

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

モバイル環境における
足入力インタフェースの研究

奥村 典明

(コンピュータサイエンス専攻)

指導教員 高橋 伸

2012年3月

概要

コンピュータの小型化により携帯端末が広く普及し、屋外でコンピュータを利用する機会が多くなってきた。屋外での活動ではユーザは様々な状況に置かれることになり、例えば手が汚れてしまっている場合など、必ずしもすぐに手が利用できるわけではない状況に遭遇する。そのため、手のみによる操作がいつでも有効であるわけではない。そこで、本研究では、モバイル機器などの移動時におけるコンピュータの入力において、手による入力に代わる入力チャネルとして移動時の足の動作に着目した。

足が地面から離れ、再び地面に設置して止まるまでの動きを1入力の単位とし、その間に特殊な動作を行うことで入力を行う。そのため、歩行時には一歩一歩が入力の単位となり、歩き続ける中で特定の動作を行なっていくことで連続した入力を行うことができる。本研究では、入力に用いる動作として、ジェスチャ入力と回転入力の2つの入力手法を提案する。また、屋外の利用を想定しており、ユーザの利用環境を制限しないためにウェアラブルなシステムの実装を行う。そこで、本研究では、外出時に必ず身につける靴に加速度センサおよび角速度センサを取り付けることより移動時における足の動きを認識し、特定の足の動作を利用した入力を可能にするシステムの開発を行い、本システムを用いた各入力手法に対する実験および試作アプリケーションによる評価実験を行った。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	足入力インタフェース	3
2.2	ウェアラブル型インタフェース	4
2.3	移動者の認識および支援を行う研究	5
2.3.1	移動者のコンテキストの取得	5
2.3.2	歩行支援	5
2.3.3	移動時における身体動作を利用した入力インタフェース	6
2.4	本研究の位置づけ	6
第3章	移動時の利用を想定した 足入力インタフェース	7
3.1	想定する環境	7
3.2	足の動作を用いた入力	7
3.3	利用する足の動作	8
3.3.1	ジェスチャ入力	9
3.3.2	回転入力	10
3.4	フィードバック方法	11
	音声によるフィードバック	11
	小型ディスプレイによるフィードバック	12
	HMDによるフィードバック	12
3.5	応用例	12
	メニュー選択インタフェース	12
	音楽プレーヤー操作インタフェース	13
	簡易文字入力	13
第4章	システムの開発	15
4.1	システム概要	15

4.2	ステップデータの抽出	17
4.3	ジェスチャ入力 of 認識	19
4.3.1	特徴量の計算	21
	P_d :動きの強さの特性	21
	P_g :回転方向特性	22
	P_r :主動作の方向特性	22
	P_{a0} P_{a7} :方向の分布特性	22
4.3.2	SVM による認識	23
4.4	回転動作の認識	23
4.5	アプリケーション：音楽プレーヤー	26
第 5 章	実験	28
5.1	回転入力における認識実験	28
5.1.1	実験 1：通常の 1 ステップにおける回転角の調査実験	28
	実験内容	28
	結果と考察	28
5.1.2	実験 2：回転動作に利用できる最大角の調査実験	29
	実験内容	29
	結果と考察	30
5.1.3	実験 3：使い分け可能な回転角の分解能の調査実験	31
	実験内容	31
	結果と考察	31
5.2	ジェスチャ入力に関する実験	33
5.2.1	実験内容	33
5.2.2	結果と考察	33
5.3	アプリケーション試用実験	34
5.3.1	試用内容	35
5.3.2	試用結果	35
第 6 章	まとめ	37
	謝辞	38
	参考文献	39

図目次

2.1	Multitoe	3
2.2	ActiveBelt	4
2.3	Running Gestures	6
3.1	足動作による入力	8
3.2	1 ステップの定義	9
3.3	入力ジェスチャの種類	10
3.4	回転動作	11
3.5	回転動作を利用したメニュー操作の例	13
4.1	ハードウェア構成	15
4.2	複合センサモジュール WAA-010	16
4.3	靴底に取り付けたセンサ	17
4.4	横から見たセンサの位置	17
4.5	システム概要	17
4.6	歩行時における足に取り付けた加速度センサのデータ推移	18
4.7	1 ステップにおける 3 軸加速度データの推移	18
4.8	状態変化の判定	19
4.9	ジェスチャの認識手順	20
4.10	メンバーシップ関数	23
4.11	複合センサの軸の方向	24
4.12	回転動作の認識とその計算	25
4.13	音楽プレーヤー	26
5.1	実験 3 に用いるテスト画面の表示	32
5.2	ジェスチャ入力に関する実験に用いるテスト画面の表示	33

表 目 次

4.1	複合センサモジュール WAA-010 の使用	16
4.2	特徴パラメータ	21
4.3	音楽プレーヤーの操作方法	27
5.1	通常のステップにおける回転角の測定結果	29
5.2	可能な限り大きな角度を入力した結果	30
5.3	メニューインタフェースにおける分割数ごとの認識精度	32
5.4	ジェスチャ入力を行った際に正しく入力できた割合	34

第1章 はじめに

1.1 背景

モバイルデバイスが普及したことにより、自宅や会社のみで利用されていたコンピュータが、常に屋外で持ち運ばれるようになった。公園のベンチに座っているときや電車の車内にいるとき、街を歩いているときなど、様々な状況の中で利用されるようになってきた。

ユーザが常に動いている状況においてコンピュータを利用する場合には、自宅でデスクトップPCを利用する場合と異なり、様々な制約が存在する。特にデバイスへの入力には制限が大きい。デスクトップPCのように五指すべてを使うようなキーボードやマウスの利用は、そのデバイスの大きさ等の理由でモバイルデバイスには向いていない。そのため、文字入力の際には、親指のみでの押下を想定した小さなキーボードや、iPhone¹などのスマートフォンに多く用いられているタッチディスプレイに特化したソフトウェアキーボードなどが主に利用されている。また、ポインティングには、方向キーを利用した選択の切り替えや、タッチディスプレイにおける直接的なタッチ操作などを用いている。

このような現在のモバイル機器における入力インタフェースは、手を用いて直接機器にふれて操作を行うことを前提としたものである。しかし、実際の移動環境では、必ずしも手を使えるような状態であるとは言えない。例えば、雨の日は片手に必ず傘を持つ。そこで他方の手に鞆などの荷物を持っていた場合には両手がふさがっている状況など、すぐに手を自由に動かせない場合も考えられる。また、手が汚れたり濡れてしまっていたりするときなど、手が空いている状態であってもできるだけ手を利用したくないといった場合がある。このような場合にも、すぐにモバイルデバイス进行操作したいという欲求があるだろう。例えば、聞いている音楽の切り替えや音量の変更をしたいとき、受信したメールをすぐに閲覧したいときなどがある。

1.2 本研究の目的

本研究では、外部環境においていつでも利用可能なウェアラブルな足の動作を用いた入力インタフェースの開発を目的としている。外部環境における移動時には、立ち止まっている状態と歩いている状態とでは、足の動きに対する自由度が異なり、歩いているときには、歩行本来の目的を妨げないようにある程度制限がかかる。そこで、このような歩行状態が変化した場合にも利用可能な入力方式であり、歩行状態を妨げないよう通常の歩行動作の重心の

¹<http://www.apple.com/jp/iphone/>

動きと同様の動作で利用可能な足による入力方式を設計，提案し，その入力手法を用いたシステムの開発を行う．

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる．第2章では，本研究に関連する足による入力インタフェースに関する研究や外部環境における認識手法やインタラクションに関する研究について述べ，本研究の位置づけを示す．第3章では，本研究で提案する足に取り付けたセンサを利用したモバイルな入力インタフェースについて，そのアプローチと概要を述べる．第4章では，第3章で述べたシステムの実装について述べる．第5章では，提案した入力手法に対する実験について述べ，第6章にて結論を述べる．

第2章 関連研究

まず，本研究に関連する研究を3つのカテゴリに分類して紹介し，最後に本研究の位置づけについて述べる．2.1節では，主に屋内などの利用を想定した，足の動作を積極的に用いた入力インタフェースに関する研究について述べる．2.2節では，動作の認識を行うためのセンサやフィードバックを与えるためのデバイスを身体に身につけることにより，様々な環境でのシステムの利用が可能となるウェアラブル型のインタフェースに関する研究について述べる．2.3節では，主に外部環境における移動者を対象とした入力インタフェースや歩行支援に関する研究について述べる．

2.1 足入力インタフェース

カメラや赤外線センサ等の認識のためのデバイスを屋内や固定の環境に設置して，歩行動作やタップ動作などの足の動きを利用したインタフェースの研究が多く行われている．

Thomas らによる Multitoe[1](図 2.1) は，FTIR と FrontDI による光学認識を利用した床面巨大タッチパネルである．複数の足の認識や足の重心位置の認識を可能にし，床面に投影されたメニューの操作や高精度なキーボード入力を行うことができる．

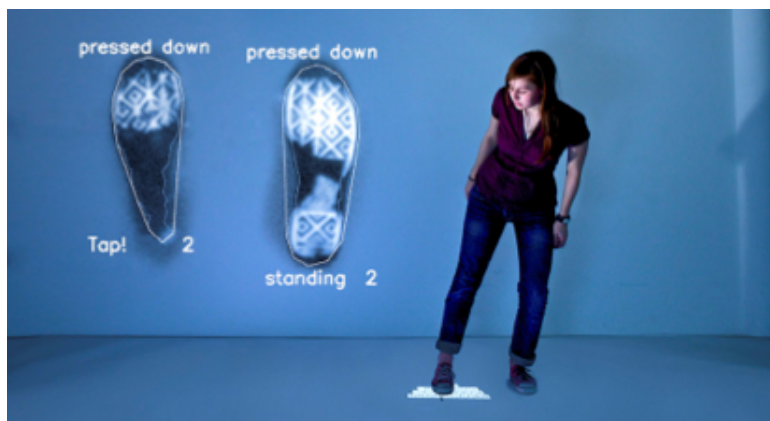


図 2.1: Multitoe

鈴木は，測域センサを利用して床面の2次元平面上における足の動きを検出することで，足の動作を用いたインタラクションを実現している [2]．田中らは，足の指にかかる力を利用してマウス操作を行うシステムを提案している [3]．加わる圧力を3軸成分に分割して計測す

ることの出来る力覚センサを利用し、地面についている足の母指が、地面に対して加える僅かな圧力の変化を認識し、書く軸方向への圧力の変化からマウスカーソルの移動などを行う。Joseph らによる研究 [4] は、仮想空間の上空から撮影したようなミニチュアを床面に投影し足で踏むことにより、HMD に表示した実際の仮想空間内に移動を行うシステムを提案している。Waraji[5] も同様に仮想空間内の移動を行うためのシステムであり、足裏の重心移動を入力として利用している。

これらの環境設置型のシステムは、環境に設置されたデバイスのみ、または身体に取り付けたデバイスと組み合わせることにより、高精度に身体の動きを認識し、複雑な動きによる入力を可能にしている。環境設置型のシステムは、主に一定の領域のみにおけるインタラクションを想定したシステムである。本研究では、通勤時や外出時等の外部環境における利用を想定したモバイルなシステムを目的としており、その認識システムやインタラクション自体も異なったものとなる。

