

指節をキーとして利用する入力手法の検討

矢崎 晃平¹ 中村 喜宏¹

概要: 指節をキーとして利用する入力手法を示す。本手法は指関節を境界とすることで、キー範囲の知覚を視覚的、感覚的に可能とする入力手法である。各指節の識別には指の付け根に装着した加速度センサのデータを用いた。本研究では4つの指すべてにセンサを装着したパターンでの認識率検証と、装着感の改善のために2指のセンサを用いた認識率検証、キー配置についての考察を行った。考案したキー配列を使用した結果、認識率は最大97.1%となり、入力としての利用可能性を示した。

A Study on Input Method Using Phalanges as Keys

1. はじめに

近年、スマートウォッチと呼ばれるウェアラブル情報デバイスが普及してきている。それらは携帯性が重要となるために小型のものが多く、入力に用いるキーボードは小型化によるサイズの制限を受け、コンテンツ領域を確保しつつ表示することが難しくなっている。そのためQWERTYキーボードやフリックキーボードが備わっているスマートウォッチでも、実際には単純操作による情報の収集・通知が主に使用される機能となっている。音声認識という方法もあるが、使用できる場所が限定されるという問題がある。それらに対する解決策の一つとして入力・操作領域の人体への拡張がある。例えば、スマートウォッチ周辺の皮膚をタッチパネルとする方式[1]や腕上にボタンを配置する方式[2]等が提案されているが、これらはキーの境界線を把握するための視覚的フィードバックがないため、キーを押し分けることが難しい。そこで本研究では入力範囲がわかりやすく、位置を知覚しやすい指節をキーとした方式を提案する。

本研究で提案する入力方式はユーザの手の指節(関節間)をキーボードの領域に見立て、各指の各指節(指先から第1指節、第2指節、第3指節)へ、もう片方の手の指によるタップ動作で入力を行う方式である。この方式を用いると、キーの数は最大12個となり、テンキーと同様の入力動作が4指で可能となる。金属のばねを用いた指輪型器具

を用いて4つの指の付け根に加速度センサを装着し、タップ時の加速度データを得る。加速度データを周波数成分に分解し、それを入力とした機械学習を行うことで12個の指節を判別する。本稿では4つのセンサすべてを用いた場合の各指節の認識精度評価実験を行った結果とキー配置について述べる。また、機器の装着感を減らすためにセンサを2つにした場合の装着位置の組み合わせと、認識精度についても考察を行った。

2. 関連研究

これまでに入力領域を人体に拡張する研究は数多く行われている。

2.1 腕を操作領域とする研究

腕に疑似的に操作領域を割り当てる研究にARmKeypad[2], Skinput[3], The Sound of Touch[4]等がある。ARmKeypadは腕のマーカーを読み取ることでスマートグラス上でキーボードが腕上にあるように表示させる技術である。これは非接触での操作も可能なため、タッチしたかどうか触覚を用いて知覚できない場合がある。Skinputは腕上部に巻いた装置の体内音響センサにより腕上の操作位置を識別する研究である。タップ位置の識別は5指の識別までであり、また、プロジェクターを用いてボタンを実際に表示しなければ位置の把握が困難である。The Sound of Touchは低周波を接触点から発生させ腕に巻き付けたセンサで取得し、パターンによる識別を行う。この研究ではタップ位置が手のひらまでであり、指、指節までの識別は

¹ 日本大学大学院 生産工学研究科
Graduate School of Industrial Technology, Nihon University,
Narashino, Chiba 275-8575, Japan

行っていない。

2.2 手を操作領域とする研究

手の甲（スマートウォッチ周辺）を主な操作領域とする研究に TapSkin[5], SkinTrack[1], 牧野らの研究 [6], 中妻らの研究 [7] 等がある。TapSkin はスマートウォッチ上の慣性センサとマイクロフォンを用いてタップを識別する。SkinTrack は操作する指からの電流を手首の2センサで取得し、距離から接触位置を識別する。これらはタップ位置の区切りが曖昧であり、正確に認知することが難しい。また、電極を用いる場合、センサ間全てが濡れていない状態でなければならない。牧野ら、中妻らは光センサを用いて、位置を識別している。どちらも操作領域が手の甲までであり、指節の判別までは示していない。

