

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

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

鈴木 茂徳

(コンピュータサイエンス専攻専攻)

指導教員 田中 二郎

2010年3月

概要

いつでもどこでもコンピュータを利用することができるというユビキタスコンピューティングの概念が一般に普及すると同時に、それを実現するテクノロジーが数多く登場している。これらの状況に伴い、壁や床、テーブルやデスクの甲板、窓など、我々の日常生活中に存在する平面をインタラクションに用いる研究が行われるようになってきている。本研究では、このようなインタラクション平面として床面に着目し、これまで静的であった足のインタラクション方法に代わる、様々な足の動きを利用した床面とのインタラクション手法であるフットワークインタラクションを提案する。

本研究ではこの足の動きの認識に測域センサを用えることで、動作をロバストに認識する方法を開発した。またこのインタラクション手法を利用するアプリケーションの開発し、複数人による試用を行った。試用を通じて、足の動きによる運動性を取り入れた入力の有効性を示唆する意見を得ることができた。

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景と問題点	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	床面に対するインタラクション	3
2.1.1	圧力センサを利用する方法	3
2.1.2	コンピュータビジョンを利用する方法	4
2.1.3	特殊な装置を身につける方法	5
2.2	測域センサによるインタラクション手法	6
第3章	フットワークインタラクション	9
3.1	測域センサによるインタラクション平面	9
3.2	ジェスチャの認識	9
3.2.1	タップ動作	10
3.2.2	スライド動作	11
3.2.3	足踏み動作	11
3.2.4	足の向きの変更動作	12
3.3	拡張性	12
第4章	実装	14
4.1	ハードウェア	14
4.2	測域センサによる足の検出	15
4.2.1	背景差分	15
4.2.2	オブジェクトの抽出とクラスタリング	16
4.2.3	オブジェクトのトラッキング	16
4.2.4	断片軌跡の結合	17
4.2.5	足の向きの取得	18
	Graham 走査のアルゴリズム	19
	凸包を囲む最小矩形を求める	19
	矩形の長さと幅を利用してオブジェクトの向きを求める	20

4.2.6	ジェスチャ機能の実装	20
	タップ動作	20
	足のスライド動作	21
	足踏み動作	22
	向きの変化	22
4.3	アプリケーション	23
4.3.1	サッカーゲームアプリケーション	23
4.3.2	フォトビューアアプリケーション	24
4.3.3	音楽再生アプリケーション	25
第 5 章	評価	27
5.1	実験	27
5.1.1	予備実験	27
	予備実験の反応	27
5.1.2	システムの設計	28
5.1.3	システムの試用	29
5.1.4	考察	30
第 6 章	結論	32
	謝辞	33
	参考文献	34

目次

2.1	MagicCarpet	4
2.2	Wisdom Well	5
2.3	Super-Feet	6
2.4	Laser Wall	7
2.5	FogScreen	7
3.1	測域センサの設置イメージ	9
3.2	タップ動作	10
3.3	タップ動作による足の裏の接地面の変化	10
3.4	スライド動作	11
3.5	足踏み動作	12
3.6	向きの変更動作動作	13
4.1	システムのハードウェア構成	14
4.2	UBG-04LX-F01 の外観 (左) と床に埋め込むようなセットアップ (右)	15
4.3	背景統計量による背景領域の抽出	16
4.4	フレーム間でのオブジェクトのオーバーラップ	17
4.5	断片軌跡の結合	18
4.6	断片軌跡が結合した例	18
4.7	センサと足の位置関係による検出領域の変化	19
4.8	検出点群を囲む最小矩形と長さの関係	20
4.9	タップ動作を認識した場合の例	21
4.10	スライド動作を認識した場合の例	21
4.11	足踏み作を認識した場合の例	22
4.12	向きの変更動作を認識した場合の実例	23
4.13	サッカーゲームアプリケーション	24
4.14	フォトビューアアプリケーション	25
4.15	音楽再生アプリケーション	26
5.1	試用実験のセットアップ	29
5.2	試用実験の様子	30

第1章 序論

1.1 本研究の背景と問題点

Mark Wisler により示唆された、日常生活にコンピュータが遍在しいつでもどこでもコンピュータを利用することができるというユビキタスコンピューティングの概念 [1] は、それを実現するテクノロジーの登場に伴って一般に普及しつつある。これらの状況に伴い、壁や床、テーブルやデスクの甲板、窓など、我々の日常生活中に存在する平面をインタラクションに用いる研究が行われるようになってきている。これらの平面を用いて人がインタラクションを行うためには、体のどの部位を用いて、どのようなジェスチャを行うかを適切に設計することが求められる。

本研究では、このようなインタラクション平面として床面に着目する。床面をインタラクション平面として用いることにより、システム利用者は足を中心とした身体的動作を介してコンピュータの能力を利用することが可能になる。これらは主にゲーム [2] やダンス [3] など身体的パフォーマンスの分野で応用されてきたが、近年は広告 [4] や教育 [5]、複数人でのコミュニケーション [6] など様々な分野への応用が試みられるようになってきている。

従来、床面を利用したインタラクションの研究では、圧力センサを埋め込みんだタイルを床に設置する方法、コンピュータビジョンを利用する方法、利用者が特殊な装置を身につける方法などが試みられている。圧力センサを床に埋め込む方法は、圧力を検知するセンサを均等に埋め込んだセンサフロアマットを設置する方法で、その上に立つユーザの足の位置や重心などを求めることができる。コンピュータビジョンを利用する方法では、特徴抽出によりユーザの位置をトラッキングすることで、ユーザのいる位置に応じたフィードバックを返すことができる。利用者に装置を身につけさせる方法は、ユーザの識別が行いやすい点、サービスの提供をユーザ自身に限定できる点などがメリットであるほか、コンピュータビジョンにおける認識を助けるマーカなどを事前に身体に着けてもらうこともできるため、比較的容易に頑健な認識を行うシステムを構築できる。

これらの従来手法では主に床を踏むことや重心を移動させることをインタラクションに利用している。そのため本来自由に取ることができる、飛び跳ねる、物を蹴るなどの足の動きが積極的に利用されないことが共通の問題点となっている。さらに、これらのアプローチはそれぞれ問題点が存在する。センサを組み込んだタイルを設置する方法では、足の圧力に反応するセンサをタイルに一定以上の密度で埋め込むこと、およびそれを設置面積だけ用意することが強いられる。また、これらのタイルの多くは大型であり、形状の変更も困難であることから、設置場所がしばしば移動するような環境における利用は好ましくない。コンピュータビジョンの場合は照明変化や人によって履き物の色が異なることなどから、足の動きだけ

を口バストに抽出することが難しい点で問題がある。利用者に特殊な装置を身に付けさせる方法では、システム利用者が装置の装着者に限定されてしまうため、様々な人が通行に利用する床面に対するインタラクションとして好ましくない。

1.2 本研究の目的

1.1 節の問題点を踏まえ、本研究の目的として以下の2点を挙げる。

1. 足の運動性を積極的に取り入れたインタラクション手法の設計を行う
2. 容易に設置可能なセットアップによる、足の動作の認識手法の検討と試作を行う

本研究ではこの足の運動性を取り入れたインタラクション手法としてフットワークインタラクションを設計する。また設置の容易さを踏まえたセットアップとして測域センサを利用する方法を提案し、実際に実装を行う。最後にアプリケーションへの応用と試用を通じて提案手法の有効性を考察する。

1.3 本論文の構成

本論文では、まず本章において本研究の背景を述べ、本研究の目的を示す。続く第2章では、床面へのインタラクションに関する研究を紹介する。第3章では、本研究で実現するインタラクションとしてフットワークインタラクションを定義し、その中で用いるジェスチャの詳細について述べる。第4章では、第3章において提案した手法を実現するための実装方法について述べる。第5章では、第4章で実装したシステムを複数人に試用してもらい、提案手法について考察を行う。第6章では、以上の各章での提案や考察を踏まえ、結論を述べる。

第2章 関連研究

2.1 床面に対するインタラクション

本研究では日常に存在する床をインタラクションのための平面として利用する。よって、ここではIwataらのように床そのものを可動式にしてしまうアプローチ [7] ではなく、日常見られる床の特性を維持しつつ、床に対する動作をセンサによって検出するアプローチに着目する。このようなアプローチによる床面を利用したインタラクションとして、圧力センサを埋め込みんだタイルを床に設置する方法、カメラ映像を利用する方法、利用者に特殊な装置を身につけさせる方法を紹介する。

2.1.1 圧力センサを利用する方法

床面に対するインタラクションを実現する方法で最も直接的な認識手法が圧力センサを利用する方法である。これは圧力センサを組み込んだタイルを床に設置し、上に乗るユーザの足から床面が受ける圧力を利用することでインタラクションを行う手法である。Paradisoらによる MagicCarpet[8] は、カーペット上のユーザの足の位置と着地の衝撃力を検知することで、ユーザの移動の追跡を行っている (図 2.1)。また Griffithらによる LiteFoot[9] は、センサを組み込んだ平板を床に設置することでユーザの足の運動を認識している。これらの研究はともにその上でパフォーマンスを行うダンサーの動きに合わせてサウンドを再生するなど、演技の演出などのために補助的に用いられることを想定している。

近年では、このような圧力を利用した方法はユーザにビジュアルなフィードバックを提供することによって誰でもが利用できるアプリケーションとして普及するようになってきた。[5] や [6] などの研究はその例である。

一方、圧力センサによる方法は単純にその上のユーザの位置や移動を検知する以外の目的でも利用されている。Orrらによる Smart Floor[10] では、足によるセンサにかかる圧力の分布と遷移を検知することで、その上にいるユーザが誰であるかを判別する手法を開発している。Yinらによる FootSee[11] や市販のバランス Wii ボード [12] などでは、足がセンサに及ぼす力の分布から体の重心を求めることを可能にしている。これにより足の状態のみならず、上半身の動きの認識などが可能となっている。



図 2.1: MagicCarpet

2.1.2 コンピュータビジョンを利用する方法

圧力センサを利用した方法よりも滑らかで自然な動作を検出することができるのがコンピュータビジョンを用いた方法である。これらは一般にインタラクション面全体の検出が可能な配置に認識用のカメラを設置し、背景差分や特徴点抽出による方法などでユーザの位置を検出し、それに対応する動作を行う。

