

# 研究報告書

## 「実世界指向ユーザインタフェース実現のための動作認識基盤の確立」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 28 年 3 月

研究者: 寺田 努

### 1. 研究のねらい

本研究の目的は、実世界指向なマルチモーダルインターフェース実現のための高度な動作認識基盤を構築することである。既存の状況依存サービスやジェスチャインタフェースは現場での実用レベルに至っていないものが多い。その原因は、認識精度そのものの悪さや、認識ディレイの存在、認識対象の増大による認識率低下、認識の計算コストの高さなどさまざまである。提案者はこれまでに、動作認識技術の研究開発および実運用を行ってきた。もし現状の動作認識技術の問題点を解消した動作認識基盤を確立できれば、インタフェース研究者は高精度な動作認識技術に基づいてジェスチャインタフェースを構築したり、状況に応じて普段はボタン操作を用いつつ、歩行中で周囲がうるさくない場合は音声入力に切り替えるといった状況依存インタフェースが容易に構築できるようになる。本研究では「動作分類に基づく高精度な動作認識」「ハードウェア・ソフトウェア連動型低消費電力化技術」「ジェスチャルールに基づく高度ジェスチャ解析」「即時性の高いリアルタイム動作認識」「サーバ・クライアント連動型動作認識」「大規模動作認識データベース」の 6 つの要素技術に基づく動作認識基盤を構築する。動作認識技術に関しては国内外で活発に研究が行われているが、本提案におけるそれぞれの要素技術はこれまでにほとんど行われてこなかった独自性および新規性の高い研究サブテーマである。加えて、提案者らのグループでは認識システムを積極的に実環境に適用する事例を積み上げることで、実運用のノウハウ獲得及びそこから得た知見を認識基盤にフィードバックし、実践的な認識基盤を確立する。

本研究が狙う波及効果としては、動作認識基盤を一般公開することにより、ユーザインタフェース研究者が気軽に認識に基づくインタフェースを構築できるようになるため、インタフェース設計への注力が行え、また、本認識基盤を用いたインタフェース同士のアルゴリズム比較が容易になる点が挙げられる。さらに、認識技術の高度化により、状況認識やジェスチャ認識技術を例示プログラミングや健康管理、エコロジー技術に転用することでそれぞれの分野におけるシステム基盤としても利用できると考えている。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究は、(1)動作認識技術の確立、(2)認識データベース構築、(3)システムプラットフォーム構築と実世界応用、の 3 つのサブテーマからなる。(1)は動作認識自身の性能向上を目指すものであり、(2)はデータ収集技術に関するものである。(3)は、それらの認識基盤を統合するプラットフォームおよび実応用に関するものである。

#### (1) 動作認識技術の確立

これまでの動作認識技術では、「ジェスチャと一般動作が同時に認識できない」といった

問題があった。そこで提案者らは、自己相関関数を用いて行動を分類し、あらゆる動作を適切に認識する手法を実現した。また、装着型センサのサンプリング周波数を可変にし、足りないデータを補完する低消費電力化技術を提案した。さらに、現場で認識技術を使う際に問題となる認識遅れを解消した早期認識アルゴリズムの開発や、加速度センサに加えて、においセンサや超音波センサ、フォトフレクタを組み合わせた動作認識技術を多数提案し、多くの成果を挙げた。これらの一部はライブラリ化し、報告者らの指導により他者利用可能である。

## (2) 認識データベース構築

実用的なシステムを構築するには動作の傾向や特性を調べるために大量のデータが必要となる。提案者らはデータ蓄積の際に必要なラベリング処理に関する研究や実際のデータ公開を行った。具体的には、順序制約を与えてラベリングを自動化するアルゴリズムや、ラベリングをゲーム化して効率的に行う手法を提案した。蓄積したデータとしては、携帯端末を把持して行う27種類のジェスチャデータや疲労により変化するジェスチャデータをウェブサイト上で公開した。また、ジェスチャが社会性に与える影響の調査、センサの装着性を考慮したセンサ配置調査、ジェスチャを言葉で説明したときのセンサ軌道調査など、これまでにないデータを多く蓄積した。

## (3) システムプラットフォーム構築と実世界応用

上記認識基盤を提案者らがこれまでに開発したウェアラブルコンピューティング向けプラットフォームに統合した。さらに、実際に実世界指向入出力インターフェースを多数実装した。また、着ぐるみやアート作品、司会、演劇、野外学習、筋力トレーニング、楽器などさまざまな対象に対してシステムを構築し、プロを含む多数の人々に利用された。

これらの成果は、ジャーナル論文30編(国際11編)、国際会議発表57編、国内発表267編など多くの成果を挙げ、情報処理学会長尾真記念研究賞を含む30件以上の学術賞を受賞した。

## (2) 詳細

### **研究テーマ(1) 動作認識技術の確立**

動作認識技術は本提案の核となる部分である。本サブテーマでは本研究期間において、(1-1)加速度センサを用いた実践的な認識技術の確立、(1-2)加速度センサ以外のセンサも統合した新たな認識技術の提案、を行った。

#### (1-1) 加速度センサを用いた実践的な認識技術の確立

加速度センサを用いた行動認識技術はこれまでに数多く提案されてきたが、従来研究で用いられている行動認識技術は、ステージパフォーマンスなどの実践的な場で用いることが難しかった。提案者は文献[1]において、従来技術の何が問題なのかをクリアにし、認識機構が備えるべき性質をリストアップした。以下に列挙する。

**多様性:** 登録された行動数が多くなるほど認識精度は低下する。また、歩きながらジェスチャ入力など、多様な状況を想定する必要があるが、学習した状況から少しでも異なる行

動だと精度が大幅に悪化する。

**正確性:** 行動認識の精度はそれほど高くないため、重要な操作に使用しづらい。認識エラーとしては、そもそも認識しない(未認識)、他の動作と認識する(誤識別)、動作していないのに認識する(誤認識)、が考えられ、それぞれ重大な問題を引き起こす。