2.2 ウェアラブル型インタフェース



図 2.2: ActiveBelt

身体にセンサ等のデバイスを取り付けることにより、ジェスチャ等を利用した入力インタフェースを実現する研究が多く行われている。Ubi finger[6] は、手にセンサを取り付けることにより、指差しによる家電の選択やジェスチャによる家電の操作を可能にしている。山本らは、加速度センサを手と足に取り付け、手と足による複数の入力チャネルを用意することで、ユーザの姿勢変化に応じた入力を可能にしている [7]。ActiveBelt は [8](図 2.2)、振動モータを複数取り付けたベルト型のデバイスであり、振動モータによりフィードバックを与えることでユーザに向き情報を伝える。どこでもタップ [9] は、人体の電位や静電容量を検知することで足や手のタップ動作を認識し、人体の各所に取り付けられたウェアラブル機器の操作を行う手法である。機器を取り付ける場所に制限がなく、手と足をそれぞれ分離して動作を認識することができる。これらの他にも、ペンダント型デバイス [10] や、指輪型 [11] など様々な部位に取り付けることを想定した研究がなされている。

ウェアラブル型インタフェースは、特定の環境のみでなく、外出時等の外部環境における利用が可能という点が大きな利点である。また、デバイスの種類や取り付ける位置によって、多様なインタラクションが可能となる。本研究においても、外部環境で利用できるよう身体にセンサを取り付け認識するシステムを採用しており、移動時の足の動きに着目した、足の動作による入力インタフェースを提案している。

2.3 移動者の認識および支援を行う研究

2.3.1 移動者のコンテキストの取得

加速度センサやジャイロセンサ等の小型のセンシングデバイスを身につけることにより、歩行者の足の動きや位置の認識、姿勢推定などを行う研究がある。このような研究は主に、ライフログの取得やユーザのコンテキストに応じたサービスへの応用を想定している。

杉本らによる研究 [12] では、圧力センサや、距離センサ、GPS センサ、音声計測装置など数種類のセンサを同時に利用することにより、ユーザの日常生活における行動を取得を行う。scott らは、スボンのポケットに入っている携帯端末に搭載された加速度センサを利用した足動作の認識を検討している [13]。多くの人が普段から持ち歩いている携帯端末を利用することで、新たなデバイスを身につける必要がないといった特徴がある。大島らによる研究 [14] は、靴に取り付けた加速度センサと圧力センサを用いて、階段や坂道といった歩行環境を把握するためのセンサの利用を検討し、各センサの長所短所を比較している。

本研究では、大島らのように外出時に常に利用することになる靴にセンサを取り付けており、インタラクションのために身体に新たにデバイスを取り付ける必要がないという利点がある。取り付けるセンサは加速度センサと角速度センサを採用した。

2.3.2 歩行支援

身体に取り付けたセンサから主に足の動きを認識し、システムと連動させることで、様々なアプローチによる道案内などの歩行支援を行う。

Gilded Gait[15] は、靴型のデバイスに加速度センサとスイッチを取り付けることで歩行時のステップを認識し、また足裏に複数取り付け付けた振動モータによってユーザにフィードバックを与えるシステムである。GPS の情報と組み合わせて、振動モータにより触覚フィードバックを与えることで仮想的な路面情報を与え、歩行ナビゲーションに応用している。また、連続して地面を踏むようなタップ動作を、ミュージックプレーヤの”次へ”、”前へ”という単純な操作に利用している。CabBoots[16] も、靴型デバイスに取り付けたセンサとアクチュエータを利用し、靴底に傾きを与えることにより仮想的な道を提示してナビゲーションを行う。渡辺らは足の甲に取り付けた振動モータにより、歩行者の歩行速度を誘導する歩行ナビゲーションシステムを実現している [17]。周期的なモータの振動により引き込み [18] と呼ばれる現象を生じさせ、ユーザに半無意識的な歩行速度の調整を促す。

2.3.3 移動時における身体動作を利用した入力インタフェース

特に歩行時などのユーザが動いている状態において、身体動作を入力動作として利用する研究が行われている。

iPod+Nike[19] は、靴に取り付けたセンサと携帯音楽プレーヤーが連動し、ジョギングの管理や支援を行う製品である。大平らは、加速度センサから得られる移動者の歩行リズムから、リズムにあった楽曲の提示を行うシステムを開発している [20]。山本らは歩行時におけるユーザの足の動きをデバイスの入力インタフェースとして積極的に利用している [21]。これは、加速度センサを靴に取り付けることで、足の動きをセンシングし、左右へのステップなど通常の歩行時とは異なる動きを入力として利用することで、携帯型音楽プレーヤ等のメニュー選択などを行うシステムである。Running Gestures[22](図 2.3) は、足に取り付けた Wii リモコンから得られる加速度データを用いて、ジョギング中のスキップ動作を認識することで、音楽プレーヤーの操作を可能にしている。



図 2.3: Running Gestures

本研究においても、足の動きを認識し、歩行時の足の特殊な動作を利用した入力インタフェースを提案している。Ruuning Gesutures や山本らによる研究では、1 つの特徴的なステップを利用した入力を提案しており最も単純な入力であるといえる。本研究では、歩行時の動作において、積極的に比較的複雑な動作を利用することによる入力を提案し、足動作による多入力インタフェースを検討している。

2.4 本研究の位置づけ

2.1 節では様々な部位を利用した身体動作によるインタフェースについて紹介した。本研究では、身体動作による入力インタフェースにおける入力チャネルとして足の動作を利用する。また、本研究は、外出時などの外部環境においていつでもどこでも利用するシーンを想定しているため、ウェアラブルなデバイスを用いた認識およびインタフェースとなる。本研究では、足の細かな動きを積極的に利用することにより、従来の歩行時における足の動きを利用した入力手法と比較し、より多様な入力を可能とする。

第3章 移動時の利用を想定した 足入力インタフェース

本章では、本研究で提案する足入力インタフェースについて、そのアプローチと提案手法を述べる。

3.1 想定する環境

本研究では、主に外部環境における移動時の利用を想定している。現在、移動時のコンピュータの利用は、携帯電話やスマートフォンなどのボタン式やタッチパネル式が備わったモバイル機器が多く使われており、手による入力がほとんどである。移動時には、多くの買い物を行ったときや旅行のために大きな荷物を持っているとき、手が汚れているときなど、反射的に手を利用することが困難な状況がある。このような場合、従来の手による入力のみを想定したモバイル機器では、電話の応答や音楽プレーヤーの停止などの操作を即座に行おうとしても、すぐに操作することができない。そこで、本研究では、特にこのような手の使えない状況や、手の仕様が煩わしい場合にも利用できることを想定している。

3.2 足の動作を用いた入力

歩行時における最も大きな特徴は、足を上げて前に出すという動作を左右交互に繰り返すという点が挙げられる。本研究では、まずこの特徴を利用し、歩行時の一歩一歩の動作をそれぞれ1入力として扱うことを検討する。

外部環境での移動時におけるユーザの歩行状態は常に変化している。移動速度も周囲の状況により変化し、常に歩き続けるのみでなく立ち止まる状況も存在する。そのため、歩行速度を直接利用するような入力方式は、状況により困難な場合がある。また、体全体を横に動かすような動作も、周囲の状況により利用しにくい場合があるなど、ユーザの進行方向を強制的に変えてしまうような動作は利用しづらい。

そこで、本研究では、一歩一歩の動作において、利用者の位置、および進行方向の強制的な変化を伴わない入力方式の設計を行う。また、立ち止まっている際にも、歩行時の動作に類似した動きを行うことにより、同様の入力が可能となるような設計を行う。

図3.1のように、ユーザは歩行時に足による入力動作を行うことで、操作対象のデバイスで直接操作することができる。足入力により操作を行った結果は、利用するインタフェースに

応じたフィードバック方法によりユーザーに伝えられる。例えば、音楽プレーヤーの操作であれば、操作した結果が、イヤホンを経由して音楽の再生状態が変化することで直接フィードバックを得ることが出来る。



図 3.1: 足動作による入力

3.3 利用する足の動作

移動状態において、一方の足が地面から離れ始めてから、再び地面に接地するまでの動作の単位を1ステップと定義する(図3.2)。本提案手法では、この1ステップごとにおいて、意図的に特殊な動作を行うことにより足によるコンピュータへの入力を行う。

1ステップは、足を後ろに上げて前に出す動作であるが、最終的に足を地面につける位置が同じ場合でも、足が空中に浮いている際には足の動きにある程度自由度が存在する。真後ろに足を向けるような動作は行うことができないが、足首を少し捻る動作や、ぶらぶらと足を振りながらステップを踏むといった動作は行うことが可能である。そのため、本研究では、このステップ動作中に行える自由度の範囲内の動作を用いて入力を行う。

本研究では、主に2種類の足の動作による入力手法を利用する。1つ目は、ジェスチャ入力である。2つ目は、足首の回転動作による入力であり、回転量に応じた入力に利用する。それ

ぞれの入力方式，または2つを組み合わせた入力を用いることで足入力インタフェースを実現する．

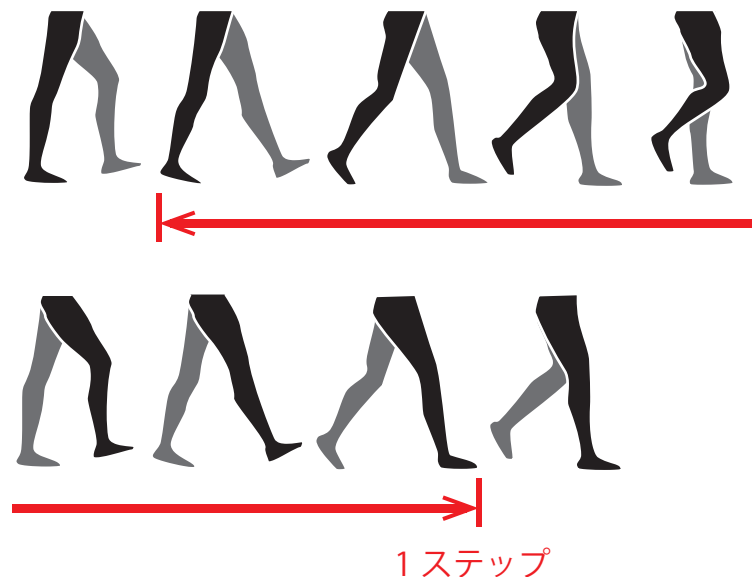


図 3.2: 1 ステップの定義

3.3.1 ジェスチャ入力

1 ステップ中に一定の方向に足を振ったり，地面を蹴ったりするような普段の歩行とは異なる動作を行うことで入力を行う．本提案手法では入力に用いる特徴的な動作として5つの基本動作を持ちいる．ジェスチャ入力により行う動作は，1 ステップにおいて足が鉛直方向より前に出る前の動作であり，ステップ全体の前半の動作を利用している．利用する5つのジェスチャは，後ろ振り上げ，つま先タップ，かかとタップ，内振り，外振りである．各ジェスチャの説明を以下に行う．各ジェスチャの概略図を図 3.3 に示す．

