

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院情報システム学研究科 情報ネットワークシステム学専攻 博士前期課程		
氏 名	岩崎 央	学籍番号	1352002
論 文 題 目	See-Through Information Belt: 光学シースルー方式 HMD と直観的ジェスチャ UI によるウェアラブルコンピューティングシステム		
<p>要 旨</p> <p>近年, 計算機の小型高性能化やネットワークサービスの普及により, 日常生活におけるコンピュータ支援の拡大が期待されている. 特に光学シースルー方式を利用することで, 周囲が見え, 現実世界に重畳して表示ができ, 着用したまま使え, 両手が塞がることなく, 常に装着することができるため, 日常生活における様々なコンピュータ支援が受けられる.</p> <p>本論文では, ユーザが日常生活において, いつでもどこでも容易にコンピュータ支援を利用できるための, 光学シースルー方式 HMD を用いたウェアラブルコンピューティングシステムとして, See-Through Information Belt を提案する. 提案システムは, マーカレス指先検出アルゴリズムにより, 指の本数の変化による直観的なジェスチャでクリックなどの操作ができる. 指先は HMD に内蔵されたカメラによって検出されるため赤外線センサやステレオカメラなどの特殊なデバイスを必要としない. また, 指先検出アルゴリズムは, パターンマッチング等の複雑な手法を用いないため, 軽量でありノート PC などの外部計算機を必要としない. このため, システムは HMD デバイス単体で動作し, HMD の可搬性を欠くことはない. 提案システムは, 停止時はヘッドトラッキングを用いた広い仮想画面を利用できる. また, 移動中は歩行検知によってヘッドトラッキングによる仮想画面の移動を停止させることにより, 仮想画面の視点を前方方向に固定表示する. これにより, 移動時でも必要なアプリケーションを常に表示することができる.</p> <p>クリックジェスチャ実験と提案システムの実験により, 評価した. クリックジェスチャ実験では, 実験の環境と実験プログラム (固定とジャイロあり) の組合せとして, 白い壁の背景, 白い壁の背景+ジャイロ, 生活環境, 生活環境+ジャイロ, 4 つの組合せで実験を行った. 被験者の平均値で, それぞれのクリック精度は, 98%, 99%, 92%, 96%となった. 初めて使用した人でも問題なく操作でき, Body-Stabilized な仮想画面でも, 画面固定と変わらない精度でクリックできた. 提案システムの実験では, システムを被験者に利用してもらうことにより, 指先でのジェスチャ操作, Body-Stabilized な仮想画面, 歩行検知による表示形式の切替, が有効であると確認できた.</p>			

平成26年度修士論文

See-Through Information Belt :

光学シースルー方式HMDと直観的ジェスチャUIによる  
ウェアラブルコンピューティングシステム

大学院情報システム学研究科  
情報ネットワークシステム学専攻

学籍番号： 1352002

氏名： 岩崎 央

主任指導教員: 入江 英嗣 准教授

指導教員： 長岡 浩司 教授

指導教員： 小川 朋宏 准教授

提出年月日： 平成27年1月26日

(表紙裏)

# 目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	関連研究	2
2.1	指先検出技術	2
2.2	赤外線ハードウェアなどのアタッチメントを必要とするジェスチャUI	2
2.3	身体に対して仮想オブジェクトが静止する HMD システム	2
2.4	AirTarget	3
第 3 章	<b>See-Through Information Belt</b> の提案	4
3.1	光学シースルー方式 HMD を活かすためのインタラクションシステム	4
3.1.1	マーカレス指先検出による直観的な操作	4
3.1.2	仮想画面を広く使用	4
3.1.3	移動中の表示形式	4
3.2	See-Through Information Belt	6
3.3	指先検出アルゴリズム	9
第 4 章	<b>See-Through Information Belt</b> の実装	11
4.1	システム概要	11
4.2	画像解析と歩行検知	11
4.3	移動座標計算部	13
4.4	状態遷移管理部	15
4.5	アプリケーションと表示	15
第 5 章	評価	17
5.1	クリックジェスチャの評価	17
5.1.1	評価環境	17
5.1.2	評価結果	20
5.1.3	議論	23
5.2	See-Through Information Belt の評価	24
5.2.1	評価環境	24
5.2.2	評価結果	25
第 6 章	結論	28
	謝辞	29
	参考文献	31

# 目次

3.2.1 See-Through Information Belt	6
3.2.2 Palette のイメージ図	7
3.2.3 移動前の Palette	8
3.2.4 移動中の Palette	8
3.3.1 アルゴリズムフローチャート	10
4.1.1 システム処理フロー	12
4.1.2 状態遷移図	12
4.2.1 クリックジェスチャ	13
4.2.2 モードチェンジ (Dark モード)	13
4.2.3 Color_Calibration モード	14
4.2.4 Camera_Calibration モード	14
5.1.1 8 マスクリック実験	18
5.1.2 Body-Stabilized な仮想画面で広く使う 8 マスクリック実験	18
5.1.3 白い壁の背景	18
5.1.4 白い壁の背景での実験風景	19
5.1.5 生活環境の背景	19
5.1.6 生活環境の背景での実験風景	20
5.1.7 再現率	21
5.1.8 適合率	21
5.1.9 1 クリックあたりの平均時間	22
5.1.10 VAS 法での使いやすさ評価	22
5.1.11 IVAS 法でのストレス評価	23
5.2.1 実験の移動中に見える画面	25
5.2.2 実験で使用した地図	25
5.2.3 目的地の写真	26
5.2.4 InfoBelt 実験についての VAS 法による主観評価	27

# 表目次

5.1 クリックジェスチャ実験の感想 . . . . .	24
5.2 InfoBelt 実験の感想 . . . . .	27

# 第1章 序論

近年、計算機の小型高性能化やネットワークサービスの普及により、日常生活におけるコンピュータ支援の拡大が期待されている。ウェアラブルコンピュータは、自宅や外出先など日常生活のあらゆる機会にコンピュータ支援を制約なく利用することができる。HMD(Head Mounted Display)は、ウェアラブルコンピュータ利用例の一つであり、光学シースルー方式とビデオシースルー方式がある。光学シースルー方式では、EPSON MOVERIO BT-200[1]やGoogle Glass[2]等、ビデオシースルー方式では、Personal 3D Viewer[3]、Oculus Rift[4]等、一般向けに製品化が進められている。特に光学シースルー方式を利用することで、周囲が見え、現実世界に重畳して表示ができ、着用したまま使え、両手が塞がることなく、常に装着することができるため、日常生活におけるコンピュータ支援が現実味を帯びてきている。光学シースルー HMD の利用シーンとして、ランニングしながら地図を見たり移動距離を確認したりカロリー消費を確認できることや、写真を撮りたいときに瞬時にジェスチャだけで撮ることが挙げられる。

このように、光学シースルー方式 HMD を利用すれば、ユーザが日常生活において、いつでもどこでもコンピュータ支援を利用できる。しかし、コントローラやリモコンなどの装置を使った入力は、直観的な操作とはいえない。もし、手や指による直観的なジェスチャを利用することができれば、容易に HMD システムを操作できる。また、一般に HMD のディスプレイサイズは小さいが、画面を窓に見立て、大きな仮想画面の一部を覗きこむような表示方法により、多くの仮想オブジェクトや大きな仮想オブジェクトを配置でき、ディスプレイサイズの制約を受けずに表示できる。

そこで、本論文では、ユーザが日常生活において、いつでもどこでも容易にコンピュータ支援を利用できるための、光学シースルー方式 HMD を用いたウェアラブルコンピューティングシステムとして、See-Through Information Belt を提案する。指先は HMD に内蔵されたカメラによって検出されるため、赤外線センサやステレオカメラなどの特殊なデバイスを必要としない。また、指先検出アルゴリズムは、パターンマッチング等の複雑な手法を用いないため、軽量でありノート PC などの外部計算機を必要としない。このため、システムは HMD デバイス単体で動作し、HMD の可搬性を欠くことはない。提案システムは、停止時はヘッドトラッキングを用いた広い仮想画面を利用できる。また、移動中は歩行検知によってヘッドトラッキングによる仮想画面の移動を停止させることにより、仮想画面の視点を前方方向に固定表示する。これにより、移動時でも必要なアプリケーションを常に表示することができる。

以降、本論文は以下のように構成される。2章で関連研究を紹介し、3章でSee-Through Information Belt を提案し、4章で提案したシステムの実装を説明し、5章でクリックジェスチャと提案システムの評価を行い、6章で結論を示す。

## 第2章 関連研究

### 2.1 指先検出技術

Mistry らは、小型カメラとプロジェクタを使ってウェアラブルコンピューティングとして、SixSense を提案している。情報をプロジェクタで実オブジェクトへプロジェクションする。指先にカラーマーカを付け、軌跡と位置でジェスチャコマンドとしている [5]。小島らは、カメラ映像越しに仮想物体を掴むことができるビデオシースルーシステムを実現している。ビデオシースルー方式 HMD に小型のステレオカメラを付け、手の3箇所カラーマーカを付け、指先の位置を検出している [6]。Lee らは、カメラ画像の手の上に仮想 3D オブジェクトを表示させる”HandAR”を提案している。Handy AR では、肌色領域の輪郭線に3点を取り、輪郭に沿って追跡し角度の鋭角な点を検出し、楕円フィッティングによって指先位置を検出する [7]。String らはモデルとのマッチングではなく形状の認識によって、突き出している指の本数とその位置を検出する手法を提案している。肌色ベースに2値化した画像の領域の中心から外側に同心円を一定間隔で描いていく。同心円が連続した白色の画素の集合がいくつあるのかで指の本数を数えている。指先の検出には、白い画素の集合の中心点を用いて、内側の同心円から順番に連続領域の数を数え上げることで、突き出した指の本数の推定を行う [8]。

### 2.2 赤外線ハードウェアなどのアタッチメントを必要とするジェスチャUI

Colaço らは、光学シースルー方式 HMD 向けのインターフェースとして、3D センサと単眼の RGB カメラを用いた”Mime”を提案している。3D センサは、赤外線センサを用いたコンパクトで邪魔にならず低消費電力になるように設計され、HMD 上部に装着する。システムは、片手ジェスチャーで操作できる [9]。Raymond らは HMD と 3D カメラとノート PC を用いて、手の形状によるジェスチャを認識できるウェアラブルコンピュータシステムを提案している。赤外線センサにより得られた画像と距離画像をもとに手認識を行っている。ジェスチャを解析では、3D から得られた2値化画像に対して機械学習とパターン認識を行っている。1本指で行うポインティングジェスチャ認識の実験では98%の認識率と報告されている [10]。加茂らは、ステレオカメラ付きのビデオシースルー方式 HMD を用いて、仮想化されたインターフェース「AiR surface」を提案している。ジェスチャとしてタップ操作を実装しており、ステレオカメラから計算した3次元座標と仮想平面との距離を求め、仮想平面を突き抜けるとタップの操作が行われる [11, 12]。

### 2.3 身体に対して仮想オブジェクトが静止する HMD システム

Billinghamst らは共同作業用の MR (Mixed Reality) 環境を提案している。彼らは、オブジェクトがユーザの身体に相対静止しているように見える Body-Stabilized な表示を実現している [13]。Ens らは、HMD のためのシステムとして、身体に対して複数の仮想ウィンドウが静止するシステムと

して, "Personal Cockpit"を提案している. 実機の HMD デバイスではなく, プロジェクタや入力デバイスを用いてシステムを実装し, 評価を行っている. 評価では, アプリケーションの切り替えにおいて, 固定画面に比べて 40%速くタスクを終えることができたとしている [14].