2.3 指を操作領域とする研究

指または指節を操作領域として利用する研究に FingerKeypad[8], FingeRing[9], 岩本らの研究 [10], 鈴木らの研究 [11] 等がある。FingerKeypad は末端を持った状態で指背面をタップした際に、末端背面の2センサ間の時間差で指節を判別する。指節を識別するという面では本研究と同様であるが、手の裏面の指節を用いる点と検出手法に違いがある。また、手で持つ携帯端末の入力補助であるため、スマートウォッチには応用できない。FingeRing は指輪型の加速度センサからその指自体がタップしたことを検出する。センサの周波数を用いる点は本研究と同様であるが、FingeRing は指自身の操作を識別するもので、指節の判別は行えない。岩本らは指の根元のセンサから指の先端と中節を判別する実験を行っている。鈴木らはカメラを用いて指につけたマーカーから指を判別している。これらの研究に対し、本研究では指の根元のセンサで3指節×4指を判別する点で異なる。また、全指にセンサを装着せずに判別する手法も検討する。

3. 提案方式

本研究で提案する入力方式はユーザの手の指節（関節間）をキーボードの領域に見立て、各指の各指節へ、もう片方の手の指によるタップ動作で入力を行う方式である（図1, 図2）。指節を用いた理由は関節がキーボードの境界になり、位置を知覚しやすいこと、また、指節の数と配置がテンキーに類似していることから、学習がしやすいと考えたためである。入力できる文字は通常のマルチタップ方式と同じように日本語、アルファベット、数字、記号等に対応する。今回は認識率の評価実験のために図1のような数字のテンキーに文字‘a’と‘b’を足した配置を用いた。文字‘a’は小指第2指節に、‘b’は小指第1指節に割り当てた。

提案方式では加速度センサを用いてタップ時の波形デー



図1 提案方式のキー割り当て例

Fig. 1 Key arrangement of proposed method.



図2 検出装置とタップ例

Fig. 2 Overview of proposed method.

タを取得する。センサは金属のバネ素材で作成した指輪型（Cの形）の器具に埋め込んでおり、装着位置は動作の妨げにならないように指の付け根とした（図2）。

加速度センサは Freescale 製 MMA7361LC を使用し、データの取得には Arduino Due を用いた。（以降人差し指のセンサから小指のセンサにかけて、センサ A, センサ B, センサ C, センサ D とする）

3.1 検出方法

本方式ではタップした際に加速度センサから得られるデータを周波数分解し、機械学習（Backpropagation）を用いて各指節を分類することで識別を行う。

加速度センサのサンプリングレートは 1kHz とし、タップ開始から 128ms までのデータ 128 個を取得した。タップの開始は $\pm 70\text{mV}$ を越えた点とした。これは弱く叩いた際に波形全体を取得でき、かつタップ以外の動作の検出を行わない値を実験的に調べたところ $\pm 70\text{mV}$ が最適であったため設定した。4 センサのうちどれかが閾値を越えた場合、その点をタップ開始とし、128 個 $\times 4$ センサのデータを取得・保持する。そのデータをセンサごとに周波数成分に分解し、500Hz までの 64 個 $\times 4$ センサのスペクトルデータを取得。今回はセンサ数等の検討も行うため、マイコン

表 1 実験協力者ごとの指の長ささと認識率

Table 1 Finger length and recognition accuracy of each experimenter.

	人差し指			中指			薬指			小指		
	第1	第2	第3	第1	第2	第3	第1	第2	第3	第1	第2	第3
A	25 (98.0)	21 (94.9)	26 (99.0)	27 (93.7)	23 (96.1)	30 (100)	26 (95.0)	23 (93.1)	24 (97.1)	24 (84.0)	16 (84.8)	21 (96.9)
B	25 (100)	20 (99.0)	25 (97.9)	27 (96.0)	24 (98.1)	31 (100)	26 (94.1)	24 (98.1)	25 (97.0)	23 (94.9)	15 (92.7)	20 (97.0)
C	27 (94.0)	23 (93.0)	27 (99.0)	27 (96.0)	23 (97.0)	28 (98.0)	28 (92.0)	21 (99.0)	25 (95.0)	25 (99.0)	17 (98.0)	19 (99.0)
D	28 (100)	24 (99.0)	30 (96.9)	28 (100)	27 (100)	32 (100)	28 (100)	26 (99.0)	28 (100)	27 (83.7)	18 (85.7)	22 (99.0)
E	22 (89.0)	18 (90.0)	22 (96.9)	23 (96.0)	23 (93.0)	22 (98.0)	23 (95.1)	20 (93.1)	19 (91.2)	23 (85.4)	15 (80.0)	19 (98.0)