(a) 後ろ振り上げ

後ろ振り上げ動作は，足を後ろの方向に振り上げる動作である．ステップ初期の地面から足を離す際に，普段の歩行時よりも後ろに強く力を加えるようにして足を上げるように行う．

(b) つま先タップ

つま先タップは，地面をつま先で蹴るような動作である．ステップ中の足を前に出し始

める際に、足を地面につま先から振り下ろすように、またはつま先を地面に引っ掛けるようにして行う。

(c) かかとタップ

かかとタップは踵で地面を蹴る動作である。ステップ中に一度後ろにあがった足を前に出す際に、踵から地面に振り下ろすように、または踵を地面に引っ掛けるようにして行う。

(d) 内振り

内振り動作は、足を内側に振る動作である。地面から足を離す際に、内向きに力を加えて一時的に足を振るようにして行う。

(e) 外振り

外振りは、足を外側に振る動作であり、内振りと逆向きに力を加えて動作を行う。

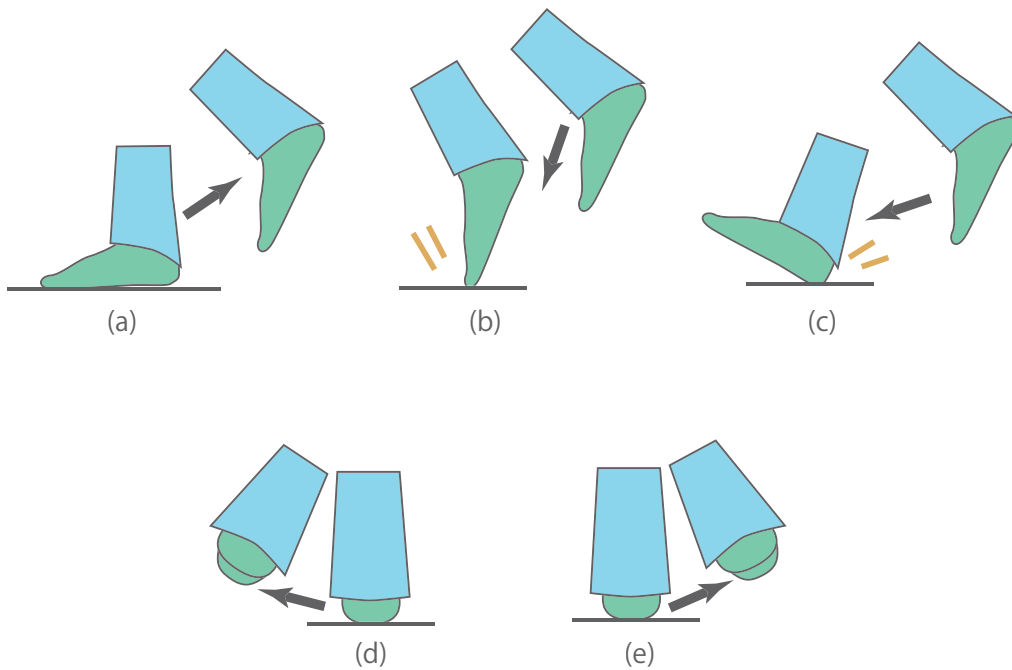


図 3.3: 入力ジェスチャの種類

3.3.2 回転入力

回転入力動作は、動作を行うことによって生じた角度情報をそのままアプリケーションの入力に利用する。入力する角度データは一定角度の範囲内における連続値から得られるデー

タであるため、アナログ入力を利用したアプリケーションなどにも適している。回転による動作では、地面の垂直方向を軸とし、地面が足についた状態における足の方向と動作中の足の方向をなす角度を利用する。(図 3.4)。1 ステップ中において、足首に任意の角度に動かすことで、角度に応じた入力を可能にする。

回転動作は、主にステップ中における後半の動きである足を前に出す際に行う動作である。足を前に出す際に、任意の方向に爪先を向けて前に出す、または、その方向に向けて蹴るような動作を行うことにより入力する。ステップを踏む前の地面に足が付いている状態の足の向きは、進行方向の向きとほぼ等しい。そのため、進行方向と蹴り出した方向をなす角がそのまま回転動作における入力角となる。利用方法として、角度を段階的に区切り、角度に応じた選択が可能なメニューの操作や、角度の情報を直接利用したアナログ入力による操作などがある。

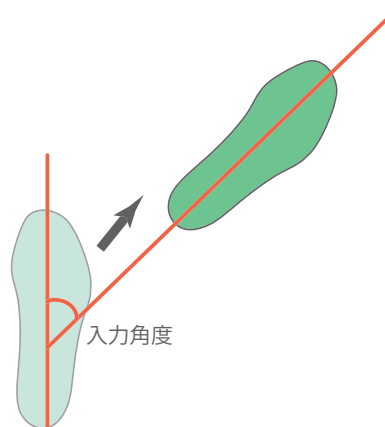


図 3.4: 回転動作

3.4 フィードバック方法

インタフェースを設計する上では、入力方法と共にコンピュータからのフィードバックを与える方法を考える必要がある。本研究では屋外の移動の利用を想定しているため、その状況に適したフィードバック方法に対して、幾つかの手法における可能性を検討する。

音声によるフィードバック

現在では、多くの人がイヤホンを見つけて音楽やネットラジオなどを聞きながら移動を行なっている。イヤホンからの音によるフィードバックは、常にフィードバックが得られる状態であるという利点と、音を用いているため、ユーザから視野を奪うことなく移動の妨

げにならないといった利点がある。しかし、音のみを利用するため、一度に多くの情報を与えることが難しいといった特徴がある。

小型ディスプレイによるフィードバック

スマートフォンなどのディスプレイを利用したグラフィカルなフィードバックである。GUIを用いることで音声と比較して、よりリッチなインタフェースを用いることが出来る。しかし、移動中にいつでも即座にフィードバックを得られるわけではなく、ポケットなどからデバイスを取り出して利用する必要がある。そのため、本研究で想定している、いつでも利用な環境という点では利用しづらく、また、スマートフォンを取り出した状況では、同時に手による入力も可能な状態であるといえるため、足入力の重要性は薄れてしまう。ただし、スマートフォンを利用する際の補助的な入力への利用や、あえて足を利用するようなゲームの操作など、限定的な利用は可能であると思われる。

HMD によるフィードバック

シースルー型のヘッドマウントディスプレイを利用する方法である。移動中も常に見につけていられるため、いつでもフィードバックが得られる状態であるという利点がある。現在市販されている製品では、デバイス本体の大きさや視野角などの問題から、普段の生活で常にご利用するような実用レベルにはまだ達していない。しかし、将来的には小型化などが進み実用レベルになるのではないかと予想される。また、グラフィカルなフィードバックのため、移動中のユーザの視野を奪ってしまうという問題がある。しかし、ユーザの意識を長時間奪ってしまうような表示や内容のものでなければ問題は少ないと思われる。スマートフォン等のディスプレイを見る際は、ディスプレイとの距離が近いために、移動時の目の焦点と大きくズレてしまうことが原因で、移動の大きな妨げになる。ヘッドマウントディスプレイの場合、焦点距離が比較的遠い位置するように設計されているため、焦点のずれが小さくなり、大きく妨害しないのではないかとと思われる。

3.5 応用例

それぞれの入力手法を用いることで様々なアプリケーションの利用が考えられるが、そのアプリケーション例として次のようなものがある。1つ目は、基本的なメニュー選択インタフェースである。2つ目は音楽プレーヤーの操作に特化したインタフェース、3つ目は簡易文字入力アプリケーションである。

メニュー選択インタフェース

図 3.5 のような扇状のメニュー選択インタフェースである。メニュー全体は楕円を切り取ったような形となっており、一定の角度ごとに区切られた区間が1つのメニューとなる。これ

は主に足の回転入力を用いたインタフェースとなり、回転入力を行うことで、入力された角度に対応したメニューを選択していく。利用には、HMDなどの視覚的なフィードバックが可能なものを利用する必要がある。中心の区画は遊びのための項目であり、通常の歩行時には回転角がこの項目内に収まるためメニューは選択されないようになっている。そのため、意図的に回転動作を行った場合のみ選択操作が行えるようになっている。

メニュー選択インタフェースは階層的な構造になっており、1つを選択することで次の階層のメニューが表示され、さらに選択を繰り返していく。そのため、歩行時の両足による連続的な動作を用いた入力が有効となる。また、ジェスチャ入力と組み合わせることにより、一つ上の階層に戻る操作といった特殊な操作も同時に行うことが出来るようになる。

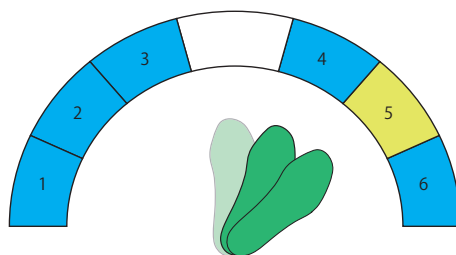


図 3.5: 回転動作を利用したメニュー操作の例

音楽プレーヤー操作インタフェース

携帯音楽プレーヤーや iPhone のような音楽再生機能のある携帯端末が広く普及したことにより、通学や外出の際に音楽を聞きながら移動を行う人々が多く見られる。そのため、本提案手法を用いて、移動中に最もよく使用されるであろう音楽プレーヤーの操作を行うインタフェースである。移動しながらイヤホンから聞いている楽曲を操作することができる。フィードバックは流れる楽曲が変化することで得られる。以下の例のように各基本操作をジェスチャに割り当てることにより利用する。

- 前の曲を選択： 内振りジェスチャ(左足の場合は外振りジェスチャ)
- 次の曲を選択： 外振りジェスチャ(左足の場合は内振りジェスチャ)
- 再生、一時停止： つま先タップ

簡易文字入力

移動状態においても、メールの返信などをすぐに行いたいという場合もあるかもしれない。そのため、提案したジェスチャを利用して簡易的な文字入力を行う方法を考える。まず、濁

音など含まない 50 音の入力を想定した場合、10 個の子音と 5 つの母音の組み合わせで入力を行うことになる。ジェスチャ入力では各足につき 5 通りの入力が行える。そのため、まず両足合わせ 10 通りジェスチャを用いて子音を入力し、次のステップのときに母音を入力するようにする。そうすることで、2 ステップ、または 3 ステップで 1 文字の入力を行うことができる。歩行時に、連続してステップを踏んでいるときに利用することで次々に文字を入力していく。

