

人とコンピュータのインタラクション拡張のための
画像認識を用いた実世界指向ヒューマンインタフェースの
研究

松原 孝志

電気通信大学 大学院 情報理工学研究科
博士（工学）の学位論文

2018 年 3 月

電気通信大学 大学院 情報理工学研究科
博士（工学）の学位論文

博士論文審査委員会

主査	田野	俊一	教授
委員	広田	光一	教授
委員	柳井	啓司	教授
委員	橋山	智訓	准教授
委員	橋本	直己	准教授

著作権所有者

松原 孝志

2018 年

Study on Real World Oriented Interface Using Image Recognition for Expansion of Human-Computer Interaction

Takashi Matsubara

Abstract

Computers continue to evolve as a tool to expand human intellectual, creative, and emotional activities. Human-computer interfaces play an important role in utilizing the power of computers without interrupting human activities. In recent years, the collaboration between humans and computers has expanded, and the scope of human activity is expanding. Therefore, an interface between humans and computers becomes more important.

An effective interface enabling real-world-oriented and intuitive operations is a major factor for increasing the appeal of using computers for information retrieval. Such an interface fundamentally affects human activities widely and generally. When using an interface, the natural action of looking at the screen and moving one's hand is most frequently used. Therefore, the purpose of this research is to develop an interface that extends the interactions between a human and a computer and enables intuitive operations by "seeing and moving."

In recent years, intuitive operations by "seeing and moving" focus mainly on touch operations used in smartphones and tablets. Therefore, such operations are limited to short-distance interactions in small- to medium-sized environments with a display. In this research, as an approach to extend such interactions, we consider those in which basic elements such as size, interaction distance, and type of screen in real environments are not restricted. Furthermore, such considerations will

enable the creation of an interface that uses a human's natural gestures. Therefore, we conducted research and development with the following two pre-requisites.

- I. Create an interface that can operate a large screen from an optimal viewing distance.

A large screen is excellent for displaying content with a high degree of visibility. This advantage is secured when its content can easily be viewed from far away. Therefore, we will develop an interface that uses natural gestures from the optimum viewing distance of a large screen.

- II. Create a human interface that can be operated by touching a non-display surface.

It is natural to approach a screen and touch it with your hands. However, if you do not have a physical display like a projector or wearable device, you can not touch the screen. Therefore, by enabling the operation of touching a non-display surface, we can extend the interactions.

This paper is organized as follows. The first section describes the background of the research and the role of a human interface. We will also clarify the purpose and approach of the research. The second section describes the conventional research and presents the main issue. The third and fourth sections will describe the human interface that we have researched and developed as the main contents of this paper.

The third section describes a human interface that can operate a large screen from an optimum viewing distance. In this research, we decided to develop a gesture operation method for a digital signage system. We designed the graphical structure and operation methods of the digital signage system. In addition, a usability evaluation was carried out by general subjects to confirm the system's practicality. We determined the following three mechanisms of interaction.

- (i) As an interface with a graphical structure can be operated intuitively, it is effective to hierarchize the information to be operated and to visualize that hierarchy as a menu by using the depth direction of the screen.
- (ii) As gesture operations can be performed intuitively and efficiently, it is effective to recognize the movement of a hand approaching the screen and

apply this gesture to the selection operation of the menu.

- (iii) As the position of a large screen affects the operations performed on it, for example, if the screen is laid flat to improve visibility, consideration for reducing the burden on a person's body is necessary.

The fourth section describes an interface that can be operated by touching a non-display surface. The most effective way to use this type of interface is to display an image from a projector or head-mounted display onto surrounding real-world surfaces and touch it directly. However, these surrounding surfaces are not always flat. For example, there might be outlets in a wall or magnets on a desk. In general, there are many surfaces where protrusions are present and/or objects are placed. Therefore, we propose a new touch detection method and a prototype system with an IR camera and two IR lights that requires no surface sensors and can detect a touch even on non-flat surfaces. There are three main contributions in this work.

