す。我々の手法は、位相および静電容量に基づいてこれらを認識する。

まず我々の手法は図3に示すように2つの電極(接触電極および非接触電極)を持つ指輪型デバイスを用いる。接触電極は、ユーザの肌に直接接触れ、交流電圧が印加される。これに対して非接触電極は、指輪型デバイスの内部に組み込まれているためユーザの肌に直接接触れない(図2A)。ユーザが指輪型デバイスを取り付けた際、非接触電極および指の表面はコンデンサを形成する(図2B)。

3.1 曲げ認識

指を曲げることで非接触電極と指の距離が短くなる(図2C)。これによって、非接触電極および指表面が形成するコンデンサの静電容量が増加する。我々の手法は、この変化を指の曲げの認識に用いる。

このコンデンサの静電容量の変化を検出するために我々の手法は分圧回路を用いる。本手法における分圧回路の等価回路を図4に示す。この回路図において C_1 と R_1 から構成される並列回路は人体のインピーダンスである。また、 C_2 は非接触電極と指表面が形成するコンデンサの静電容量である。 C_2 が増加すると、 C_1 、 R_1 および C_2 の合成インピーダンスが減少するため出力電圧が大きくなる。この出力された電圧を測定することによって、 C_2 の静電容量の変化を検出する。

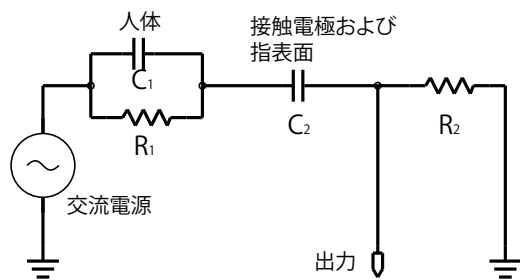


図 4 分圧回路の等価回路

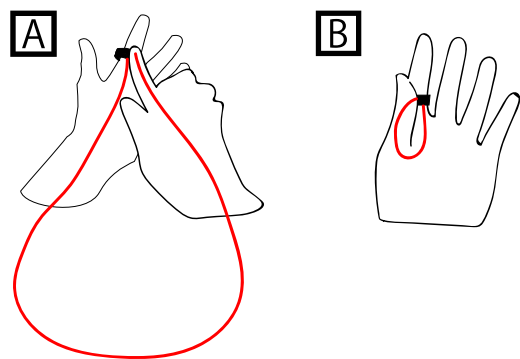


図 5 タッチされた手による電気の経路

3.2 タッチに用いられた手の認識

タッチに用いられた手を認識するために、我々は電圧の位相を用いる。具体的には、接触電極に印加した電圧、および、分圧回路の出力電圧の位相差を測定する。一般に、伝達経路の長さに比例して、観測される交流電圧の位相は遅れる。よって左手に高周波の交流電圧を印加した場合、右手から伝わる交流電圧の位相は左手のものに比べ遅れる(図5)。我々の手法はこの位相の差を測定することによって、右手で指輪のタッチを行ったのか、左手で行ったかを認識する。同様に交流電圧の位相差を用いた研究として SkinTrack [27] がある。

4. 実装

前節の検出原理に基づき、指の曲げおよびタッチに用いられた手の認識を行うシステムのプロトタイプを実装した。本システムは、一本の指に指輪型デバイスを取り付け、その指の曲げおよびタッチに用いられた手の認識を行う。図6に、本システムのブロック図を示す。本システムは大きく分け、ハードウェアおよびソフトウェアによって構成される。ハードウェアは、静電容量および交流電圧の位相を測定し、測定した値をPCに送信する。ソフトウェアは、送信された値から指の曲げおよびタッチに用いられた手の認識を行う。