Krogh らによる iFloor[13] や Nielsen らによる MultiLightTracker[14]、あるいは EyeStep[4]などは、床面に対してビジュアルフィードバックを与えるため、プロジェクタとユーザの位置認識用のカメラをととも天井に設置したセットアップにより構成される。このようなセットアップを利用することで障害物や他ユーザによるオクルージョンを回避する狙いがあるが、ユーザ自身の上半身による下半身のオクルージョンなどが発生する。よってこの方法では足の領域のみをロバストに抽出することは難しいが、カメラ映像においてインタラクション面上に存在するユーザの身体領域すべてを床に対するインタラクションみなすことでこの問題への対処を回避している。Grest ら [15] は壁面上の大画面に映し出された 3 次元空間とのインタラクションのために、画面上部に設置されたカメラからユーザの足領域の追跡を行っている。ユーザがインタラクション領域内で足を移動させると、仮想空間の移動が行われる。カメラは常にユーザを斜め上方から撮影することになるため、検出された人物領域のセグメントの最も下部に足があると仮定することで足の位置を判断している。一方 Iversen らによる Wisdom Well[5] は、プロジェクションと物体認識をとともスクリーンの裏側から行う方式を床面に対して実現したものである。Wisdom Well ではガラス張りの投影面を床に設置し、その下から映像の投影とスクリーンに触れている足や手の位置の認識を行う。これにより、床に直接触れているユーザの足や手の動きを極めて安定して検出することができる(図 2.2)。



図 2.2: Wisdom Well

2.1.3 特殊な装置を身につける方法

靴やスリッパのような足に装着する装置などを利用して床面上の足の動作を検出する方法である。LaViolaらは、床に投影された仮想空間のミニチュアである Step WIM を足で踏むことで HMD 中の仮想空間を移動するインタフェースを開発した [16]。このシステムではユーザは裏側にトリガーのついたインタラクション用スリッパを着用する。トリガーはつま先とかかと付近に取り付けられており、これによりシステムはユーザのステップ動作を認識することができる。Reyらによる Super-Feet[17] もまた仮想空間の移動インタフェースである (図 2.3)。このシステムはつま先にマーカのついたスリッパをカメラにより計測することにより足の位置の計測を行う。これに加えカメラに対する足の相対的な角度や足踏み動作の速度を計測することで、視点の変更や速度を調整しながらの前進操作などが可能となっている。またこのシステムはマーカやカメラのようなハードウェア、動作の認識ソフトウェアともに容易に入手・製作できるものを利用することで、セットアップの簡略化を行っている。

一方福本らは、かかとをつけた状態でつま先を上下させる際変化する人体の電位や帯電量を検知することで、足によるタップ動作を認識するどこでもタップ [18] を開発している。どこでもタップはウェアラブル機器用の入力機構として開発されており、電荷量センサをウェアラブル機器とともに持ち歩くことでどこでもタップ動作による操作を実行できる。

これらの認識手法のうち、圧力センサを利用した方法は、必ず検出対象との接触を必要とする。このため、検出領域をある程度広範囲に設定する場合、その領域の面積分だけフロアセンサパッドなどを敷き詰める必要がある。よって様々な場所にセンサを設置しようとする際はその都度カスタマイズと敷設が必要となり、多大なコストと労力を要してしまう。また、

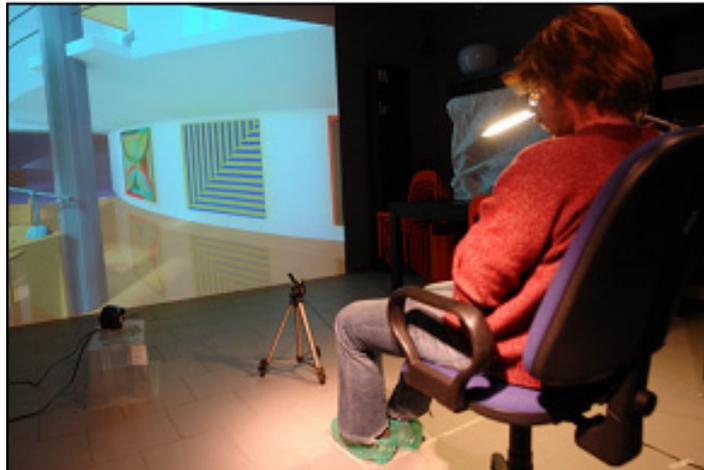


図 2.3: Super-Feet

センサの検出精度は単位面積当たりの圧力センサの分布に依存するため、高い検出精度を求めるほどコストが膨大になってしまうという問題もある。

コンピュータビジョンを利用した方法は、足の3次元的位置を正確に認識することが難しく、殊に足が床に触れているかといった情報を安定して検出することは困難である。Wisdom Well[5]のように足の位置をスクリーンに対して裏側から検出することでロバストな認識を実現する方法もあるが、このようなセットアップを構成を試みた場合コストも大きくなる。

特殊な装置を足に装着する方法では、装置を装着している人でなければシステムを利用できない問題がある。

2.2 測域センサによるインタラククション手法

平面上の人の動作の認識に近年利用されている手法として、測域センサを利用する方法を紹介する。測域センサは広角な範囲を検出可能な2次元平面の距離計測用のセンサであり、レーザスキャナ、レンジスキャナ、レーザレンジスキャナなどと呼ばれることもある。このセンサは内部に回転鏡を持ち、周囲に照射した光線が障害物にあたって反射した光を計測することにより、測距を行うという機構になっている。移動ロボットによる位置認識[19]や形状認識[20]、あるいは人物追跡[21, 22]などでの利用例が多いが、ヒューマンインタフェースの領域での応用も試みられるようになっている。

Strickonらは、壁面上のスクリーンとのインタラククションシステムとして、Laser Wallを開発している[23]。Laser Wallはスクリーンと、映像をスクリーンの裏側から投影するプロジェクタ、スクリーン上の角に取り付けられた測域センサからなる。測域センサの認識領域がスクリーンと平行になるように設置することで、スクリーン上のオブジェクトをインタラクティブに操作することができる。Rakkolainenらによって開発されたFogScreen[24, 25]は、

水蒸気によって空中に構成されるスクリーンである。FogScreen はインタラクションに測域センサを利用することで、スクリーン面を通過する人体の領域に反応して FogScreen 上の映像を変化させる構成になっている。また鎌谷らは足の位置や動作によって音が変わる楽器「Beacon」を開発している [26]。この楽器は円筒状の本体を持ち、本体とユーザの間の距離を測域センサによって認識する。



図 2.4: Laser Wall



図 2.5: FogScreen

ロボット分野からの人間との対話を試みるアプローチも盛んである。Matsumaruらは、自立移動するロボットが床に投影したメニューをユーザが踏むことによってロボットとの対話を実現するインタフェースとして、Step-On Interface(SOI)を開発している [27]。このシステムでは、測域センサによるスキャン平面を床から 20mm の高さとなるようにロボットに設置している。従来の手動操作や音声操作による対話に代わるロボットとの対話手法として有効性が示されている。一方 Tushima らは、環境内に存在するロボットではなく環境自身にセンサやアクチュエータを埋め込み、その環境内で活動する人間に対して支援を行う知能化空間というコンセプトを提唱し、それを実現するシステムの開発を行っている [28]。この研究では人間の位置と向きが認識に天井に受信機を設置した超音波ロケーションシステムとスキャン平面が足元の高さになるよう設置された測域センサを用いる。そして認識したユーザの状態に合わせてアクティブプロジェクタや移動ロボットなど環境中に存在するデバイスが動作し、情報支援やコミュニケーションを行うことができる。

このように、測域センサを利用したインタラクションは、ユーザは特殊な装置を身につけることなく操作を行えるだけでなく、動作の検出対象となる平面を容易に構成できるというメリットがある。また、測域センサを利用した形状認識の有効性も確かめられていることから [20]、足の移動や向きなどの認識精度についても十分応用可能と考える。そこで本研究では、インタラクションの設計に測域センサを利用することとした。

第3章 フットワークインタラクション

本章では、これまで研究が行われてきた床面に対する足の位置や重心を利用したインタラクション手法とは異なる手法として、足の動きを利用したインタラクション手法であるフットワークインタラクションを提案する。フットワークインタラクションは、足によるタップ動作、スライド動作、足踏み動作、向きの変化を利用してインタラクションを行う手法である。またこれらの認識には、測域センサを用いる。

3.1 測域センサによるインタラクション平面

本研究は、測域センサを利用して床面に対する足のジェスチャを認識する。足の地面との設置面は動きや向きの情報の判断に適しており、本研究ではこの領域を利用してインタラクションを行うため、床から 8mm あまりの高さが認識エリアとなるようセットアップを行う。本研究ではこのスキャン平面を床面に平行にかつ距離がわずかとなるように設置することで、足の動きや向きのセンシングを行う。図 3.1 に測域センサを真横から見たときの設置のイメージ図を示す。

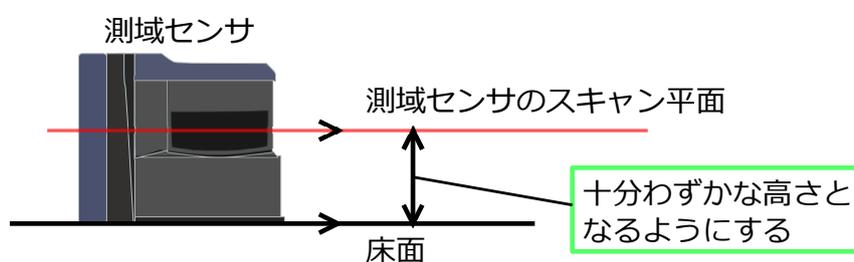


図 3.1: 測域センサの設置イメージ

3.2 ジェスチャの認識

本研究で実装するジェスチャは、足によるタップ動作、床面に対するスライド動作、足踏み動作および向きの変更動作である。これらはこれまで一般的だった踏むという動作に替えて、新たな動作によるインタラクションを提案するものである。上記以外にも様々なジェスチャの実現についても考慮したが、足の動きと発生するコンピュータの動作の関連性が希薄

とならないよう、現状ではこれが妥当であると判断している。これは、Pakkanennらによる足による GUI 操作の設計に関する調査 [29] により、足による操作が複雑になると、目的を正確に実行できたとしても満足感は高くないという事実が知られているためである。これらの足のジェスチャの認識は、床に対する足の位置をベースに認識を行う。通常の歩行動作などに対して誤検出が発生しないよう、各ジェスチャにおいて特有な動きをセンシングするように設計を行った。