**即時性:** 一般に、認識はその動作終了後に過去一定時間分(ウインドウサイズ分)のセンサ情報を用い、特徴量抽出や DTW による処理を行う。そのため、実際の動作から機能の発動までにタイムラグが生じ、快適さが低下する。

**導入容易性:** システム利用前に、可能性のあるすべての動作を学習させる作業は困難である。一方、他人の登録した動作をもとに認識を行うと、ほとんどの場合で認識精度が大幅に悪化する。

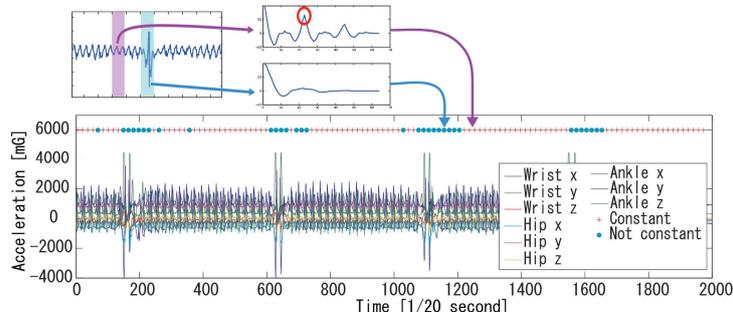
**直観性:** ジェスチャなどの身体動作は言葉で表現しにくい、覚えることが難しく、また覚えてから時間が経つほどに動作が変化してしまう。

**常時利用性:** 認識システムを常時利用するためには、センサやデータ処理システムを常時稼働させる必要があるが、バッテリー切れや故障によりシステムが利用できなくなる可能性がある。

**汎用性:** アルゴリズムやシステムが汎用性をもつかを確認するためには多様なデータを用いてテストを行う必要があるが、現状では動作認識の基礎データが存在せず、汎用性を確認できない。

**ハードウェア運動性:** 従来から用いられている汎用のセンサではなく、状況認識に特化したハードウェア(センサ)が開発されれば、より高度な認識が行える可能性がある。

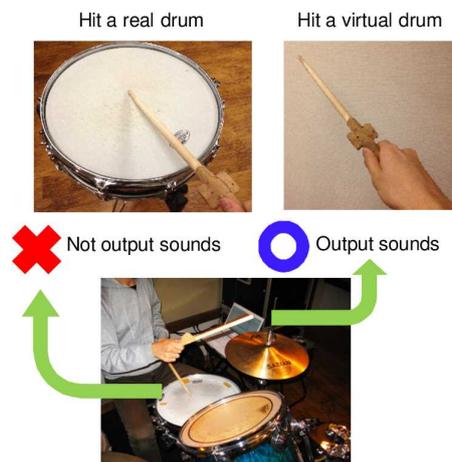
本サブテーマの目的は、これらの性質を備えた認識基盤を構築することである。例えば、多様性の問題に対処するために、自己相関を用いた認識高度化技術を確立した。従来の動作認識技術では、「ジェスチャと一般動作が同時に認識できない」「認識前に静止しないとジェスチャを正しく認識できない」といった問題があった。そこでこの研究では、下図に示すように、繰り返し動作を含む運動波形の自己相関にはピークが現れる一方、ジェスチャにはピークが現れない(図上部)ことを利用し、該当区間にジェスチャが行われたと判断した場合のみ(図下部)、ジェスチャ認識アルゴリズムを使用する。この手法により、運動中の7種類のジェスチャ認識において従来手法は再現率 0.75、適合率 0.59 であるのに対し、提案手法では再現率 0.93、適合率 0.93 を得ることに成功した。



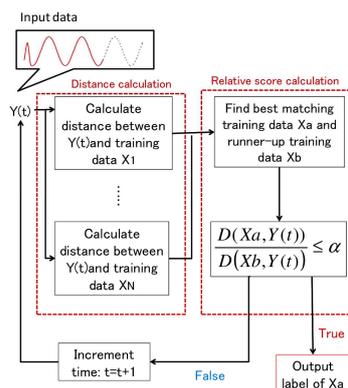
さらに、この技術を体の部位ごとに個別に適用し、例えば「歩く動作」と「投げるジェスチャ」を個別に学習した場合でも、「歩きながら投げる」という行動を認識できるようになった。

日常生活を含め実践的環境では多種多様な動作が起こりうるため、このような技術が必要になる。

認識の即時性に関して、従来研究では例えばジェスチャ入力において、実際の動作から機能発火までの遅延についてはほとんど考慮されていなかったが、実サービスを提供するにあたってはその遅延が致命的なユーザビリティ低下を招く。例えば、我々が構築した AirStick Drum(下図)は、叩打動作を加速度センサを用いて認識するドラムスティックである。空間をスティックで叩いたときには電子音を鳴らし、本物のドラムを叩いたときには電子音を鳴らさない(本物のドラムが鳴る)ため、既存のドラムセットに自由に電子音を組み合わせる演奏できる。一般に叩打動作を用いて認識する場合、打撃時の振動等を認識するのが容易である。しかし、本システムも叩打のタイミングで遅延なしに音を出す必要があるため、叩打の前に認識処理を終えておく必要がある。そのため本システムでは、空中を叩く際には無意識にユーザが振り下ろす動作にブレーキをかける一方、本物のドラムを叩く際にはそのブレーキが起らないことを利用し、100%の識別率で叩打の数 10ms 前に認識を終えることに成功した。