4.1 ハードウェア

本システムのハードウェアは、静電容量および交流電圧の位相を測定する。

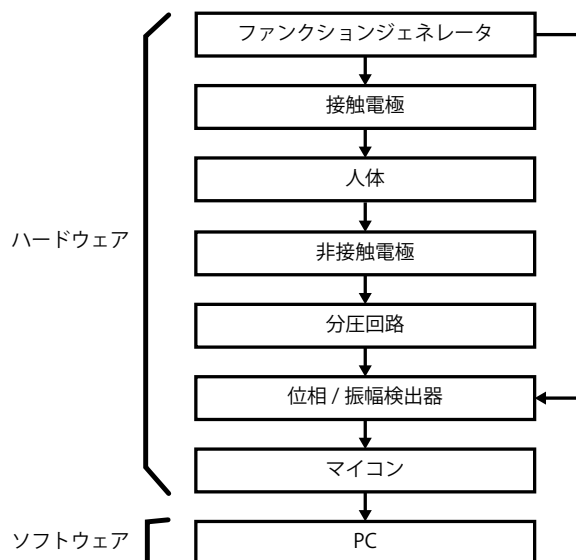


図 6 システム全体のブロック図

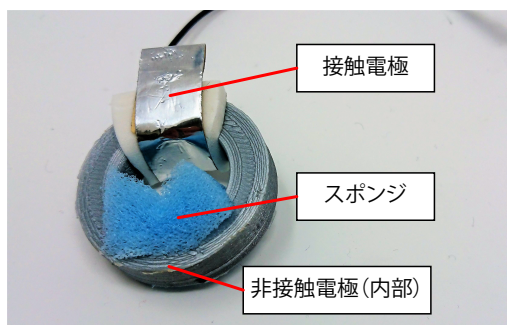


図 7 製作した指輪型デバイス

4.1.1 指輪型デバイス

指輪型デバイスは、外部に露出した接触電極および内部に埋め込まれた非接触電極を持つ。図7に製作した指輪型デバイスの外観を示す。指輪の寸法は外径が32mm、内径が18mm、長さが9mmである。我々は、接触電極として導電性のテープを指輪に貼り付けた。また、接触電極の指への接触を安定させるために指輪にスポンジを取り付けた。そして、非接触電極として指輪の内部に導電性のテープを貼り付け、このテープに導線を取り付けた。

4.1.2 振幅および位相検出ハードウェア

指表面と指輪型デバイスが形成するコンデンサの静電容量は分圧回路によって、交流電圧の電圧として出力される。この静電容量は指輪を取り付けた指の曲げによって変化する。また、タッチを行った際も同様にこの静電容量は増加し、タッチに使用した指によって位相が変化する。位相の変化を検出するために、接触電極に印加している交流電圧と非接触電極に印加される交流電圧の比較を行っている。接触電極に交流電圧を印加するために、本システムではファンクションジェネレータ (Metex 社製 MGX-9810A) を使用した。また、分圧回路から出力される交流電圧の位相および振幅を測定するための IC として AD8302 を使用

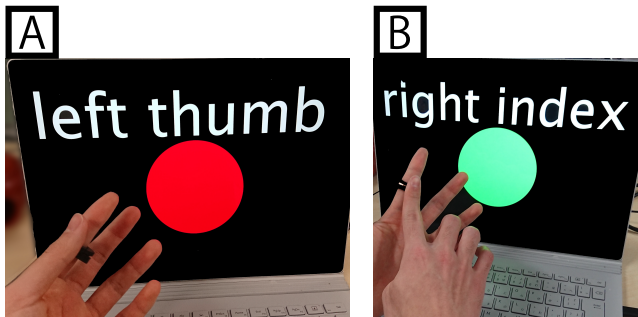


図 8 タッチの検出結果を表示するソフトウェアの画面

した。AD8302 は、入力した 2 つの交流電圧の位相と振幅の差を測定する。それぞれの測定結果は、AD8302 によってアナログ値として電圧が出力される。これらの測定値を受け取り、PC に送信するためのマイコンとして Arduino Duemilanove 328 を使用した。

4.2 曲げおよびタッチ認識ソフトウェア

作製したソフトウェアの画面を図 8 および図 9 に示す。本システムのソフトウェアでは、ハードウェアから送られてきた測定値を元に指の曲げおよびタッチに用いられた手の認識を行う。最初に、ソフトウェアはタッチが行われているかどうか、認識する。その後、タッチが行われている場合は、どちらの手でタッチが行われているか、認識する。タッチの認識結果は、図 8 に示すように画面に表示される。またタッチが行われていない場合は、指の曲げ具合の認識を行う。指の曲げの認識結果は、図 9 に示すように画面に表示される。個々の認識のアルゴリズムを以下に示す。

4.2.1 タッチ認識アルゴリズム

本システムのソフトウェアはハードウェアから送られてきた位相差を用いることによってタッチに用いられた手の認識を行う。最初にキャリブレーションとして、次の 3 状態における位相差を測定する。