3.2.1 タップ動作

タップ動作は、踵をつけたまま足先を床から上下させることで行う(図 3.2)。タップ動作によってまず足先が上げられるとき、床に対する足の接地面はつま先付近の部分なくなり、踵の部分だけが残る状態になる。続いて足先が下ろされるとき、再びつま先付近を含めた足全体が接地するされるようになる。このとき、足先を挙げた時と下ろした時の設置面の変化の軌跡は逆向きのベクトルとなって検出される。接地面の中心座標を基準に軌跡を模式的に示したものを図 3.3 に示す。図 3.3 において水色の部分は足の裏による床の接地面を表す。また赤の点はこの接地面の中心座標の変化を表す。

実装においては、このような短時間での軌跡の逆向きの変化によって、タップ動作が認識されるよう設計を行う。

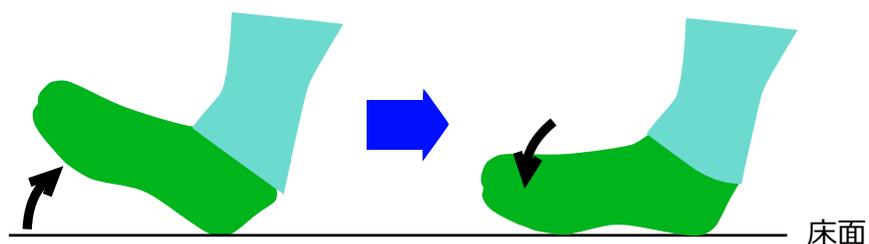


図 3.2: タップ動作

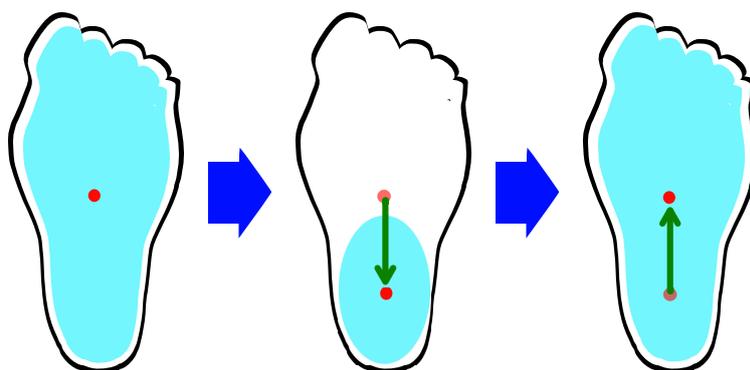


図 3.3: タップ動作による足の裏の接地面の変化

3.2.2 スライド動作

スライド動作は、前後左右の4方向のいずれかに足を一定距離以上滑らせ、その後静止させることで行う(図3.4)。足はユーザがシステムを利用している間と同じ地点付近を滞留しているため、常に足の移動軌跡を追いつけるのではなく、何らかのトリガによって追跡の開始と終了を認識する必要がある。本手法ではこれを片方の足がいずれかの方向に閾値を超える移動速度で移動したことをトリガとして開始し、その後一定時間静止した時点で動作の終了を検知することとした。これは向きや他の足の動作などをトリガとして行うことによる操作の煩雑性を考慮したものである。そして、追跡開始点から追跡終了点までの移動方向をスライドの方向として検知することとする。

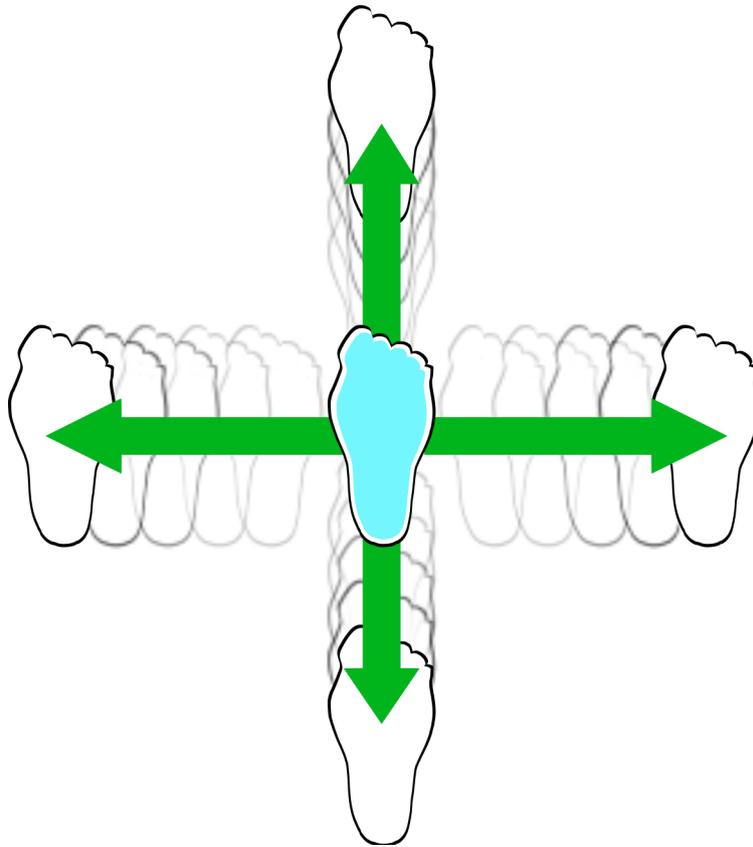


図 3.4: スライド動作

3.2.3 足踏み動作

足踏み動作はある地点で足を床から離した後、揚げた足を同じ地点に着地させる動作である。足が床から離れた地点を記憶しておき、足が再出現した際に座標がほぼ同じであれば足

踏みと認識する(図 3.5)。この動作は足でリズムをとるなど足踏みが明確な意味を持つ操作への対応づけに加え、床を踏むという行為を伴う歩行動作と区別して、意図された項目の選択を正確に認識させる目的にも利用できる。

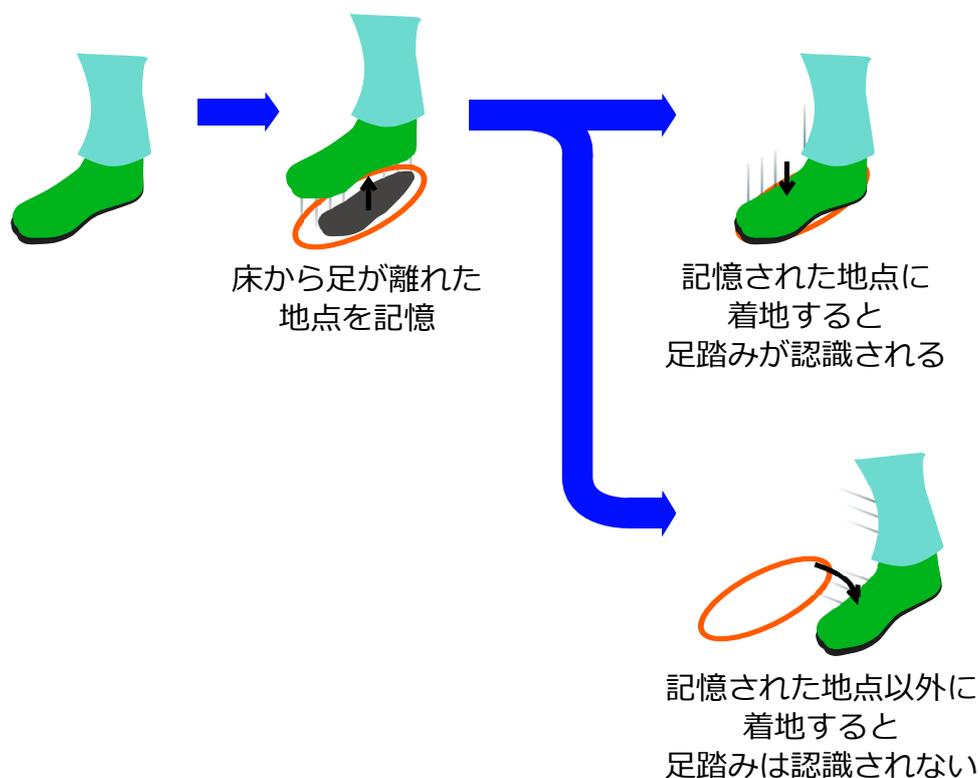


図 3.5: 足踏み動作

3.2.4 足の向きの変更動作

足の向きの変更動作は、左右正面の3方向を基準として、正面から左向き、左向きから正面向き、右向きから正面向き、正面向きから右向きのいずれか変更を行う動作である(図 3.6)。ただし、利用者が意図してこの動作を行ったことを認識するため、閾値を超える角速度の発生を伴った場合に認識が行われるようにする。

3.3 拡張性

本手法は足の移動軌跡または向きの変化をベースに認識を行うため、上記で提案しなかった動作(たとえば足で円を描く動作、足をツイストさせる動作など)の必要性に対して容易に



図 3.6: 向きの変更動作動作

拡張できる。ただしこの際は、前述のように足の動きと動作の関連性が希薄とならないように考慮すべきである。

第4章 実装

4.1 ハードウェア

本研究で利用するハードウェアはPC、測域センサ、ディスプレイまたはプロジェクタである。図 4.1 にシステムの構成を示す。壁面にあるディスプレイを利用するか床面にあるディスプレイを利用するかによって、2種類のオプションが可能になっている(図 4.2)。

測域センサには北陽電機社製 UBG-04LX-F01 を用いている。センサの仕様を表 4.1 に示す。測距範囲は最大 5600mm、240°、走査時間は 28ms/scan である。測域センサは高精度、高分解能、高視野、照明条件にほとんど影響を受けないといった特徴がある。

床面をディスプレイとして用いる場合は人物の上半身などによってディスプレイが遮蔽されてしまうのを避けるため、短焦点プロジェクタなどを利用して低い位置からの投影を行う(図 4.2 右)。

今回使用するセンサは、センシング領域に対してに対して中央奥の位置で、スキャンする平面が床面から約 8mm となるようセンサを床に埋め込むように設置する(図 4.2)。これによりつま先を安定して検出することが可能になり、足によるタップなど床面に対する足のジェスチャを認識することができる。