## 2.4 AirTarget

私達は, 日常生活支援の基本インターフェースとして, 光学シースルー方式 HMD を用い, 指先での直観的な操作を可能とする "AirTarget" を提案している [15, 16]. HMD に内蔵されたカメラからの画像を基にするマーカレス指先認識を用いて, 指先でのカーソル移動やクリック動作で操作することができる. これにより, HMD から透過して見える視界に重畳表示される仮想オブジェクトに対して, ポインティングをすることができる. AirTarget では座標変換を行っており, 目で見える指先の位置に HMD のカーソルを合わせることができる. ジェスチャ検出では, 指先の軌跡を用いて, 過去の軌跡を遡って解析を行うことでコマンドを検出する. クリックジェスチャのコマンドは円を描くように指先を動かす.

## 第3章 See-Through Information Belt の提案

### 3.1 光学シースルー方式 HMD を活かすためのインタラクションシステム

#### 3.1.1 マーカレス指先検出による直観的な操作

HMD システムの操作に、コントローラやリモコン等を利用する場合は、それらのデバイスを取り出し操作しなければならず、HMD の特性である可搬性や透過性を活かさない。外部コントローラ等を使わず、手や指のジェスチャで操作できれば、直観的な操作ができる。

指先にカラーマーカを付けて HMD システムを操作すると、カラーマーカを使うことにより、指先の検出精度は高くなる。しかし、カラーマーカを使用して HMD システムを操作する場合、カラーマーカを常に持ち歩かなければならず、利用の都度、指にマーカを装着するといった動作が必要となる。指先検出に赤外線センサなどの HMD に装着するデバイスが必要となると、HMD デバイス以外にも持ち運ばなければならない装備が必要になり、HMD デバイスの特性である可搬性を欠く。

指先にマーカを取り付けることなく、手や指のマーカレス検出技術を利用することができれば、いつでもどこでも HMD システムを直観的に操作できる。手や指先の検出に用いるアルゴリズムは、赤外線センサや Kinect などの特殊なデバイスやノート PC などの外部計算機を使わず、軽量なアルゴリズムであれば、HMD の特性である可搬性を活かせる。

#### 3.1.2 仮想画面を広く使用

HMD のディスプレイのサイズには制限があり、1 画面に表示できる情報の量に限界があるために、多くのアプリケーションやアイコンなどを同時に表示することは難しい。そこで、ヘッドトラッキングによって、body-Stabilized な仮想画面を実現すれば、仮想画面を広く使え、多くのアプリケーションやアイコンを仮想画面に配置できる。また、アプリケーションを使用したいときに、その方向を向くだけで使用することができる。この動作は直観的であり、瞬時にアプリケーションを起動したり、切り替えたりすることができる。これにより、擬似的に広い画面として使える仮想画面があれば、多くの仮想オブジェクトや大きな仮想オブジェクトを配置でき、ディスプレイサイズの制約を受けずに表示できる。

#### 3.1.3 移動中の表示形式

HMD システムに期待されるアプリケーションとして、地図、活動量計、時計、電車の時刻表などによる、移動中や作業中のコンピュータ支援が挙げられる。しかしながら、前項で説明したヘッドトラッキングを用いた仮想画面を利用すると、移動中に移動方向を変えた場合、表示されていた情報が画面の外へ移動してしまう。そのため、移動中に一定の情報を見ることができなくなる。

例えば、地図を見ながら目的地まで移動中に、角を曲がると表示されている地図は画面の外へ移動してしまう。

そこで、状態検知により、ユーザの状態に合わせて、適切な表示形式に切り換える。移動時には表示部分が仮想画面の中央に固定して、常に特定のアプリケーションを利用できる。停止時には自由に見渡して使う **Body-Stabilized** な仮想画面を利用できる。これにより、移動中でも適切なコンピュータ支援が受けられるようになる。

## 3.2 See-Through Information Belt

前節で述べたように、マーカレス指先による直感的な操作ができ、広い仮想画面を使用し、移動中も使用可能とすることで、光学シースルー方式 HMD の特性である透過性や可搬性を活かしたウェアブルコンピューティングシステムとなる。これより、ユーザが日常生活でいつでもどこでも容易にコンピュータ支援を受けることができる。本論文では、光学シースルー方式 HMD を用いたウェアブルコンピューティングシステムとして、See-Through Information Belt（以下、InfoBelt と略す）を提案する。提案システムのイメージ図を図 3.2.1 に示す。

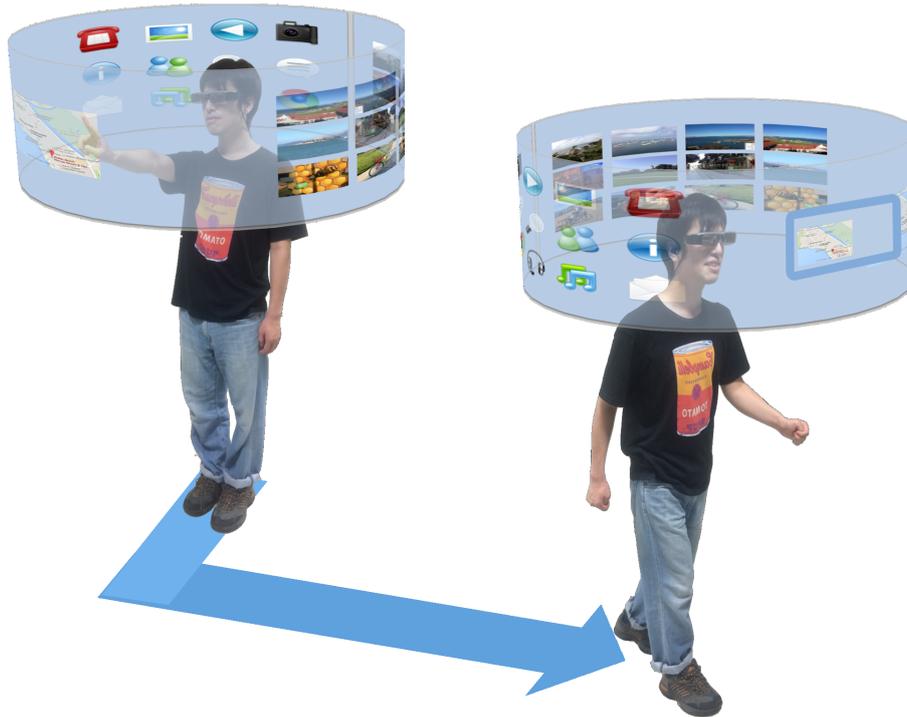


図 3.2.1: See-Through Information Belt

InfoBelt はマーカレス指先検出アルゴリズムにより、指先にマーカを付けるような煩雑な準備を必要とせず、HMD のディスプレイ越しに直接見える指先でのポインティングと、直観的な指の本数の変化によるジェスチャにより、操作ができる。クリックジェスチャは、指を 1 本から 2 本に変化させたときに、直接見える左の指先の座標でクリックコマンドが実行される。指先は HMD に内蔵されたカメラによって検出されるため、他にデバイスを必要としない。また、本論文で提案する指先検出アルゴリズムは軽量であり、HMD システム単体で動作し、可搬性を欠くことはない。

カメラ画像を用いたジェスチャ認識には各種キャリブレーションが必要である。本システムでは、指先検出に用いる肌色空間の閾値を再定義する Color\_Calibration モードと、カメラ画像の座標をディスプレイの座標に変換するためのパラメータを定義する Camera\_Calibration モードが必要となる。このキャリブレーションを行わなければ、指先でのジェスチャ操作が出来ないことがある。これらは、指先でのジェスチャ以外で確実に呼び出される必要がある。

そこで、カメラを手で覆う簡単なジェスチャを用意し、キャリブレーション及びシステム関連の動作をトリガできるようにする。Color\_Calibration モードの起動の手順は、カメラを手で覆い、

カメラ画像を暗くすると、システムメニューのリストが表示される。メニューの選択はジャイロ入力を用い、頭を動かすことによつて行う。この状態で頭を右に動かし、color calibration を選択する。すると、Color\_Calibration モードになり、画面の中央に四角の枠が表示され、枠に手を合わせると、その手の色で肌色空間の再定義ができる。頭を左に動かすと、Camera\_Calibration モードがトリガされ、カメラ画像の座標をディスプレイの座標に変換するためのパラメータを設定できる。頭を下に動かすと、Display\_Off モードになり、ディスプレイがオフになる。

InfoBelt は、頭の周りにベルト状の360度広がる仮想画面を浮遊させ、そこにアイコンや起動したアプリケーション等を配置できる。ヘッドトラッキングによる Body-Stabilized な仮想画面を表示することによつて、広がる仮想画面を見渡すことができる。また、使用したいアプリケーションの方向に頭を向けるだけで、そのアプリケーションを利用することができる。