第4章 システムの開発

4.1 システム概要

本システムのハードウェアの構成を図 4.1 に示す。

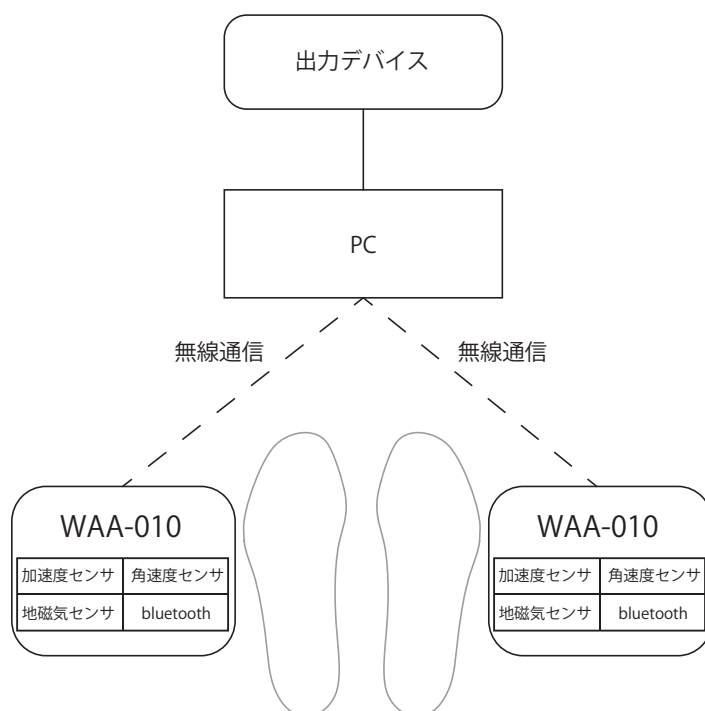


図 4.1: ハードウェア構成

足の動作を認識するために、複合センサモジュール WAA-010(ATR Promotions 製)¹を利用する(図 4.2)。WAA-010 の主な仕様を表 4.1 に示す。WAA-010 は、3 軸加速度センサ、3 軸角速度センサ、3 軸地磁気センサの 3 つのセンサにより構成されている。靴底を切抜き、足の裏に位置するようにセンサを取り付けた(図 4.3, 図 4.4)。左右それぞれの靴に取り付けることで両足による入力を可能にする。センサモジュールには Bluetooth モジュールも含まれている

¹<http://www.atr-p.com/sensor10.html>



図 4.2: 複合センサモジュール WAA-010

ため，Bluetooth による無線通信によりコンピュータとのデータの送受信を行う。

表 4.1: 複合センサモジュール WAA-010 の使用

基本仕様	
サイズ	39.0mm(W) × 44.0mm(H) × 12.0mm(D)
重さ	20.0g
サンプリング周波数	最大 1000Hz ※地磁気センサを用いない場合 最大 50Hz ※地磁気センサを用いる場合
通信仕様	
有線	USB シリアル通信
無線	Bluetooth Ver 2.0
	通信プロファイル: SPP
センサ機能	
加速度センサ	± 2G/± 4G/± 8G/± 16G (切替可能)
角速度センサ	± 2000deg/s
地磁気センサ	± 300T

本提案システムにおけるデータ処理の概要を図 4.5 に示す。センサ制御部は，シリアル通信により，bluetooth によって接続されたセンサモジュール WAA-010 の制御，およびデータの受信を行う。シリアル通信により受信した文字列データから加速度や角速度データを数値に変換して上位の動作認識部に受け渡す。動作認識部は，センサ制御部から加速度，角速度データを受け取り，受け取ったデータから動作認識を行うための処理を行い，処理結果である回転動作やジェスチャ動作のイベントを発生させ，足入力を利用するアプリケーションに受け渡す。

本システムでは，センサ制御部において，センサモジュールからのデータを 50Hz のサンプリング周波数で取得する。加速度センサのレンジは，急激な動きの変化にも対応できるように ±16G に設定する。また，センサモジュールより得られる角速度データは，静止状態においても僅かであるが常に一定の値を示してしまう。そのため，システムの起動時に静止状態の



図 4.3: 靴底に取り付けたセンサ



複合センサ

図 4.4: 横から見たセンサの位置

データをオフセット値として設定し，取得するデータにそのオフセットを利用することで補正を行なっている．動作認識部は，得られたセンサデータから実際に動作の認識を行う部分であり，主に3つの処理に分けられる．常に得られるセンサのデータから1ステップ分のデータ列を取り出す処理と，取り出した1ステップ分のデータ列を用いて回転動作を認識する部分，ジェスチャの認識を行う部分に分けられる．次節より，各処理の手法について詳細を述べる．また，以降，1ステップ分の各センサのデータ列を，”ステップデータ”と定義する．

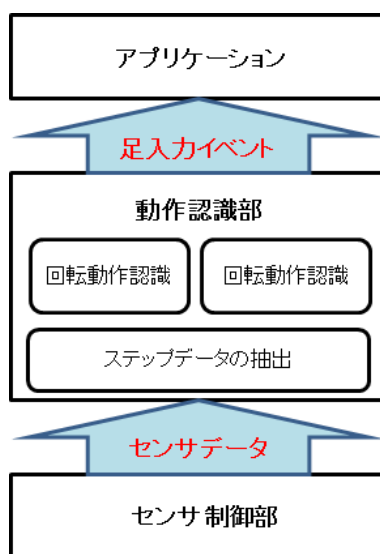


図 4.5: システム概要

4.2 ステップデータの抽出

本提案手法では，1ステップごとの足の動きを用いてジェスチャや回転動作等をを行う．1ステップ動作を認識するためには，1ステップ分のセンサのデータを取得する必要がある．そ

のため、まず1ステップ分の加速度センサと角速度センサの時系列データを抽出する方法を述べる。

足が接地状態にある場合、足の接地面に近い部分はほとんど動くことがない。対して、1ステップを踏む際の地面から足が浮いている状態の時には、ほとんど常に足が動いている。そのため、本システムではセンサより得られるデータから、現在動作中であるかどうかを判定し、接地状態と動作状態を判断する。歩行動作は、接地状態と動作状態の連続であるため、これらを認識することで、1ステップ分のデータをリアルタイムに抽出することが出来る。

センサから得られるデータは加速度と角速度データである。そのため、足が状態のときに、足が一定の姿勢で等速運動をしていた場合には、各軸の角速度は0、加速度は重力方向のみとなり、加速度、角速度データから接地状態とを区別することができない。しかし、実際の歩行環境では等速状態が長い間続くといったことはおきない。

図4.6は実際の歩行状態において加速度センサから得られた3軸の時系列データである。変化の大きい区間と、変化がほとんど生じていない区間の連続となっている。この大きく変化している区間がステップを踏んでいる区間であり、図4.7のようになっている。

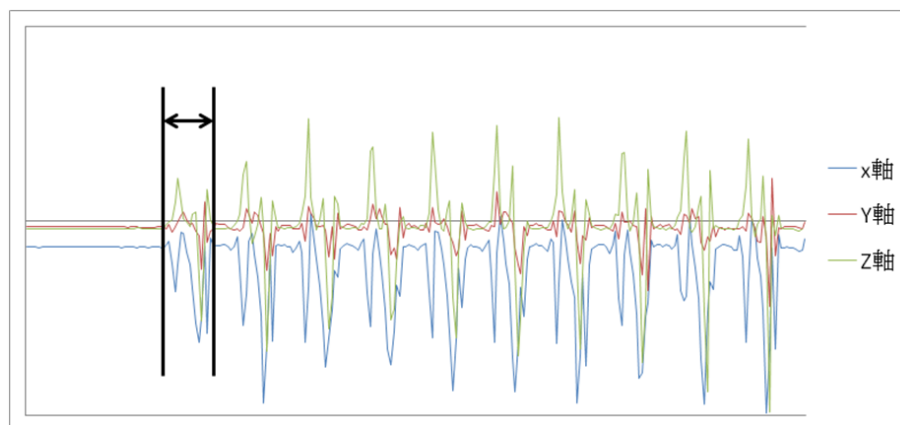


図 4.6: 歩行時における足に取り付けた加速度センサのデータ推移

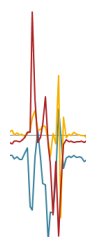


図 4.7: 1 ステップにおける3軸加速度データの推移

まず、状態を識別するために、センサのデータを受け取る際に、得られた各軸のデータから現在動作中かどうかの予測を行う。具体的には、主に次の3つの値を、接地状態における値と比較する。

- 加速度ベクトルの大きさ
- 加速度データの各軸の変化量
- 角速度データの各軸の値

加速度ベクトルの大きさは、3つの軸のデータからなるベクトルの大きさである。接地状態では、重力のみが加速度として加わるため、約9Gの値を示す。加速度ベクトルの大きさが一時的に接地状態と同様の値を示す場合にも、加速度のかかる方向の比較や、各軸の回転量を比較することで識別が可能となる。足が接地状態の場合にも、僅かではあるが加速度や角速度が変化する。しかし、動作中の変化と比較すると変化量が大きく異なるため、データを比較する際に、取得データとの差分に対し閾値処理を行うことで判定を行う。閾値処理に用いる閾値は、経験的に得られたデータから設定している。

ステップの動作状態においても瞬間的に、接地状態における加速度の大きさととの差が極僅かである場合がある。そのため、状態が切り替わる間に遊びのような状態を用意し、接地状態と判定されるデータがある程度連続して得られた場合のみ接地状態として判断している(図4.8)。これにより、瞬間的に接地状態と判断されるデータが得られた時のようなノイズを除去することが出来る。このノイズ除去処理を行うことにより、入力判定に40msほど遅延が生じてしまうことになるが、これはごく僅かな遅延であるため体感速度にはあまり影響しないと考えられる。

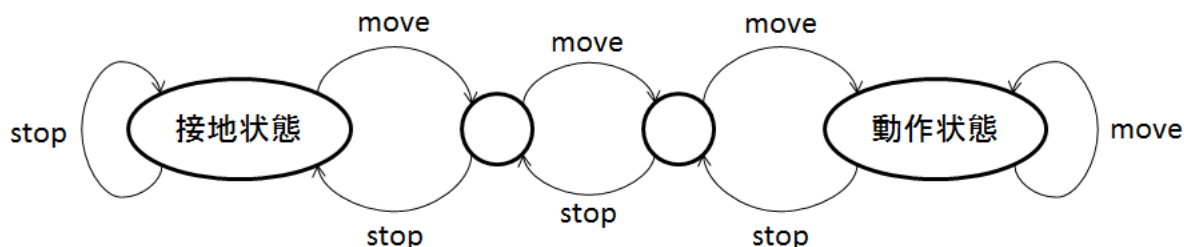


図 4.8: 状態変化の判定

4.3 ジェスチャ入力の認識

ジェスチャ入力における各ジェスチャの識別は、1ステップにおける加速度センサと角速度センサの各軸の時系列データを元に行う。予め各ジェスチャのデータをモデルデータとして保存しておき、ジェスチャ入力時にモデルデータと比較することで識別する。

モデルデータを用いて識別を行う手法として、センサの各軸の時系列データと比較対象となるモデルデータの対応する軸の時系列データを直接比較するパターンマッチング方法がある。この方法における最も単純なものとして、先頭データから1つずつ対象データとの比較を行い、最終的に生じた差分を対象モデルとの類似度として識別を行なっていく方法がある。加速度データなどを用いた動作は、動作全体では同じような動作でも個々のデータの変動は大きくなる場合があり、このような単純な比較には適していない。また、系列データ同士の比較し認識する手法としてDPマッチングという手法がある。DPマッチングは音声認識などにも用いられており、動的計画法を用いた認識手法である。特徴として、比較対象となる系列データとデータ長が異なる場合でも比較可能という点があげられる。しかし、3軸センサの場合、各軸において独立して比較を行うため、ある程度認識はできるものの大きな認識率は得られなかった。そこで、本研究では、各センサにおける3軸の時系列データから大域的な特徴を算出し、その特徴量を比較に用いることで認識を行う(図4.9)。特徴量を用いた識別には、機械学習の1つであるSVM(Support Vector Machine)を利用する。

