能動的振動入力による手形状識別

加 藤 寛 之*・竹 村 憲太郎*

Hand Pose Identification by Emitting Vibration

Hiroyuki KATO* and Kentaro TAKEMURA*

In this paper, we propose a novel method for identifying hand poses by emitting vibrations actively, toward intuitive user interfaces. The proposed method is an active acoustic sensing method, which can simultaneously identify hand poses and provide haptic feedback. We used the power spectrum of the propagated vibration as a feature to identify when the hand pose changed, and data compression was applied to improve the precision of hand pose identification, using a support vector machine. We evaluated the recognition rates, which depend on the number of estimation targets and the compression ratio. Further, we confirmed the feasibility of our proposed method through evaluation experiments. It was found that the recognition rate of seven hand poses was around 90%, and there is little reduction in the recognition rate when haptic feedback is provided.

Key Words: vibration, hand pose identification, haptic feedback, support vector machine, wearable user interfaces

1. はじめに

近年、全身動作や手入力による直感的なインタフェースの実現に向けてさまざまなセンシング手法が提案されている。Kinect や Leap Motion, RealSense などの製品も登場し、ゲームなどでは多くのユーザがこれらを利用している。しかしながら、これらのデバイスは一般にテレビやディスプレイに設置するため、携帯性が高いとはいえない。バーチャルリアリティを対象にこれらのセンサをヘッドマウントディスプレイと共に頭部に装着して利用することもあるが、近赤外カメラを用いていることから計測範囲がカメラの画角によって制限される。また、カメラを用いた場合には、照明の影響も大きく受け、使用環境にも制約がある。そのため、非装着型のインタフェースを実現する上で、近赤外カメラを用いることは有効な手段であることは間違いないが、携帯性・可搬性の高い装着型のインタフェースの実現を目指す場合には、そのほかのセンシング手法も有効である。Laput ら¹⁾はスマートウォッチを用いた把持物体推定手法として EM-Sense を提案している。これは人体を介して機器の発する電磁ノイズを計測し推定を行なっているため、推定対象にタグを装着する必要がなく、直感的に扱うことができる。Zhang ら²⁾は複数電極を用いた皮膚上の接触位置推定手法である Skin Track を提案し、指輪型デバイスとリスト型デバイスを組み合わせるこ

とで、本来タッチパネル上でしか行なえないスワイプやスクロールなどのタッチ操作を皮膚上で実現し、スマートウォッチなどのウェアラブルデバイスの操作性を向上させている。また、Fukui ら³⁾は、赤外線フォトリフレクタを用いたリスト型センサを製作し、手首凹凸形状を計測することで手形状推定を実現した。これらの研究は、手動作による入力を可能とすることで直感的な操作を実現しているが、これに加えて触覚フィードバックを行なうことも直感的な操作では重要であることが報告されている。Hoggan ら⁴⁾によってタッチスクリーンを用いたテキスト入力時に、触覚フィードバックを行なうことで、従来のキーボードを用いたテキスト入力に操作感が近づくことが報告されている。Cho ら⁵⁾の提案している RealPen では、ペンを用いたタッチシステムのペンに対して音と触覚のフィードバックを行ない、実際にペンを用いた操作感へ近づけることを提案し、フィードバックの有無による有意差を報告している。また、Gupta ら⁶⁾は、センシングと同時に触覚フィードバックを行なうことによってジェスチャをコマンドベースの操作インタフェースとして扱う場合、その操作方法を効果的に学習することができることも報告している。

装着型インタフェースにおいて直感的な操作を実現する上で、センシングの対象を動作や物体とのインタラクションとすることは重要であるが、これに加えてセンシング手法の観点では生体を伝播する信号を用いることが有効である。また、効果的に触覚フィードバックを入力することで操作性を高めることが期待できる。そこで本研究では、直感的な装着型手入力インタフェースの実現を目指し、能動的振動入力による手形状識別手法を提案する。生体を伝播する振動を用いて手形

* 東海大学大学院工学研究科 平塚市北金目 4-1-1

* Graduate School of Engineering, 4-1-1 Kitakaname Hiratsuka

(Received March 24, 2017)