括弧内は認識率

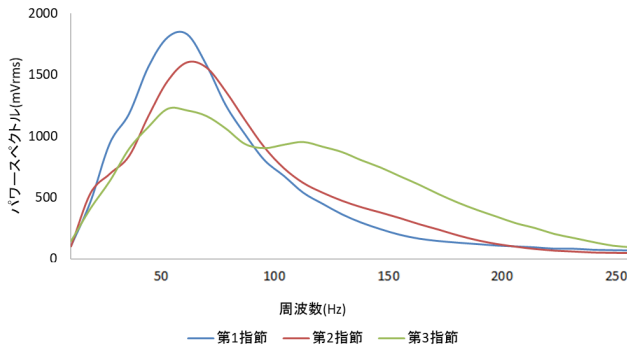


図 3 パワースペクトル例

Fig. 3 Frequency spectrum of ring finger.

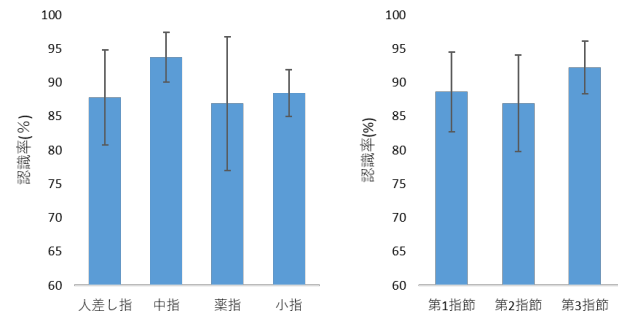


図 5 指ごとの認識率と指節位置ごとの認識率

Fig. 5 Recognition accuracy classified by fingers and phalanges.

		認識された指節													
		人差し指			中指			薬指			小指				
正しい指節	人差し指	第1	第2	第3	第1	第2	第3	第1	第2	第3	第1	第2	第3		
		第1	96.2	2.80	1.00										
		第2	1.62	95.1	3.24										
	第3	0.20	1.43	98.0			0.41								
	第1				96.4	3.02	0.20			0.40					
	第2				1.57	96.9	1.57								
	第3					0.79	99.2								
	第1							95.2	3.76	0.99					
	第2							1.77	96.5	1.77					
	第3							0.39	3.53	95.9				0.20	
	第1										89.5	9.94	0.61		
	第2										0.20	10.8	88.2	0.81	
第3										0.20	1.22	0.61	98.0		

図 4 4 センサでの認識精度の混同行列

Fig. 4 Confusion matrix of recognition accuracy using four sensors.

ボード側ではデータの取得のみを行い、周波数分解から先は PC 側で処理を行った。周波数分解して得られた 64 個のデータのうち特徴が出ている 250Hz までの 30 個分のデータを抽出し、入力に用いた。例として薬指の各指節をタップした場合のスペクトル波形を図 3 に示す。図 3 は 1 人分のタップデータ (薬指の 3 つの指節を各 20 回ずつ) をセンサ C で取得し、スペクトルデータに変換後に平均した波形である。この波形から、指の先端に近い (第 1 指節) ほど低い周波数に分布し、指の付け根 (第 3 指節) では 100Hz 以上にも多く分布している。このような特徴を機械学習を用いて抽出し指節を識別する。

4. 評価実験及び結果

指節ごとの認識精度を評価するための実験を行った。実験には 20 代の男性 5 人が参加した。まず、実験協力者に実験の説明を行い、手の指の付け根に加速度センサを埋め込んだ指輪型 (C 字型) の器具を装着した。数字 0 から 9 を図 1 の位置に、文字 'a' と 'b' を小指の第 2・第 3 指節に割り当て、ランダムで出現される数字・文字に従いその指節をタップしてもらった。学習データに出力と違うデータを組み込まないために、ユーザーが明らかに表示と違う指節をタップした場合はそのデータを無効とした。実験は 1 セッション 240 文字で 5 セッション行った。実験では 4 センサのどれかがタップの開始を検出してから 1ms 間隔で 0~128ms までの 128 個のデータを収集する。よって 1 タップのデータは 128×4 センサで 512 データとなり、データの総数は 1 人あたり 240 タップ×4 センサ×128 データ×5 セッションで 614400 データとなった。このデータを 1 タップの 1 センサごとに周波数分解し得られた 0Hz~500Hz までの 64 個のデータのうち、特徴の出ている 250Hz までの 30 データを抽出した。

認識率の検証は 5 セッションのうち 4 セッションを学習用データとし、1 セッションをテストデータとする 5 分割交差検証を用いた。指の形状により、同指節でも協力者ごとにデータが異なることが予想されるため学習は各協力者ごとに行った。

表 2 2 センサでの認識精度 (6 パターン)
Table 2 Recognition accuracy using two sensors (6 patterns).