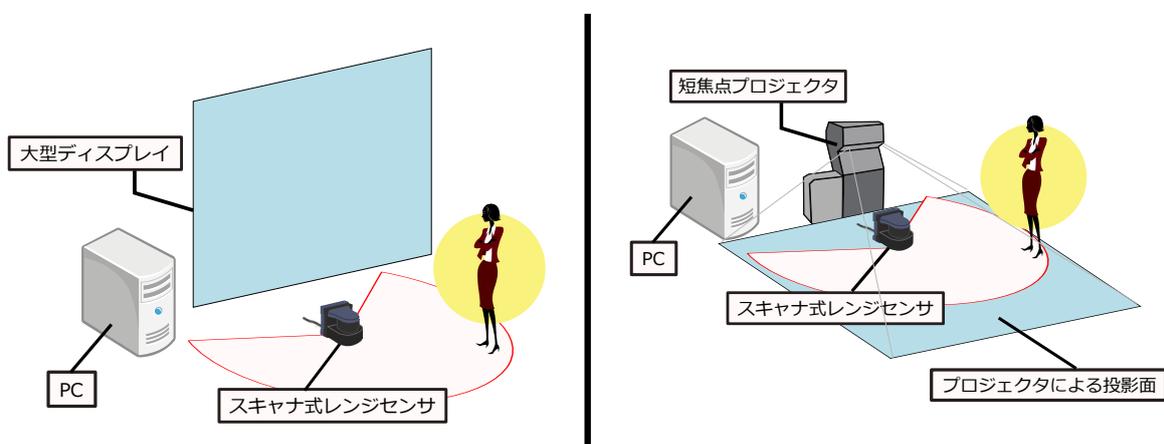


図 4.1: システムのハードウェア構成



図 4.2: UBG-04LX-F01 の外観 (左) と床に埋め込むようなセットアップ (右)

表 4.1: UBG-04LX-F01 の仕様

形式	仕様
測距範囲	20 ~ 5600mm, 240°
測距精度	60 ~ 1000mm:±10mm, 1000 ~ 4095mm :距離の ±1%
角度分解能	ステップ角:約 0.36°(360°/1024 分割)
光源	半導体レーザ λ =785nm(FDA 認証 レーザ安全クラス 1)
走査時間	28ms/scan

4.2 測域センサによる足の検出

4.2.1 背景差分

画像センサにて背景から前景を抽出する際によく用いられる背景差分法を利用し、移動物体の抽出を行う。測域センサから得られる距離データには、壁や柱のように静止している物体と人の足のように移動している物体がともに含まれている。静止している物体から得られる距離データは毎回のスキャンにおいてほとんど値が変わらないため、初めに一定時間スキャンを続けることで背景統計量を求め、これを利用して背景領域を得ることができる。

本手法では、カメラを利用した背景差分法の一つである森田の手法 [30] を応用するため、背景の距離を以下のようにモデル化する。

$$D = \bar{D} + \sigma \sin(2\pi\omega t) + k\zeta \quad (4.1)$$

ここで \bar{D} は距離データの時間平均、 σ は距離データの振幅、 ω は距離の周波数、 t は時間、 k は $-1 \leq k \leq 1$ を満たす係数、 ζ はセンサ依存のノイズの最大値を表す。新たに検出された距離データ D が、この式において $\bar{D} - \sigma - \zeta \leq D \leq \bar{D} + \sigma + \zeta$ を満たすとき、その距離データは背景領域に該当すると判断する。

図 4.3 左に実際の背景領域を、図 4.3 右にセンサを通して得られる背景領域を示す。右図では、赤い×印で示される場所がセンサの位置であり、背景となりうる物体までの距離が灰色の線で示されている。

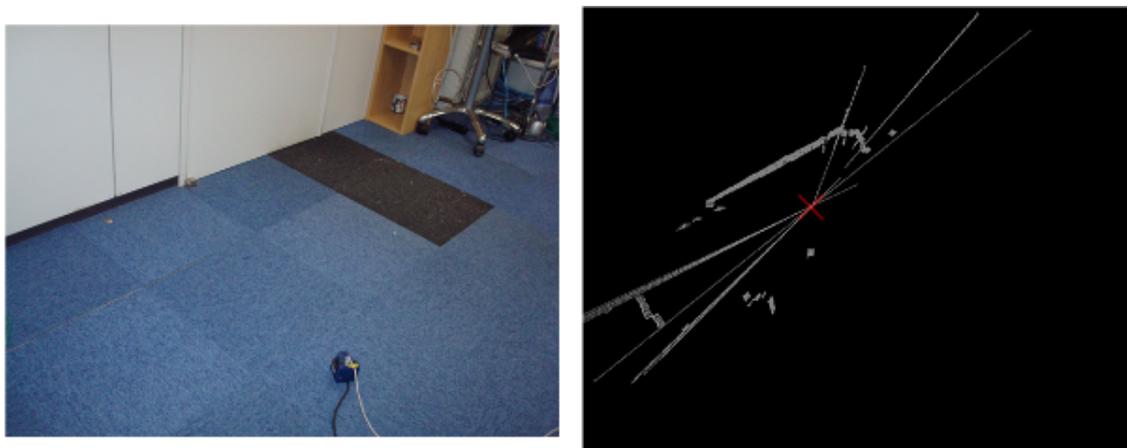


図 4.3: 背景統計量による背景領域の抽出

4.2.2 オブジェクトの抽出とクラスタリング

続得られた前景情報をクラスタリングし、一つの足(オブジェクト)を抽出する。通常、一つの足に対してはレーザポイントが複数点当たると考えられるため、スキャンデータ間でユークリッド距離を求め、この距離を基準に分類を行う。2つのデータ点を $p_1 = (x_1, y_1)$ 、 $p_2 = (x_2, y_2)$ とするとき、この2点間の距離が閾値 σ 未満であれば、同じクラスタとして登録する。以下に分類式を示す。

$$D(p_1, p_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} < \sigma \quad (4.2)$$

1 フレームにおいてスキャンした点すべてに対して以上の処理を行うことでクラスタリングによりオブジェクトを抽出する。この際、1回のスキャンで得られたクラスタ内のデータ点が少ない場合にはノイズとして除去しておく。また抽出された各クラスタには、次フレームにおける対応のために ID を付与しておく。

4.2.3 オブジェクトのトラッキング

第2フレーム以降は、クラスタリングしたオブジェクトと前回のフレームにおいて抽出したオブジェクトとの対応を考慮する。歩行者の移動など人の動きをトラッキングしている研究では、カルマンフィルタやパーティクルフィルタを用いて将来予測によってトラッキングを実現しているものが多い [31, 32, 21]。また Kluge らはネットワーク最適化によるトラッキング手法を提案している [33]。しかし本研究で利用するインタラクションは動作は利用者の

任意のタイミングで行われるため、このようなモデルを適応しにくい側面がある。一方、今回使用した測域センサは 28ms/scan という高速なスキャン周期を有しているため、多くの場合同一の足オブジェクトが囲む領域には連続するフレームにおいてオーバーラップする領域が存在する (図 4.4)。そこで帷子らの手法 [34] をもとに、直前のフレームにおいて検出されたオブジェクトが囲む領域と重複する領域にオブジェクトが検出された場合には、これらを同じオブジェクトとみなすこととする。そして、前回のフレームにて割り当てられている各クラスタの ID の中から該当するものを新たなオブジェクトに付与する。

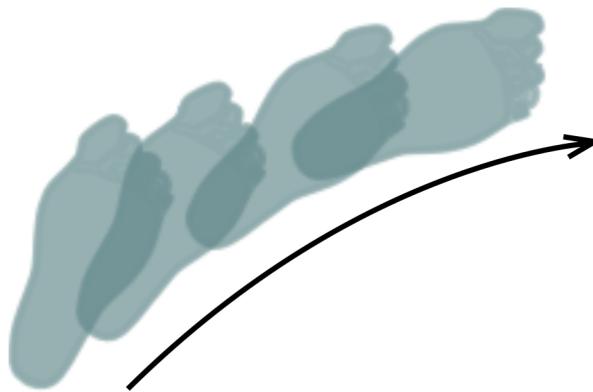


図 4.4: フレーム間でのオブジェクトのオーバーラップ

検出されたオブジェクトを構成する点群の重心をとることにより、オブジェクトの重心位置を得る。前回のフレームにおけるオブジェクトと同じ ID を持つオブジェクトは、前回のフレームにおけるオブジェクトが持つ重心座標の軌跡のリストに現在の位置の座標を加え、新たに自分の軌跡のリストとする。これによりフレームが更新されるごとに軌跡が蓄積されていく。

4.2.4 断片軌跡の結合

前述のトラッキングアルゴリズムによって基本的な追跡は可能であるが、利用者がジェスチャに用いる動作速度が非常に大きかったり、足に身につけている衣類や靴などの光の反射特性などによってトラッキングが失敗し、別の ID が付与されることで軌跡が断絶することがある。測域センサの場合検出されるデータが距離データのみであるため、形状などの特徴によって再び同じ物体を同定することは困難である。そこで本研究では、断絶前の物体による移動軌跡と再出現した物体による移動軌跡を比較することで、断絶した軌跡の統合を図る。

軌跡が消失する直前の物体の移動軌跡によるベクトルを v_1 、消失直前の物体の移動軌跡のベクトルを v_2 とする。軌跡を消失している間のスキャン回数を t 回とすると、 v_1 を $-t$ 倍、 v_2 を t 倍することでそれぞれのベクトルによる推定消失点 p_1 、 p_2 を構成できる (図 4.5)。この時 p_1 と p_2 の間のユークリッド距離を求める。消失を認めるスキャン回数を閾値として、 t が閾値以下の場合上記の処理を繰り返す。最終的に、 p_1 と p_2 との距離を最小とする消失点を

もつ2つのベクトルの軌跡を統合することで、断片軌跡の連結を行う。なお本研究の場合は認識エリア内で長時間1つのジェスチャをすることはないと考えられるため、閾値は1秒あたりのスキャン回数とする。

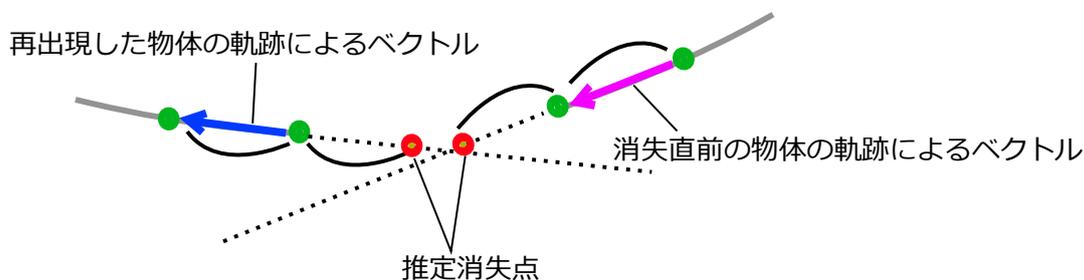


図 4.5: 断片軌跡の結合

この手法により移動軌跡の連結が行われた例を図 4.6 に示す。この例では、前方向に足が高速で動かされたことにより一時的に物体の検出に失敗している。しかし物体が再び検出されたときに過去の軌跡との照合が行われた結果、移動軌跡の連結に成功している。