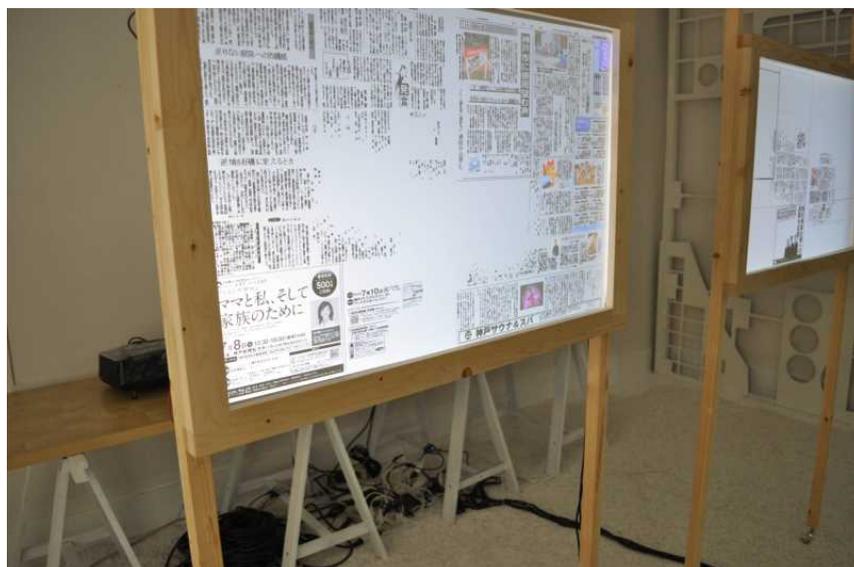


このように、実世界で認識システムを利用する際には行動終了の前に認識を終えることが重要になる場合がある。提案者らは、上記の例等を踏まえて、認識高速化の一般化も行った。下図に示すこの手法では、ジェスチャ認識において一般的に用いられている波形比較アルゴリズム DTW を拡張し、入力波形と教師データとの距離を逐次的に計算しつつ、最近傍の教師データと次点の教師データとの距離の差が相対的に大きくなった時点で認識結果を出力する。この方式を用いることで高い認識率を保ったまま認識時間を平均 65%削減できた。



常時利用性に関しては、まず認識精度と低消費電力化の両立をはかる研究に取り組んだ。具体的には、装着センサの電源を制御し、OFFにしたセンサの値を補完することで低消費電力化を実現する手法および、センサのサンプリング周波数を可変にし、足りないデータを補完することによる低消費電力化を実現する技術を提案した。事前にセンシングデータのデータベースを構築し、装着しているセンサのうちONのセンサから得られた値と最も距離に近いサンプルをデータベースから検索する。ここでの距離とはユークリッド距離にセンサ間の相関係数を乗じたものである。検索したサンプルのOFFにしたセンサに該当する値で補完することでデータは完全なものとなり、認識システム側からセンサはすべて稼働中に見えるため追加の変更を必要とせず高精度で認識できる。OFFにするセンサを増やすことで認識精度は若干低下するが省電力効果は大きくなる。その際、最適なセンサの組合せを事前に収集したデータから自動的に判断する機構を備えている。また、このデータ補完手法とサンプリング周波数制御を併用することで、サンプリング周波数を低下させても補完できるようになり、より柔軟に認識精度と消費電力のバランスを制御できる。

導入容易性および耐故障性に関しては、加速度センサを複数備えた認識システムにおいて一部のセンサが異常値を発生した場合、認識アルゴリズムを自動調整したり、あるいは一般のユーザがインタラクティブな作品を作る場合にセンサと作品を展示した状態で実際に認識させたい動作を行うと認識学習及び認識器の生成を自動で行う仕組みを開発した。この仕組みはアーティスト迫一成氏が2件の長期アート展示(下図はそのうちの1件。展示物に



息を吹きかける動作を認識している)で利用するなど有用性が示されている。

さらに、これまでに存在しなかった「ジェスチャ中の特定タイミングを高精度に認識」する方式を提案した。これは加速度データ処理において、波形マッチングと特徴量処理を並列して行い、確信度を計算する仕組みを導入することで実現したものである。この仕組みを用い、競技カルタの札取得者判定システムを構築した。構築したシステムは札取得タイミングを平均 8 ミリ秒の誤差で特定できる。

状況に特化した認識技術としては、頭部装着型加速度センサを用いた会議状況の認識システムや、自転車ペダルに装着した加速度センサを用いたペダリング状況認識システム、加速度動作からユーザの酸素摂取量を推定する方式など、新たな認識アルゴリズムを多数実現した。

#### (1-2) 加速度センサ以外のセンサも統合した新たな認識技術の提案

本提案の中心は加速度センサやジャイロセンサなど体の動きを直接的に取得するものであるが、目的によってはそれらのモーションセンサではなく、別の装着型デバイスを用いた方が効率よく正確な行動や状況を取得できる可能性がある。例えば、ウェアラブルセンシングの有力なアプリケーションの一つであるライフロギング(行動記録)を考えた場合、加速度センサによって得られる動作以外に、本人の感情の変化や、食事、排泄、人と会った、といったような記録すべき情報は多様である。この場合、加速度センサと他の方式を組み合わせて利用することが有力である。

例えば、下図のように、メガネに装着した数ミリ角のフォトフレクタを用いたデバイスによって装着者の笑顔を認識し、微笑みや笑いなど日常生活にとって大事なシーンを切り出す笑顔ライフログシステムや、鼻部表面温度を用いてストレスを計測するメガネ型デバイス、首飾り型で数センチ角のにおいセンサを用いて食事や排泄など人間の健康にとって重要なイベントを記録するにおいライフログシステム、超音波を用いてボイスレコーダに場所・行動・対面人物すべての情報を埋め込む音響ベースライフログシステム、ロードセルを用いて机上動作を高精度に認識するシステム、導電ゴムを用いて体の周径を計測し、呼吸などの状況を高精度に認識するシステム、赤外線フォトトランジスタアレイを用いてポケットの中身を認識するシステムを構築しており、それぞれ大きな成果となっている。



また、音響情報を用い、ユーザが主観的に感じる音量と実際の音量のずれを認識して音量を調整するシステムや、ユーザがヒザを叩く動作から文字入力の内容を予測するシステムを構築した。