InfoBelt 上に浮遊するように配置される仮想オブジェクトは、総じて”Palette”として管理される。Palette のイメージ図を図3.2.2に示す。Palette は、アイコン、アプリケーション、ウィジェットなどを自由に格納でき、InfoBelt 上でユーザの好きな位置に自由に再配置可能である。Palette の左上の四角をクリックすると移動モードがアクティブになり、指先に添って Palette の配置位置が変更される。もう一度クリックすると、その時点の座標に停止させるすることができる。また、このときに既に他の Palette がある場合は、元の位置に戻る。図3.2.3に移動前の Palette を、図3.2.4に移動中の Palette を示す。

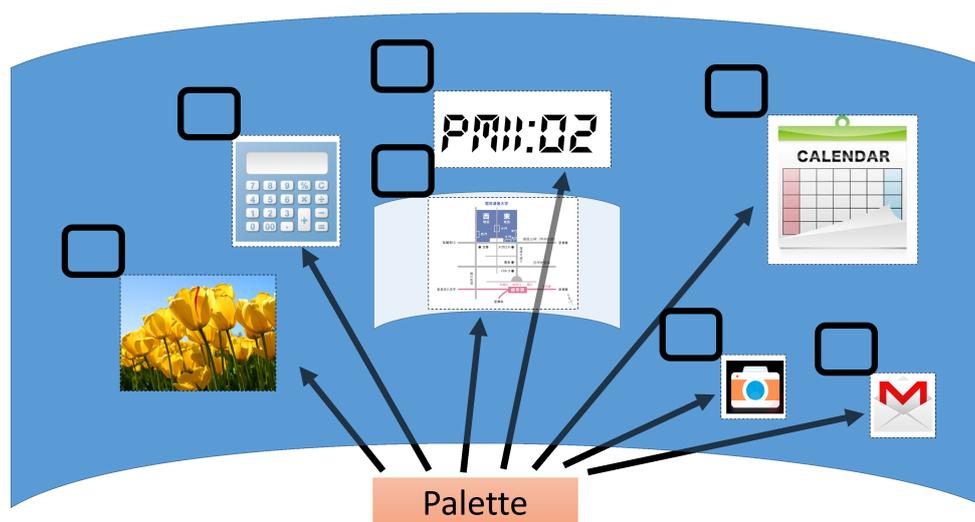


図 3.2.2: Palette のイメージ図

InfoBelt は、移動中は歩行検知により自動で WalkingMode に遷移し、ヘッドトラッキングによる仮想画面の追従を停止させることにより、視点を仮想画面の前方中央に固定して表示する。移動中に移動方向を変えた場合でも、表示されていた情報が画面の外へ移動してしまうことはない。例えば、移動しながら地図を見たいときに、角を曲がった後も常に地図を見続けることができる。これにより、ユーザは停止時には仮想画面を広く使うことができ、移動時には特定のアプリケーションを常に使用できる。

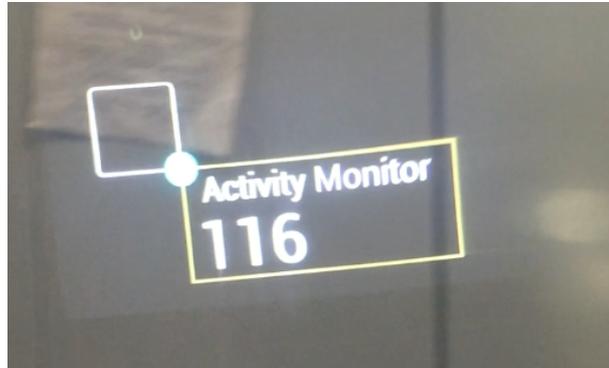


図 3.2.3: 移動前の Palette

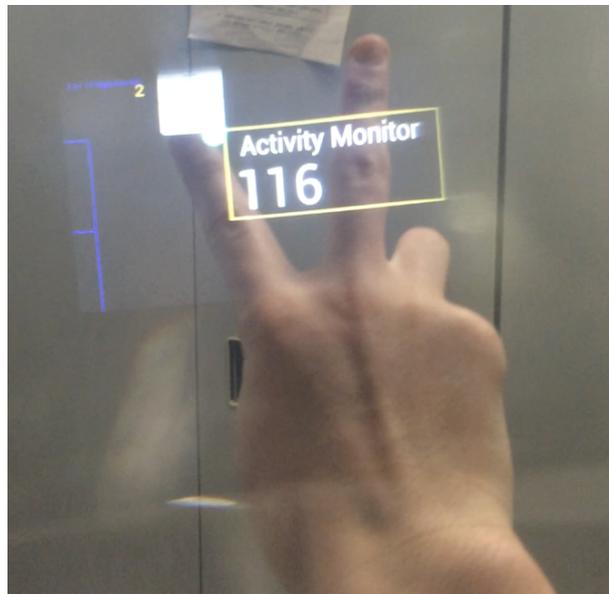


図 3.2.4: 移動中の Palette

### 3.3 指先検出アルゴリズム

マーカレス指先検出によるジェスチャUIは指に何も着用せずに、手や指先での直感的なジェスチャで操作できることからHMDのインターフェースとして適している。私たちが提案したInfoBeltも、指先検出技術により指の本数の変化による直観的なジェスチャで操作できる。HMDシステムに用いる指先検出アルゴリズムは、ウェアラブルコンピュータでも十分に動作するように、軽量なアルゴリズムが求められる。本研究では、輪郭の曲率を用いた指先検出技術をベースに、よりノイズ耐性を高めるために、手の輪郭候補を最大で3つ抽出し、その後、凸包と輪郭の割合でフィルタ、バウンダリボックスの縦横比でフィルタ、輪郭の中心座標による指先座標の削除、を順に行い、指先検出を行うアルゴリズムを提案する。

提案したアルゴリズムのフローチャートを図3.3.1に示す。まず、カメラから取得した画像をHSV画像に変換し、更に肌色閾値により肌色領域とそれ以外の領域で2値化する。2値化した画像の中には、肌色領域に近い色もノイズとして含まれる。2値化画像した画像に対して、モルフォロジー演算をしてノイズ除去をする。次にモルフォロジー演算をした2値化画像の閉空間になっている領域を輪郭として検出する。輪郭候補抽出では、各輪郭の面積が一定値以上の輪郭を手の輪郭候補として、面積の降順に最大3つ抽出する。

ここから、最大3つの輪郭候補に対して、まず、輪郭候補に凸図形の面積と候補輪郭の面積の比での閾値でフィルタを行う。候補輪郭に対して凸包を求め、その凸包の面積と候補輪郭の面積との割合を求め、その割合が0.55より小さい、または0.9よりも大きい場合に、その候補輪郭はフィルタされ、候補輪郭がまだある場合は次の候補輪郭への処理に移る。

次に、バウンダリボックスの縦横比でフィルタを行う。候補輪郭の外接矩形をバウンダリボックスとして、バウンダリボックスの縦横比で横の方が長い場合、その候補輪郭はフィルタされ、候補輪郭が残っている場合は、次の候補輪郭への処理に移る。

次に、ここまでの処理で残っている輪郭に対して、指先の候補点検出を行う。指先検出では、加茂ら[11]の手法と同様に、輪郭上に3点を取り輪郭を辿って、鋭角な点を抽出すると、手の指先に点群が抽出できる。点が一定数の以上の点群を指先として、その点群の中から最も鋭角な点を、指先座標として検出する。

次に、輪郭の中心座標でフィルタを行う。指先座標のY座標が、バウンダリボックスの中心点のY座標より、小さいものについて指先座標から削除する。ここまでの処理で、指先座標が存在すれば、それらの座標を指先座標とする。指先座標が5より多い場合は、その中で鋭角な5点を指先座標とする。指先の候補点座標が存在しなければ、次の輪郭候補に対して同様の処理を行う。輪郭候補がなくなった場合は、カメラ内に指先が写っていないと判断する。