- タッチされていない状態
- 指輪を付けている手の親指によって指輪がタッチされている状態
- 指輪を付けていない手の指によって指輪がタッチされている状態

実行時には、測定した位相差と上記 3 状態の位相差を比較し、最も近い値の状態を現在の状態として認識する。

4.2.2 曲げ認識アルゴリズム

本システムのソフトウェアはハードウェアから送られてきた振幅差を用いて曲げ認識を行う。最初にキャリブレーションとして、指輪が装着された指が伸ばされた状態および曲げられた状態における振幅差を測定する。実行時には、事前に測定した 2 状態を最小値と最大値として、現在の振幅差の比を計算する。

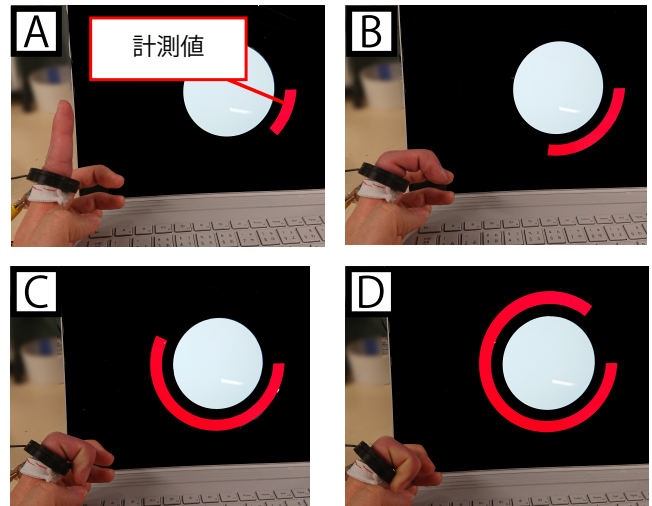


図 9 曲げの認識結果を表示するソフトウェアの画面

5. 実験

提案システムのプロトタイプにおいて接触電極に印加する交流電圧の周波数として適切なものを調べるために、周波数を変えることにより得られるタッチに用いられた手の認識率を調査した。実験参加者は著者 1 名である。

本実験では、1 MHz から 10 MHz までの周波数を持つ正弦波を 1 MHz 刻みで使用した。使用した交流電圧の振幅は $5V_{pp}$ である。実験参加者の左手の人差し指に指輪型デバイスを取り付けた上で、3 状態の位相差を測定した。具体的には、各状態における位相差を 5 回ずつ測定し、各測定にて 100 回のサンプリングを行った。また、配線の位置が変化することによって測定される値に影響が出るのを防ぐために、測定中は手を動かさないようにした。500 個のデータに対して、最初の 50 個をキャリブレーション用のデータとして使用し、残りの 450 個のデータを用いて認識率を求めた。我々は、タッチの状態とその認識結果の状態が一致した場合を正解、不一致の場合を不正解として認識率を算出した。

表 1 に結果を示す。接触電極に印加する交流電圧の周波数を 7MHz にした場合、他に比べ認識率が低くなった。また、8MHz 以上の周波数の場合、認識率は 90% を超えていた。しかし、4MHz においても認識率は 90% を超えているため、一概に周波数が高いほど認識率が高くなるとは言えない。このため、両腕および胸部など身体の各点における交流電圧の波形を測定することで位相がどのように遅れて伝わるか調査する必要があると考えられる。また、10 MHz より高い周波数にて実験を行った場合、どのような結果になるか調査する。さらに、7 MHz の周波数において認識率が低くなった原因を調査するために 6.5 MHz などより調査する周波数の刻み幅を小さくして実験する必要があると考えられる。

表 1 各周波数におけるタッチの認識率

	1MHz	2MHz	3MHz	4MHz	5MHz	6MHz	7MHz	8MHz	9MHz	10MHz
タッチ無し	72.63	95.26	100.00	100.00	54.74	93.16	100.00	88.42	90.53	100.00
左手親指	92.63	83.16	63.68	78.95	74.21	82.63	27.37	98.95	100.00	100.00
右手人差し指	66.32	70.00	67.37	95.26	100.00	61.05	34.21	97.89	98.42	86.32
平均	77.19	82.81	77.02	91.40	76.32	78.95	53.86	95.09	96.32	95.44