(Revised June 20, 2017)

Table 1 Device position in related works

	Laput et al. ¹⁾	Fukui et al. ³⁾	Gupta et al. ⁶⁾	Amento et al. ⁷⁾	Deyle et al. ⁸⁾	Laput et al. ⁹⁾
Finger			○			
Wrist	○	○	○	○	○	○
Forearm				○	○	

状を識別し、入力する振動の種類を変えることで触覚フィードバックも同時に可能である。以下、本報告はつぎのような構成となっている。まず第2章において関連研究についてまとめ、本研究の位置づけを述べる。第3章では、能動的振動入力による手形状識別手法を提案し、第4章では手形状識別手法の評価実験の結果から考察する。最後に第5章ではまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

本研究では、触覚フィードバックを入力するため生体に入力する信号を音ではなく振動と表現しているが、生体を介して計測される音を用いたインタフェースの研究はこれまでいくつか代表的なものが報告されているため紹介するとともに、以下で本研究の新規性について整理する。

2.1 生体音響センシング

生体を介した音響センシングのインタフェースで、先行した取り組みとしては Amento ら⁷⁾のものがある。タッピングや擦れ、フリックなどの動作時に、振動が骨を介して伝播していることを発見し、この現象を利用したジェスチャ推定手法およびウェアラブルインタフェースを提案した。また、Deyle ら⁸⁾の提案する Hambone では、隠れマルコフモデルを利用することでおよそ90%の精度でジェスチャ推定を行なっている。Laput ら⁹⁾が開発した ViBand は、スマートウォッチを用いて生体音響センシングを実現しており、動作認識だけでなく振動を ID としての識別などの応用も提案されている。生体音響センシングは工学分野のみに留まらず医療分野においても注目されており、PVDF フィルムを用いたウェアラブルデバイスが Wei ら¹⁰⁾によって提案されており、睡眠時の呼吸の計測にも用いられている。

2.2 アクティブ音響センシング

前述の生体音響センシングでは、人の動きなどによって発生する受動的な音響をセンシング対象としていたが、能動的に振動入力を行なうことで、生体音響が発生しないような状態での推定が可能となる。このようなセンシング手法はこれまでにいくつか提案されており、Mujibiya ら¹¹⁾は超音波の伝播を計測することで身体への指の接触を感知する手法を提案しており、接触位置をインタフェースとして用いている。Ono ら¹²⁾は物体にスピーカとアクチュエータを装着し、能動的振動入力を行なうことで、その物体に対しての把持状態と把持姿勢の推定を行ないインタラクティブ性の付与を実現しており、同様の手法で物体に対する接触力推定も実現している¹³⁾。Takemura ら¹⁴⁾は、受動的な振動によりタップされた位置を推定し、能動的に入力した振動により関節角度を推定

するアクティブ骨導音センシングを提案した。また、Okawa ら¹⁵⁾はこれを発展させ、リング型デバイスにより指の連続的な関節角度推定と触覚フィードバックを行なう手法を提案している。また、Funato ら¹⁶⁾も同様のアプローチで指先接触力推定を実現している。

2.3 デバイス装着位置

関連研究において特にジェスチャや手形状について識別したものを中心に、そのデバイス装着方法について考察する。Table 1 からわかるようにリスト型が採用される傾向がある。これは、腕時計のように手首に装着するデバイスがすでに存在し、動作を阻害しないことが明らかであることが理由である。しかしながら、本研究の特徴でもある触覚フィードバックや Gupta ら⁶⁾の提案する学習速度の向上を考えると、指先にアクチュエータを配置するようなデバイスも検討する必要がある。そのため本稿では、リング型デバイスとリスト型デバイスを作成し、手形状識別精度について比較を行なう。