- (i) We conducted experiments to determine the accuracy required for touch detection. As a result, nearly all touch operations could be detected if the position of a user's finger is 5 mm or more away from a surface.
- (ii) We propose a new touch detection method and a prototype system with an IR camera and two IR lights that requires no surface sensors and can detect a touch even on non-flat surfaces. To improve touch detection, we have developed two techniques: extraction of shadow area and detection of shadow shape change.
- (iii) We evaluated the accuracy of touch detection with our prototype system and found that a touch can be detected with high accuracy over a large (80 inches wide) operating surface.

The fifth section concludes the results of this research. In this research, to extend human-computer interactions, we developed a real-world-oriented interface that enables intuitive operations by "seeing and moving" with various environments and devices. We want to further develop the interface not only to make it easier for a human being to use a computer but also develop technology that contributes to maintaining the quality and value of a sophisticated system.

人とコンピュータのインタラクション拡張のための画像認識 を用いた実世界指向ヒューマンインタフェースの研究

松原 孝志

概要

コンピュータは人の知的、創造的、感性的な活動を拡張するための道具として進化を続けている。人の活動を阻害することなくコンピュータのパワーを利用するために、ヒューマンインタフェースは重要な役割を担ってきた。近年では、人とコンピュータが高度に連携、融合するインタラクションの拡張により人の活動範囲が広がっており、人とコンピュータの界面となるヒューマンインタフェースがより重要度を増している。

実世界指向で直感的な操作性を実現した快適なヒューマンインタフェースは、情報機器製品としてのコンピュータの魅力を高める大きな要因となっている。このような実世界指向インタフェースは、人が常に具体的な環境の中にいるが故に、人の活動において最も基本的であり、広く一般に影響を及ぼす。実世界指向インタフェースにおいて、特に「見て、手を動かす」操作は人が自然に利用でき、尚且つ、最も利用頻度が高い操作のひとつである。そこで、本研究では、実世界指向インタフェースによるインタラクション拡張のために、「見て、動かす」直感的な操作を可能にするヒューマンインタフェースを実現することを目的とした。

「見て、動かす」直感的な操作は、近年、スマートフォンやタブレットなどのタッチ操作を中心に洗練されてきた。これは「中小型」「手元」「ディスプレイ」という限定された実環境でのみ、直感的な操作が実現されていると言い換えることができる。そこで、本研究では、インタラクションを拡張するためのアプローチとして、実環境における画面の「大きさ」「距離」「種類」という基本的な要素が限定されることのないインタラクションを検討し、人の自然な行為を取り入れたヒューマンインタフェースを実現する。そこで、次の2つの観点で研究開発を行った。

- ・ 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース

大画面は視認性や情報の一覧性に優れる。この長所は、大画面を見やすい距離（以下、最適視距離）に離れて見るときに担保されるため、最適視距離で行う自然な行為を操作に取り入れて、インタラクションの拡張を実現する。

- ・ 非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース

画面に近づいて手を触れて操作することは直感的であり自然な行為として行われるが、プロジェクタやウェアラブルデバイスのように物理的なディスプレイが存在しない場合、画面に触れて操作できない。そこで、このような非ディスプレイ面に触れて操作できるようにすることで、インタラクションの拡張を実現する。

本論文は以下のように構成される。第1章は序論として、研究の背景とヒューマンインタフェースの役割を述べ、研究の目的とアプローチを明らかにする。第2章では、従来研究について論述し、その課題について議論する。第3章と第4章は、論文の主要内容として研究開発したヒューマンインタフェースを整理する。

第3章は大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースについて論じる。本研究では、大画面の用途を具体的に定め、その用途を対象とした操作およびシステムを統合的に開発することで、大画面を最適視距離で操作するための基本技術を確認する方針とした。この具体的な用途として、ジェスチャ操作を用いてフロアガイドコンテンツをインタラクティブに操作できるデジタルサイネージを選定した。グラフィック構造および操作方法の設計を行い、デジタルサイネージのシステムを実装して試作検証した。また、一般被験者でのユーザビリティ評価により、利用方法を説明することなく目的の操作を実行できる、公共用途に適した実用性を確認した。インタラクションの仕組みとして以下の3つの成果を得て、これにより大画面を最適視距離で操作する基本技術を確認した。