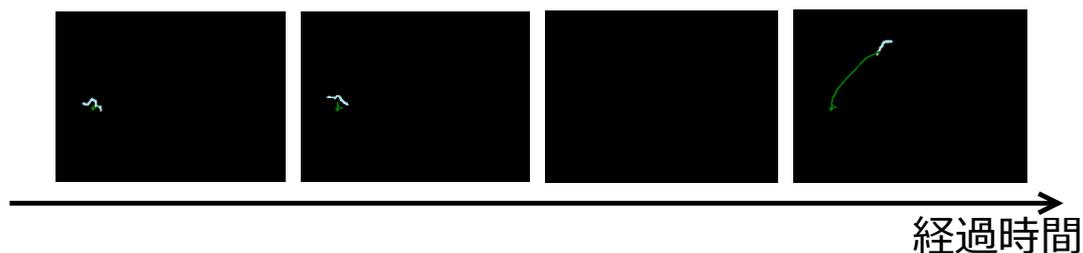


図 4.6: 断片軌跡が結合した例

4.2.5 足の向きを取得

センサによって検出される検出されるオブジェクトは、本来の足の形ではなく、足まわり全体に対してセンサ方向に面している部分だけから構成される(図 4.7)。しかし、抽出したオブジェクトを構成する点の分布はその位置、向きによって特徴的な分布となることから、この距離データを利用して足の向きを求めることができる。

足の向きは、次のようなアルゴリズムによって求める。

1. Graham 走査のアルゴリズムにより、オブジェクトを構成する点列の凸包を求める
2. 1. で求めた凸包を囲む面積が最小となる矩形を求める
3. 矩形の長ささと幅を利用して、オブジェクトの向きを求める

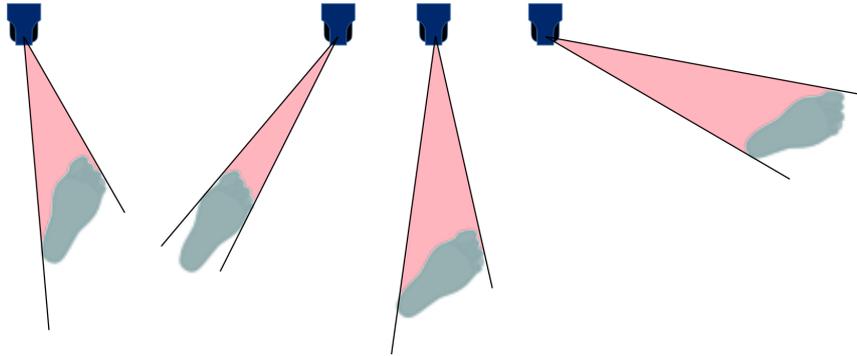


図 4.7: センサと足の位置関係による検出領域の変化

Graham 走査のアルゴリズム

凸包とは n 個の点の集合 P_n に対し、任意の 2 点 $p_1, p_2 \in P_n$ を結ぶ線分を含む閉曲線である。これは n 個の点の集合の最も外側の点を結んだ多角形と等しい。

Graham 走査 (Graham Scan) とは、1972 年に Graham によって提案された点集合を囲む凸包を求めるアルゴリズムである [35]。

アルゴリズムの流れは以下のようになっている。

Step1. 点集合中 y 値が最小の点を求め p_0 とする。

Step2. p_0 以外の点を p_0 に対する偏角の大きさの順にソーティングし、ソートされた順に p_1, p_2, \dots, p_{n-1} とする。

Step3. 点 e_k で構成するスタック S を定義し、 $e_0 = p_0, e_1 = p_1, k = 1$ とおく。

Step4. $p_j (2 \leq j \leq n-1)$ に対して以下の処理を行う。

Step4.1 3 点 $e_{k-1}, e_k, p_j (2 \leq j \leq n-1)$ がなす角が 180° 以上であれば $k = k-1$ とする。 180° 未満であれば $k = k+1$ とし、 e_k を p_j としてスタックに追加する。

以上の処理を行うことで得られる頂点集合 $e_m : 0 \leq m \leq k$ が凸包の頂点である。

凸包を囲む最小矩形を求める

Freeman らにより、点群を囲む最小矩形は、これを囲む凸包の辺に接することが示されている [36]。よって、凸包の各辺を基準に、凸包を囲み面積を最小とする矩形を求めることを繰り返すことで、点群を囲む最小の矩形を得ることができる。

矩形の長さと幅を利用してオブジェクトの向きを求める

ここで、かかとからつま先を結んだ線がセンサ方向を向いている場合を除いて、センサから検出されるデータは足の側面であることを考慮する(図 4.8)。足の長さは側面の長さと同程度一致することから、3. において得られた矩形の長辺を足の向きとして取得する。一方センサに対してかかととつま先を結んだ線がセンサの方向を向いている場合は、側面が検出されないため長辺が十分な長さとならない。そこで長辺が十分な長さでない場合にはオブジェクトはセンサ方向を向いているものとし、オブジェクトの重心とセンサ位置を線分で結んだ角度を足の向きとする。本研究では足の向きはおおよそその方向の取得とジェスチャの起動に用いるのみであるため、このような近似的な角度を用いて認識を行うこととする。

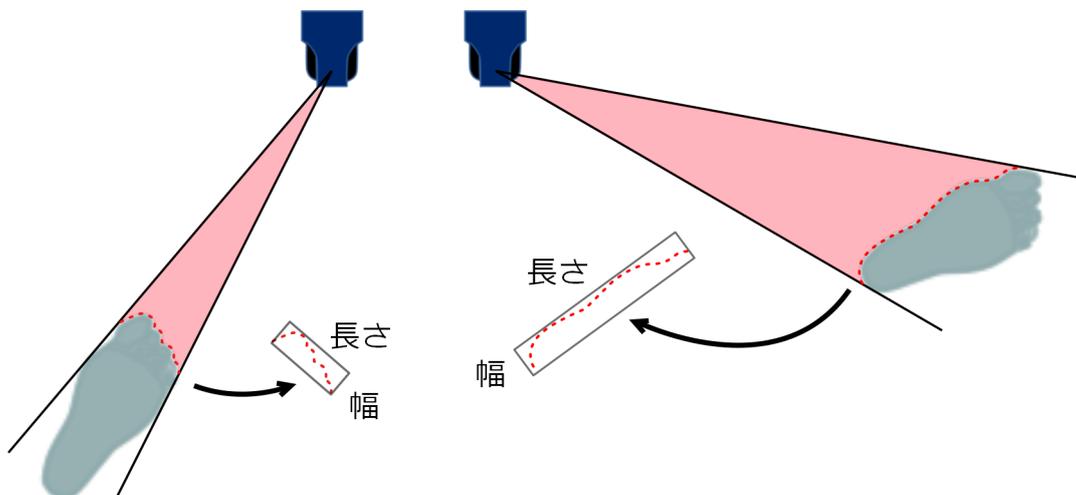


図 4.8: 検出点群を囲む最小矩形と長さの関係

4.2.6 ジェスチャ機能の実装

前章において説明したタップ動作、足のスライド動作、足踏み動作、足の向きの変化の各ジェスチャの実装を行う。

タップ動作

タップ動作はいったんかかと方向に軌跡が移動し、再びつま先方向に軌跡が移動することで行われる。これは単純なアプローチではあるが、かかとから地面を離れ移動する通常の歩行動作などとは異なる独特の軌跡であり、動作の混同は少ない。このアルゴリズムで右足のタップ動作が認識された例を図 4.9 に示す。この例においては、つま先を揚げることで軌跡が下方方向に移動し、つま先を降ろすことで上方方向に軌跡が移動したことが分かる。

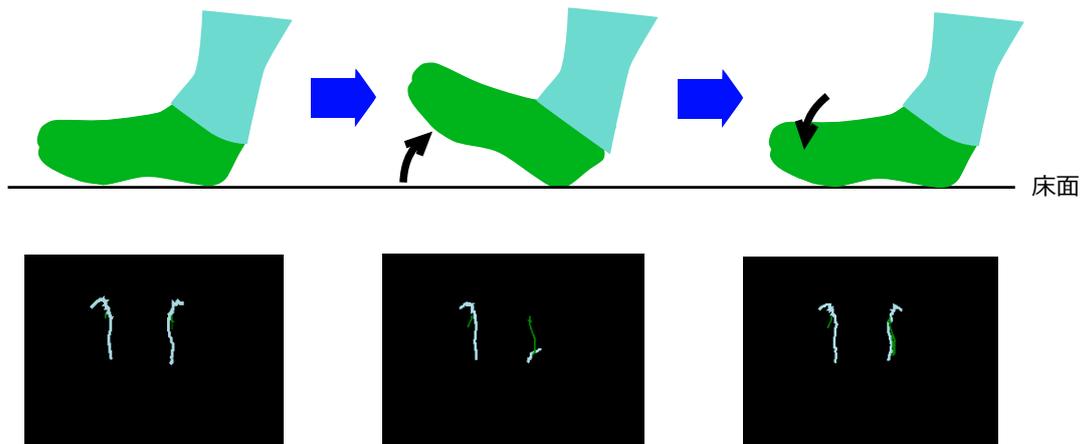


図 4.9: タップ動作を認識した場合の例

足のスライド動作

前述のように一定以上の移動速度を検知して追跡を開始する。その後数回のスキャンにわたって軌跡の移動がほとんど見られなかった場合に足の移動が止まったとみなし、ジェスチャが終わったと判定する。そして、軌跡の追跡開始時をスタートとしてどのような移動が行われたかを認識する。左足による左方向のスライド動作が認識された例を図 4.10 に示す。

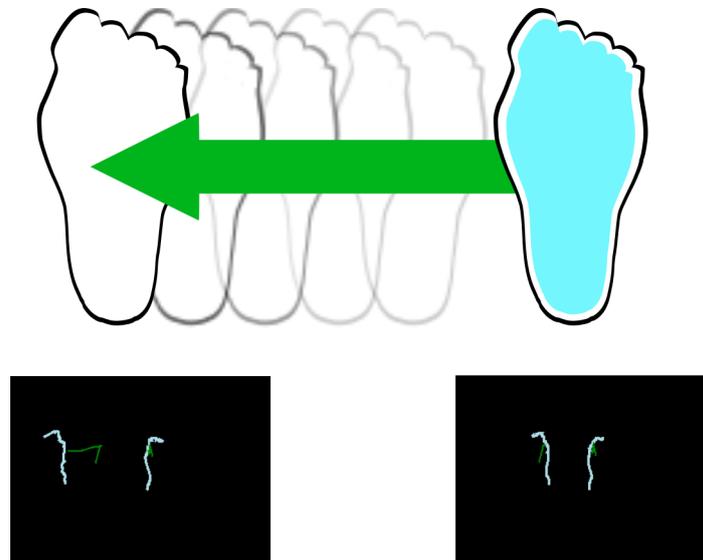


図 4.10: スライド動作を認識した場合の例

足踏み動作

前述のようにいったん床から離れた足が同じ地点に着地することで行われる。足が離れた瞬間の座標を一定時間記憶しておき、新たに足が出現した場合記憶しているオブジェクトとの位置を評価する。位置の評価にはオブジェクトを構成する点列を囲むバウンディングボックスを利用する。着地時のオブジェクトの照合において、オーバーラップする領域があれば足踏みとして認識する。右足の足踏み動作が認識された例を図 4.11 に示す。