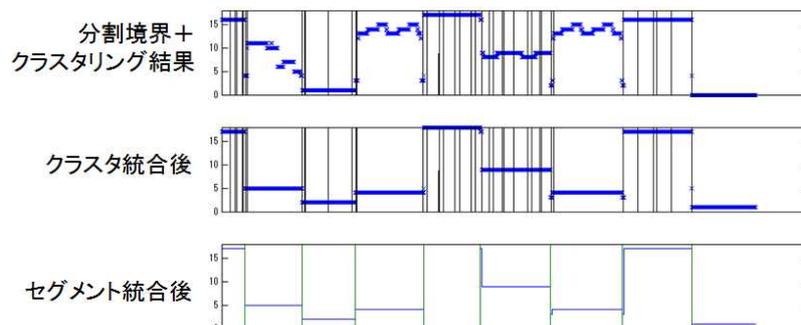
[1] 寺田 努、 ``ウェアラブルセンサを用いた行動認識技術の現状と課題,`` コンピュータソフトウェア(日本ソフトウェア科学会論文誌) インタラクティブソフトウェア特集, Vol. 28, No. 2, pp. 43--54 (May 2011).

## 研究テーマ(2) 認識データベース構築

実用的なシステムを構築するにはユーザの一般的な傾向や特性を調べ、評価するために大量のユーザデータが必要となる。動作認識データベースは、大量のユーザのラベル付きモーションデータを含み、各種のモーションデータ、ジェスチャールールや重み付け情報などを管理するデータベースである。このデータベースは少なくとも数百人規模のデータ蓄積を想定している。実際の加速度データ蓄積に関しては、Human Activity Sensing Consortium (HASC)などのデータ収集団体と協力しながら進めることとなったため、本サブテーマの主な役割は(2-1)データ収集を補助するためのシステムやアルゴリズムの作成、(2-2)特殊なデータの収集、である。

### (2-1) データ収集を補助するためのシステムやアルゴリズムの作成

加速度センサ等のセンサデータはそのまま蓄積するだけでは利用価値が薄く、そのセンサ値が得られたときにユーザが何をしていたかをラベルとして同時に記録する必要がある。この作業をラベリングと呼ぶが、その作業は例えば 10 分の 3 軸加速度データへのラベリングに 30 分かかるといわれるなど、大変コストが高い。そこで、提案者らは、日記のように漠然と「\* \*をして\* \*をした」といったような行動の順序制約を入力としてラベリングを自動化するアルゴリズムを確立した。これは、センサデータをもとに下図のように境界分割、クラスタリング、セグメント統合を行っておおまかな行動遷移を得た後、順序制約によって行動内容を決定している。この成果をまとめた学術論文は情報処理学会特選論文に選ばれるなど高い評価を受けた。



また、このような自動化を行っても最終的にチェックする作業が残っていたり、提案手法ではうまく分離できない行動群も存在する。そこで、ラベリング作業をゲーム化することで、人間がラベリング作業を楽しく行えるシステムの開発にも取り組んだ。例えばセンサデータを基準とした株売買のゲーム等を行うことで、集合知的に高精度なセンサデータクラスタリングが行えると考えられる。現在その有効性はまだ確認出来ていないが、ラベリング作業はあらゆるデータ収集研究において重要な作業であるため、このような先駆的な取り組みは重要な研究テーマであると考えている。

## (2-2) 特殊なデータの収集

これまでに収集されていないが、多くの研究者が必要とするわけではないデータに関して独自に収集し、一部を一般公開している。具体的には、まず公開しているデータとして、携帯端末を把持した状態で行いうる 27 種類のジェスチャをそれぞれ 7 人が 10 回ずつ行ったデータセットを公開している(内容は左下図)。これらのデータをもとに、例えば右下図にあるようなジェスチャベースのブラウザなどが実現できる。

ID	Description	Illustration
1	Tilt to the near side	
2	Tilt to the far side	
3	Tilt to the left side	
4	Tilt to the right side	
5	Tap upper side twice	
6	Tap left side twice	
7	Swing twice to the left side quickly	
8	Swing twice to the right side quickly	
9	Shuffle cards	
10	Tap lateral edge as though sifting	
11	Scoop	
12	Lay cards	
13	Gather cards	
14	Rap table with the longer lateral edge	
15	Rap table with the surface of the board	
16	Knock the board twice	
17	Turn the board over	
18	Rotate clockwise on the table	
19	Shift up	
20	Shift down	
21	Shift left	
22	Shift right	
23	Shift diagonally up	
24	Shift diagonally down	
25	Draw a circle	
26	Draw a triangle	
27	Draw a square	



また、同じジェスチャを行っていても疲労や繰り返しによりジェスチャ軌跡は変化すると思われるが、それを調査した研究が存在していなかった。そこで提案者らは、5 人の被験者に対し、同じジェスチャを 200 回連続で行うことを 7 日間繰り返すデータセットを蓄積し、公開した。データ分析の結果から、確かに疲労や忘却の影響によってジェスチャが変化し、従来研究で行われているように最初の数回のジェスチャを学習データとするようなアプローチでは正しい結果が得られないことを示した。また、ジェスチャの単純な認識精度だけでなく、そのジェスチャが社会的に受け入れられるかどうかの調査を行った。例えば頭を振ることによって行うジェスチャは認識精度が高いものの、周囲の人からは奇異に見られるためなるべく使わない方がよい、など、ジェスチャ設計の指針となるデータを提供できた。さらには、体の部位ごとに、センサを装着すること自体の快適さも踏まえた認識精度の評価を行った。これは、体に 20 個の加速度センサを装着した 4 人の被験者にトレーニングやヨガを含む 36 種類の行動を行わせ、装着性の評価と動作認識精度の評価を行ったものである。このとき、首など装着性の低い部位にセンサを付けない場合は、他の部位についてもセンサの最適配置が異なることをデータから示した。