- (i) 直感的に操作できるグラフィック構造として、操作対象の情報を階層化するとともに、画面の奥行き方向を利用して階層を可視化する表現が有効である。
- (ii) 直感的かつ効率的に操作可能なジェスチャ操作として、手が近づく動きのジェスチャを認識してメニュー階層の選択操作に適用することが有効である。
- (iii) 大画面の操作は、画面を寝かせて見やすくするなど、身体への負担軽減の配慮が必要である。

第4章は非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースについて論じる。本ヒューマンインタフェースの最も有用な用途は、周囲の実空間の様々な

面にプロジェクタやヘッドマウントディスプレイで画面を重畳して表示し、重畳した画面に直接タッチ操作することであると考える。しかしながら、身の回りにある机上や壁面などの様々な面上は、物が置かれる、突起物があるなどの状態が多い。そこで、面上や面の周囲の様々な状態に対応してタッチ検出する方法として、赤外カメラと2つの赤外照明を用いて指先の左右にできる影を利用して指先の接触を検出する新たな手法を提案する。提案手法を用いてタッチ検出を行うシステムを開発した。この開発を通じて、以下の3つの成果を得て、これにより非ディスプレイ面に触れて操作する基本技術を確立した。

- (i) タッチ検出に必要な精度を求める実験を行い、面から指が 5mm 以上離れたことが判別できれば、ほぼ全てのタッチ操作が検出できることを明らかにした。
- (ii) 赤外カメラと2つの赤外照明を用いて、非ディスプレイ面でタッチ検出できる新たな手法を提案し、高精度なタッチ検出を実現するために、影領域の抽出技術と影の変化の検出技術の2つの技術を開発した。
- (iii) 提案手法の試作検証とタッチ検出精度の評価を行い、80 インチの操作対象面の全面で高精度にタッチ検出できることを確認し、提案手法の有効性を確認した。

第5章では本研究の成果を総括する。本研究では、人間とコンピュータのインタラクションの拡張に向けて、実世界指向インタフェースにおける「見て、動かす」直感的な操作を様々な実環境やデバイスで実現するヒューマンインタフェースの基本技術を確立した。ヒューマンインタフェースは、人間とコンピュータの界面としてインタラクションを支える役割を増している。ヒューマンインタフェースが人間にとっての使いやすさを超えて、高度なシステムの質や価値を維持するために効果を発揮する技術開発にさらに努めたい。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 ヒューマンインタフェースの役割と研究の目的	3
1.2.1 ヒューマンインタフェースの役割	3
1.2.2 次世代のヒューマンインタフェースの方向性	4
1.2.3 研究の目的	5
1.3 研究のアプローチ	6
1.4 本論文の構成	9
第2章 従来研究と課題	10
2.1 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース	10
2.1.1 用途の具体化	10
2.1.2 従来研究	11
2.1.3 課題	13
2.2 非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース	14
2.2.1 用途の具体化	14
2.2.2 従来研究	15
2.2.3 課題	16
第3章 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース	17
3.1 研究の対象と解決すべき課題	17
3.2 アプローチ	18
3.2.1 コンテンツの選定	18
3.2.2 フロアガイドの利用状況調査	18
3.2.3 要件定義	18
3.3 インタラクション設計	20
3.3.1 直感的に操作できるグラフィック構造	20
3.3.2 短時間で操作するためのジェスチャ操作	23
3.3.3 身体への負担が少ない端末形状	26
3.4 実装	28
3.4.1 ハードウェア構成	29
3.4.2 ソフトウェア構成	31
3.4.3 ハンドトラッキング	32
3.5 評価	33
3.5.1 思考発話法によるユーザビリティ評価	33