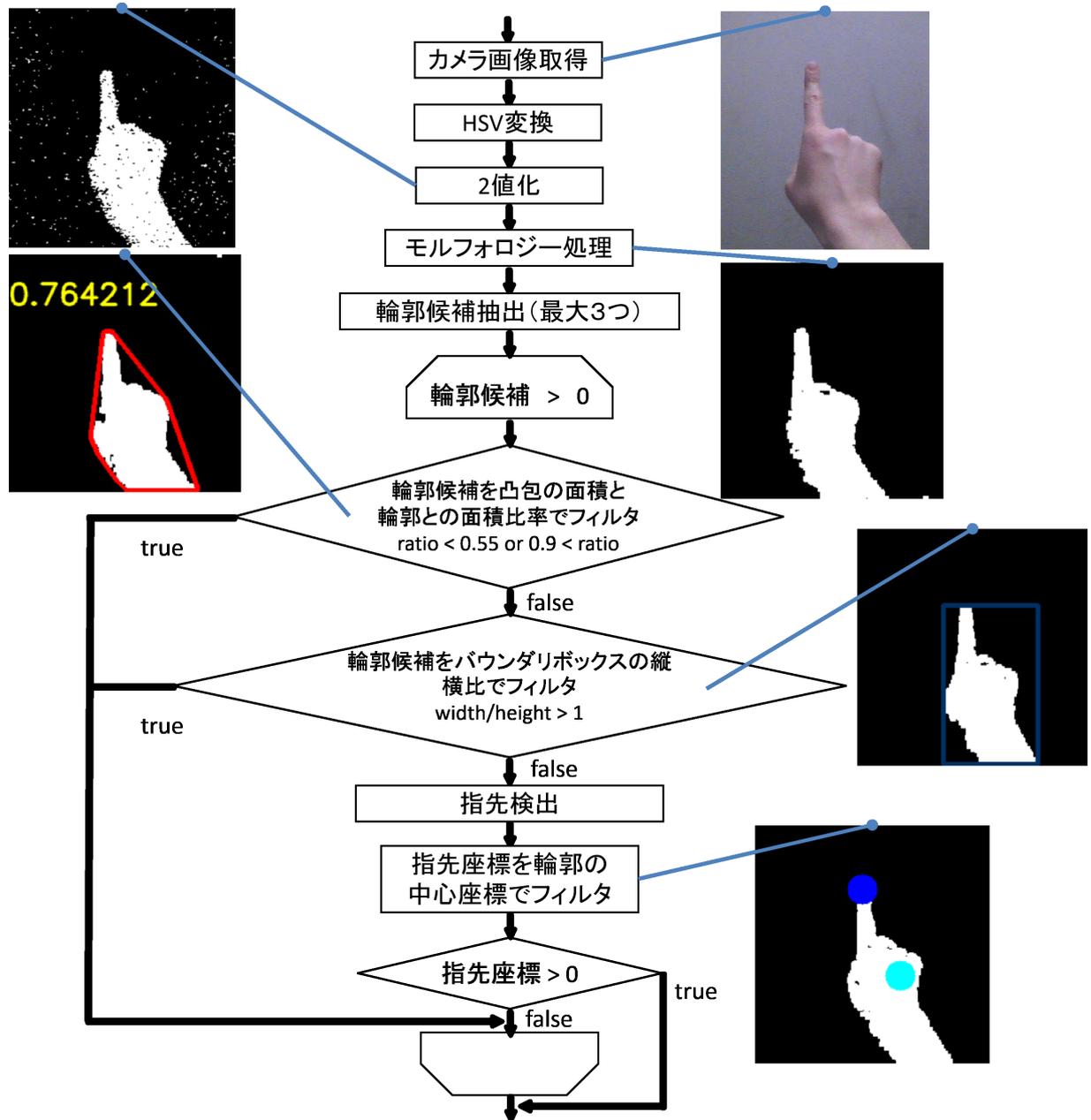


図 3.3.1: アルゴリズムフローチャート

## 第4章 See-Through Information Beltの実装

### 4.1 システム概要

提案したシステムをOpenCV ライブラリを使用して EPSON MOVERIO BT-200 (Android) [1] に実装した。OpenCV ライブラリは、画像処理のライブラリであり、画像や動画を処理するのに必要な様々な機能が実装されている。本システムでは、OpenCV ライブラリを指先検出の画像解析に使用した。本システムは、私たちが開発を進めている AirTarget[15, 16] を基に実装した。MOVERIO BT-200 には、HMD メガネ部の右側にカメラ、各センサ（加速度センサ、ジャイロセンサ、地磁気センサ）が内蔵されている。また、本システムの実装に使われるアルゴリズムは軽量であり、HMD 単体で動作することが可能である。特殊なハードウェアアタッチメントを必要とせず、モバイルデバイスに搭載された標準的なセンサ（RGB カメラ、加速度、ジャイロ）を用いて、一般的な光学シースルー方式 HMD 上で動作可能である。

本システムの処理フローを図 4.1.1 に、状態遷移図を図 4.1.2 に示す。ユーザがシステムを起動すると、Color\_Calibration モードになり、指先検出に用いる肌色の閾値を設定する。その後、Normal モードになる。Normal モードでは、広いベルト状の仮想画面を使用できる。歩行すると、歩行検知部で歩行が検知され、Walking モードになる。Walking モードでは、ヘッドトラッキングがオフになり、表示部分が仮想画面の中央に固定される。歩行をやめると、Normal モードに戻る。カメラを手で隠すことで、暗闇検知部が暗闇を検知し、Dark モードになる。Dark モードでは、図 4.2.2 の画面が表示され、モードチェンジを行うことができる。カメラを手で隠した状態で、頭を右、左、下に動かすと、それぞれ Color\_Calibration モード、Camera\_Calibration モード、Display\_Off モードを選択でき、選択したままカメラから手を離すと、それぞれのモードになる。Color\_Calibration モードでは、指先検出に用いる肌色の閾値を設定できる。Camera\_Calibration モードでは、カメラ画像の座標をディスプレイの座標に変換するためのパラメータを設定できる。Display\_Off モードでは、ディスプレイがオフになる。Display\_Off モードで、再びカメラを手で隠すと、"display on" と表示され、Display\_On モードになり、カメラから手を離すと、Normal モードへなる。

### 4.2 画像解析と歩行検知

指先座標検出部では、カメラからの画像を基に、提案した指先検出アルゴリズムを用い、指先座標と指の本数を取得する。検出結果はジェスチャ解析部に渡される。

ジェスチャ解析部では、指の本数の変化をジェスチャとして検出する。フレーム毎に検出された指の本数を 6 フレーム分記録する。6 フレーム内で 4 回以上検出された指の本数が、現在の指の本数のステートとなる。ステートの数と異なる指の本数が 4 回以上検出された時に、ステートが変化する。その変化をジェスチャとして認識する。例えば、1 本から 2 本に指を変化させた時に、1 本から 2 本へ変化したジェスチャと認識される。これにより、指の本数の変化に応じて、ジェスチャを割り当てることができる。図 4.2.1 に示すように、本システムでは、指の本数を 1 本から 2

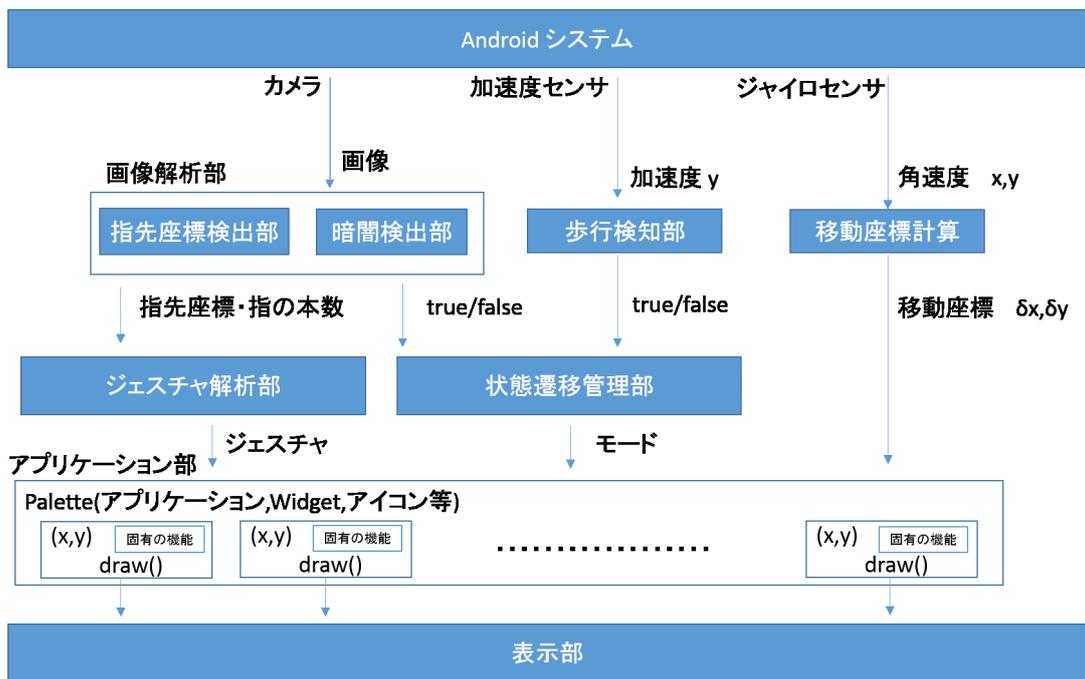


図 4.1.1: システム処理フロー

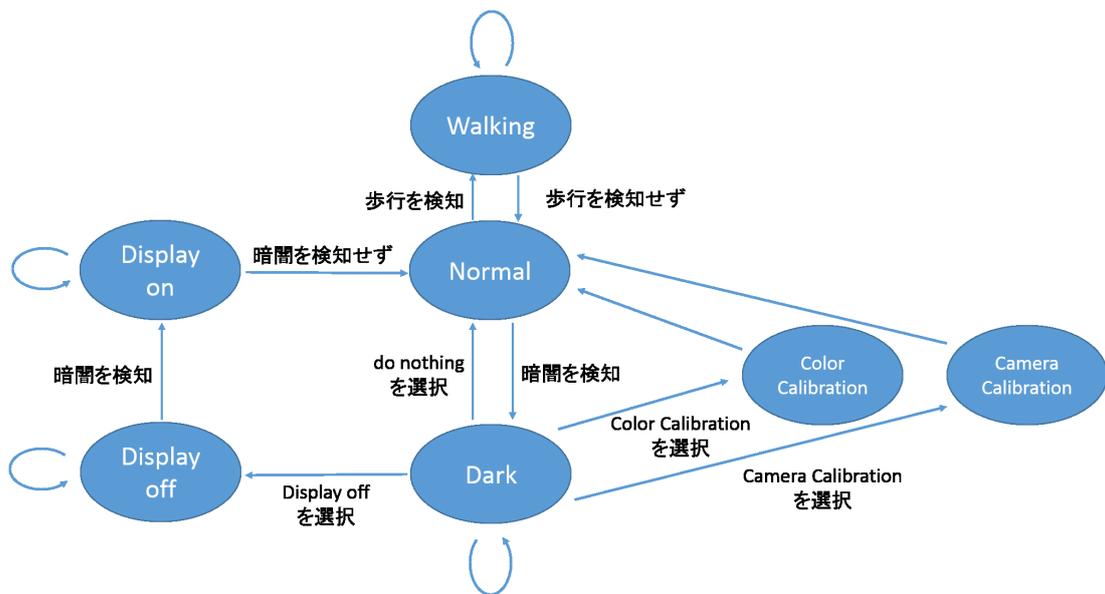


図 4.1.2: 状態遷移図

本に変化した時に、左の指先の座標でクリックコマンド実行するように割り当てた。ジェスチャの検出結果は、アプリケーション部に渡される。

暗闇検知部で行われる暗闇検出は、カメラ画像を 1/25 に縮小後、画像をグレースケールに変換する。その後、その画像の明度 (0~255) の平均を算出し、閾値 30 より小さい場合に暗闇と検出する。暗闇の検出結果は状態遷移管理部に渡させる。

歩行検知部では、HMD の加速度センサの Y 軸 (地面に対して垂直) の値を用いて、過去 1 秒間中の最大値が閾値  $12[m/s^2]$  を超えると歩行と検出する。加速度センサは HMD メガネ部の右側に内蔵されており、地面と垂直方向の Y 軸のデータを用いるだけで十分に検知できる。検出結果は状態遷移管理部に渡させる。