	人差し指			中指			薬指			小指		
	第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3
① センサ A+B	99.0	96.9	97.9	99.0	98.1	98.0	87.3	81.6	75.0	80.8	58.3	76.8
② センサ A+C	100	99.0	94.8	86.0	87.6	89.2	95.1	94.2	88.0	83.8	55.2	71.7
③ センサ A+D	100	99.0	92.8	92.0	93.3	94.1	93.1	87.4	88.0	94.9	91.7	96.0
④ センサ B+C	91.0	88.7	82.5	95.0	96.2	98.0	94.1	95.1	93.0	83.8	65.6	79.8
⑤ センサ B+D	87.0	92.8	80.4	97.0	94.3	95.1	93.1	91.3	96.0	96.0	91.7	94.9
⑥ センサ C+D	85.0	83.5	79.4	89.0	86.7	74.5	95.1	90.3	91.0	96.0	91.7	94.9

4.1 4 センサでの認識精度評価

4 つのセンサすべてを用いた場合の認識精度の評価を行った。今回入力として使用するデータは収集した 1 タップにおける 30 データを 4 センサ分合成した 120 データである。識別結果の混同行列を図 4 に示す。また、指ごとの認識率と、指節位置ごとの認識率を図 5 に示す。全体の識別率は 95.4% (SD:2.13) となり、第 1 から第 3 指節まで含めた指ごとにみると、中指が 97.4% (SD:1.64) で最も高く、人差し指が 96.4% (SD:2.89)、薬指が 95.9 (SD:2.40) 小指が 91.9% (SD:4.72) で最も低い結果となった。特に小指の第 1・第 2 指節の認識率が低くなった。これは指 (指節) の長さ起因しており、表 1 から長い指節ほど特徴が出やすく、指節の間をタップすることが少ないためであると考えられる。指節の位置ごとにみると第 1 指節が 94.3% (SD:2.14)、第 2 指節が 94.2% (SD:3.46) であり、第 3 指節が 97.8% (SD:1.11) で最も高くなった。これは図 3 からわかるように第 1・第 2 指節は波形が類似している部分が多く、第 3 指節のみ他よりも高い周波数帯に特徴が出やすかったためであると考えられる。また、第 3 指節は他 2 つの指節に比べも高い認識率に関係していると考えられる。認識ミスは同指内の隣接する指節に認識されるパターンがほとんどであり、これは指節の間 (関節) に近い部分を叩くことで起こると考えられる。認識された指節がタップした指内の指節でないパターンの多くはその指内の同じ位置 (同指節番号) に間違えられている。これはタップの際に隣の指の指節を同時に叩いてしまったことが原因ではないかと考える。

4.2 2 センサでの検証及び認識精度評価

より装着の手間を減らし、装着感の改善を図るため、センサを 2 つに減らした場合について認識精度の評価を行った。今回入力として使用するデータは収集した 1 タップにおける 30 データを 2 センサ分合成した 60 データである。

4.2.1 装着位置の検証

まず、1 人の協力者のデータを用いて、センサの取付位置はどの組み合わせが最適であるか検証を行った表 2。全体としてセンサを装着している指 (入力に使用しているセ

正しい指節		認識された指節											
		人差し指			中指			薬指			小指		
		第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3
人差し指	第 1	92.0	5.00	3.00									
	第 2	3.44	88.9	7.29			0.20					0.20	
	第 3	1.85	6.38	91.4	0.21		0.21						
中指	第 1				94.7	3.85	1.22						
	第 2				4.31	92.4	2.94		0.20	0.20			
	第 3			0.39	1.37	4.50	93.3		0.20		0.20		
薬指	第 1				0.20			88.1	8.22	3.33	0.20		
	第 2		0.20					4.71	82.4	12.5			0.20
	第 3				0.20	0.59		2.54	3.32	93.4			
小指	第 1								0.20		90.2	9.20	0.41
	第 2								0.41		14.6	84.1	0.81
	第 3	0.20						0.41	0.20	0.20	3.26	0.61	95.1

図 6 2 センサでの認識精度の混同行列 (センサ A とセンサ D)
Fig. 6 Confusion matrix of recognition accuracy using sensor A and sensor D.