そのほかにも、さまざまなジェスチャをユーザに言葉で教示し、その言葉の詳細度(表現)が認識精度に与える影響を調査している。たとえば「手を振る」という動作で多数のユーザが同じ動き(バイバイをするように手を振る)をする場合、そのジェスチャは汎用性が高く直観的な動作であると言える。このようなジェスチャは他のユーザの学習データでも十分な認識精度が得られるため、「あらかじめ学習させないと使えない」というジェスチャインタフェースの欠点を解消できる。この実験では、下図に示す10種類のジェスチャそれぞれに5段階の具体度を設け、13名の被験者にそれぞれの指示に対するジェスチャを行わせた。結果として指示が具体的になるほど被験者は想定するジェスチャを行うが、「ボール」や「ドア」などの語が入ると逆に動作に一貫性がなくなることが分かった。

ジェスチャ	具体度	指示
 円を描く	1	円を描いてください
	2	上を起点に円を描いてください
	3	上を起点に反時計回りの円を描いてください
 三角を描く	1	三角を描いてください
	2	上を起点に三角を描いてください
	3	上を起点に反時計回りに三角を描いてください
 四角を描く	1	四角を描いてください
	2	左上を起点に四角を描いてください
	3	左上を起点に反時計回りに四角を描いてください
 星印を描く	1	星印を描いてください
	2	上を起点に星印を描いてください
	3	上を起点に左下の方向から星印を描いてください
パンチ	1	手を前に出してください
	2	手をまっすぐ突き出してください
	3	パンチしてください
ドアを押す	1	手を前に出してください
	2	手を押し出してください
	3	ドアを押してあけるように手を押し出してください
引き出しを引く	1	手を手前に引いてください
	2	掌を上に向けて手前に引いてください
	3	引き出しを開けるように手を手前に引いてください
ドアを引く	1	手を手前に引いてください
	2	掌を下に向けて手前に引いてください
	3	ドアを引いてあけるように手を手前に引いてください
投げる	1	腕を振ってください
	2	投げてください
	3	ボールを投げてください
チョップ	1	腕を振ってください
	2	チョップしてください
	3	斜めにチョップしてください

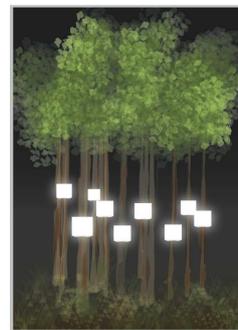
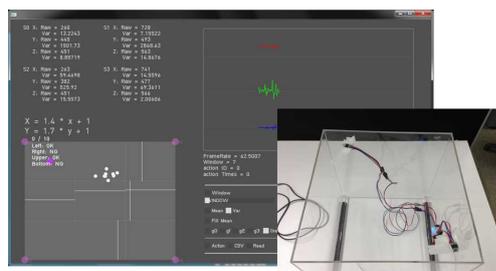
\*具体度 4 は図形、具体度 5 は動画

そのほかにも、演劇家においてマイム動作と実動作の違いを調べるためのセンサデータセットの構築や、プロジェクトを装着する際の、装着部位ごとのプロジェクトの揺れ情報、のべ30時間以上の会議中の頭部動作など、さまざまな状況における加速度データをこの3年間で蓄積した。加速度データ以外では、上記会議データにおける音声・画像等のデータ、観光地における会話データ、状況別のヘッドマウントディスプレイの注視データなど、実世界システムを構築するにあたって重要なデータを多数蓄積した。

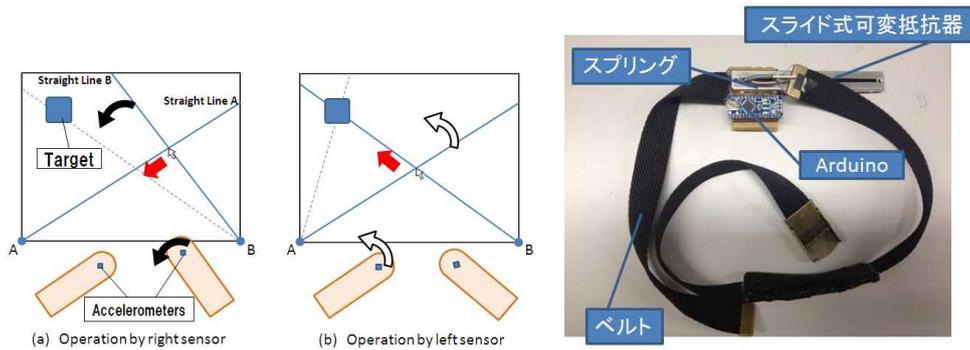
さらに、取得情報のフィードバック効果についてもデータ蓄積および検討を行っている。例えば、ジェスチャの学習データ10回分を作成するときに、単純に10回を行った場合と比べて、前回との波形の差異を視覚フィードバックした方が結果としてテスト時の認識精度も高くなった。このような学習時フィードバックの効果についてもさらなる調査が必要である。