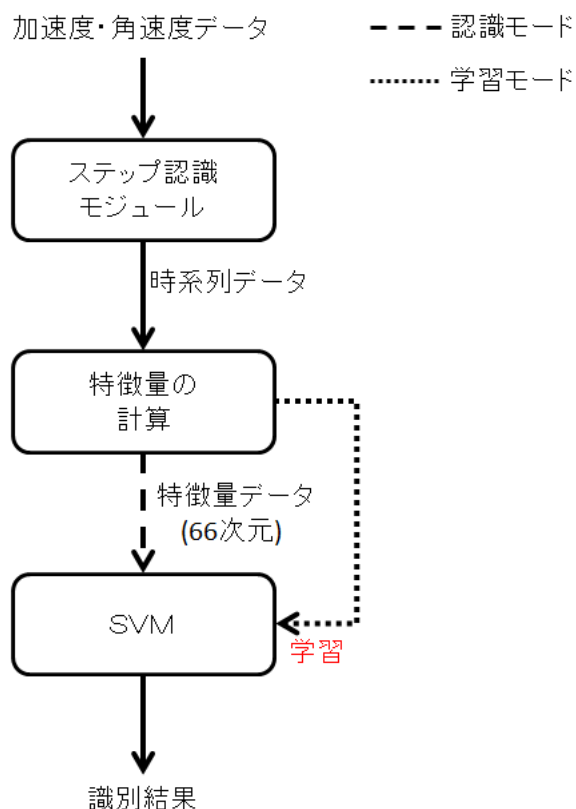


図 4.9: ジェスチャの認識手順

4.3.1 特徴量の計算

センサより得られる時系列データの特徴量の算出方法は、澤田等による手法 [23] を参考にした。センサより得られた3軸のデータから、2つの軸の値をベクトルの成分とした2次元ベクトル列に変換し、計3つの2次元ベクトル列を利用する。2次元平面上のベクトルの変異から、幾つかの特徴量を算出する。この手法により、1つ2次元平面において、表4.2のような4つの特性に分類された11個の特徴量が算出される。

表 4.2: 特徴パラメータ

特徴量	特徴
Pd	動きの強さの特性
Pg	回転方向特性
Pr	主動作の方向特性
Pa0	方向の分布特性
Pa1	
Pa2	
Pa3	
Pa4	
Pa5	
Pa6	
Pa7	

加速度センサのデータを例に挙げ、各特徴量の導出方法を述べる。センサから得られる各軸の時系列データを、 $a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_z(t)$ として表す。まず、この3つの時系列データから次のような3つの2次元ベクトル列に変換する。

$$\begin{aligned}
 A_1(t) &= (a_y(t), a_z(t)) \\
 A_2(t) &= (a_z(t), a_x(t)) \\
 A_3(t) &= (a_x(t), a_y(t))
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

これら3つの2次元ベクトル列から以下のように各特徴量を導出する。

P_d :動きの強さの特性

P_d は、動きの強さの特性を表し、式4.2のように各ベクトルの時間差分の総和で表せられる特徴量である。 S はベクトル $A(t)$ のデータ数であり、1ステップにおける加速度データの

サンプリング数に対応している.

$$P_d = \sum_{t=1}^{S-1} |\Delta A(t)| \quad (4.2)$$

$$|\Delta A(t)| = A(t+1) - A(t)$$

P_g :回転方向特性

P_g は動作の回転方向の特性を表すパラメータである. 各ベクトル間の外積を利用し導出する (式 4.3), 時間 $t+1$ におけるベクトルが時間 t におけるベクトルに対して, 反時計回りに移動した場合にのみ 1 が加算される.

$$P_g = \sum_{t=1}^{S-1} u(A(t) \times A(t+1)) \quad (4.3)$$

$$u(m) = \begin{cases} 1 & : m \geq 0 \\ 0 & : m < 0 \end{cases}$$

P_r :主動作の方向特性

P_r は, 動作の方向特性を示す特徴量である. 2次元平面上に描かれる S 個のベクトル全てを内包する矩形の縦横比が P_r となる. 縦軸成分のみ変化量が多い場合ほど値が大きくなる. y-z 平面の場合, 式 4.4 のような計算式となる.

$$P_r = \frac{Vt^+ - Vt^-}{Hr^+ - Hr^-} \quad (4.4)$$

$$Hr^+ = \max_S a_y, Hr^- = \min_S a_y$$

$$Vt^+ = \max_S a_z, Vt^- = \min_S a_z$$

$P_{a0} \ P_{a7}$:方向の分布特性

パラメータ $P_{a0} \ P_{a7}$ は, $\pi/4$ ごとの 8 方向へのベクトルの偏りを表す. 与えられたベクトルに対し, 一種のメンバーシップ関数を適用することで, ベクトルの密度を求めることが出来る. それぞれのパラメータは式 4.5 のように求める.

$$P_{an} = \sum_{t=1}^S F_n(\theta_t) \quad (4.5)$$

$F_n(\theta_t)$: n 方向成分のメンバーシップ関数
 θ_t : ベクトル $A(t)$ の角度
 $n = 0, 1, 2, \dots, 7$

メンバーシップ関数は図 4.10 のように、与えられたベクトルの角度 θ_t が、各主方向に一致する場合に最大値 1 となり、隣接する主方向までに単調減少する関数である。

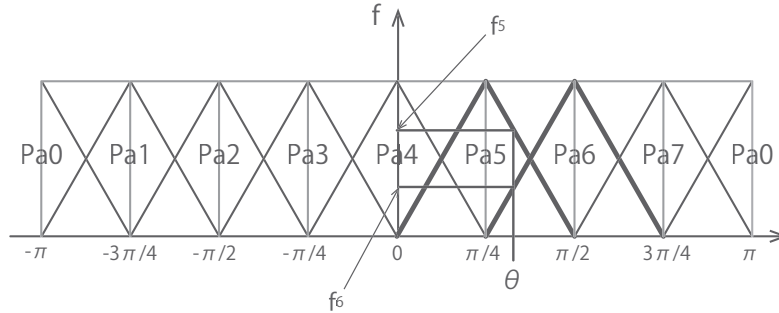


図 4.10: メンバーシップ関数

4.3.2 SVM による認識

SVM は教師あり学習であるため、システムの利用の前に学習データの準備が必要となる。モデルデータとして各ジェスチャと通常の歩行時のデータを、予めそれぞれ複数回分取得しておく。そして、取得したデータを用いて 4.3.1 で述べた手法により計算を行い、算出された特徴量を SVM の学習データとして利用する。

1 つのジェスチャは 66 個の特徴量により表せられるため、66 次元データの分類となる。また、本研究では、5 つのジェスチャを提案している。そのため、SVM により分類するクラス数は、通常動作も含めた 6 クラスとなる。SVM に利用する gamma 値等のパラメータは、グリッドサーチを行うことで算出している。システムの利用時には、取得したデータから算出した特徴量を、予め学習している SVM に適用することで識別を行う。

本研究では、SVM の実装のために SVM.NET² というライブラリを利用した。また、学習用データとして各ジェスチャに対し 100 回分、通常の歩行時の動作を 200 回分取得したものを利用した。

4.4 回転動作の認識

センサモジュールは、図 4.11 のように、Z 軸が足裏に対して垂直になるように取り付けられている。本提案手法において用いる回転動作は、膝から足首に沿った軸に対する回転動作であるため、センサの Z 軸に対する回転角が提案手法に用いる回転角と一致する。そのため、

²<http://www.matthewajohnson.org/software/svm.html>

センサから得られるZ軸の角速度データを積分することにより現在の回転角度を計算する。回転角は次式で計算される。

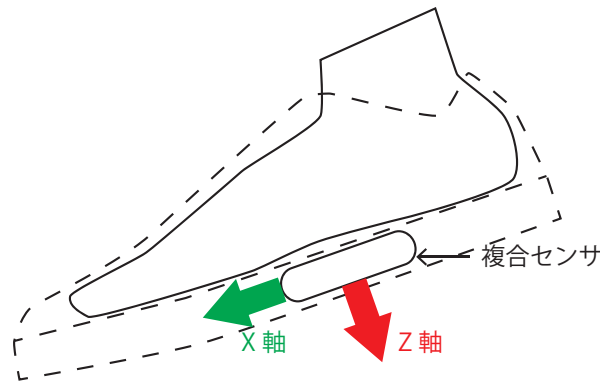


図 4.11: 複合センサの軸の方向

1ステップにおける回転動作を認識および角度の算出を行うアルゴリズムを図4.12に示す。取得する回転角は右回りが正の値となる。 θ_{max} は開始位置からの時計回り方向への最大角が保存される。 θ_{min} は左回りの方向への最大角である。足が接地状態から動作状態になると、回転角度の計算を開始し、次に接地状態になるまでの間、取得したZ軸の角速度の積分を行い角度を計算する(θ)。1ステップにおける回転角度は、1ステップ中の左右どちらかの最大角度が適用される。動作状態が終了した際に、右向きの回転角である θ_{max} と左向きの回転角 θ_{min} の大きさを比較し、大きい方が最大角度となる。通常歩行動作における僅かな回転は、回転動作として認識しないようにするために、最大角度が閾値(θ_f)より大きい場合のみ利用する。

また、歩行時は常に真っ直ぐに歩いていることはなく、進行方向は度々変化する。進行方向を帰る際には、1ステップの中で回転動作が起きてしまう。この時の特徴として、足を地面から離す際と、再び接地する際とでは角度が大きくことなる。そのため、接地時の回転角度を用いて回転角度に補正をかけることにより、進行方向の変更時にも対応し、通常の歩行動作が回転動作と誤認識されないようにする。

センサから得られる角速度データは僅かな誤差を含んでいる。積分により算出する方法では、積分を繰り返すことで誤差が大きくなり正確な値ではなくなってしまうといった問題がある。そのため、適当なタイミングで誤差を修正する必要がある。本提案手法は、歩行時の1ステップごとに入力を行う手法である。そのため、1ステップ間の足が接地したタイミングで角度を0にリセットし、さらにステップごとの間隔は長くともせいぜい1秒ほどであるため、角度を算出する際に大きな誤差が生じない。