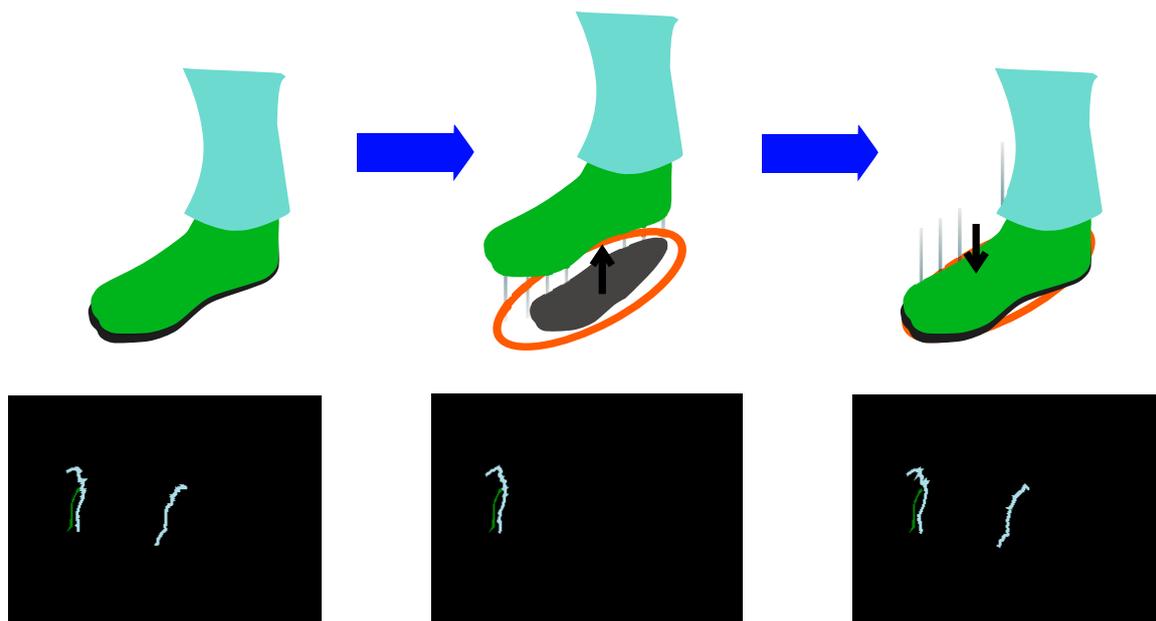


図 4.11: 足踏み作を認識した場合の例

向きの変化

前フレームと現在のフレームにおいて同一の ID を持つオブジェクトの向きが大きく変わる、すなわち閾値以上の角速度を検出することで追跡を行う。動作が静止した時点で、左右正面の 3 方向に近似した方向が前フレームと異なるとき、向きの変更が行われたと判定する。右足の向きの変化を検出した例を図 4.12 に示す。

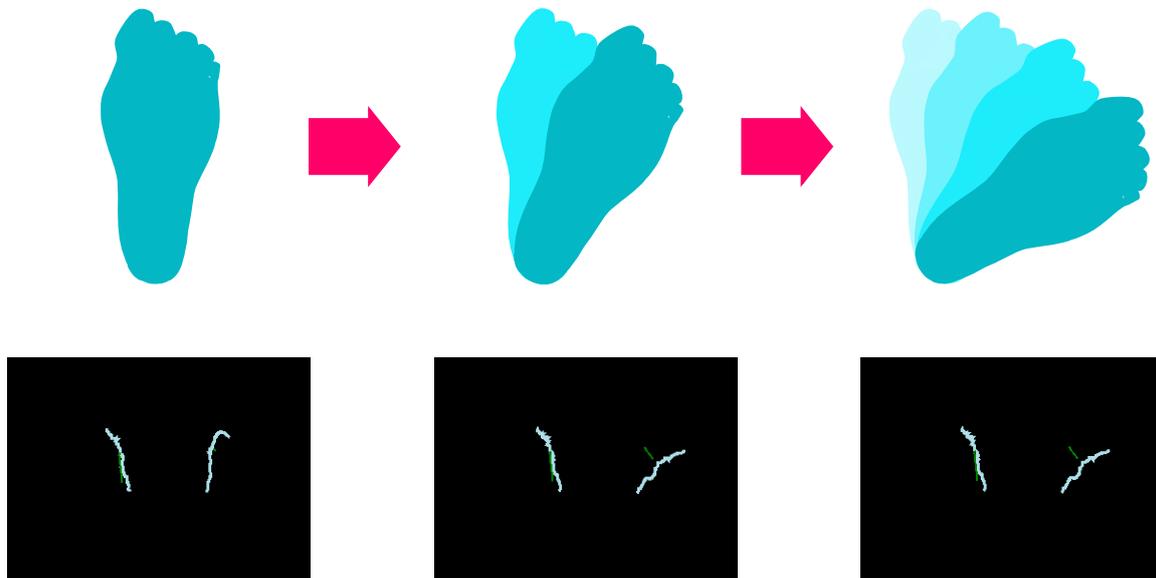


図 4.12: 向きの変更動作を認識した場合の実例

4.3 アプリケーション

これまで提案したジェスチャや、足の位置や向きの情報を利用したインタラクションを設計する。今回実装したアプリケーションはサッカーゲームアプリケーション、フォトビューアアプリケーション、音楽再生アプリケーションの3つである。以下、それぞれのアプリケーションを紹介する。

4.3.1 サッカーゲームアプリケーション

アプリケーション例としてサッカーゲームアプリケーションを示す(図4.13)。本アプリケーションではサッカーのPK戦を模したゲームとなっている。プレイヤーは画面中央に表示されたボールを蹴る動作をすることでシュートを放つことができる。ボールに対しては蹴る方向の調整、インパクト点のボールの中心からのずれによる回転変化、速度による威力の調整などを行うことができる。ゴールキーパーはシュートを打つ前のプレイヤーの位置に合わせて移動したり、放たれたシュートをキャッチしようと移動したりする。ボールがキーパーにキャッチされず枠内に入ればゴールである。

このアプリケーションにおいては前方向のスライド動作をシュートとして利用するが、この時の足の向きや位置、速度なども同時に利用する拡張的なジェスチャとなっている。

床面とのインタラクションに対する研究は最初期からゲーム分野で取り上げられてきた歴史がある[2]。本アプリケーションも同じくゲームを扱うものであるが、向きの情報などを反映させられる点でこれまでにない新しいインタラクションとして楽しむことができる。



図 4.13: サッカーゲームアプリケーション

4.3.2 フォトビューアアプリケーション

2つ目のアプリケーション例としてフォトビューアアプリケーションを示す(図 4.15)。このアプリケーションは普段はスライドショーのような表示を行っており、横1列に並べられた写真がスクロールしていく。ユーザが測域センサにより有効な範囲内に入ったことが検知されると、ユーザと画面との距離と角度に応じていずれかの写真が周囲の画像よりもやや拡大して表示される。そのまま画面まで近づいていくと1枚の写真による全画面表示となり、ユーザは詳細を閲覧できる。また画面下部には足で操作できる仮想的なスクロールバーがあり、足を高速に移動することによりフリック動作のようにスクロールを行ったり、足の向き変更により1枚1枚を閲覧していくことができる。ユーザがその場を去ると再び横1列の写真によるスライドショーモードへと戻る。

表 4.3.2 本アプリケーションで用いたジェスチャとコマンドの対応を示す。

本アプリケーションは複数のユーザが存在するような環境中におかれることを想定し、距離によってユーザにインタラクティブに働きかけ、興味を持ったユーザには簡単なジェスチャで内容を閲覧できるように設計を行った。

なお、このように映像によるフィードバックをユーザによる位置に対応させる場合、スキャナ式レーザセンサとディスプレイの座標系が異なるため、キャリブレーションを行う必要がある。キャリブレーションは距離が既知である4点の座標を与えることによって行う。システムが壁や柱などを検出可能な位置に置かれている場合には、これらの物体の特徴点を利用することでシステム開始時に自動的にキャリブレーションを行うよう設定することができる。

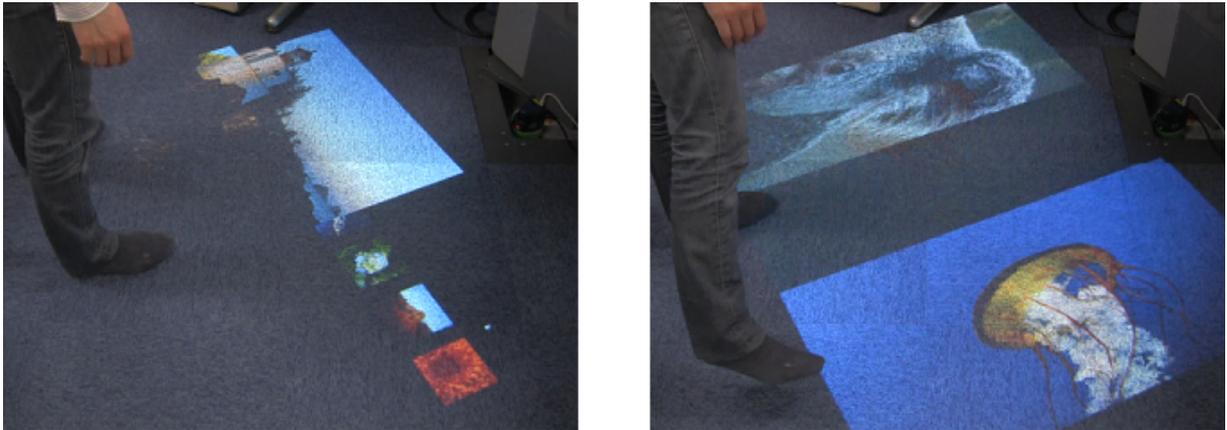


図 4.14: フォトビューアアプリケーション

表 4.2: ジェスチャとコマンドの対応

ジェスチャとコマンドの対応表		
ジェスチャ	コマンド	利用可能なモード
ユーザの立ち位置の画面中心に対する角度	対応する画像の選択	ユーザが画面から遠いとき
ユーザの立ち位置の画面中心からの距離	対応する画像の拡大	
左右方向のスライド動作	フリック (スクロール)	ユーザが画面から近いとき
タップ動作	スクロールを止める	
足の向き変更	前・次の写真を閲覧	