### 研究テーマ(3) システムプラットフォーム構築と実世界応用

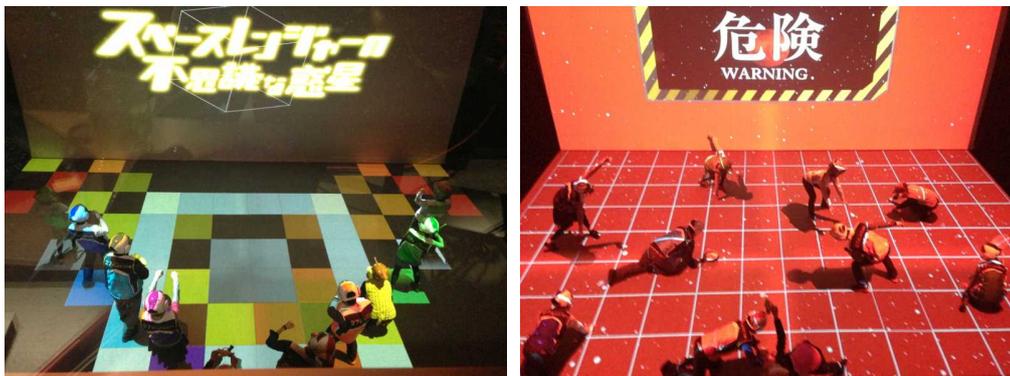
上記の動作認識基盤に基づき、いつでもどこでも状況依存インタフェースの利用およびカスタマイズが行えるシステムプラットフォームを開発した。システムプラットフォームは、動作認識基盤およびアプリケーション実行ミドルウェア、ディペンダビリティインタフェースからなる。アプリケーション実行ミドルウェアは、提案者らがこれまでに開発したウェアラブルコンピューティング向けシステムプラットフォームである Wearable Toolkit を改良して用いた。このミドルウェアは、エンドユーザであっても容易にサービスが記述でき、システムを稼働させたままサービスの追加・削除・変更が行えるようにイベント駆動型ルールによる動作記述を採用している。Wearable Toolkit は、すでに一般公開され、多数の実践利用においてその有効性が示されたミドルウェアであり、このミドルウェアを利用することで信頼性が高く実践的なシステムを構築できた。ディペンダビリティミドルウェアに関しては、提案者が科学研究費補助金において取り組んでいるウェアラブル OS 構築プロジェクトの成果を流用している。具体的には、高信頼化のために OS フリーズ時にも入出力デバイス間のデータ転送を継続する入出力ハードウェアおよびデータ変換管理機構を含んだ OS を構築しているが、この信頼性確保の仕組みを提案するプラットフォームにもミドルウェアとして備えさせる。このシステム構成をとることで、いつでもどこでもインタフェース変更や状況依存インタフェースの構築を高信頼に行えるようになった。この 3 年間では、基本的なシステムのプロトタイプを完成させ、その場プログラミングシステムと呼ぶインタフェースを実現した。また、同様の仕組みを用いて Flash でジェスチャを用いた体感ゲームを簡単に作成できるプラットフォームを作成した。また、壁面やカーテンなど好きなものに加速度センサを付け、叩くなど認識したい動作を数回行うだけで認識結果に基づく処理が行えるツールキット(左下図)を作成した。これを用いて、アーティストの迫一成氏が韓国でのインスタレーション(右下図)を行うなど、認識に不慣れな設計者とともにシステムを作ることが可能であることを示した。



実際に構築した実世界指向インタフェースの例としては、左下図に示すように体に装着した加速度センサにより画面上の直線の角度制御を行い、交点をポインティングする Xangle や、腹囲の大きさと変化を用いた入力インタフェース(右下図)を構築した。



実践的なシステム提供例としては、司会進行の支援システム、プロジェクタパフォーマンス支援システム、着ぐるみ装着者支援システム、野外学習システム、観客参加型演劇など多数の実践環境でシステムを運用してきた。例えば下図に示すのは観客参加型演劇 YouPlay における提案者らのシステム利用例である。YouPlay は、基本的には 1 ステージ 10 名の演者(一般人)が 10 種類のキャラクタのどれかを割り当てられ、さまざまなイベントをこなしつつインタラクティブにストーリーを進めていくものである。2013 年 11 月 16 日～24 日、全 40 公演が行われた。観客参加型演劇は新しいエンタテインメントの形を示唆しており、そこでセンシング技術が重要な役割を果たしている。YouPlay Vol. 1 では、演者が装着するヘルメットの頭頂部に複数の赤外線 LED、内部に加速度センサやジャイロセンサ、ヘッドセット等を含んでいる。会場の天井に装着された赤外線カメラにより演者の位置をリアルタイムでトラッキングし、加速度センサにより演者の動き(歩く、ジャンプ、宇宙空間のようにゆっくり歩く)を認識する。また、手に持つアイテム(銃や虫取り網などキャラクタによって異なる)にもセンサが仕込まれており、アイテムの使用を検出できるようになっている。行動の認識は各演者の機器に仕込まれた Arduino のみで行い、結果をサーバに集約する。加速度センサは歩いたときの音を出したり、他の演者と一緒にジャンプすることによってクリアできる仕掛けに用いられている。このように、観客参加型演劇は「システムを使った人が楽しくなる」ものであり、そのために、どう動かわからない演者の動きをロバストに検出する必要がある、という点でセンサを用いたインタラクティブシステムに適した構成になっているといえる。



野外学習のシステムでは、虫眼鏡を模したオリジナル端末(3D プリンタを用いて作成、左下図)を用い、表示される課題(「大きな石を探せ」など)をクリアしていくものである。端末は加速度センサを内蔵し、子供安全状態などを監視する機能をもつ。このシステムは 2013 年 8 月に大阪万博記念公園で実運用し、多くの参加者に体験された(右下図)。



このように、提案する技術は研究室内だけでなく、さまざまなイベント等で一般人が利用するなど信頼性の高いものになりつつある。

### 3. 今後の展開

これまでに述べたように、本研究課題ではセンサを用いた実世界指向システムを構築するにあたって、アルゴリズム面からの問題解決、データ蓄積からの問題解決、システム構築からの問題解決など広い範囲にわたって研究を推進し、大きな成果を挙げてきた。認識のためのシステム基盤は出来つつあるが、引き続き認識技術の確立、データの蓄積、応用研究の推進を行っていく予定である。また、認識技術と情報提示技術は表裏一体であり、認識技術の確立によって情報提示技術においても革新的な成果を創出するための下準備が整ったと言える。今後はそれらの各要素において、この研究成果をもとにさらなる飛躍を目指し、商用を含めた多くのインタラクティブシステムにおいて本提案の仕組みが活用されることを目指す。以下、各要素についての今後の展開についてまとめる。