2.4 本研究の概要

本研究では、携帯性・可搬性や触覚フィードバックの面から能動的に振動を入力する手法に注目したが、従来手法では識別対象が単関節1自由度に限定されているため、インタフェースへの利用には限りがあった。そこで、能動的な振動入力による手形状の識別手法を確立する。従来は、関節角度の変化に伴う振動の振幅変化を用いて角度の推定を実現してきたが、手形状の識別を実現する上では特徴量が不足することから、識別に用いる特徴量を新しく設定した。また、振動入力を用いたインタフェースの優位な点は、触覚フィードバックが可能な点であることから、本研究においても手形状識別と同時に触覚フィードバックが可能であるか評価を行なった。

3. 能動的振動入力による手形状識別

3.1 センシングデバイス

能動的振動入力による手形状識別はアクティブ音響センシングの手法の1つで、常時装着可能なセンシングを目指したものである。常時装着が目標であることからデバイスを小型なデザインにし、装着者の負担とならないよう設計した。装着型のデバイスにおいて、デバイスが装着者の動作を妨げないことは重要な要素である。そこで、Fig. 1(A)(B)のようなリング・リスト型デバイスとリスト型デバイスを製作した。出力としてはセンシングと触覚フィードバックの2種の振動出力を行ない、計測にはマイクを用いて伝播した振動の計測を行なっている。そのため、音の入出力端子を搭載した任意のデバイスにおいて使用することが可能である。振動計測にはコンタクトマイク CM-01B(TE Connectivity)を採用し、振動入力用

Fig. 1 Two types of sensing devices for estimating hand poses. One is device (A), in which the contact microphone and vibration actuators are located on the finger and wrist, respectively, and the other is device (B), in which both the sensor and the actuators are located on wrist. In these devices, there are two vibration actuators (C), and both actuators are used for sensing and providing haptic feedback, respectively

のアクチュエータはセンシングおよび触覚フィードバックにそれぞれ、Surface Transducer Small COM-10917(SparkFun Electronics) と C10-000(Precision Microdrives Ltd) を採用した。これはセンシングと触覚フィードバックにおいて用いる周波数帯域が異なるためであり、Surface Transducer small はセンシングに適した 1000 Hz 以上の振動出力に優れ、C10-000 は触覚フィードバックに用いる 200 Hz 前後の振動出力に優れている。また、C10-000 には MAX98306 Stereo Amplifier(Adafruit Industries) を用いて増幅し、振動知覚を発生させやすくしている。この 2 つの種類の異なるアクチュエータをセンシングと触覚フィードバックにそれぞれ用いることで、単一のアクチュエータを用いて信号を入力する場合よりもセンシング、触覚フィードバックを行ないやすくなる。センシングと触覚フィードバックに用いる 2 つのアクチュエータは Fig. 1(C) のようなパーツを 3D プリントを用いて作成し、1 箇所にとめた。アクチュエータとマイクはそれぞれラバーバンドに埋め込んであり、直接皮膚に触れるような構造となっている。なお、アクチュエータは 2 種のアクチュエータを組み合わせたものを利用しリング・リスト型デバイス、リスト型デバイスにかかわらず同一のものを使用した。これはバンドの切り込みにはめ込む形で固定している。

3.2 装着位置

振動伝播速度の観点から骨上にマイクとアクチュエータを配置するのが良いと考えられる。これは、骨が生体物質の中で最も伝播速度が速い特性をもっているためである。マイクとアクチュエータの装着位置に関しては、いくつか候補が挙げられるが手根骨や中手骨にデバイスを配置することは難しい。そこで、マイクを示指基節骨に、アクチュエータを尺骨上にそれぞれ配置し、振動が手根骨を伝播するようにしたデバイス (Fig. 1(A)) と、マイクとアクチュエータを前腕部の骨幹部上とし、それぞれ橈骨上と尺骨上に配置したデバイス (Fig. 1(B)) を用いて、ホワイトノイズを能動的に入力した際の振動伝播を比較する。Fig. 2 は、3 種類の手形状に対して、それぞれのデバイスで観測された振動のパワースペクトルで

Fig. 2 The power spectrum depends on hand poses when white noise is input actively using the ring-wrist type device (A), and the wrist type device (B)