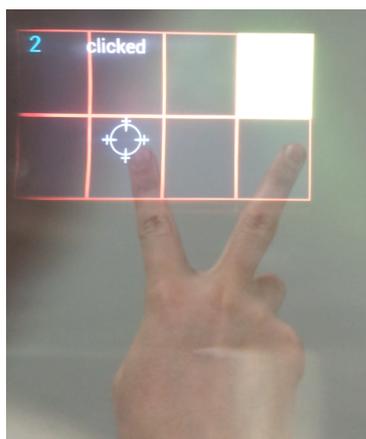


図 4.2.1: クリックジェスチャ

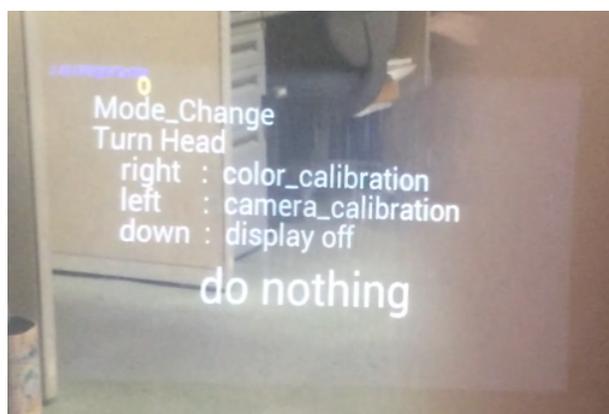


図 4.2.2: モードチェンジ (Dark モード)

### 4.3 移動座標計算部

ジャイロセンサからの x 軸 (首を左右に振る角度)、y 軸 (首を上下に振る角度) の角速度から、x 軸、y 軸の回転角度を計算する。それぞれの回転角度に 30 を掛けた値が移動座標であり、アプ

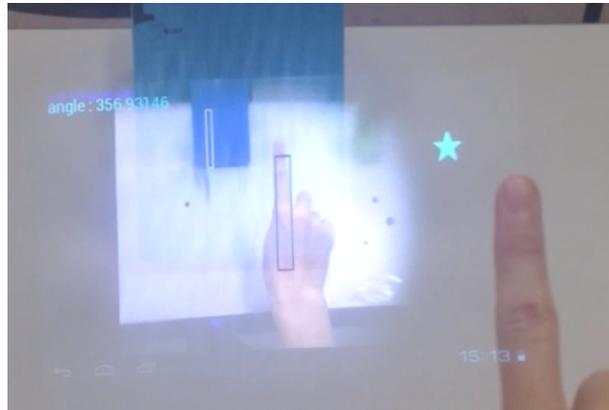


図 4.2.3: Color\_Calibration モード



図 4.2.4: Camera\_Calibration モード

リケーション部の各 Palette の座標に移動座標を回転方向の逆方向になるように加算する。例えば、ユーザが右に頭を 1 度回転させたとする、全ての Palette は左に 30 ピクセル移動する。

## 4.4 状態遷移管理部

本システムの状態は、Normal モード、Walking モード、Dark モード、Color\_Calibration モード、Camera\_Calibration モード、Display\_On モード、Display\_Off モードがある。状態遷移図を図 4.1.2 に示す。Normal モードの時に、歩行検知部からの歩行の検知により Walking モードに遷移する。歩行が検出されていない時には、Normal モードへ遷移する。Normal モードの時に、暗闇検知部からの暗闇の検知により Dark モードに遷移する。Dark モードの時に、モードチェンジ画面で do nothing が選択されると Normal モードへ遷移する。Dark モードの時に、モードチェンジ画面で Color\_Calibration が選択されると Color\_Calibration モードへ遷移する。カラーキャリブレーションが終了すると、Normal モードに遷移する。Dark モードの時に、モードチェンジ画面で camera\_Calibration が選択されると Camera\_Calibration モードへ遷移する。カメラキャリブレーションが終了すると、Normal モードに遷移する。Dark モードの時に、モードチェンジ画面で Display\_Off が選択されると、Display\_Off に遷移する。Display\_Off モードから、再び暗闇検知部からの暗闇の検知により、Display\_On モードに遷移し、暗闇が検知されなくなると、Normal モードへ遷移する。

## 4.5 アプリケーションと表示

アプリケーション部では、各 Palette が動作する。Palette では、アイコン、Widget、アプリケーションの各機能が動作している。Palette は、座標 (x,y)、移動するための左上の四角、それぞれの Palette で動作する機能、が実装されている。Palette の左上の四角をクリックすると、クリックされた Palette は、移動モードになる。移動モード中、指先の座標と Palette の座標が同じ座標になり、指先を動かすことで Palette を移動することができる。もう一度クリックすると、クリックされた座標に Palette が配置される。Palette の移動先に、別の Palette が配置されていた場合、元の位置に配置される。

本研究では、アプリケーションとして、カメラ機能、写真ギャラリー、時計、ActivityMonitor、数字入力キーパッド、を実装した。カメラ機能は、カメラアイコンをクリックすると、カメラ映像が目の前に表示され、5 秒後に写真が撮影される。撮影された写真は写真ギャラリーに追加される。ハンズフリーで撮影できるため、両手での作業中の写真も撮ることができる。写真ギャラリーは、仮想画面上に複数の写真が表示されている。頭を動かして見渡すようにして、複数の写真を見ることができる。写真ギャラリー中の写真をクリックすると、仮想画面の前方方向に拡大表示される。拡大された写真をクリックすると、拡大表示が消える。また、拡大表示中の写真は、水色の枠で囲われる。時計は、時刻が表示される。ActivityMonitor は、簡単な活動量計（カロリーと相関はない）になっており、前方方向の加速度 (x 軸) を計測し、絶対値を加算する。移動するに従って数値が増加する。数字入力キーパッドは、キーパッドの数字をクリックすることで、数字を入力できる。クリックした数字は、キーパッドの上部に表示される。キーパッドの e(enter) または、d(delete) で入力した数字を消すことができる。

表示部では、アプリケーション部の各 Palette (アプリケーション) が、draw したものを表示する。表示については、状態遷移管理部から渡された各モードに応じて表示形式が変わる。Normal モードでは、ヘッドトラッキングによって、頭の周りにベルト状の 360 度広がる仮想画面に、各

Palette が浮遊するように表示する。Walking モードでは、表示部分を仮想画面の中央に固定して表示する。その他のモードでは、それぞれのモードに応じて、そのモードの実行画面が表示がされる。

## 第5章 評価

### 5.1 クリックジェスチャの評価

#### 5.1.1 評価環境

提案した指先検出アルゴリズムでの、クリックジェスチャについての適合率、再現率、操作時間についての評価を行った。また、主観評価として使いやすさとストレスに関して VAS(Visual Analog Scale)法により評価を行った。実験は、図 5.1.1 に示すような、画面を 8 つの枠に区切って、マスを順にクリックする 8 マスクリック実験（視点固定実験）と、図 5.1.2 に示すような、マスを 2 倍の面積にしヘッドトラッキングを用いて仮想画面で広く使用する 8 マスクリック実験（ジャイロ実験）を行った。

実験では、現実に見える指先にカーソルが重畳して表示され、被験者がディスプレイのどの座標を指しているのか確認できる。クリックは、指先を 1 本から 2 本に変化させると、左の指先の座標でクリックコマンドが実行される。クリックした時に、ディスプレイの左上に”clicked”と表示され、クリックしたことを確認できる。また、ディスプレイの左上に認識されている指の本数が表示され、認識されている指先の本数を確認できる。

クリックの実験では、仮想画面に 8 つのマスが表示され、8 マスのうち 1 つのマスがランダムに黄色になる。黄色になったマスをクリックすると、次のマスが黄色になる。ランダム順に 8 つすべてのマスをクリックしてもらい、1 マスをクリックする制限時間として 20s 設け、20s 経つと無条件に次のマスに移る。この場合は、クリック失敗となる。黄色のマス内をクリックした場合は成功クリックとしてカウントし、黄色のマス外をクリックした場合、誤クリックとしてカウントする。1 つのマスをクリックするのに掛かる時間を計測するために、マスが黄色になってからクリックされるまでの時間を計測する。実験は、5 人の被験者を対象に行い、各実験 3 回ずつ試行を行った。実験終了後に主観評価として VAS 法と感想のアンケートを行った。被験者には実験前にクリックジェスチャを説明し、5 分程度の練習時間を設けた。実験背景として、白い壁の背景と生活空間の背景で評価実験を行った。実験に使用した BT-200 の内蔵カメラから見える各実験環境を図 5.1.3 と図 5.1.5 に示す。白い壁の背景は白い壁の前、生活環境の背景は研究室内である。白い壁の背景での実験風景を図 5.1.4 に、生活環境の背景での実験風景を 5.1.6 を示す。

実験の環境と実験プログラム（固定とジャイロ）の組合せとして、(a) 白い壁の背景、(b) 白い壁の背景+ジャイロ、(c) 生活環境、(d) 生活環境+ジャイロ、の 4 つの組合せで実験を行った。生活環境での実験については、人の活動については制限せず、実験時に被験者の視界内でデスクに向かって作業している学生もいた。

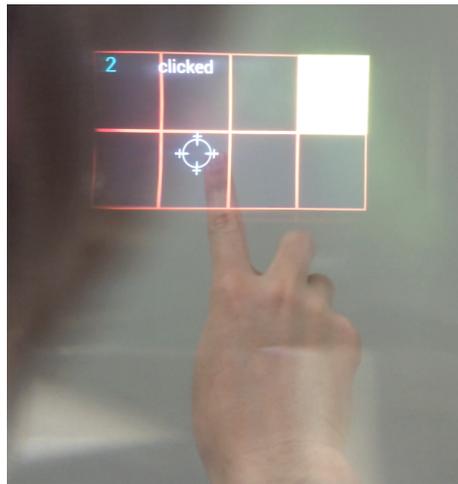


図 5.1.1: 8 マスクリック実験

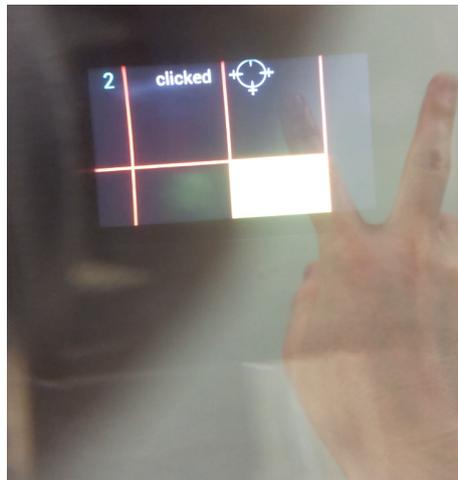


図 5.1.2: Body-Stabilized な仮想画面で広く使う 8 マスクリック実験



図 5.1.3: 白い壁の背景



図 5.1.4: 白い壁の背景での実験風景



図 5.1.5: 生活環境の背景



図 5.1.6: 生活環境の背景での実験風景

### 5.1.2 評価結果

図 5.1.8 に適合率 (precision), 図 5.1.7 に再現率 (recall) を示す. 今回の評価では, 適合率と再現率は次のように定めた.

$$\text{適合率} = \text{正解クリック数} / \text{すべてのクリック数}$$

$$\text{再現率} = \text{正解クリック数} / \text{正解の数}$$

今回の実験ではマス数が 8 つなので, 再現率の正解の数は 8 である. グラフでは, 被験者 A-E とその平均を示す. 適合率は, 誤クリックが少ないと高くなり, クリック精度を表す. 再現率は, 8 マスのうちいくつクリックできたかの割合であり, クリックするべきマスをどの程度クリックできたのかを表す.