4.3.3 音楽再生アプリケーション

本アプリケーションは人が足踏みで音楽のリズムをとるということに着目し、足でリズムをとることを利用してそれに合わせた音楽を再生するアプリケーションである。本アプリケーションでは大画面は床に投影された映像としてセットアップを行う。ユーザが測域センサによる認識エリア内に入ると、システムにより足踏みでリズムをとることを促すメッセージと、楽曲の抽出対象となるジャンル名が表示された複数の矩形領域がユーザの近くに投影される。ユーザはいずれかのジャンルが投影された領域上でタップまたは足踏み動作によりリズムをとる。こうして数回リズムを刻むと、足踏みの間隔をテンポ (BPM) として認識し、このテンポをクエリとして最もマッチするものをデータフォルダ内から選択・再生する。

今回リズムを刻むジェスチャに重複を許す設計を行ったのは、初期に設計を行った足踏みのみを入力とするモデルを一般利用者に使用してもらったところ、人によっては足踏み (足全体を地面から離すことを伴う) ではなく、タップ動作のように地面から足が離れない踏み方ややり方でリズムを刻むことがあったため、十分な精度が得られなかったためである。この問題に対処することによりよりロバストな認識が可能となっている。



図 4.15: 音楽再生アプリケーション

このアプリケーションは特定の楽曲を選択・再生するという用法には向かないが、環境自身がユーザのステップを認識し、それにあった楽曲を推薦してくれるという対話的なアプリケーションとして利用できる。またユーザがより積極的にインタラクションを試みるように、足踏みが認識されるとその場所に波紋が投影されるように設計している。

第5章 評価

5.1 実験

本研究で提案したインタラクション手法を利用したアプリケーションとして、音楽再生アプリケーションを実装し、これを利用してシステムの評価を行った。

本アプリケーションは前章で示した足踏みで音楽のリズムをとることでBPMとして認識し、このテンポにあった楽曲を再生する機能を主として持つ。

5.1.1 予備実験

本実験に先立ち、2009年12月、学術会議である第17回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(WISS2009)において、本手法を搭載したアプリケーションのデモ発表を行った。セットアップとしては、ノートPCとそれに搭載されたディスプレイ、スピーカ、測域センサURG-04LXを利用した。

このとき発表を行ったデモの機能は、以下のようなものであった。利用者がセンサによる認識エリアの中に立つと、システムはそれを認識し、検出した距離データをそのまま白い点として画面上にフィードバックを行う。またユーザが認識エリア内で足踏みを行うと、検出した距離データのうち動作を行った足の周辺に波紋が発生し、その足による足踏みが行われたことを示すフィードバックを行う。なお、この波紋は時間の経過によって拡大と同時に透明になっていき、やがて消失する。さらに、足踏みを一定のリズムになるよう、利用者が足踏みを続けると、1回の足踏みと足踏みの間隔を平均としてBPMの算出が行われる。十分な回数足踏みが繰り返された時点で、BPMを確定し、これに最も近い楽曲を音楽ライブラリの中から探し出し、再生する。

利用者に対しては、基本的に自由に移動してもらって波紋の投影などを最初に確認してもらった後、足踏み動作による楽曲再生法を説明し、実際に足踏み動作によってこれが実現できることを確かめてもらった。

予備実験の反応

システムの利用者に対して提案システムの印象について口頭で伺った。これらは、概ね好評であった。ビジュアルなフィードバックによりユーザの興味をかきたてている点、比較的簡単なセットアップにより平面をインタラクションとして実現できている点は、特に多くの人から好意的な反応をいただくことができた。またもう少し楽曲の選択に対して利用できる

オプションが多くてもよいのではないかという意見や、床面を認識エリアとしてだけでなくこの面に波紋などのフィードバックをダイレクトに投影して、インタラクティブ性を深めてはどうかといった意見が寄せられた。さらに、家庭や公共の場におけるゲーム用途での利用を期待する声も寄せられた。

また筆者らによる気付き・反省としては、システム利用者の足の位置や動作の検出率が当初想定した状況よりも低かったことが挙げられる。これは、数多く人が集まる環境下においてほかの多くの人の足による足の距離データなど環境から得られるノイズが大きかったが原因として考えられる。また、利用者による足踏み動作が、地面から十分に足を離し再び着地することが足踏みであるという設計と異なっている例が多く存在した。足踏みは提案手法のように足全体を上下に大きく動かすことのほかに、つま先の身を床から離したり、地面につけること(すなわちタップ動作)によって試みられる例があった。これは特に早いBPMを足で刻まなければならない場面において顕著であった。これはBPMが速くなればなるほど、足踏みを行う際十分に地面との距離を取ることができなくなるためと考えられる。

5.1.2 システムの設計

これらの予備実験における知見に基づき、よりロバストな認識と様々なジェスチャによるインタラクションを可能とする音楽再生アプリケーションの構築を行った。

このシステムは、床面上に映像が投影可能なプロジェクタ(三洋電機社製 LP-XL50)、測域センサ UBG-04FX01、PC、スピーカからなる。システムの構成を図 5.1 に示す。本研究において利用した LP-XL50 は短焦点型プロジェクタであり、極めて短い距離で床面上や壁などの空間へ最大 80 型のサイズの情報を投影することができる。システムの機能としては、タップ動作と足踏み動作、左右方向のスライド動作と向きの変更動作が利用できる。これらのジェスチャにより、以前作成したアプリケーションよりも様々な動作を実行できるようになった。

実行できる動作としては、BPM 指定のための足踏み動作に加え、再生中の楽曲の音量調整や、再生の一時停止、再開機能などを搭載した。前回作成したアプリケーション同様、これらの動作発生時には動作を行った場所を中心として、波紋が描画される。波紋は時間が経過するごとに拡張しつつ色が薄くなっていき、やがて消える。これを利用して利用者はジェスチャが入力されたことの確認を行いつつ、ビジュアルなフィードバックによりさらに興味を持って本システムと対話することができる。

提案手法により実行できるジェスチャとシステムの動作との対応を表 5.1 に示す。

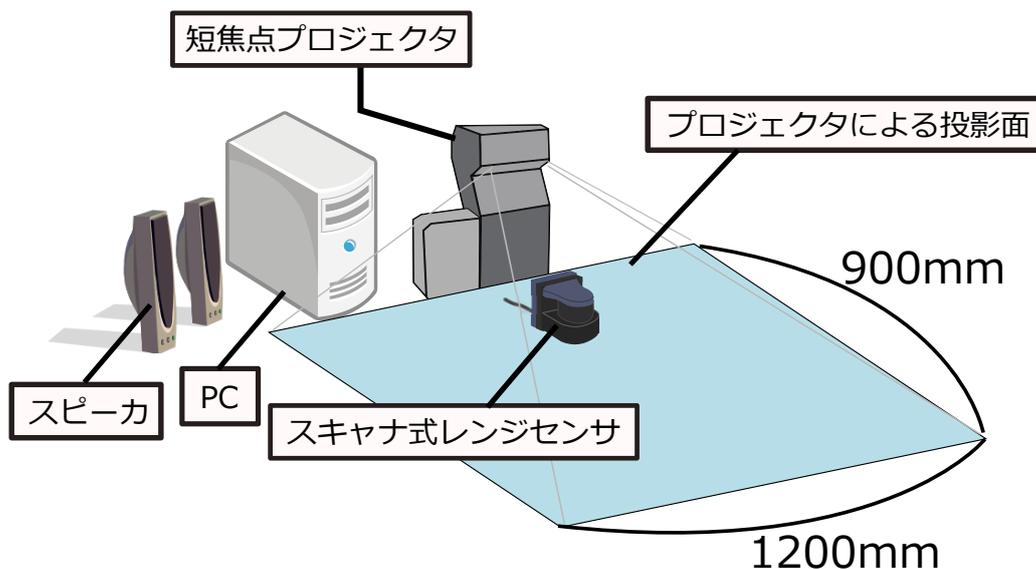


図 5.1: 試用実験のセットアップ.

表 5.1: 実行可能なジェスチャと動作

ジェスチャ	実行する動作
タップ動作および足踏み動作	BPM 指定のための足踏み
波紋を広げる方向へのスライド動作	再生中の楽曲の音量が 5 % 上昇
波紋をふさぐ方向へのスライド動作	再生中の楽曲の音量が 5 % 減少
波紋上でのタップ動作 (楽曲再生中)	再生の一時停止
波紋上でのタップ動作 (楽曲一時停止中)	再生の再開

5.1.3 システムの試用

提案手法によるインタラクションの運動性を確かめるため、システムを実験室中の床面に設置し、ユーザに自由に利用してもらおうと同時に、システムを利用した印象を自由形式で回答してもらった (図 5.2)。今回システムの利用・回答を行ったのは、コンピュータサイエンスを専攻する 20 代および 30 代の男性 4 名であった。

各被験者は足踏みによってテンポを指定し音楽を再生するなど意図した動作を問題なく行うことができた。さらに、すべての被験者から利用していて楽しい、自然に体を動かすことができるといった好意的な意見が得られた。例えばある被験者からは、足踏みをはじめとするジェスチャで音楽との対話ができる点はとても有効であると感じたといった意見も得られた。また、インタラクション評価的な観点では、各被験者とも操作を覚えると一度意図した操作ができた後も積極的に繰り返しインタラクションを試みる様子が見られた。

一方で操作のしやすさについては各被験者で印象の差が大きかった。ある被験者は足の動作



図 5.2: 試用実験の様子.