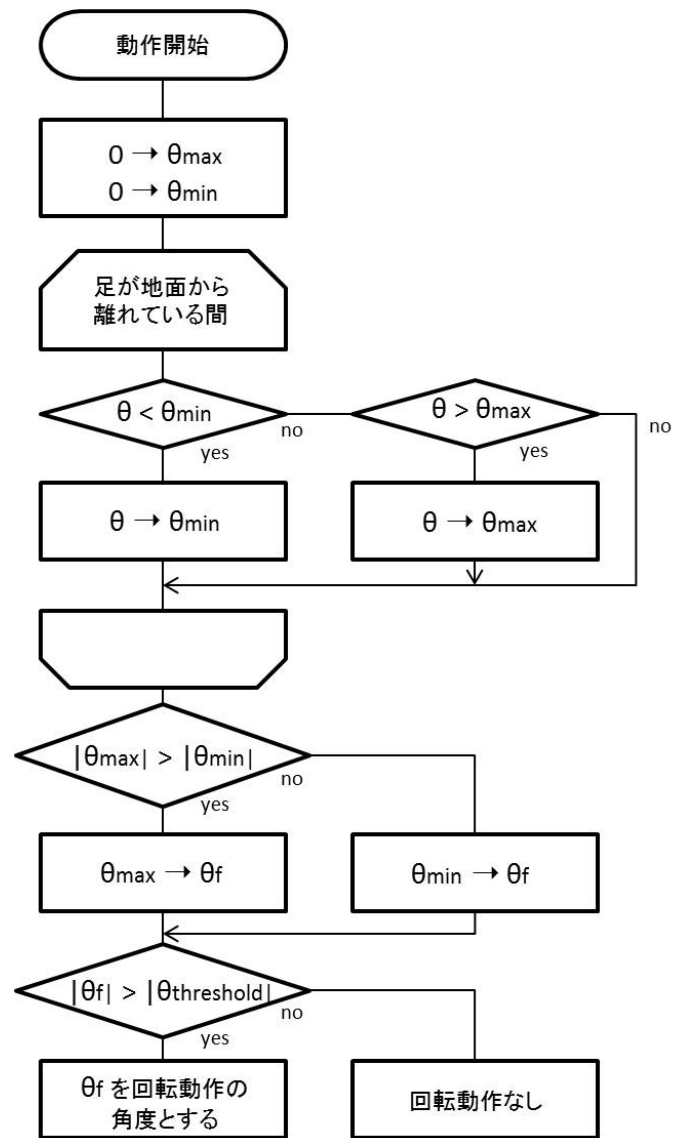


図 4.12: 回転動作の認識とその計算

4.5 アプリケーション：音楽プレイヤー

提案する各入力手法を利用したアプリケーションを設計，実装する．主要なアプリケーション例として音楽プレイヤーの操作アプリケーションを提案する．図4.13は実装したアプリケーションの画面である．尚，図のようにGUIによるフィードバックも実装したが，本アプリケーションは音によるフィードバックのみを利用した操作を想定しており，普段の移動時における音楽鑑賞において利用しているイヤホンからのフィードバックのみを用いて，操作デバイスを手に取る必要なく，足のみを利用した操作が可能となっている．各入力手法を利用した本アプリケーションの操作方法是，表4.3のとおりである．ジェスチャ入力には，再生や停止，曲送りなどの基本的な操作がそれぞれ割り当てられている．また，回転入力には音量調整が割り当てられており，回転量に応じた音量調整が可能になっている．左側に回転することにより，回転量に応じて音量が小さくなり，右側経の回転で音量が大きくなる．



左足	右足
つま先タップ: 次アーティスト	つま先タップ: 再生/一時停止
かかとタップ: 前アーティスト	かかとタップ: 停止
外振り: 前アルバム	外振り: 次曲
内振り: 次アルバム	内振り: 前曲
回転入力: 音量調整	回転入力: 音量調整

図 4.13: 音楽プレイヤー

表 4.3: 音楽プレーヤーの操作方法

入力方法		コマンド	
		左足	右足
ジェスチャ入力	つま先タップ	次アーティスト	再生/一時停止
	かかとタップ	前アーティスト	停止
	外振り	前アルバム	次曲
	内振り	次アルバム	前曲
回転入力		音量調整	音量調整

第5章 実験

本章では、本研究で行った各提案手法における認識実験とアプリケーションの試用による評価実験について述べる。各実験における被験者は、20代の情報系の大学院生4名である。

5.1 回転入力における認識実験

提案手法で利用する回転動作に関する認識実験を行った。本研究は、歩行時における足首の回転動作の利用を想定しているため、回転入力を利用したアプリケーションを設計する際には、歩行時の動作の特徴を考慮に入れた設計にしなければならない。通常、入力を意図しない1ステップの場合にも、自然とある程度の回転動作が起きている。また、360度すべてが利用できるわけではなく、物理的に回転可能な範囲も限られている。回転動作を利用したアプリケーションを設計する上では、これらの制限を考慮して設計する必要がある。そのため、予備実験では、以下の3つの項目を目的とする。

- 通常の1ステップにおける回転角の調査
- 回転動作に利用できる最大角の調査
- ユーザが使い分け可能な回転角の分解能の調査

これらの調査を行うため3つの実験を行う。

5.1.1 実験1：通常の1ステップにおける回転角の調査実験

実験内容

実験1では、普段通りに真っ直ぐに歩いた場合における、1ステップ中の回転角の変化量を測定する。被験者は、普段の歩く動作でまっすぐに20歩(各足10歩)連続して歩く、これを5セット行い、各ステップにおける回転角を記録する。

結果と考察

実験1において、通常のステップの回転角を測定した結果を表5.1に示す。発生する回転の方向は、ほとんどの被験者が内側にはあまり回転せず、外側に大きく回転していることがわ

かった。歩き方に細かな差があるため被験者ごとに生じる回転角に違いがあるが、通常歩行時にはおよそ $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ の範囲で回転しながらステップを踏んでいることがわかった。また、股傾向の人の場合、接地状態においてすでに外向きにある程度の角度で向いているため、ステップ中に大きく回転してしまい、回転角は比較的大きくなってしまいうようであった。

ステップにおける回転角を利用した回転入力を実アプリケーションに用いるときには、通常歩行時の動作は回転入力として扱わず、意図的に入力を行った場合のみに入力が行われるようにしたい。そのため、実験結果から得られた、通常歩行時に生じる可能性のある 20° ほどの回転幅は利用にはあまり適していないと考えられる。ただし、被験者によっては生じる回転角が小さく、利用者の普段の歩き方により差が生じるため、利用者に最適化するようなシステムを用いるならば、通常歩行時の回転角が小さい利用者は、より回転入力に用いる範囲が広がるようになる。

通常歩行時に生じる回転は、主に1ステップ中における、足を地面から離すときと足を前に出しきるときに大きく発生しているようであった。前に出した時の角度の変化は小さい場合でも、地面から離す際に大きく変化してしまう場合が見られた。回転入力を行う動作は、ステップの後半である足を前に出す際に行う場合がほとんどであるため、ステップ前半の回転を除外することで、意図しない回転入力を抑えられるのではないかと考えられる。

表 5.1: 通常のステップにおける回転角の測定結果

	平均角度 [$^{\circ}$]		最大角度 [$^{\circ}$]	
	内側	外側	内側	外側
被験者 A	2.5	13.5	3.1	21.6
被験者 B	4.5	9.1	8.2	19.0
被験者 C	2.4	12.1	5.4	18.8
被験者 D	3.3	6.85	7.1	12.6

5.1.2 実験2：回転動作に利用できる最大角の調査実験

実験内容

実験2では、回転動作を用いて動かすことの出来る角度の範囲を測定する。被験者は、以下の手順に従って実験を行う。

- 1 デバイスを取り付けた右足のステップを踏む際に、外側に可能な限り大きく足首を回転させて、20歩連続して真っ直ぐ歩く。
- 2 右足のステップを踏む際に、内側に可能な限り大きく足首を回転させ、20歩連続して真っ直ぐ歩く。
- 3 1,2を2セット繰り返す。

- 4 立ち止まった状態で、右足が正面に向いている状態から外側に可能な限り大きく回転させ、また正面に戻す、という動作を 10 回行う。
- 5 立ち止まった状態で、右足が正面に向いている状態から内側に可能な限り大きく回転させ、また正面に戻す、という動作を 10 回行う。
- 6 4,5 を 2 セット繰り返す。

結果と考察

回転動作時に入力可能な最大角度を測定した結果を表 5.2 に示す。立ち止まった状態におけるすべての被験者の結果の平均は、外側が 89.9° 、内側が 73.4° となった。対して、歩行時には、外側 79.7° 、内側が 69.5° と立ち止まった状態と比較すると回転可能な範囲が小さくなっていた。立ち止まった状態では、回転入力を行う際に、上半身の動きも利用することで大きな角度が入力可能となるが、歩行状態では姿勢にある程度制限がかかるため、回転可能な範囲は減少してしまうと思われる。また、外側の回転に比べ内側の回転角は小さくなった。この結果から回転入力では、およそ 150° ほどの範囲が利用可能であることがわかった。また、実験 1 において通常歩行時の回転が $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ほど生じていることから、実際に利用可能な角度は左右合計 130° ほどであると考えられる。

歩行時の回転入力には、接地時の足の向きに対する動作時の足の向きの角度を利用して、入力するための動作として、足首を大きくひねり足の向きを変える動作と動かす脚全体をひねることにより足の向きを変える動作の 2 種類の方法による入力が多く見られた。前者は脚全体の軸の動きは通常歩行時に近い動作となっており、後者は足先を一定の方向に蹴り出すような動作となる。本実験においてそれぞれの方法で回転を試みている場面があったが、足首のみを大きく利用する方法では大きな回転角は得られず、後者の蹴るような動作を利用した場合は比較的大きな角度が得られていた。

表 5.2: 可能な限り大きな角度を入力した結果

	立ち止まり時の平均角度 [$^{\circ}$]		歩行時の平均角度 [$^{\circ}$]	
	内側	外側	内側	外側
被験者 A	64.0	103.0	63.1	72.6
被験者 B	73.7	74.9	63.6	74.8
被験者 C	76.3	96.1	76.1	80.6
被験者 D	79.5	85.4	75.3	90.6

5.1.3 実験3：使い分け可能な回転角の分解能の調査実験

実験内容

回転動作によるメニュー選択アプリケーションにおいて、メニュー項目の分割数を変更した際に、使い分け可能な最大の分割数を調査する。被験者は図 5.1 のように表示されているノート PC を手に持ち、以下の実験を行う。回転入力に用いる回転角の範囲は、図 5.1 において扇状に並べられた青、又は黄色と赤で表示されている項目に対応する範囲である。この角度の範囲は、実験 1 と実験 2 の結果を反映しており、通常歩行動作における回転角となる可能性のある範囲を除き、歩行時に利用可能な最大回転角の範囲を用いている。

被験者は、まず扇状メニューに対する回転入力を試用を行う。数分間試用した後、ある程度慣れたところで、以下に示す手順に従って実験を行う。

- 1 右足でステップを踏む際、黄色に表示された項目の角度に一時的に足首を回転させながら歩く。黄色に表示される項目は、ステップごとにランダムで決定される。また、ユーザが入力した項目は、フィードバックとして一時的に赤色に変化し表示される。
- 2 指定する左右のマス目の角度の分割数を 4, 6, 8, 10 と変更し 1 の動作をそれぞれ分割数 × 10 回行う。
- 3 立ち止まった状態において、分割数が 4, 6, 8, 10 の場合の選択操作をそれぞれ分割数 × 10 回行う。