適合率については, 平均に着目すると, すべての実験で, 良好な精度でクリックできていることがわかる. (a)(b) 固定実験と, (c)(d) ジャイロ実験, で比較すると, 結果に大きな差は見られず, どちらも同様の適合率となっている. しかし, 細かく見ると, 被験者 E 以外では, ジャイロ実験の結果の方が, 適合率は高くなった. (a)(b) 白い壁の背景と (c)(d) 生活環境の結果を比較すると, すべての被験者で生活環境の方が, 適合率が同様の値または下回った.

再現率については, (a)(b) 白い壁の背景では, すべての被験者で 100% となった. (c)(d) 生活環境では, 被験者 C, D の結果が下がった. (a)(b) 固定実験と (c)(d) ジャイロ実験の結果に, ほぼ違いは見られなかった.

1 クリックあたりの時間の平均の結果を, 図 5.1.9 に示す. 白い壁の背景では, クリックするマスが選択されてから, 2 ないし 3 秒程度でクリックすることができている. 視点固定実験とジャイロ実験の結果では, 1 クリックあたりの時間は同程度であった. (a)(b) 白い壁の背景に比べて (c)(d) 生活環境は, 1 クリックあたりの時間が増加した.

VAS法での使いやすさ評価の図を5.1.10に、ストレス評価の図を5.1.10に、被験者からの感想を表5.1に示す。平均的に見ると(a)(b)白い壁の背景では使いやすさの値は高く(c)(d)生活環境でも、(a)(b)と比べると、低い値になっているが概ね使いやすいと言える。生活環境では、手が背景と混ざり指先認識の精度が下がり、カーソルがブレてしまうなどの現象が起こるため、使いやすさが下がり、ストレス値が上がる傾向にあった。被験者Dのストレス値はどの実験でも高くなっている。これは、薄橙色の服を着ている人にカーソルが取られたという感想があり、それが原因だと考えられる。被験者C、Dのストレスの値が高くなっているのは、再現率と適合率の値が低くなっていることから、クリックがうまくできていないことが原因だと考えられる。