6. 今後の課題

本研究では指輪型デバイスを用いた指の曲げを認識するシステムのプロトタイプを製作した。今後、指を曲げたときにおける静電容量および位相の測定値の変化量について調査する。具体的に、指輪型デバイスを取り付けた状態にて指にマーカを取り付け、カメラ画像から指の曲げを取得する。その後、カメラ画像から得られる曲げ具合と指輪型デバイスから得られる曲げ具合を比較し、どのような特性があるか調査する。

また、実験結果から周波数を変化させることによって得られるタッチの認識率に特徴は見られなかった。今後は、交流電圧がどのように伝搬されているかを調査するために身体に交流電圧の測定点を増やす。さらに、より高い交流電圧を使用することによって得られる位相差についても調査する。SkinTrack [27] では 80 MHz の交流電圧を使用していたため、同程度の周波数を調査対象にする。以上の調査によって、手形状認識に最適な周波数の選定を行っていく。

実験の際、手が静止した状態において測定される振幅差および位相差にノイズが見られた。家庭用電源や無線 LAN などから生じる電磁波による外乱が交流電圧の振幅および位相の測定に影響を与えた可能性がある。これらは、回路に外乱を除去するフィルタを入れることによって、測定されるノイズを軽減できると考える。

また、今回の提案システムのプロトタイプの実装では手を動かすと測定される振幅差と位相差が変化した。これは導線が動くことにより、非接触電極と接触電極に接続されている導線同士の距離が変化する。これにより、導線間の静電容量が変化すると考えられる。これらのケーブルを同軸ケーブルに変えることによりこの影響は少なくなると考えられる。

将来的に、測定のために使用する指輪の数を 5 個に増やす。これにより、各指の曲げの認識が可能になる。全部の指の曲げが認識可能になることによって、手の形状が認識可能になる。

7. おわりに

本稿において、静電容量および位相に基づいて指の曲げおよびタッチされた手を認識する指輪型デバイスの検討を行った。本手法は、指輪型デバイスが指に取り付けられる

ことによって形成されるコンデンサを指の曲げおよび指輪へのタッチに用いられた手の認識に利用する。我々の手法は身体に交流電圧を印加することによって、このコンデンサの静電容量およびコンデンサに印加される交流電圧の位相を測定し、指の曲げおよび指輪をタッチに用いられた手を認識する。提案システムのプロトタイプにおいて接触電極に印加する交流電圧の周波数として適切なものを調査した。4 MHz, 8 MHz, 9 MHz および 10 MHz の場合において、90% 以上のタッチの認識率が確認された。今後は、タッチの認識率の向上および指の曲げに関する調査を行い、手形状の認識を可能とするシステムの実装を進める。

参考文献

- [1] K. Barczewska and A. Drozd. Comparison of Methods for Hand Gesture Recognition Based on Dynamic Time Warping Algorithm. In *2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, pp. 207–210, Sep. 2013.
- [2] Liwei Chan, Yi-Ling Chen, Chi-Hao Hsieh, Rong-Hao Liang, and Bing-Yu Chen. CyclopsRing: Enabling Whole-Hand and Context-Aware Interactions Through a Fisheye Ring. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 549–556, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [3] Liwei Chan, Chi-Hao Hsieh, Yi-Ling Chen, Shuo Yang, Da-Yuan Huang, Rong-Hao Liang, and Bing-Yu Chen. Cyclops: Wearable and Single-Piece Full-Body Gesture Input Devices. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 3001–3009, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [4] Liwei Chan, Rong-Hao Liang, Ming-Chang Tsai, Kai-Yin Cheng, Chao-Huai Su, Mike Y. Chen, Wen-Huang Cheng, and Bing-Yu Chen. FingerPad: Private and subtle interaction using fingertips. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 255–260, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [5] Ke-Yu Chen, Kent Lyons, Sean White, and Shwetak Patel. uTrack: 3D Input Using Two Magnetic Sensors. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 237–244, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [6] Andrea Colaço, Ahmed Kirmani, Hye Soo Yang, Nan-Wei Gong, Chris Schmandt, and Vivek K. Goyal. Mime: Compact, Low Power 3D Gesture Sensing for Interaction with Head Mounted Displays. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 227–236, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [7] Artem Dementyev and Joseph A. Paradiso. WristFlex:

- Low-power Gesture Input with Wrist-worn Pressure Sensors. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 161–166, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [8] Sean Gustafson, Daniel Bierwirth, and Patrick Baudisch. Imaginary Interfaces: Spatial Interaction with Empty Hands and Without Visual Feedback. In *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, pp. 3–12, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [9] Chris Harrison, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson. OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 441–450, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [10] Da-Yuan Huang, Liwei Chan, Shuo Yang, Fan Wang, Rong-Hao Liang, De-Nian Yang, Yi-Ping Hung, and Bing-Yu Chen. DigitSpace: Designing Thumb-to-Fingers Touch Interfaces for One-Handed and Eyes-Free Interactions. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 1526–1537, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [11] Lei Jing, Zixue Cheng, Yinghui Zhou, Junbo Wang, and Tongjun Huang. Magic Ring: A Self-contained Gesture Input Device on Finger. In *Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM '13, pp. 39:1–39:4, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [12] David Kim, Otmar Hilliges, Shahram Izadi, Alex D. Butler, Jiawen Chen, Iason Oikonomidis, and Patrick Olivier. Digits: Freehand 3D Interactions Anywhere Using a Wrist-worn Gloveless Sensor. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 167–176, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [13] Eyal Krupka, Kfir Karmon, Noam Bloom, Daniel Freedman, Ilya Gurvich, Aviv Hurvitz, Ido Leichter, Yoni Smolin, Yuval Tzairi, Alon Vinnikov, and Aharon Bar-Hillel. Toward Realistic Hands Gesture Interface: Keeping It Simple for Developers and Machines. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1887–1898, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [14] Leap Motion Inc. Leap Motion. <https://www.leapmotion.com/>, 2018. (accessed 2019-1-9).
- [15] Pranav Mistry and Pattie Maes. SixthSense: A Wearable Gestural Interface. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Sketches*, SIGGRAPH ASIA '09, pp. 11:1–11:1, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [16] Pranav Mistry, Pattie Maes, and Liyan Chang. WUW - Wear Ur World: A Wearable Gestural Interface. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, pp. 4111–4116, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [17] Suranga Nanayakkara, Roy Shilkrot, Kian Peen Yeo, and Pattie Maes. EyeRing: A Finger-worn Input Device for Seamless Interactions with Our Surroundings. In *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference*, AH '13, pp. 13–20, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [18] Nod Inc. Backspin. <https://nod.com/>, 2018. (accessed 2019-2-23).
- [19] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. iRing: Intelligent Ring Using Infrared Reflection. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 131–136, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [20] Manuel Prätorius, Dimitar Valkov, Ulrich Burgbacher, and Klaus Hinrichs. DigiTap: An Eyes-free VR/AR Symbolic Input Device. In *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '14, pp. 9–18, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [21] T. Scott Saponas, Desney S. Tan, Dan Morris, Ravin Balakrishnan, Jim Turner, and James A. Landay. Enabling Always-available Input with Muscle-computer Interfaces. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, pp. 167–176, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [22] Munehiko Sato, Ivan Poupyrev, and Chris Harrison. Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, ScreensEnhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 483–492, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [23] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Brainy Hand: An Ear-worn Hand Gesture Interaction Device. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, pp. 4255–4260, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [24] Koji Tsukada and Michiaki Yasumura. Ubi-Finger: Gesture Input Device for Mobile Use. In *Proceedings of APCHI 2002*, Vol. 1, pp. 388–400, 2002.
- [25] Sang Ho Yoon, Ke Huo, Vinh P. Nguyen, and Karthik Ramani. TIMMi: Finger-worn Textile Input Device with Multimodal Sensing in Mobile Interaction. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pp. 269–272, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [26] Cheng Zhang, Xiaoxuan Wang, Anandghan Waghmare, Sumeet Jain, Thomas Ploetz, Omer T. Inan, Thad E. Starner, and Gregory D. Abowd. FingerOrbits: Interaction with Wearables Using Synchronized Thumb Movements. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '17, pp. 62–65, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [27] Yang Zhang, Junhan Zhou, Gierad Laput, and Chris Harrison. SkinTrack: Using the Body as an Electrical Waveguide for Continuous Finger Tracking on the Skin. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 1491–1503, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [28] 青山周平, 志築文太郎. Thumbstick: 片手スマートウォッチ操作のための親指の二次元動作認識システム. インタラクシオン 2018 論文集, pp. 623–628. 情報処理学会, 3 2018.
- [29] 高田峻介, 志築文太郎, 高橋伸. GROVE: 導電繊維編み込み手袋を用いた手形状計測手法. インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2017), pp. 77–82, 12 2017.