正しい指節		認識された指節											
		人差し指			中指			薬指			小指		
		第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3
人差し指	第 1	85.6	7.82	5.81	0.20	0.20	0.40						
	第 2	4.65	87.3	7.47			0.40			0.20			
	第 3	1.43	6.94	90.6			0.61			0.41			
中指	第 1			0.20	92.4	6.61	0.40			0.40			
	第 2				3.51	92.4	3.70			0.39			
	第 3	0.20				3.16	96.4			0.20			
薬指	第 1							90.9	6.44	2.21	0.20		0.20
	第 2	0.20						15.4	82.0	2.37			
	第 3		0.20	0.20		0.20		3.35	8.28	87.8			
小指	第 1										85.5	11.2	3.21
	第 2		0.20						0.20		13.4	85.8	0.40
	第 3								0.81	0.20	2.82	2.22	94.0

図 7 2 センサでの認識精度の混同行列 (センサ B とセンサ D)
Fig. 7 Confusion matrix of recognition accuracy using sensor B and sensor D.

ンサの装着指) の認識率は 4 センサ時と比べて差があまりなかった。しかし、センサを装着していない指の認識率が下がっており、特に小指のセンサを用いないパターン①②④の小指の各指節の認識率が悪い結果となった。①のパターンでは小指第 2 指節の認識率が 55.2% まで落ちており、4 センサ時との差は 37.5 ポイントまで開いた。4 センサを用いた場合でも、全指で最も短い小指の指節は認識率が低かったため、センサ D を用いない場合は特に指節ごと

の特徴を分類できなかつたと考えられる。小指のセンサ D を使用しているパターン⑥の認識率が 88.1%と低くなった原因としては、人差し指と中指がセンサから遠く、衝撃が減少したこと、また、センサ C とセンサ D に到達する人差し指と中指からの衝撃が同方向のものであるため、特徴が出づらく分類できなかつたことが考えられる。最も認識率が高くなったパターンは③の 93.5%であった。次に高くなったパターンは⑤の 92.5%であった。この 2 パターンは上記で認識率を下げる要因となった、センサからの距離が遠い、センサ D を使用していないという条件に当てはまらないため、認識率が高くなったと考える。この結果から 2 センサを装着する際に最適なパターンは人差し指と小指のパターン③、または中指と小指のパターン⑤であると考えられる。

4.2.2 認識精度評価

装着位置の検証結果から最適であると考えられるパターン③と⑤について実験協力者 5 人分の検証を行った。パターン③で検証を行った結果の混同行列を図 6 に、パターン⑤で検証を行った結果の混同行列を図 7 に示す。パターン③では平均認識率が 90.5% (SD:5.69) であり、指ごとにみると人差し指が 91.7% (SD:7.64)、中指が 93.5% (SD:4.76)、薬指が 87.9% (SD:9.06)、小指が 89.8% (SD:3.42) であった。4 センサ使用時との差は人差し指から 5.68 ポイント、4.03 ポイント、7.93 ポイント、2.08 ポイントであった。結果としては中指の認識率は 4 センサ時と同様に一番高く、次いでセンサを装着している人差し指と小指が高く、センサを装着していない薬指では認識率が他より下がった。パターン⑤では平均認識率が 89.2% (SD:5.45) であり、指ごとにみると人差し指が 87.8% (SD:7.03)、中指が 93.7% (SD:3.70)、薬指が 86.89% (SD:9.86)、小指が 88.44% (SD:3.48) であった。4 センサ時との差は人差し指から 8.62 ポイント、3.75 ポイント、8.98 ポイント、3.45 ポイントであった。パターン③に比べ、センサを装着していない人差し指の認識率が下がり、装着している中指の認識率が若干上昇した。他の指はパターン③と同等の認識率となった。2 パターン間の違いを調べるため t 検定を行った結果 $p=0.18>0.05$ となり、有意な差はでなかつた。このことから両パターンとも 2 センサでの入力に適していると言える。

5. 考察

実験の結果、4 センサでの検証結果は協力者 5 人の平均で認識率 95.4%であった。この結果は指の判別だけでなく指節も分類できるという点から高い認識率と言える。しかし、95.4%という認識率は文字入力方法として利用する場合、十分とは言えないため、認識率の向上が必要であると考えられる。そこで全体の認識率を下げる原因となっている小指の第 1 指節 (平均認識率:89.5%) と第 2 指節 (平