#### (1) 動作認識技術の確立

本研究課題において、早期認識や疲労性解決、ジェスチャの特定タイミング推定など新たな概念を多数提案した。これらの概念は実際のシステム利用において大きな意味をもったが、他分野への応用を進めるにつれてさらなる解決すべき課題が登場すると思われる。本研究課題において培った実践と理論提案のサイクルを引き続き回していくことで新たなアルゴリズム提案が今後も行えると考えられる。当面の目標としては、システムの長期運用における問題点の抽出、さらには高レベル(抽象化された)コンテキストの認識における問題点の洗い出しとその解決を行うことを考えている。

#### (2) 認識データベースの構築

当面蓄積する予定のデータはフィードバックが認識にどういった影響を与えるかを計測したものを考えている。これは、認識時の環境によってデータの質が大きく異なるのであれば、認識研究においてテストデータや学習データの決定方法が大きく変化する可能性があるためである。また、演劇における人の動きデータ、スポーツにおけるフィードバックの効果測定など、新たな分野開拓につながるデータ蓄積を積極的に行っていく予定である。

### (3) システムプラットフォーム構築と実世界応用

本研究課題で構築したシステムプラットフォームをさまざまな場所において利用し、実証していく予定である。マラソンや自転車を含めたスポーツのメンタル制御、教育における集中度測定や授業のビデオ化における自動タグ付け、神戸市における高齢者の活動支援、観光案内システム、演劇やエンタテインメントにおける観客・演者支援、美容センシング、など応用範囲は広く、大きな成果が期待できる。

### (4) 情報提示技術への展開

装着型ディスプレイなどを装着していると、画面を常時閲覧しながら生活するようになる。このような画面閲覧において、画面の配色や提示する数値、提示するオブジェクトの種類や形などさまざまな要素が意図せずともユーザの心身に影響を与えている。報告者はこれまで、例えば生体情報を常時閲覧する場合、虚偽情報の提示によりユーザの心拍値を制御できることを明らかにしている。ユーザの状況が適切に認識できるようになると、それを適切に活用したフィードバックによって人間の生活がより快適になる可能性が高い。今後は、ユーザ状況の認識と、それに対してどのようなフィードバックを行えばユーザにいい効果が得られるのかを様々なフィールドにおいて調査し、健康やメンタルの向上に貢献したい。

## 4. 評価

### (1) 自己評価

(研究者)

本課題は、実践的な動作認識システムの構築が目的であり、そのためには実運用と、それに基づいて必要となった認識アルゴリズムの開発両面が必須である。その観点から考えると、この5年間で演劇やパフォーマンス、アート制作、野外学習、募金箱を含めた多数の実戦投入が行えたことは大きな成果である。これらの活動は情報技術の広報活動にもつながっており、30件以上の新聞等報道にて採り上げられている。実運用から得られた知見に基づく学術的成果としては、これまで重要視されていなかった動作分離や早期認識等の新たなアルゴリズムを開拓し、学術論文誌30編(うち海外11編)、国際会議発表57件、その他の発表約300件の成果を挙げており、特にウェアラブルコンピューティングにおけるトップカンファレンスであるISWCには5年間で6件採択され、日本人採択件数としては最多である。また、学長表彰、情報処理学会山下記念研究賞(2回)、ヒューマンインタフェース学会論文賞、情報処理学会2013年度特選論文、Augmented Human Conference 2014やMoMM2015ベストペーパーを含め、30件以上の学術賞を受賞しており、研究の質・量ともに満足いくレベルである。

成果の公開に関しては、現在携帯端末把持ジェスチャおよび疲労によるジェスチャ軌道の変化データを一般公開している。これらのデータは複数件利用されていることを確認している。今後は、研究成果の章で述べたように、提案者だけがもつデータは多数あり、それを順次公開していくことが必要になる。また、ライブラリに関しては当初予定していた一般公開ではなく、報告者らがライブラリを保持し、必要に応じてシステム開発を支援すると

いう方式にした。これは、初期設定を専門家以外が行うと認識精度が上がらず、認識技術が正しく活用されないと考えたためである。一方、メンテナンス性を高めたシステムの提供は積極的に行っており、長期的なシステム運用において専門家を必要としない仕組みを構築した。この結果、多くの実運用システムを稼働させることに成功し、社会的なインパクトを与えられたと考えている。

さきがけの研究期間に挙げた成果は、量・質・インパクトともにさきがけ研究前までの報告者の研究成果をはるかに凌駕しており、さきがけにおける統括・アドバイザー・他メンバとのディスカッションや切磋琢磨が報告者の研究活動のレベル向上に大きく寄与したと確信している。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究は、研究室内実験では高精度の認識率を誇る技術が、実世界に適用すると期待される性能を出せないことに対する疑問から出発している。現場で利用可能な動作認識技術を蓄積すべく、研究室の学生と共に、数多くの技術開発と実証実験を積み重ねた。特に、自己相関関数を用いて動作を適切に分類して認識する技術、認識遅れを解消する早期認識アルゴリズム、加速度センサに加えてにおいセンサやフォトリフレクタを組み入れた動作認識技術などを提案している。さらに、ラベル付きモーションデータを含む動作認識データベースを、海外のデータ収集団体と協力して構築している。また、開発した様々な技術をウェアラブルコンピューティング向けプラットフォームとして統合した。このプラットフォームを用いて入出力インターフェースを多数実装すると共に、プロフェッショナルなアーティストを含む多くの人々に提供している。

本研究が、実世界に適用可能な技術を開発すると共に、他の研究者やアーティストに利用可能なデータベースとプラットフォームを提供したことは高く評価できる。発表論文数は、論文誌 30 編、国際会議 57 件を数え、質の高い豊かな研究が行われたことを示している。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