ある。リング・リスト型デバイスを用いてホワイトノイズ入力する場合、伝播する振動は低周波が最も強くなり、1000 Hz 以上の周波数は観測しづらい。一方でリスト型デバイスを用いた場合、1000 Hz 以上のパワースペクトルの変化も良く確認できる。手形状識別には振動知覚の発生しない周波数が効率よく伝播することが望ましい。そこで本研究ではリスト型デバイスを採用し手形状識別を行なう。能動的振動入力によるセンシングでは、加速度を用いた計測手法などと異なり、計測位置から離れた部位でのセンシングが可能であり、装着型デバイスに用いる点でこの自由度は優位な点である。これまでのアクティブ骨導音センシングの研究^{14), 15)}では、関節を挟む形でアクチュエータとマイクを装着した場合と、一方にまとめた場合で共に関節角度の変化によって振幅が変化することが報告されている。このことから反射波も計測にかかわると理解でき、リスト型デバイスでの計測も可能であると判断した。

3.3 入力振動

能動的振動入力による手形状識別・触覚フィードバックを実現する上で、振動知覚特性への配慮が重要である。人間の

Fig. 3 The power spectrum depends on hand poses when sweep signal is input using the wrist type device. Left figures are data which are measured by placing the device as show in Fig. 1 (B), and the right figures are data measured by wearing the device where the positions of the actuator and the microphone are switched

皮膚には触覚受容器としてマイスナー小体、メルケル小体、パチニ小体などが存在する。この受容器の中で最も振動を知覚しやすいのはパチニ小体であるため、触覚フィードバック用の入力振動はこのパチニ小体への刺激として作成する。このパチニ小体の特性として 200 Hz で最高感度に達し、800 Hz から振動を知覚なくなることが報告されている^{17), 18)}。そのため、センシングに用いる信号はこれらの触覚受容器を刺激しないよう 1000 Hz 以上の周波数を用い、触覚フィードバックには 200 Hz 付近の振動を用いるのが望ましい。また、前述した装着位置の実験によって 2500 Hz 程度までの振動が観測できることを確認している。そこでセンシングに用いる振動は知覚できない 1000~2500 Hz とし、パワースペクトルを特徴量として手形状識別を行なう。ホワイトノイズを用いた場合、低周波を含むため振動知覚が発生することや、パワースペクトルに偏りが発生することが問題となる。そこで任意の周波数区間を入力でき、生成周期をデザインしやすいことからスイープ信号を採用した。スイープ信号を入力したときの各手形状に応じたパワースペクトルは **Fig. 3(A)** に示すとおりである。また、**Fig. 3(B)** は、デバイスのアクチュエータとマイクの位置を逆転させたもので、位置関係を逆転させても問題なく振動が伝播していることがわかる。今回の実験では、高周波の観測からリスト型デバイスを採用したが、触覚フィードバックを考えると指先のほうがより振動知覚に優れているため、アプリケーションに応じて指先にアクチュエータが配置可能なリング・リスト型デバイスとの使い分けが求められると考えられる。高周波振動の伝播ではホワイトノイズを入力した場合と比べると、スイープ信号を用いた場合のほうが優れており、本手法に適している。なお、今回の実験でのアクチュエータの出力は定格電圧の低い触覚フィードバック用アクチュエータ C10-000 に合わせ 2.0 V の出力で振動入力を行なっている。

Fig. 4 Procedure for data compression

3.4 手形状識別手法

手形状識別の特徴量には振動のパワースペクトルを用いる。1000~2500 Hz まで、1500 次元の値が取得できているが、計算コストを削減するため **Fig. 4** のように任意の周波数区間ごとにデータをまとめることで、特徴量の次元を圧縮を行なった。特徴量とするパワースペクトル $P(f)$ は (1) 式によって算出される。

$$P(f) = X(f)X^*(f) \quad (1)$$

ここで $X(f)$ は計測された振動 $x(t)$ を高速フーリエ変換を用いて算出したものであり、 $X^*(f)$ はその複素共役である。算出されたパワースペクトル $P(f)$ から 1000~2500 Hz の 1500 次元を抽出し、行列 **A** とおく。行列 **A** は圧縮率 $1/n$ と圧縮後の次元数 m から m 行 n 列となる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