3.5.2 評価結果	35
3.5.3 考察	36
3.6 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースのまとめ	38
第4章 非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース	39
4.1 研究の対象と解決すべき課題	39
4.2 提案手法	39
4.2.1 基本原理	40
4.2.2 タッチ検出精度の目標値	42
4.2.3 提案システム構成	45
4.2.4 事前検証による課題抽出	47
4.3 影領域の抽出技術	47
4.4 影の変化の検出技術	51
4.5 影の変化の検出の事前評価	53
4.6 タッチ検出のアルゴリズム	55
4.7 タッチ操作の検証	56
4.8 タッチ検出精度の評価	57
4.8.1 評価方法	57
4.8.2 結果	58
4.8.3 考察	59
4.9 タッチ位置の補正	61
4.9.1 タッチ位置精度の目標値	61
4.9.2 回帰分析を用いたタッチ位置補正の検討	62
4.9.3 指の姿勢を表す特徴量の計算	63
4.9.4 重回帰分析を用いたタッチ位置補正量の計算	63
4.10 タッチ位置精度の評価	64
4.10.1 評価方法	64
4.10.2 結果	65
4.11 非ディスプレイ面のタッチ操作のまとめ	66
第5章 結論	69
5.1 成果のまとめ	69
5.2 今後の課題	74
発表論文リスト	83
謝辞	86
参考文献	87
著者略歴	91

図目次

図 1.1	コンピュータの利用による人間の活動範囲の拡大	2
図 1.2	人間とコンピュータのインタラクションで構成されるシステム	4
図 1.3	「見て、動かす」実世界指向インタフェース	6
図 1.4	インタラクションの拡張が求められる 2つの状況	8
図 2.1	従来の非ディスプレイ面のタッチ検出	16
図 3.1	フロアガイドの利用状況調査	18
図 3.2	グラフィック構造の定性評価に用いた試作の一例	20
図 3.3	グラフィック構造	22
図 3.4	手の近づきの認識アルゴリズム	25
図 3.5	手の近づきによる表示の変更	26
図 3.6	筐体のリファレンスデザイン	28
図 3.7	プロトタイプ全体の構成	29
図 3.8	ハードウェア構成	29
図 3.9	3D カメラの距離画像と赤外画像	31
図 3.10	ハンドトラッキングの処理の概要	32
図 3.11	ユーザ評価	33
図 3.12	思い通り使えるかの評価結果	35
図 3.13	タスク実行時間の平均値	35
図 3.14	タスク実行時間の分布	36
図 4.1	指先の影の変化	40
図 4.2	タッチ検出の手順	41
図 4.3	タッチ操作の測定実験	42
図 4.4	タッチ操作の測定データの例	43
図 4.5	タッチ操作の測定実験の結果	44
図 4.6	システム構成	46
図 4.7	輝度の測定	48
図 4.8	影領域の抽出	50
図 4.9	面の下端における影の変化	51
図 4.10	面の右端における影の変化	53
図 4.11	影の変化の検出の事前評価を行った面上の位置	54
図 4.12	タッチ検出のアルゴリズム	55
図 4.13	突起物がある面でのタッチ操作の検証	56
図 4.14	タッチ操作による文字の描画	57

図 4.15	タッチ検出精度の評価方法	58
図 4.16	偽陽性の誤検出の発生位置	60
図 4.17	偽陰性の誤検出の発生位置	60
図 4.18	指の傾きによるタッチ位置のずれの違い	62
図 4.19	タッチ位置の補正に用いる特徴量	63
図 4.20	重回帰分析に用いるデータ収集方法	64
図 4.21	タッチ位置精度の評価結果	66
図 5.1	次世代の車室内環境のコンセプトイメージ	76
図 5.2	マルチディスプレイの各画面の役割の定義	78
図 5.3	提示制御アーキテクチャの一例	79
図 5.4	HUD とジェスチャを組み合わせた操作	80

表目次

表 3.1	利用状況調査の結果	19
表 3.2	グラフィック構造の定性評価の観点	21
表 3.3	筐体の仕様	28
表 3.4	ディスプレイの仕様	30
表 3.5	3D カメラの仕様	31
表 4.1	影の変化の検出の事前評価の結果	55
表 4.2	タッチ検出精度の評価結果	59