とシステムの動作の関連付けが分かりやすく容易に操作できたといった意見が得られた一方、最初は意図した操作がほとんどうまくいかず難しかったが、慣れていくうちに操作できるようになったという意見が寄せられた。

また筆者による気づきとして、実装されているジェスチャに気付かず動作が行われないケースがあることがわかった。このため、いろいろなジェスチャを試すことができた人物とそうでない人物との間で試用時間の差がみられた。

技術的な側面では、利用者が足に身につけているものの色、素材によって認識精度の差がややみられた。また移動方向によるジェスチャの認識率の差が見られた。さらに、測域センサによる測定誤差によって足を動かさなくても向き変更などのジェスチャを発生させてしまうケースがあった。

5.1.4 考察

試用実験により足を利用した音楽とのインタラクションができる提案アプリケーションは楽しく、また音楽という情報とのやり取りをする手段としても自然に受け入れられるというコメントが得られた。また被験者が積極的にインタラクションを行う様子が見られた。これは提案手法により足の運動性を取り入れたインタラクションが有効に機能したことを示唆するものであると考える。

一方で、ジェスチャを覚えることに時間がかかったり、認識そのものの失敗によりインタラクションの機会を損失してしまうケースがあった。これらに対し考えられる原因として、一方の足がもう一方の足を隠すことによる ID 付の失敗や、被験者の足に身につけているものの色、あるいはセットアップ時のセンサの設置ミスなどがある。今後はこれらに対処するため認識アルゴリズムの改善やセットアップ上の誤差などに対するロバストな認識を実現す

ることで、誰でも容易に設置を行うことのできるシステムの実現を目指す。また家庭用ゲームなどへの応用を目指し、アプリケーションとの連携をより柔軟にする。

第6章 結論

本研究では、ユビキタス環境におけるインタラクション平面として床面に着目し、これまで利用されてきた踏むことや重心移動などの静的インタラクション手法に代わる運動性を取り入れたインタラクション手法「フットワークインタラクション」を提案した。またこれらのインタラクションで利用するジェスチャの設計について考察し、実際に構築・試用を行った。

試用により、ユーザは自らが意図した様々なジェスチャを実行できることが確かめられ、またそれらは楽しさを伴うという意見が得られた。これらは、運動性を活かした様々なジェスチャを利用してインタラクションを行うという本手法の有効性を示唆するものであった。半面、認識の失敗によりユーザがインタラクションを行う機会を損失させてしまうケースがあった。これらの原因には測域センサのセットアップによる誤差、アルゴリズムの不備などがいくつかの原因が考えられる。今後はそれぞれの見地に立って検証を行い、よりロバストな認識手法の構築を目指す。

謝辞

本研究を行うに際しまして、丁寧な指導と多大なる助言を与えてくださった指導教員の筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻田中二郎教授に心より感謝し、お礼申し上げます。研究生のみならず、組織としての意識のあり方から私の進路に至るまで数多くのご助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

筑波大学大学院システム情報工学研究科高橋伸講師には、私の所属する研究チームの担当教員として研究の進め方や研究生生活、論文の執筆に至るまで親身になってアドバイスをいただきました。心よりの感謝を申し上げます。

そして、筑波大学大学院システム情報工学研究科三末和男准教授、志築文太郎講師にも示唆に富んだ数多くのアドバイスを頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

また筑波大学大学院システム情報工学研究科インタラクティブプログラミング研究室のメンバーには研究に関する部分のみならず様々な面でお世話になりました。貴重なアドバイスやディスカッション、ときには研究生生活以外の面でもご協力下さった皆様のおかげでここに修士論文を完成させることができました。本当に有難うございました。

そして最後に、入学当初より現在に至るまで力になってくださった家族には深く感謝したいと思います。修士課程での学生生活は本当に家族の支えがあって送ることができました。本当にありがとうございました。最後に、6年に及ぶ学生生活で何物にも代えがたい時間を共に過ごした友人、サークルのメンバーにも心より感謝申し上げます。有難うございました。

参考文献

- [1] Mark Weiser. The computer for the 21st century. *Scientific American*, pp. 94–104, 1991.
- [2] Jaana Leikas, Antti Väättänen, and Veli-Pekka Rätty. Virtual space computer games with a floor sensor control - human centred approach in the design process. In *Proceedings of the First International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, pp. 199–204, 2001.
- [3] Griffith N Fernström, M. Litefoot - auditory display of footwork. In *Proc. of ICAD'98*, 1998.
- [4] Interactive floors, surfaces, tables, windows - eyeclick - interactive floor - eyestep. http://www.eyeclick.com/products_500.html.
- [5] Ole Sejer Iversen, Karen Johanne Kortbek, Kaspar Rosengreen Nielsen, and Louise Aagaard. Stepstone: an interactive floor application for hearing impaired children with a cochlear implant. In *IDC '07: Proceedings of the 6th international conference on Interaction design and children*, pp. 117–124, 2007.
- [6] Krogh P. G. Ludvigsen M. Petersen, M. G. and A. Lykke-Olesen. Floor interaction hci reaching new ground. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1717–1720, 2005.
- [7] Hiroo Iwata. Walking about virtual environments on an infinite floor. *Virtual Reality Conference, IEEE*, p. 286, 1999.
- [8] Joseph Paradiso, Craig Abler, Kai-yuh Hsiao, and Matthew Reynolds. The magic carpet: physical sensing for immersive environments. In *CHI '97: CHI '97 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 277–278, 1997.
- [9] N. Griffith and M. Fernström. Litefoot: A floor space for recording dance and controlling media. In *Proceedings of the 1998 International Computer Music Conference, International Computer Music Association*, pp. 475–481, 1998.
- [10] Robert J. Orr and Gregory D. Abowd. The smart floor: a mechanism for natural user identification and tracking. In *CHI '00: CHI '00 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 275–276, 2000.

- [11] KangKang Yin and Dinesh K. Pai. Footsee: an interactive animation system. In *SCA '03: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 329–338, 2003.
- [12] Wii fit: バランス wii ボードで「からだ測定」. <http://www.nintendo.co.jp/wii/rfnj/balance/index.html>.
- [13] Ludvigsen M. Lykke-Olesen A. Krogh, P.G. Help me pull that cursor? a collaborative interactive floor enhancing community interaction. In *Proceedings of OZCHI 2004*, pp. 199–204, 2004.
- [14] J. Nielsen and K Gronbak. Multilighttracker: Vision based simultaneous multi object tracking on semi-transparent surfaces. In *In proc. of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2006)*, pp. 25–28, 2006.
- [15] D. Grest, J. M. Frahm, and R. Koch. A color similarity measure for robust shadow removal in real time. In *in Proc. of Vision, Modeling and Visualization (VMV)*, pp. 253–260, 2003.
- [16] Joseph J. LaViola, Jr., Daniel Acevedo Feliz, Daniel F. Keefe, and Robert C. Zeleznik. Hands-free multi-scale navigation in virtual environments. In *I3D '01: Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, pp. 9–15, 2001.
- [17] Alcaiz R. M. Gamberini L. Calvet M. Kerrigan D. Rey Solaz B., Lozano J. A. and Martino F. Super-feet: A wireless hand-free navigation system for virtual environments. In *Virtual Reality, Proceedings of the Second International Conference, ICVR 2007 (pp. 348-357). Held as part of HCI International 2007*, pp. 348–357, 2007.
- [18] 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.
- [19] 河合克哉, 中澤篤志, 清川清, 竹村治雄. 災害地の 3 次元再構築のための移動ロボット制御システムの開発. *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol. 105, No. 256, 2005.
- [20] Akihisa Ohya Tetsuo Tomizawa, Kohtaro Ohba and Shin'ichi Yuta. Remote food shopping robot system in a supermarket -realization of the shopping task from remote places-. In *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1771–1776, 2007.
- [21] A. Fod. A laser-based people tracker. *Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3024–3029, 2002.
- [22] H. Zhao and R. Shibasaki. A real-time system for monitoring pedestrians. *Applications of Computer Vision and the IEEE Workshop on Motion and Video Computing, IEEE Workshop on*, Vol. 1, pp. 378–385, 2005.

- [23] Joshua Strickon and Joseph Paradiso. Tracking hands above large interactive surfaces with a low-cost scanning laser rangefinder. In *CHI '98: CHI 98 conference summary on Human factors in computing systems*, pp. 231–232, 1998.
- [24] Palovuori K. Rakkolainen, I. Laser scanning for the interactive walk-through fogscreen. In *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2005)*, pp. 224–226, 2005.
- [25] Erdem T. Utku B. Erdem Ç. Özkan M. Laitinen M. Rakkolainen, I. Mid-air display for physical exercise and gaming. *IEEE 3DTV Conference*, pp. 85–95, 2007.
- [26] 鎌谷崇広, 貝田龍太. 複数人で身体を動かし音楽を奏でる場を形成する楽器の開発. 2008年度下期未踏 IT 人材発掘・育成事業(未踏コース)採択案件, 2008.
- [27] Takafumi Matsumaru and Kosuke Akai. Step-on interface on mobile robot to operate by stepping on projected button. *The Open Automation and Control Systems Journal*, Vol. 2, pp. 85–95, 2009.
- [28] Y. Toshima, Q. Wang, N. Ando, and H. Hashimoto. Occlusion avoidance of information display system in intelligent space. *SICE-ICASE International Joint Conference*, pp. 2663–2667, 2006.
- [29] Toni Pakkanen and Roope Raisamo. Appropriateness of foot interaction for non-accurate spatial tasks. In *CHI '04: CHI '04 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 1123–1126, 2004.
- [30] Shinji Morita, Kazumasa Yamazawa, Masahiko Terazawa, and Naokazu Yokoya. Networked remote surveillance system using omnidirectional image sensors. *The transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. D-II*, Vol. 88, No. 5, pp. 864–875, 2005.
- [31] J. Duetscher, A. Blake, and I. Reid. Articulated body motion capture by annealed particle filtering. *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on*, Vol. 2, p. 2126, 2000.
- [32] Katsuyuki Nakamura, Huijing Zhao, Ryosuke Shibasaki, Kiyoshi Sakamoto, Tomowo Ooga, and Naoki Suzukawa. Tracking pedestrians using multiple single-row laser range scanners and its reliability evaluation. *The transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. D-II*, Vol. 88, No. 7, pp. 1143–1152, 2005.
- [33] C. Kohler B. Kluge and E. Prassler. Fast and robust tracking of multiple objects with a laser range finder. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1683–1688, 2001.

- [34] Kyoichiro Katabira, Tomoyuki Suzuki, Katsuyuki Nakamura, Huijing Zhao, Ryosuke Shibasaki, and Yuri Nakagawa. Tracking pedestrians and visualization of the crowds-flow using multiple single-row laser range scanners. *IPSJ SIG Notes. CVIM*, No. 31, pp. 229–236, 2007.
- [35] R. L. Graham. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. *Information Processing Letters*, pp. 132–133, 1972.
- [36] H. Freeman and R. Shapira. Determining the minimum-area encasing rectangle for an arbitrary closed curve. *Commun. ACM*, Vol. 18, No. 7, pp. 409–413, 1975.