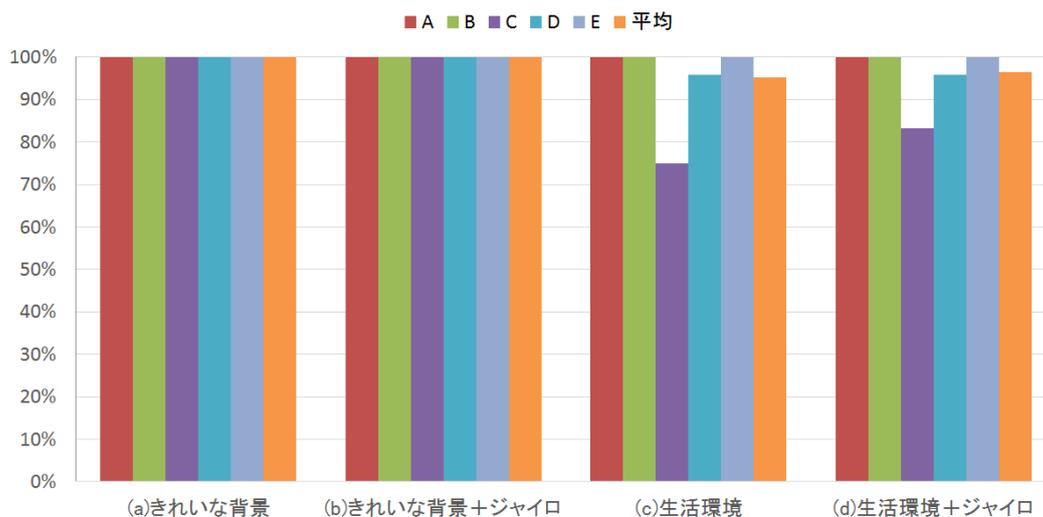


図 5.1.7: 再現率

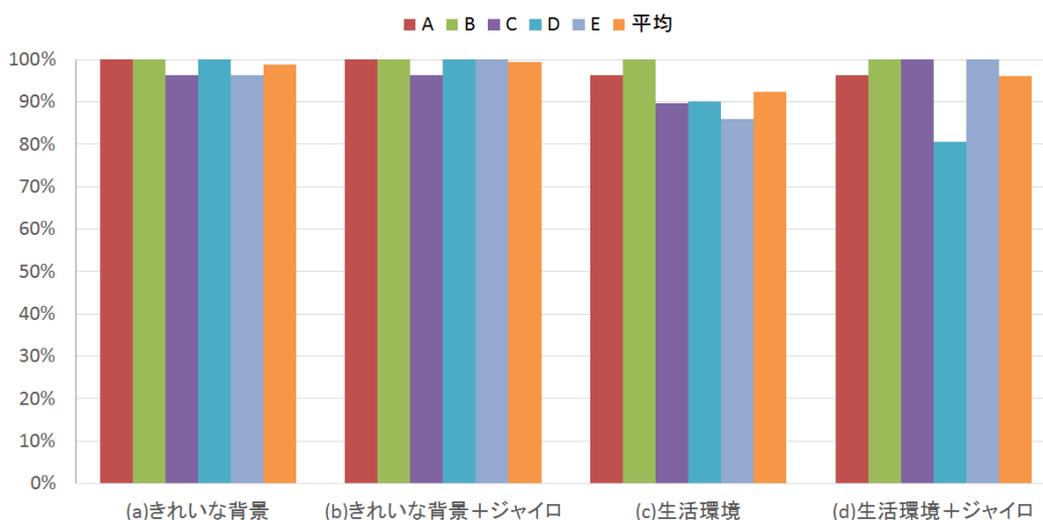


図 5.1.8: 適合率

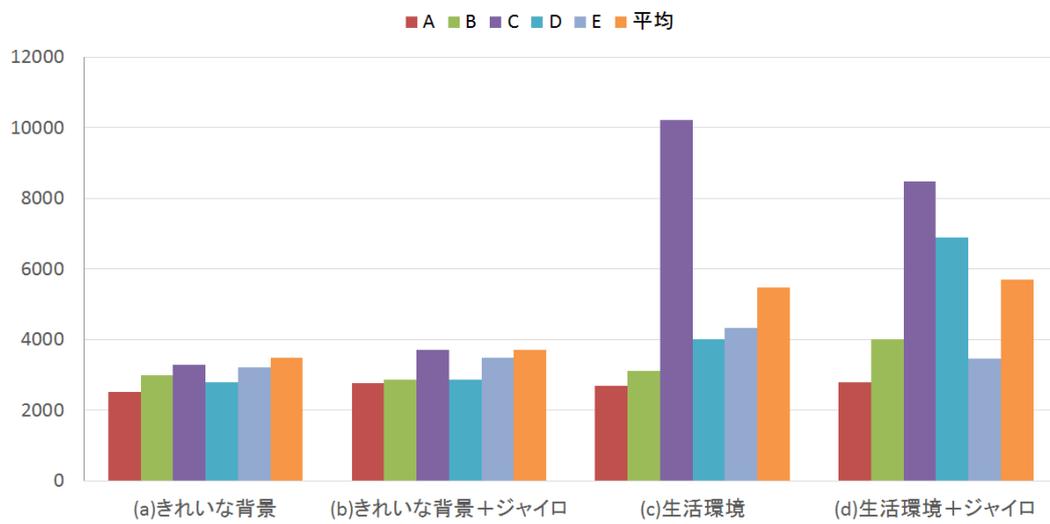


図 5.1.9: 1 クリックあたりの平均時間

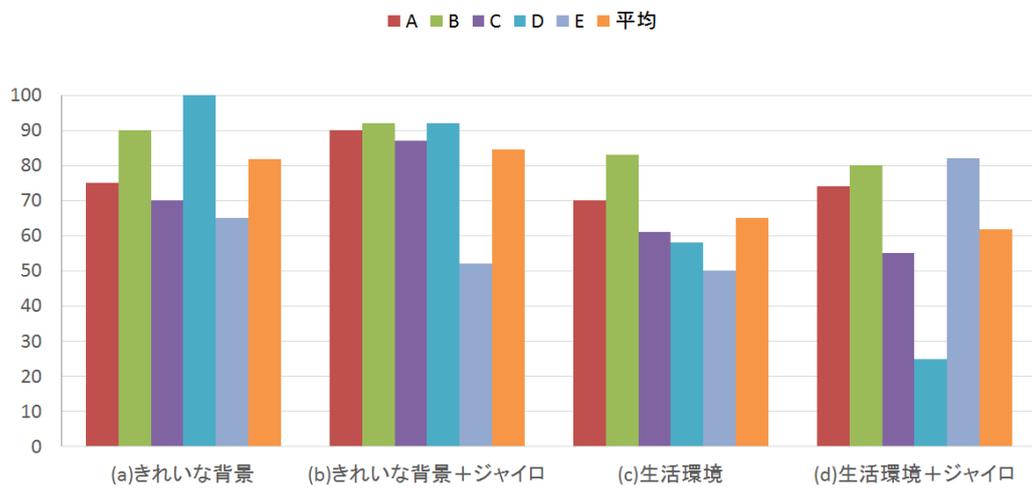


図 5.1.10: VAS 法での使いやすさ評価

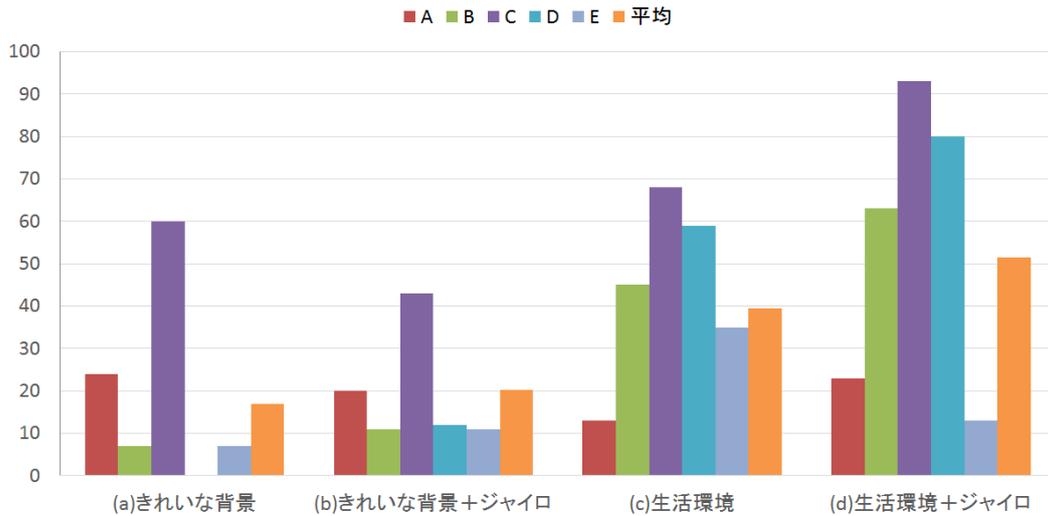


図 5.1.11: VAS 法でのストレス評価

### 5.1.3 議論

クリックジェスチャ実験の結果は、実験に使用した背景の白い壁の背景と生活環境では、高い精度でクリックできた。しかし、屋外、照明環境が悪い場所、背景に肌色に近い色のものがある場所では、指先で全く操作できないということもあった。指先検出の精度は、環境背景による依存度が高い。これは、手の色と背景色が似ていると、背景と手が一体化して認識してしまうことや、照明環境が悪い場所では手の色が暗い色になってしまうことなど、指先検出がうまく行われなからであると考えられる。また、実装に用いた BT-200 に内蔵されているカメラは、画素が VGA の 30 万画素であるので性能が良いとは言えない。そのため、カメラ性能が上がれば、指先検出は改善すると考えられる。また、BT-200 のカメラにはオートフォーカスと自動露出調整があるため、場所によっては、それらの機能が悪影響して、手の色が白飛びすることや、極端に暗くなることもあった。

1 クリックあたりの時間では、平均に着目すると白い壁の環境に比べて生活環境の方がやや時間が掛かっている。これは、生活環境では肌色に近い色領域が出現しノイズが発生し、カーソルがズレてしまうため、クリックするマスに狙いをつけるのに時間が掛かったためであると考えられる。

実験終了後、被験者 A, C から「手を使うと疲れる」「腕がつりそうになる」といった感想があった。1 試行に 30 秒程かかり、3 回の試行、4 パターンしてもらったので、試行の間ごとに多少休憩の時間があつたものの、実験の総時間は 6 分程度であつた。手を長時間上げっぱなしにすることは、利用者への負担が多く、長時間の連続した使用は難しいことが想定される。本システムのインターフェースが使用されるのは、キーボードやマウスのように多くの入力を長時間するのはなく、その場で使いたい機能をすぐに呼び出して使用するような使い方が理想とされる。

クリックジェスチャ実験に参加した被験者 D と E は、本システムでの指先による操作を初めて体験した。しかし、他の被験者と変わらない精度でクリックできた。このことから、クリックジェスチャを習得するのに時間が掛からないと考えられる。したがって、初めて使用した人でも、特段の練習やコツの習得などがなくても、すぐに操作できる。

クリックジェスチャ実験評価の使いやすさでは、視点固定実験でも、ヘッドトラッキングを用

表 5.1: クリックジェスチャ実験の感想

被験者	感想
A	生活環境ではカーソルが動く、ノイズフィルタを入れた方がいいかもしれない 手を使うと疲れる、手をくっと上げるのがつらい
B	指を1から2に、指の本数の認識が遅くて、マスが近いところは2本のままになってしまう ジャイロでも、固定でも、あまり変わらない
C	背景の人にカーソルが取られる感じがした 生活空間での実験では、カーソルの位置が飛び飛びになる 腕を上げているのがつらい、つりそう 白い背景の場合は、ジャイロを使ったほうがクリックしやすい ジャイロ実験はマスが大きいので、指を合わせる時間が少ない
D	固定だと頭の位置を動かして、クリックできる位置まで移動させることができる ジャイロだとその位置に固定してしまうのでむずかしい 色認識のテクニック、実験を行った場所では手を傾けると明るくなる
E	白い壁では、固定のほうがよい 生活環境なら、ブレが大きくなるので、マスが大きい方がクリックしやすい 頭を動かすのがめんどくさい

いて仮想画面で広く使用する実験でも、評価の平均に大きな違いは見られなかったが、被験者からも「マスが大きくなって、クリックしやすくなった」という感想があった。しかし、別の被験者からは「頭を動かすのが面倒くさい」という感想もあった。被験者によって、頭を動かしても大きなマスをクリックするほうが良いと感じるのか、頭を動かすのは面倒であるのでマスが小さくても良いと感じるのか、人によって感じ方が違った。

クリック時間については、視点固定実験とジャイロ実験でほとんど違いが見られなかった。マスの面積が2倍になり指先の移動距離が長くなったにも関わらず、ヘッドトラッキングモードによって広い仮想画面を利用したとしても、クリック時間に影響することはないと考えられる。

## 5.2 See-Through Information Belt の評価

### 5.2.1 評価環境

提案した InfoBelt の評価として、システムの機能の使用できたか、VAS(Visual Analog Scale) 法、所感、により評価を行った。VAS 法の項目は、“使いやすさ”、“ストレス”、“表示はジャマかどうか”、“情報表示が常にある方が良いか”、とした。

実験は、建物内からスタートして、InfoBelt にある写真ギャラリーから地図と目的地の写真を確認してもらい、その中から地図を選んで表示させ、地図を表示させながら目的地まで移動してもらった。また、カメラ機能で写真を撮ることを試してもらい、写真ギャラリーに追加されていることを確認してもらった。

実験で使用した地図を図 5.2.2 に、目的地の写真を図 5.2.3 に示す。写真ギャラリーには、目的地までの地図と目的地の写真が見える。その2枚の写真を確認してもらって、地図をクリックし

て選択してもらい、前方方向に地図を表示してもらい。この状態で、歩行してもらいと、図 5.2.1 のように左側に地図、右上に Activity Monitor、右下に時計が表示される。この表示された地図を見ながら、目的地まで移動してもらい。カメラ機能は、カメラのアイコンをクリックし、写真を撮ってもらい。実験は、5 人の被験者を対象に行った。実験終了後に主観評価として VAS 法と感想のアンケートを行った。被験者には実験前に InfoBelt の機能について、説明を行い簡単に試してもらった。



図 5.2.1: 実験の移動中に見える画面



図 5.2.2: 実験で使用した地図

## 5.2.2 評価結果

InfoBelt の実験では、すべての被験者で、InfoBelt にある写真ギャラリーから地図と目的地の写真を確認してもらい、写真ギャラリーから地図を選んで表示させること、地図を表示させながら目的地まで移動してもらい、カメラ機能で写真を撮ることを試してもらい、試してもらった。

InfoBelt システムの VAS 法による評価を図 5.2.4 に示す。このグラフは、数値が高いほど評価が高い。使いやすさに関しては、平均で 62 となり、使いやすいとも使いづらいとも言えない評価が得られた。今回の実験では「GPS と地図を連動させるとさらに使いやすい」「曲がる場所で教えて



図 5.2.3: 目的地の写真

くれると良い」という地図に関する要望の感想が多かった。被験者は、普段使っている地図アプリの機能と比較すると使いづらいつ感じたと考えられる。

使いやすさ以外の項目に関しては、個人差が大きく、被験者によって評価が別れた。ストレスの項目に関しては、指先検出の精度に依存すると考えられる。指先検出がうまくいかず、指先で操作できなくなった場合には、ストレス値が高くなった。

表示がジャマではないかと情報表示が常にあるほうが良いに関しては、被験者 A, D では高い評価が見られた。被験者から「常にディスプレイに表示があると視界が遮られるため移動するときに危ない」、「表示に集中してしまうので危ない」、「地図の表示が目の前にあるのではなく、小さい方が良い」という感想があった。常に表示があると、危ないと感じる被験者もいた。ただし、InfoBelt では、カメラを覆い頭を下に向けることによって、ディスプレイをオフにすることができる。事前にその機能について説明をしたが、実験が短時間であったので、その機能を自発的に試した被験者はおらず、実験中は常にディスプレイに表示がある状態であった。また、移動中のディスプレイ表示は、ディスプレイの全体にアプリケーションを表示するのではなく、視界のジャマにならない程度に表示するほうが良いと考えられる。

「見ている景色と目的地の写真を見比べられるのが簡単にできて良い」という感想があった。実験では、写真ギャラリーに目的地の写真があり、目的地の写真と実際の風景を眺めることができ、立ち止まって頭を動かすだけで、容易に確認ができた。

また、「指先が検出されず、カーソルが表示されない時に手軽にキャリブレーションできるのが良い」という感想があった。指先検出ができないと InfoBelt は操作することができなくなる。移動先で指先検出がうまくいかない時に、肌色領域のキャリブレーション機能を簡単に確実に起動できるので、移動先の環境が悪くなければ、操作できるようになる。

評価実験を通して、すべての被験者が目的地まで InfoBelt を使用して行くことができ、InfoBelt の指先でのジェスチャ操作や、Body-Stabilized な仮想画面、Walking モードによる仮想画面の視点固定が有効であると確認できた。また、被験者からの所感により、いくつかの問題点や、改善点が得られた。