結果と考察

実験 3 において、一定角度ごとに区切られたメニューインタフェースの操作を行う際に、ユーザが使い分け可能な分割数の調査を行った結果を表 5.3 に示す。立ち止まった状態と歩行時のどちらも、片側 2 つずつの 4 分割における選択は正答率が高く、容易に使い分けが可能であると思われる。片側 3 つずつの 6 分割における入力では、4 分割よりも正答率は少し落ちるものの十分選択が可能な分割数であると考えられる。また、繰り返し入力を行うことで、後半における入力では誤選択回数が減少していた被験者もいるため、さらに入力に慣れてもらった後に実験を行うことで、より正確に選択が可能になるのではないかとと思われる。また、実験の手順において、1 ステップごとに選択を行っており、入力ごとの時間間隔が短くなっていたため、繰り返し入力することで反応が遅れてしまうといったことや、目標となるマスと選択したマスを間違えてしまうといったことがあり、実験環境が原因で正答率を下げていることがあった。そのため、実際の正答率とは異なることが考えられるので、再度実験環境を整えて確認する必要があるかもしれない。

8 分割、10 分割では 6 分割までと比較し正答率が低く、誤入力が多くなってしまった。また、動作を行う際にも、少ない分割数の時と比べ、少しゆっくりと慎重な動作で行なっていた様子もうかがえた。そのため、8 分割以上の高い分割数における入力は、気軽にいつでも使

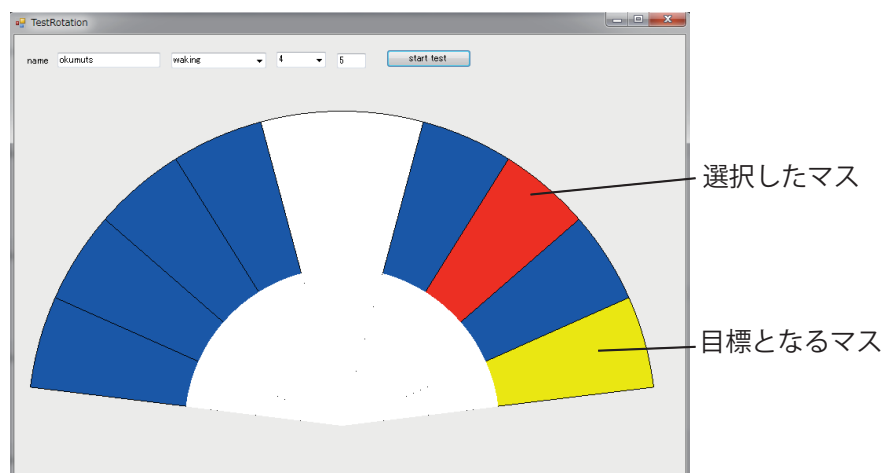


図 5.1: 実験 3 に用いるテスト画面の表示

うような入力にはあまり利用できないのではないかとと思われる。歩行時は立ち止まった状態と比較すると基本的に正答率は減少したが、分割数の少ない場合には立ち止まった状態に近い精度で入力を行なっている場合が多くあった。以上のことから、ユーザが使い分け可能な分割数は 6 分割以下であると思われる。

次に、実験中において見られた足の動作の特徴について述べる。前小節でも述べたように、歩行時の回転入力には大きく 2 通りの動作が用いられていた。選択に用いる足の動かし方は、被験者ごとに各々が最も選択を行い易い動作を使用してもらった。始めは足首を大きく捻る動作により選択を試みていたが、次第に、つま先で目標のマスに向かって蹴るような動作で選択を行うようになる被験者もいた。足全体で蹴る動作は、軸が大きいため正確な入力を行いやすいようであった。立ち止まった状態における足の動かし方においても特に指定はしなかったが、踵を常に地面につけ、踵を軸とした回転動作を行っていた。

表 5.3: メニューインタフェースにおける分割数ごとの認識精度

状態 分割数	立ち止まり時				歩行時			
	4	6	8	10	4	6	8	10
被験者 A	0.93	0.75	0.56	0.45	0.84	0.75	0.26	0.16
被験者 B	0.80	0.70	0.45	0.25	0.68	0.66	0.25	0.23
被験者 C	0.95	0.90	0.63	0.44	0.95	0.87	0.68	0.68
被験者 D	1.00	0.95	0.71	0.52	0.95	0.84	0.62	0.40

5.2 ジェスチャ入力に関する実験

ジェスチャ入力に関する認識実験を行った。ジェスチャを用いた入力はそれぞれを正確に使い分けられるかどうかことが重要となる。そのため、本研究で提案するジェスチャ入力に関して、それぞれのジェスチャを行った際の認識精度を測定するための実験を行う。本実験におけるジェスチャ入力の認識に利用した SVM の教師データは、筆者 1 名が各入力、および通常歩行時のステップを 100 回ずつ行ったデータを利用している。

5.2.1 実験内容

被験者は図 5.2 に示すウィンドウが表示されたノート PC を手に持ち実験を行う。中央に表示されるジェスチャは、次に入力するジェスチャを示し、下に表示されるジェスチャは、被験者が実際に入力して認識されたジェスチャを示している。また、上部の数字は次にジェスチャ入力を行うまでの歩数を示している。

はじめに、被験者にそれぞれのジェスチャの動作を実例で示す。その後、数分間システムを用いて、各ジェスチャにある程度なれるまで練習を行う。被験者は、中央にランダムに選ばれ表示されたジェスチャを 3 ステップごと行う。その際に入力されたジェスチャはフィードバックとして下側に表示される。これを連続で 100 回 (各ジェスチャ 20 回) 行い、入力したジェスチャの正誤率を測定する。

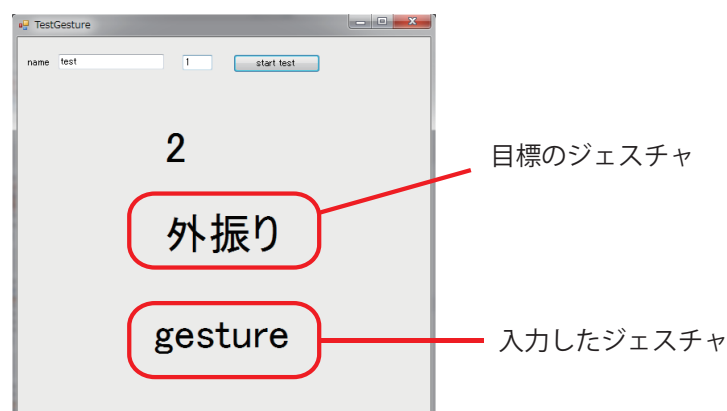


図 5.2: ジェスチャ入力に関する実験に用いるテスト画面の表示

5.2.2 結果と考察

ジェスチャ入力を行い、提示されたジェスチャと入力し認識されたジェスチャの正誤率を測定した結果を表 5.4 に示す。全体の認識結果では、すべての被験者が 80%以上の割合で正

しく入力を行っており、比較的高い認識率を得ることができた。尚、被験者 D は筆者自身であり、筆者の動作は認識システムにおける教師データに利用されている。そのため、実験中も学習に用いた動作と十分に似た動作になり、被験者 D の正誤率が他の被験者と比較して高くなったと考えられる。

ジェスチャごとの識別結果では、外振りジェスチャが他のジェスチャの認識精度と比べて低くなってしまった。特に、内振りジェスチャとの誤認識が多くあった。これは、ジェスチャの行う際に被験者ごとに足元の動作が異なっていることが原因であると考えられる。被験者の動作を観察していると、足を外側に振る際に、足のかかと側から外に動かす場合、つま先から外に動かす場合、足全体をそのまま横に動かす場合の 3 通りの動作が見られ、被験者ごとに異なった方法を行っていた。それぞれの動作は、足全体の動作としては近く加速度データはある程度近い値を示すが、かかとから先に出す場合とつま先から先に出す場合とでは、回転方向が逆になってしまい角速度データに大きく違いが生じる。教師データに用いた動作は 1 人の動作であるため、その動作のほとんどが 3 つの内の特定の 1 つに属していると考えられ、被験者によってその動作と異なることで大きく認識率が下がってしまうと考えられる。また、回転方向が逆になることから、角速度の特徴量が内振りと近くなり打ち振りジェスチャとして誤認識されたと考えられる。これらを改善する方法として、複数人の動作を教師データとして利用することにより改善されるのではないかと考えられる。人物ごとに僅かに異なった動作をそれぞれ教師データとして用いることにより、幾つかのパターンの動作に対応した認識が行えると思われる。

ジェスチャ別の認識結果において、つま先タップとかかとタップは高い認識率を得ることができた。地面を叩くという動作が特徴的であることと、外振りなどジェスチャとは異なり横への回転が生じないために、被験者ごとの動作の差異が小さくなることから、認識率が高くなったと考えられる。

表 5.4: ジェスチャ入力を行った際に正しく入力できた割合

	つま先タップ	かかとタップ	後ろ振り上げ	内振り	外振り	全体 [%]
被験者 A	0.95	1.0	0.85	0.80	0.50	0.82
被験者 B	0.95	0.80	0.70	0.70	0.85	0.80
被験者 C	1.0	0.95	0.90	0.90	0.60	0.87
被験者 D	1.0	0.95	0.95	1.0	1.0	0.98
平均	0.98	0.94	0.85	0.86	0.71	88.2

5.3 アプリケーション試用実験

提案手法を利用したアプリケーションを用いた試用実験を行う。

5.3.1 試用内容

試作した音楽プレーヤー操作アプリケーションを用いて試用実験を行う。被験者には試用前に実験の説明と提案手法を用いたアプリケーションの操作方法についての説明を行う。試用の初期の段階は、操作方法を覚えてもらうために、ノート PC を手に持ち、操作方法など視覚的フィードバックのある状態で利用してもらう。その後、イヤホンからの音声フィードバックのみの環境でアプリケーションを 10 分以上試用してもらい、被験者の任意のタイミングで終了してもらう。試用後、各入力手法やアプリケーションに対する意見聴取を行う。

5.3.2 試用結果

アプリケーションの試用を行い、各入力手法について意見聴取を行った結果を述べ、考察を行う。

アプリケーションにおいて利用したジェスチャ入力について以下のような意見が得られた。

- 通常歩行時との区別がしやすく認識精度もいいと感じた。
- タップ動作は歩きながらでも行いやすいと感じた。
- 思っていたよりやりやすく、通常歩行時の誤認識もなく使えると思う。
- 外振りがやりづらいと感じた。
- 外振りは歩行の妨げになるかもしれない。