つぎに行列 **A** に対して次元圧縮を行ない **A'** を求める。

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \\ \vdots \\ a'_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

A' の要素 a'_i は (4) または (5) 式に示すように行ごとに平均値もしくは最大値を算出したものである。

$$\text{Average : } a'_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (4)$$

$$\text{Maximum : } a'_i = \max(a'_{i1}, a'_{i2}, \dots, a'_{in}) \quad (5)$$

平均値と最大値の性能評価、比較は次章に後述する。次元を圧縮した後、教師あり学習器であるサポートベクターマシン (以下、SVM) を用いて手形状識別を行なう。SVM の実装には LIBSVM (linear kernel, cost=8096, gamma=1/the number of dimensions) を用いた。各手形状の学習データには手形状ごとに 30 回、各 0.5 秒間のデータを取得した。振動入力に用いるスイープ信号の生成周期は 0.1 秒としており、1 回のデータに対し 5 周期分の入力を行なっていることになる。学習後、手形状を変化させた際の識別結果は **Fig. 5** に示

Fig. 5 Results of identifying hand pose using the support vector machine

Fig. 6 The estimation target for evaluation experiments

すとおりであり、手形状と同じ形状が骨のCGを用いて表示しており適切に識別できていることが確認できる。

4. 手形状識別精度の評価実験

5名の実験協力者に対してFig. 6に示すような7種類の手形状を対象に、A～C、A～E、A～Gの3グループに分け評価実験を行なった。実験は、データ圧縮手法および識別対象数による識別精度と触覚フィードバックの有無による識別精度に関して評価した。実験協力者は21～23歳の男性5名である。本実験では、個人ごとに識別モデルを作成し推定を行なう。また、肘と肩の関節はほとんど動かさずデバイス位置も一定の状態データ取得、識別を行なった。なお、本実験では人体に振動を入力しているため東海大学において倫理委員会の審査を受け、認証番号16151「ウェアラブルなセンサによる人間動作計測技術の開発」として認証を受けている。

4.1 実験手順

- (1) 実験協力者は画面上に表示された指示(グー/チョキ/パーなど)に従って、手形状を変更する。
- (2) 実験協力者は手形状を変更し、任意のタイミングで1秒間のデータを保存する。このとき、サンプリング周波数は44.1kHzである。
- (3) 上記の操作を、手形状Aから最後まで順番に変化させることを1セットとし、この動作を40回繰り返す。本実験では、1人に対して識別対象の手形状数×40個のデータが得られる。
- (4) 得られたデータに対してデータ圧縮を行なう。
- (5) 上記のデータを用いて識別モデルを作成する。
- (6) 作成されたモデルに対し、(1)～(4)の作業を繰り返し得られたデータの識別を行ない、実際の識別率を求める。

4.2 データ圧縮および識別手形状数による精度変化

データの次元圧縮手法による手形状識別への影響については、データ圧縮の際に採用する値として最大値と平均値を用いた場合の比較を行なった。また、次元圧縮での圧縮率の違いから生じる精度変化についても評価した。結果はFig. 7に示すとおりである。なお、実験結果は5名の実験協力者のデータをまとめたもので誤差棒は標準誤差を示している。圧縮手法としては、平均値を採用した場合より最大値を採用したほうが精度が高いことが確認できる。この推定精度の変化はSVMによるものだと考えている。パワースペクトルを特徴量とするとき、識別対象の手形状が似た形状であると特徴が識別境界付近に位置する。このようなときに生体音響や動作によるノイズが加わると識別精度が低下してしまう。平均値を用いた場合も共通である。しかしながら、最大値を特徴量とした場合が平均値を特徴量とした場合よりもマージンが大きくなることが考えられる。そのため、パワースペクトルを特徴量としSVMを用いた手形状識別を行なう場合、最大値を用いたほうが推定精度が高い。また、圧縮率に関しては1/10圧縮を行なうことで非圧縮時と比較して、3形状の手形状識別では1.1%、5形状では0.9%、7形状では2.3%の識別精度の向上を確認することができた。1/10圧縮時の識別精度は、3形状では平均99%、5形状では平均98%であり、最も識別精度の低い7形状の場合でも平均90%の精度での識別を実現した。