均認識率:88.2%) の結果について分析を行う。図 4 より、小指の第 1 指節タップ時の誤認識の対象中 94.2%が小指の第 2 指節であり、小指の第 2 指節タップ時の誤認識の対象中 91.4%が小指の第 1 指節となっている。このことからこの 2 つの指節を一つのキーとしてみるキー割り当てを考案する。2 つの指節を 1 キーとして考えると全体の認識率は 97.1%となり、入力としての利用可能性を示すことができた。この割り当ては実際のテンキーでも採用されているものが多く、実用上も問題はないと思われる。

2 センサでの検証結果は人差し指と小指にセンサを装着するパターン③の場合、平均認識率が 90.5%であり、中指と小指にセンサを装着するパターン⑤場合、89.2%であった。認識率に関しては文字入力に利用できる段階にあるとは言えないため、この検証にも小指第 1 指節と小指第 2 指節を 1 キーとするキー配置を適用した。その結果、パターン③では 93.5%、パターン⑤では 91.3%となり、文字入力に利用できる認識率までは届いていないが、センサを 2 つに減らしても 90%程度で各指節を識別できることを示した。また、センサを装着していない指のキーの数を減らすことで、さらに 1%ほど認識率を上げることができる。

6. おわりに

本研究では指節をキーとして用いる入力手法について検討した。本手法は指関節をキーの境界と見立てることで、皮膚への入力拡張で問題となる位置の知覚を可能とする。指節の識別は指輪型の加速度センサから得られたデータを周波数分解し、機械学習を用いることで行った。実験の結果、4 指すべてのセンサを用い、小指の 2 指節を 1 キーをする配置を適用することで、95%以上の認識率で打ち分けが可能であることを示した。また、センサを 2 つに減らした場合の認識についてセンサ位置の検証を行ったところ、2 つのパターンが適していることが確認できた。認識率については 4 センサ時と同様のキー配置を用いて、それぞれ 93.5%、91.3%となった。4 センサ時と比べて認識率は劣るが、識別自体を行うことは可能であることを示せた。今回は認識率の検証のみを行ったが、指節を用いる利点であるタップ位置の知覚性を明確にするために、他の部位を利用した方式との比較や、アイズフリーで入力を行う実験等を行う必要がある。また、全体の認識率の更なる向上を目指し、システムの改善も行っていく。

参考文献

- [1] Zhang, Y., Zhou, J., Laput, G. and Harrison, C.: Skin-Track: Using the Body As an Electrical Waveguide for Continuous Finger Tracking on the Skin, Proc. CHI '16, pp.1491-1503, (2016).
- [2] 則枝真, 三橋秀男: プロダクト A 腕を仮想キーボード化し非接触操作を実現する: ARmKeypad Air, 自動認識 30(4), pp.59-62, (2017)

- [3] Harrison, C., Tan, D. Morris, D.: Skinput: Appropriating the Body as an Input Surface, Proc. of CHI '10, pp.453-462, (2010).
- [4] Mujibiya, A., Cao, X., Tan, D.S., Morris, D., Patel, S.N., and Rekimoto, J. The sound of touch: on-body touch and gesture sensing based on transdermal ultrasound propagation. Proc. ITS '13. ACM, pp.189-198, (2013).
- [5] Zhang, C., Bedri, A., Reyes, G., Bercik, B., Inan, O., Starner, T., and Abowd, G.: TapSkin: Recognizing On-Skin Input for Smartwatches. In Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces. ACM, pp.13-22., (2016).
- [6] 牧野泰才, 前野隆司: 手の甲の皮膚感覚を利用した情報入力インタフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.5, pp.488-490, (2012).
- [7] 中妻啓, 篠川裕之: ユーザの身体表面位置指示に基づくウェアラブルインタフェース, 第12回 SICE SI 部門講演会論文集 (SI2011), pp.2263-2266, (2011).
- [8] 則枝真, 三橋秀男, 佐藤誠: FingerKeypad: 衝撃検出による指上タップ位置の識別, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.14, No.4, pp.393-402,(2012).
- [9] 福本雅朗, 平岩明, 曾根原登: ウェアラブルコンピュータ用キーボード FingeRing; 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-A, No.2, pp.460-470 (1996).
- [10] 岩本貴之, 篠田裕之: 指の多自由度振動計測による触覚インタフェース; 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集, 1A2-A08 (2007).
- [11] 鈴木優, 三末和男, 田中二郎: 指を識別するタッチインタフェース向けインタラクション手法の検討, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, Vol.2011, No.4, pp.1-6 (2011).