ほとんどの動作は歩きながらでも利用がしやすく、歩行自体の妨げにあまりならないようであった。また、現在は直線歩行のみであるが、通常の歩行時に誤認識があまりないため、入力を行いたいと意識した時のみ入力が行えることで利用しやすいといった意見や、予想していたよりも入力しやすいといった意見がいくつか得られた。しかし、動作の中で特に外振り動作は利用しづらいようであった。動作自体が行いづらいという意見と、その動作が他人や自らの歩行動作の妨げになってしまうのではないかと意見が得られた。外振り動作においてネガティブな意見や評価が低い原因として、前節における実験の結果において述べたように、外振り動作が他の動作よりも認識率が低くなってしまうことが 1 つ挙げられる。認識率が低いために、次曲の選択をする場合などの外振り入力を行う際に、何度も入力を試みて正しく認識されるようにすることで、次第に動作が大きくなってしまっていた。そのため、体全体の重心が動いてしまい歩行の妨げになったのではないかと考えられる。また、動作が大きいことで大きく外に足が出てしまうので、周囲の人への影響を心配する意見が得たのではないかと考えられる。よって小さい動作でも正しく認識されるようにシステムを修正することで改善されるのではないと思われる。

回転入力について以下のような意見が得られた。回転入力は施策アプリケーション内では音量調整に利用している。

- 外側は楽に回転することができる。
- 思った方向に足をだすだけだから、自然に入力が行える。
- 内側は入力しづらいと感じた。
- 動作を行なっていないときに入力が起こっている時があった。
- 最大の角度が入力しづらい。
- 連続して入力するとうまく入力できない。

小さい角度の入力では、歩行時にとても自然に行えるようであった。しかし、意図しない回転入力が発生する場合もあり、システム側の通常歩行時との区別が正しく出来ていないようであった。また、大きい角度の入力を行う際には、特に内側が入力しづらいと感じる場合が多かった。実際に、内側に大きく回転を行なっている被験者の様子を観察すると、体全体を捻るように入力を行なっている場合や、一度完全に立ち止まるようにして入力を行なっている場合がみられ、本来の歩行動作に大きく影響が出ているようであった。システム側で意図している最大の回転量よりも大きな角度で入力しようとしているようであった。これは、利用している最大の角度をユーザが認識できないために、必要以上に大きく動作を行なってしまうと考えられる。そのため、音声フィードバックなどの場合においても、ユーザに利用角度の範囲を認識させる仕組みが必要であることがわかった。

音楽プレーヤー操作アプリケーションに対しては次のような意見が得られた。

- 画面を見ずにいろいろな動作が行える。
- 音楽プレーヤーのほとんどの動作がひと通り行えて良い。
- 動作を覚えるのが大変だった。
- 曲数が多いと選択するのが大変になる。

足の動作のみで多くの入力が行なえ、再生から曲選択、音量調整までひと通り行えるので、ハンズフリーの入力が行えて便利になるという意見が幾つか得られ好評であった。従来の研究において例示されている音楽プレーヤーの操作では、曲のスキップのみなど一部の機能しか実現できていないことから、提案した入力手法を利用することは大きなメリットとなるのではないと思われる。しかし、入力の種類が多いために、動作を覚えるのが大変であると感じる場合もあった。アプリケーションを長期間利用することにより操作を覚えることは可能であるが、習得のしやすさという点では今後の課題である。また、曲数が多い場合は選択に時間がかかってしまうと意見があった。現在は、アーティスト、アルバム、曲とそれぞれにおいて、次のアイテムの選択が行えるが、数百のアーティストの選択となると、現在のアプリケーションの操作方法での利用は難しい。提案する入力手法では多くの入力が行えるので、これを利用した多くのアイテムの効率の良い選択手法などを設計することも今後の課題である。

第6章 まとめ

本研究では、歩行時における足の動きによる歩きながらの入力を可能にする入力インタフェースの設計および実装を行った。動作を認識する手法として、各足に3軸加速度センサ、3軸角速度センサを取り付け、歩行時の各データの推移から推定する手法を採用した。ジェスチャ入力と回転入力の二種類の入力方式を設計し実装を行った。回転入力に関する各実験からユーザが利用可能な回転動作の範囲を調べることができた。また、回転入力におけるおおよその分解能を調べた。これらの結果から回転入力を用いた扇状のメニューインタフェースを利用する場合、一度に選択可能なメニューの個数は6個程度が妥当だと考えられる。ジェスチャ入力における実験では比較的高い認識率を得ることができたが、外振り動作の認識率が低く、大きな重心移動が生じてしまうなど歩行の妨げとなってしまうことがあった。試作したアプリケーションを利用した試作実験では、ジェスチャの入力の行いやすさや各入力手法が大きく歩行の妨げにならなかったなど一定の評価を得ることができた。本研究にて提案した入力動作により、移動時においても足による多様な入力が可能となることがわかった。

今後の課題として、認識精度の改善やより様々な歩行環境に対応できるようにシステムをしていくことがあげられる。まず、ジェスチャ入力などの認識精度を向上させることにより、小さな動作での利用が可能となるなど、動作の利用のしやすさを改善できるのではないかと考えられる。また、実際の移動環境では、方向転換や階段の上り下りなど様々な状況が想定される。現在の実装では、基本的に直線的な移動にしか対応していない。ジェスチャ入力に関してはある程度歩行環境が変化した場合にも利用が可能となるが、回転動作は方向転換などの場面での利用は難しい。そのため、こういった様々な状況に対応した実装が今後の課題となる。また、開発した入力手法を利用したさらに有用なアプリケーションの提案も行なっていきたいと考えている。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，指導教員である高橋伸准教授をはじめ，田中二郎教授，三末和男准教授，志築文太郎講師，Simona Vasilache 助教にはゼミやミーティングを通して大変貴重なご意見，アドバイスを頂きました。深く御礼申し上げます。また，田中研究室の皆様にはゼミや日常生活の中で数々のご意見をいただきました。特に，ユビキタスチームの皆様にはゼミ以外にも研究生活全体にわたって数多くのご意見やご指摘をいただきました。心より感謝いたします。そして最後に，大学生活を送る中，経済面や精神面にわたっても支えてくれた両親や，大学生活を共に過ごし様々な面でお世話になった全ての友人に心より感謝いたします。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Thomas Augsten, Konstantin Kaefer, René Meusel, Caroline Fetzner, Dorian Kanitz, Thomas Stoff, Torsten Becker, Christian Holz, and Patrick Baudisch. Multitoe: high-precision interaction with back-projected floors based on high-resolution multi-touch input. *UIST '10: Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 209–218, 2010.
- [2] 鈴木茂徳. フットワークインタラクションのための測域センサによる足の位置・動作の認識手法. 修士論文, 2010.
- [3] 田中則子, 上田知生, 中尾恵, 佐藤哲大, 湊小太郎, 吉田正樹, 瀬瀬和美. 足指マウス開発にむけての基礎的検討-母指の運動特性-. 生体医工学, Vol. 43, No. 4, pp. 790–794, 2005.
- [4] J.J. LaViola Jr, D.A. Feliz, D.F. Keefe, and R.C. Zeleznik. Hands-free multi-scale navigation in virtual environments. *I3D '01: Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, pp. 9–15, 2001.
- [5] 増野智経, 齋藤豪, 高橋裕樹, 中嶋正之. Waraji:仮想環境のための足を用いた入力インタフェース (論文<小特集>ヒューマンインタフェース). 映像情報メディア学会誌: 映像情報メディア, Vol. 54, No. 6, pp. 833–839, 6 2000.
- [6] 塚田浩二, 安村通晃. Ubi-finger: モバイル指向ジェスチャ入力デバイスの研究 (<特集>インタラクション技術の革新と実用化). 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3675–3684, 2002.
- [7] 山本哲也, 庄司武, 寺田努, 塚本昌彦, 義久智樹. ウェアラブルコンピューティングのための手足を使った状況依存コマンド入力手法 (セッション 1, <特集>新領域創造インタラクション). 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. 2009, No. 28, pp. 17–23, 3 2009.
- [8] 塚田浩二, 安村通晃. Active belt:触覚情報を用いたベルト型ナビゲーション機構 (ウェアラブル/ユビキタス・コンピューティング)(<特集>「インタラクション:理論, 技術, 応用, 評価」). 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 11, pp. 2649–2658, 2003.
- [9] 福本雅朗. どこでもタップ: 装着部位を問わないウェアラブル機器用入力機構. インタラクション 2007 論文集, pp. 171–172, 2007.

- [10] Thad Starner Jake, Jake Auxier, and Daniel Ashbrook. The gesture pendant: A self-illuminating, wearable, infrared computer vision system for home automation control and medical monitoring. *FISWC '00: 10th International Symposium on Wearable Computing*, pp. 87–94, 2000.
- [11] 藤木健史, 浦西友樹, 佐々木博史, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. ウェアラブルコンピュータにおけるリング型デバイス ”ubi-wa” の提案. 第 53 回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, pp. 157–158, 2009.
- [12] 杉本千佳, 長井宏和, 江副亮介, 保坂寛, 佐々木健, 板生清, 龍田成示. ウェアラブルセンサによる行動認識システムの開発 (研究). *マイクロメカトロニクス*, Vol. 51, No. 197, pp. 1–12, 12 2007.
- [13] Jeremy Scott, David Dearman, Koji Yatani, and Khai N. Truong. Sensing foot gestures from the pocket. *UIST '10: Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 199–208, 2010.
- [14] 大島一将, 石田泰之, 木實新一, 戸辺義人. 靴型ヒューマンブローブ実現に向けた圧力センサと加速度センサの適用可能性の検討 (ユビキタス・モバイルコンピューティング, 一般論文). *情報科学技術フォーラム講演論文集*, Vol. 8, No. 4, pp. 251–252, 9 2009.
- [15] Yuichiro Takeuchi. Gilded gait: Reshaping the urban experience with augmented footsteps. *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, Vol. UIST '10, pp. 185–188, 2010.
- [16] Martin Frey. Cabboots: Shoes with integrated guidance system. *TEI '07: Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, pp. 245–246, 2007.
- [17] 渡邊淳司, 安藤英由樹, 朝原佳昭, 杉本麻樹, 前田太郎. 靴型インタフェースによる歩行ナビゲーションシステムの研究 (ユーザインタフェース). *情報処理学会論文誌*, Vol. 46, No. 5, pp. 1354–1362, 5 2005.
- [18] Hermann Haken. 脳機能の原理を探る: 非平衡協同現象としての脳神経活動・行動・認識. シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000.
- [19] Nile + iPld. <http://www.Apple.com/jp/Ipod/Nike/run.Html>.
- [20] 大平茂輝, 長尾確. 身体リズムに適応したウォーキング/ジョギング中の音楽再生支援システム. 第 21 回人工知能学会全国大会論文集, 2007.
- [21] 山本哲也, 塚本昌彦, 義久智樹. 情報機器利用のための足ステップ文字入力方式 (どこでもわくわくどきどき/モバイルインタラクション, <特集>どきどきわくわくインタラクション). *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*, No. 99, pp. 33–38, 2007.

- [22] Boris Smus and Vassilis Kostakos. Running gestures: Hands-free interaction during physical activity. *Ubicomp '10: Proceedings of the 12th ACM international conference adjunct papers on Ubiquitous computing*, pp. 433–434, 2010.
- [23] 澤田秀之, 橋本周司, 松島俊明. 運動特徴と形状特徴に基づいたジェスチャー認識と手話認識への応用 (<特集>次世代ヒューマンインタフェース・インタラクション). 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 5, pp. 1325–1333, 1998.