4.3 触覚フィードバックを伴う手形状識別

触覚フィードバックを用いた場合の手形状識別の精度評価を行なうため、3形状の手形状に対して各30回のデータを取得し、触覚フィードバックの有無による精度の比較を行なった。前述の実験と同様に、手形状を指示どおりに変化させた際の精度を評価する。実験に用いる手形状はFig. 6A～Cの3種

Fig. 7 Recognition rates of three (a), five (b), and seven (c) hand poses. Varying the compression ratio between 1 to 1/100 altered the recognition rate

類で、触覚フィードバックに用いる信号には 200 Hz、デューティー比 50%の矩形波を用いている。3 種類の振動はこの矩形波の振動出力区間 T と非振動区間 t で構成され、 T を変更することで複数のフィードバック信号を生成する。今回生成した信号は $T = 0.1, 0.2, 0.05$ s の 3 種で、非振動区間 $t = 0.1$ s で固定した。なお、識別モデルは触覚フィードバックを行っていない状態で作成し、触覚フィードバックの有無にかかわらず同一のモデルを用いて実験を行なっている。本実験はあらかじめ各実験協力者に 3 種類の信号に明確な差を感じるかどうかを確認し、明確に違いを感じるとの回答を得た上で実験を行なっている。手形状と触覚フィードバックの組み合わせは手形状 A, B, C に対してそれぞれ $T = 0.1, 0.2, 0.05$ を採用している。実験結果は、Fig. 8 に示すとおりであり、触覚フィードバックを加えた場合にも、大きな識別率の低下はなく、同等の性能で手形状識別を実現できることを確認した。触覚フィードバックを提示することでより直感的なインタフェースとなることが期待され、センシング用の振動入力と同様のシ

Fig. 8 Recognition rates of hand pose estimation with/without haptic feedback

ステム構成で実現できることが利点である。現在、アクチュエータは 2 種類用いているが、将来的には 200~2500 Hz まですて提示可能なアクチュエータの利用により 1 つに統合することが可能と考えている。

5. まとめ

本稿では、能動的振動入力による触覚フィードバック可能な手形状識別手法を提案し、入力振動とデバイスのデザインについて検証を行なった。また、識別対象数とデータ圧縮による識別率の変化について評価した。入力振動には 1000~2500 Hz のスイープ振動が適しており、センシングデバイス形状については、リスト型デバイスが手形状に依存して伝播した振動を検出しやすいことが確認できた。パワースペクトルを特徴量として手形状識別を行なったが、データの圧縮を行なうことによって最大 2.7%の手形状識別精度の向上を確認した。7 形状の識別時においても 90%程度の識別精度を得ることができた。さらに、知覚振動と非知覚振動を組み合わせることで触覚フィードバックを可能とし、実験協力者がディスプレイを用いた視覚的フィードバックに依存することなく、手形状による入力結果を直感的に把握することができる。

識別対象が増えると識別精度が低下し 7 形状の手形状を対象とした場合に、識別精度は 90%に留まった。そのため、今後は識別手法を見直し精度向上を目指す。また、触覚フィードバックでは明確に差を感じる 7 種類のフィードバック信号を生成できず、3 形状時における識別精度の評価に留まった。このことから、触覚フィードバック振動のデザイン手法・生成手法にも取り組む予定である。

謝辞 本研究の成果の一部は、総務省戦略的情報通信開発制度 (SCOPE) の委託および JSPS 科研費 15K00285, 15KK0014 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) G. Laput, C. Yang, R. Xiao, A. Sample and C. Harrison: Em-sense: Touch recognition of uninstrumented, electrical and electromechanical objects, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 157/166 (2015)
- 2) Y. Zhang, J. Zhou, G. Laput and C. Harrison: SkinTrack:

- Using the Body as an Electrical Waveguide for Continuous Finger Tracking on the Skin, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1491/1503 (2016)
- 3) R. Fukui, M. Watanabe, M. Shimosaka and T. Sato: Hand shape classification in various pronation angles using a wearable wrist contour sensor, *Advanced Robotics*, **29**-1, 3/11 (2015)
 - 4) E. Hoggan, S.A. Brewster and J. Johnston: Investigating the effectiveness of tactile feedback for mobile touchscreens, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1573/1582 (2008)
 - 5) Y. Cho, A. Bianchi, N. Marquardt and N. Bianchi-Berthouze: RealPen: Providing Realism in Handwriting Tasks on Touch Surfaces using Auditory-Tactile Feedback, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 195/205 (2016)
 - 6) A. Gupta, A. Irudayaraj, V. Chandran, G. Palaniappan, K.N. Truong and R. Balakrishnan: Haptic Learning of Semaphoric Finger Gestures, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 219/226 (2016)
 - 7) B. Amento, W. Hill and L. Terveen: The sound of one hand: A wrist-mounted bio-acoustic fingertip gesture interface, *CHI'02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 724/725 (2002)
 - 8) T. Deyle, S. Palinko, E.S. Poole and T. Starner: Hambone: A bio-acoustic gesture interface, *Proceedings of 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, 3/10 (2007)
 - 9) G. Laput, R. Xiao and C. Harrison: ViBand: High-Fidelity Bio-Acoustic Sensing Using Commodity Smartwatch Accelerometers, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 321/333 (2016)
 - 10) Y. Wei-Lin, L. Guillaume, S. Misaki and I. Yamada: Development of a Wearable Acoustic Respiration Sensor Using Piezoelectric Film, *Proceedings of the 2012 ASME-IPSPS/JSME-IIP Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment*, 413/415 (2012)
 - 11) A. Mujibiya, X. Cao, D.S. Tan, D. Morris, S.N. Patel and J. Rekimoto: The sound of touch: On-body touch and gesture sensing based on transdermal ultrasound propagation, *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, 189/198 (2013)
 - 12) M. Ono, B. Shizuki and J. Tanaka: Touch & activate: Adding interactivity to existing objects using active acoustic sensing, *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 31/40 (2013)
 - 13) M. Ono, B. Shizuki and J. Tanaka: Sensing touch force using active acoustic sensing, *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, 355/358 (2015)
 - 14) K. Takemura, A. Ito, J. Takamatsu and T. Ogasawara: Active Bone-Conducted Sound Sensing for Wearable Interfaces, *Proceedings of the 24th ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 53/54 (2011)
 - 15) Y. Okawa and K. Takemura: Haptic-enabled Active Bone-Conducted Sound Sensing, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 87/88 (2015)
 - 16) N. Funato and K. Takemura: Estimating Contact Force of Fingertip and Providing Tactile Feedback Simultaneously, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 195/196 (2016)
 - 17) H.T. William, I. Darian-smith and H. Hans: The Sense of Flutter-Vibration: Comparison of the Human Capacity with Response Patterns of Mechanoreceptive Afferents from the Monkey Hand, *Neurophysiology*, **31**-2, 301/334 (1968)
 - 18) A.W. Freeman and K.O. Johnson: A model accounting for effects of vibratory amplitude on responses of cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey, *The Journal of Physiology*, **323**-1, 43/64 (1982)

[著者紹介]

加藤 寛之

2015 年東海大学情報理工学部コンピュータ応用工学科卒業。現在、同大学工学研究科情報理工学専攻修士課程在学中。能動的振動入力を用いたヒューマンインタフェース研究に従事。

竹村 憲太郎 (正会員)

2006 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士課程修了。博士 (工学)。同年、奈良工業高等専門学校電気工学科助手、2007 年同助教。2008~2012 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2011-2012 年 Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, Visiting Researcher。2013 年より東海大学情報理工学部講師、2015 年同准教授となり現在に至る。視線計測およびヒューマンインタフェースに関する研究に従事。ACM, IEEE, 日本ロボット学会などの会員。