- |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 寺田 努, ``ウェアラブルセンサを用いた行動認識技術の現状と課題,`` コンピュータソフトウェア(日本ソフトウェア科学会論文誌) インタラクティブソフトウェア特集, Vol. 28, No. 2, pp. 43--54 (May 2011). <u>招待論文</u>                                                                                                                  |
| 2. Kazuya MURAO, Tsutomu TERADA, Ai YANO, and Ryuichi MATSUKURA, ``Evaluating Sensor Placement and Gesture Selection for Mobile Devices,`` The Transactions of Human Interface Society, Vol. 15, No. 3, pp. 281--292 (Aug. 2013). <u>ヒューマンインタフェース学会論文賞</u> |
| 3. 村尾和哉, 寺田 努, 塚本昌彦, ``行動の順序制約を用いた加速度データのラベリング手法,`` 情報処理学会論文誌 (2014). <u>推薦論文, 2013 年度情報処理学会特選論文</u>                                                                                                                                                       |
| 4. Ryo IZUTA, Kazuya MURAO, Tsutomu TERADA, and Masahiko TSUKAMOTO, ``Early Gesture Recognition Method with an Accelerometer,`` International Journal of Pervasive                                                                                         |

Computing and Communications, Vol. 11, Issue 3, pp. 270--287 (Aug. 2015). 推薦論文

5. 磯山直也, ウォーリー木下, 出田 怜, 寺田 努, 塚本昌彦, ``YOUPLAY: インタラクティブな演出を用いた観客参加型演劇,`` 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 11, pp. 2151--2164 (Nov. 2015). 推薦論文

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

(3-1) 受賞

1. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2011)シンポジウム, 最優秀論文賞 (July 2011).
2. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2011)シンポジウム, 優秀論文賞(3件) (July 2011).
3. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2011)シンポジウム, 優秀プレゼンテーション賞 (July 2011).
4. International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2011), Best Video Award (Sep. 2011).
5. 情報処理学会 エンタテインメントコンピューティング 2011, 最優秀論文賞 (Sep. 2011).
6. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2012)シンポジウム, 最優秀論文賞 (July 2012).
7. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2012)シンポジウム, 優秀論文賞 (July 2012).
8. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2012)シンポジウム, 優秀プレゼンテーション賞 (July 2012).
9. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2012)シンポジウム, ベストカンバーサント賞 (July 2012).
10. 情報処理学会 エンタテインメントコンピューティング 2012, カンテール賞 (Sep. 2012).
11. 情報処理学会 エンタテインメントコンピューティング 2012, 優秀デモンストレーション賞 (Sep. 2012).
12. The Advances in Computer Entertainment Conference (ACE 2012), Bronze Paper Award (Nov. 2012).
13. 平成二十四年度「神戸大学のミリオク」シンポジウム, 学長表彰 (Jan. 2013).
14. 4th Augmented Human International Conference (AH 2013), Best Paper Award (Mar. 2013).
15. 情報処理学会 山下記念研究賞(2件) (Mar. 2013).
16. 情報処理学会 ユビキタスコンピューティングシステム研究会, 第 37 回ユビキタスコンピューティングシステム研究発表会研究会奨励賞 (Mar. 2013).
17. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2013)シンポジウム, 功労賞 (July 2013).
18. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2013)シンポジウム, 最優

秀論文賞 (July 2013).

19. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2013)シンポジウム, 優秀論文賞(2件) (July 2013).
20. 情報処理学会 ユビキタスコンピューティングシステム研究会, 第39回ユビキタスコンピューティングシステム研究発表会優秀論文賞 (Sep. 2013).
21. 情報処理学会 ユビキタスコンピューティングシステム研究会, 国際会議発表奨励賞 (Nov. 2013).
22. 情報処理学会 2013年度特選論文 (Jan. 2014).
23. 5th Augmented Human International Conference (AH 2014), Honorable Mention (Mar. 2014).
24. 情報処理学会 モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 2014年度優秀論文 (May. 2014).
25. 情報処理学会 モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 2014年度優秀発表 (May. 2014).
26. 情報処理学会 2013年度長尾真記念特別賞 (June 2014).
27. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2014)シンポジウム, 優秀プレゼンテーション賞 (July 2014).
28. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2014)シンポジウム, 優秀論文賞(2件) (July 2014).
29. 情報処理学会 2014年度特選論文 (Aug. 2014).
30. 情報処理学会 エンタテインメントコンピューティング 2014, 優秀論文賞 (Sep. 2014).
31. 12th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2014), Best Short Paper Award (Dec. 2014).
32. ヒューマンインタフェース学会 2015年度論文賞 (Feb. 2015).
33. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2015)シンポジウム, 最優秀論文賞 (July 2015).
34. 13th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2015), Best Paper Award (Dec. 2015).

### (3-2) 作品・システム提供

1. 迫一成, ``34°-41.38'N 135°-30.7'E," 作品への技術協力 (Aug. 2012).
2. ``大阪水辺バル 2012 水先あんない帳," システム提供 (Oct. 2012).
3. ``Designer Show House 2012," 2件のシステム展示 (Oct. 2012).
4. ``AR宝探し in 万博記念公園," システム提供 (Nov. 2012).
5. ``YouPlay Vol.0," システム提供 (Mar. 2013).
6. 迫一成, ``SYMBIO(共生)," 作品への技術協力 (Aug. 2013).
7. ``大阪水辺バル 2013 水先あんない帳," システム提供 (Oct. 2013).
8. ``触って楽しい! 未来のインタラクティブ・ルーム!," いしかわ夢未来博 2013, 3件のシステム展示 (Nov. 2013).
9. ``YouPlay Vol.1," システム提供 (Nov. 2013).

10. ``タッチ&ウェア デジタル体験祭り,`` グランフロント大阪, 研究展示 (May. 2014).
11. ``未来の日記は勝手にできあがる? ライフログングに関する研究,`` ディスカバリーラボ ISHIKAWA2014, 4 件のシステム展示 (Nov. 2014).

**【プレスリリース、出版(TV, 新聞などメディア報道含む)】**

NHK テレビ、番組名:サイエンスZERO「ウェアラブルセンサーが起こすスポーツ革命」にて、  
【解説・コメンテーター】として出演。放送日:2015.7.19