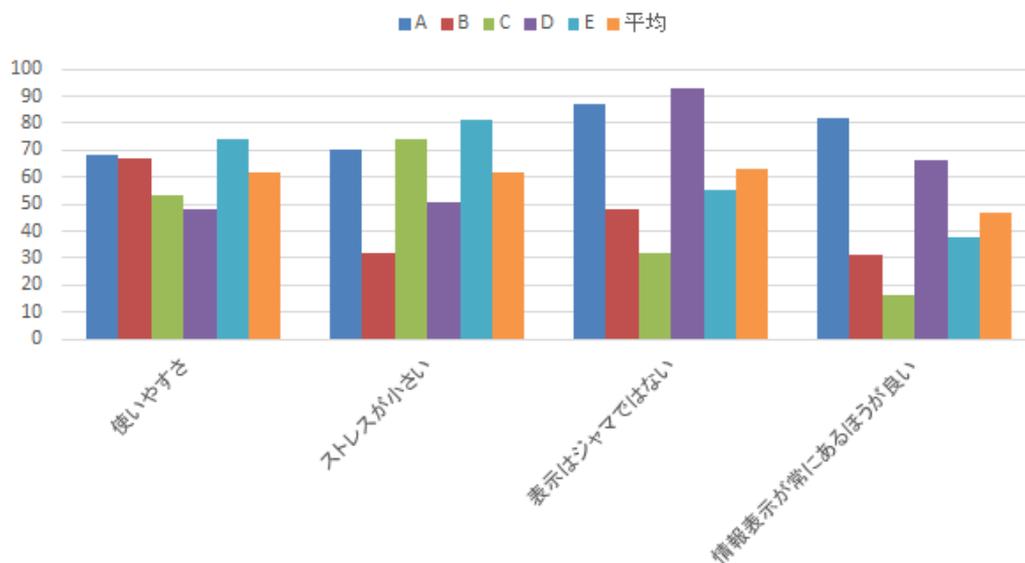


図 5.2.4: InfoBelt 実験についての VAS 法による主観評価

表 5.2: InfoBelt 実験の感想

被験者	感想
A	GPS と地図を連動させるとさらに使いやすい 暗闇検出が暗い所で誤作動してしまった 地図が固定しているのは、使いやすい メガネを掛けているのがちょっと恥ずかしい
B	階段とかあるとあぶない 地図で現在位置がわかるようにしてほしい まったくしらない場所だとうるさかな
C	表示がずっとだしっぱなしだと、表示に集中してしまうので、危ない 地図が歩く方向に向いてほしい 見たい時だけに地図を表示したほうがいいかもしれない 見ている景色と写真を見比べて確かめられるのは良い ここで曲がってくださいと言ってほしい 歩行の邪魔にならない程度に地図が小さいほうが良い 指先が認識しない 手軽にキャリブレーションできるのが良い
D	日向だと指先が認識しない おしゃれなデザインだった イラッとしたときに手軽にキャリブレーションを行えるのは良い
E	地図が進行方向に向いてほしい 全画面に絵があると、なにも見えなくて事故りそう 指先認識はうまくいった

## 第6章 結論

近年、計算機の小型高性能化やネットワークサービスの普及により、日常生活におけるコンピュータ支援の拡大が期待されている。光学シースルー方式HMDを用いれば、透過性や可搬性を活かし、あらゆる機会でのコンピュータ支援を制約なく受けられる。

本論文では、ユーザが日常生活において、いつでもどこでも容易にコンピュータ支援を受けるための、光学シースルー方式HMDを用いたウェアブルコンピューティングシステムとして、See-Through Information Beltを提案した。InfoBeltはマーカレス指先検出アルゴリズムにより、HMDのディスプレイ越しに直接見える指先でのポインティングと、指を使った直観的なジェスチャにより操作できる。InfoBeltは、頭の周りにベルト状の360度広がる仮想画面を利用でき、アプリケーション等をPaletteとして自由に再配置できる。また、使用したいアプリケーションの方向に頭を向けるだけで、そのアプリケーションを利用できる。InfoBeltは、状態検知により、ユーザの状態に合わせて、適切な表示形式に切り換える。移動時には表示部分が仮想画面の中央に固定して、常に特定のアプリケーションを利用できる。停止時には自由に見渡して使うBody-Stabilizedな仮想画面を利用できる。

クリックジェスチャ実験とInfobeltの実験により、提案したシステムを評価した。クリックジェスチャ実験では、実験の環境と実験プログラム（固定とジャイロあり）の組合せとして、白い壁の背景、白い壁の背景+ジャイロ、生活環境、生活環境+ジャイロ、4つの組合せで実験を行った。被験者の平均値で、それぞれのクリック精度は、98%、99%、92%、96%となった。初めて使用した人でも問題なく操作でき、Body-Stabilizedな仮想画面でも、視点固定と変わらない精度でクリックできた。InfoBeltの実験では、InfoBeltを被験者に利用してもらい、指先でのジェスチャ操作、Body-Stabilizedな仮想画面、歩行検知による表示形式の切替、が有効であると確認できた。また、被験者からの所感により、いくつかの問題点や、改善点が得られた。今後の課題として、指先検出アルゴリズムの精度向上やInfoBeltの機能改善や機能追加が挙げられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂きました入江英嗣准教授に感謝の意を表します。また、同講座吉永努教授、吉見真聡助教にも研究を進めるにあたり多くの有益なご助言を頂き、感謝致します。日常の議論を通じて多くのご指摘、ご協力を下さいました吉永研究室・入江研究室の先輩方、同期の皆様、後輩の皆様に感謝致します。

本研究の一部は、電気通信大学民間等共同研究（セイコーエプソン株式会社）「光学透過ヘッドマウントディスプレイにおけるジェスチャ入力の研究」、電気通信大学民間等共同研究（株式会社中山鉄工所）「光学ベルトコンベアスケールに関する研究」によるものです。

## 参考文献

- [1] MOVERIOBT-200(エプソン製品情報). <http://www.epson.jp/products/moverio/bt200/>.
- [2] Google. Google Glass. <https://www.google.com/glass/start/>.
- [3] Sony Corporation. Personal 3D Viewer. <http://www.sony.jp/hmd/>.
- [4] Oculus VR, Inc. Oculus Rift. <https://www.oculus.com/>.
- [5] P. Mistry and P. Maes. Sixthsense: a wearable gestural interface. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Sketches*, pp. 11:1 – 11:1, 2009.
- [6] Y. Kojima, Y. Yasumuro, H. Sasaki, Ichiroh Kanaya, O. Oshiro, T. Kuroda, Y. Manabe, and K. Chihara. Hand manipulation of virtual objects in wearable augmented reality. In *Virtual Systems and Multimedia, 2001. Proceedings. Seventh International Conference on*, pp. 463–469, 2001.
- [7] T. Lee and T. Hollerer. Handy ar: Markerless inspection of augmented reality objects using fingertip tracking. In *Wearable Computers, 2007 11th IEEE International Symposium on*, pp. 83–90, Oct 2007.
- [8] M. Störring, T.B. Moeslund, Y. Liu, and E. Granum. Computer vision-based gesture recognition for an augmented reality interface. In *Int. Conf. on VISUALIZATION, IMAGING, AND IMAGE PROCESSING*, pp. 766 – 771, 2004.
- [9] Andrea Colaço, Ahmed Kirmani, Hye Soo Yang, Nan-Wei Gong, Chris Schmandt, and Vivek K. Goyal. Mime: Compact, low power 3d gesture sensing for interaction with head mounted displays. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13*, pp. 227–236, 2013.
- [10] R. Lo, A. Chen, V. Rampersad, J. Huang, Han Wu, and S. Mann. Augmented reality system based on 3d camera selfgesture sensing. In *Technology and Society (ISTAS), 2013 IEEE International Symposium on*, pp. 20–31, 2013.
- [11] 加茂浩之, 田中二郎. ウェアラブル拡張現実感による情報端末の仮想化. マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集, 第 2011 巻, pp. 1223–1233, jun 2011.
- [12] 加茂浩之, 田中二郎. AiR surface: 拡張現実感を用いた仮想タッチパネルインタフェース. 情報処理学会第 73 回全国大会, 2011.
- [13] M. Billinghurst and H. Kato. Collaborative mixed reality. In *Int. Symp. on Mixed Reality*, pp. 261 – 284, 1999.

- [14] Barrett M. Ens, Rory Finnegan, and Pourang P. Irani. The personal cockpit: A spatial interface for effective task switching on head-worn displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3171–3180, 2014.
- [15] 入江英嗣, 放地宏佳, 小木真人, 檜原裕大, 芝星帆. Airtarget:光学シースルー方式HMDとマーカレス画像認識による高可搬性実世界志向インターフェース. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp. 1295–1304, Jul 2012.
- [16] 入江英嗣, 森田光貴, 岩崎央, 千竈航平, 放地宏佳, 小木真人, 檜原裕大, 芝星帆, 眞島一貴, 吉永努. Airtarget:光学シースルー方式 hmd とマーカレス画像認識による高可搬性実世界志向インタフェース. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 4, pp. 1415–1427, apr 2014.

## 発表論文

- [1] 岩崎 央, 千竈 航平, 森田 光貴, 吉見 真聡, 入江 英嗣, 吉永 努. “光学シースルー方式 HMD に適した直観的ジェスチャー UI” 信学技報, Vol. 113, No. 234, pp.41–46, Oct. 2013.
- [2] 千竈 航平, 岩崎 央, 森田 光貴, 吉見 真聡, 入江 英嗣, 吉永 努. “HMD 端末単体で動作する指先認識アルゴリズムの性能評価” 信学技報, Vol. 113, No. 234, pp.35–40, Oct. 2013.
- [3] 中島 嵩文, 千竈 航平, 岩崎 央, 吉見 真聡, 入江 英嗣, 吉永 努. “AirTarget システムにおけるカーソルの予測描画による UI の改善” 信学技報, Vol. 114, No. 242, pp.7–12, Oct. 2014.
- [4] 入江 英嗣, 森田 光貴, 岩崎 央, 千竈 航平, 放地 宏佳, 小木 真人, 樫原 裕大, 芝 星帆, 眞島 一貴, 吉永 努. “Airtarget:光学シースルー方式 HMD とマーカレス画像認識による高可搬性実世界志向インタフェース”, 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 4, pp. 1415-1427, Apr 2014.

## 特許

- [1] 千竈 航平, 岩崎 央, 入江 英嗣. “ヘッドマウントディスプレイ、画像表示方法及びプログラム”, 特願 2014-212248, Oct, 2014.
- [2] 入江 英嗣, 稲場 朋大, 岩崎 央, 千竈 航平, 力 翠湖, 中山 弘志, ビソンボロ アベル. “粉粒体の流量計測方法とそのプログラム”, 特願 2014-212119, Oct, 2014.