第1章 序論

1.1 研究の背景

人間は，道具や機械を使うことにより活動範囲を広げてきた．特に人間の知的，創造的な活動においては，文章や図，絵などの情報を紙などの媒体に記録，保存して，他の人と共有する，さらには広く一般に伝達するということが，活動範囲を広げる基盤となってきた．このように，情報を保存，共有，伝達するための道具は，紙とペンにはじまり，古くは活版印刷による出版や，機械式タイプライタによる効率的な文字入力，さらには，ワープロやコンピュータによる情報の電子化へと進んできた．そして現在に至るまで，コンピュータは人間の知的，創造的，感性的な活動を拡張するための道具として進化を続けている．コンピュータの利用により人間の活動範囲が拡大してきた概念を図 1.1 に示す．

人間の活動を阻害することなくコンピュータのパワーを利用するために，ヒューマンインタフェースは重要な役割を担ってきた．1946 年に世界最初のコンピュータ ENIAC が公開されてから十数年の間は，コンピュータはあらかじめ決められた処理を順次に行うバッチ処理を行う装置として利用されてきた．1960 年代に，人とコンピュータとがリアルタイムに情報を操作する対話処理の考え方が具体化され，ヒューマンインタフェースの概念が形成されてきたのはこの頃からである．このヒューマンインタフェースの黎明期の中心は，ディスプレイにテキスト情報が出力され，キーボードで入力を行うコマンドラインインタフェース（CLI）である．CLI で対話処理を行うコンピュータやワークステーションは広く普及したが，ユーザは業務でコンピュータを利用するために必要な知識を得ている知的労働者が中心であった．この時代にコンピュータを利用するユーザが限定された要因は，コストが高いことやコンピュータでできることが限定的であったなど様々あるが，CLI はユーザが必要な入力コマンドを記憶して使う必要があり，ユーザインタフェースとして記憶負荷が高いという課題があったこともこの一因と考えられる．

コンピュータを限られたユーザに向けたものから，誰もが使える道具へと広げた要因のひとつがグラフィカルユーザインタフェース（GUI）である．GUI は 1970 年頃から開発が進められた Xerox 社の Alto[1]に起源があり，アイコンやメニューなどをまとめたデスクトップをマウスで直接的に操作することを可能にした．ユーザが見ているものを見ているままに操作できるようにしたことで，CLI の課題であった記憶負荷を大きく低減した．GUI を用いたコンピュータは 1980 年代以降に広く一般に普及し，人間とコンピュータの距離を近づけることに貢献した．

近年では、人間がコンピュータを単に利用するというよりも、人間とコンピュータが高度に連携、融合するインタラクションによって、人間が活動範囲を広げる、もしくは、人間の経験価値が向上するという傾向が増している。コンピュータは GUI の搭載で誰もが使えるようになり、一般への普及に合わせて低価格化と小型化が進んだ。これと並行するように 1990 年代には、小型化していくコンピュータは世の中の至る所に遍在するようになるという「ユビキタス・コンピューティング」[2]や、情報と物理世界を融合してマウスとキーボードから情報を解放してもっと自由に触れ得るようにする新しいコンピュータのかたちである「タンジブル・ビット」[3]のビジョンが登場した。この頃から、ユーザインタフェースは、コンピュータを使いやすくするためのユーザビリティに貢献するのみならず、人間とコンピュータの界面としてインタラクションを支える役割を増してきた。さらには、ユーザインタフェースは、コンピュータを含むシステムやサービスの利用を通じてユーザが得る経験価値である「ユーザ・エクスペリエンス」の向上にも大きく影響する要素となっている。

こうした変遷を経て、広く一般において人間とコンピュータの関係を大きく変えた代表例のひとつにスマートフォンがある。高性能なコンピュータをポケットに入るサイズに小型化して持ち歩けるのみならず、タッチパネルディスプレイによる直感的な操作や、音声認識、加速度センサや GPS 等の各種センサの連動により、人間とコンピュータの多様なインタラクションを可能にした。

人間とコンピュータとがより高度に連携、融合するインタラクションの拡張を通じて、人間の活動範囲を広げるために、人間とコンピュータの界面となるヒューマンインタフェースは益々重要となっている。

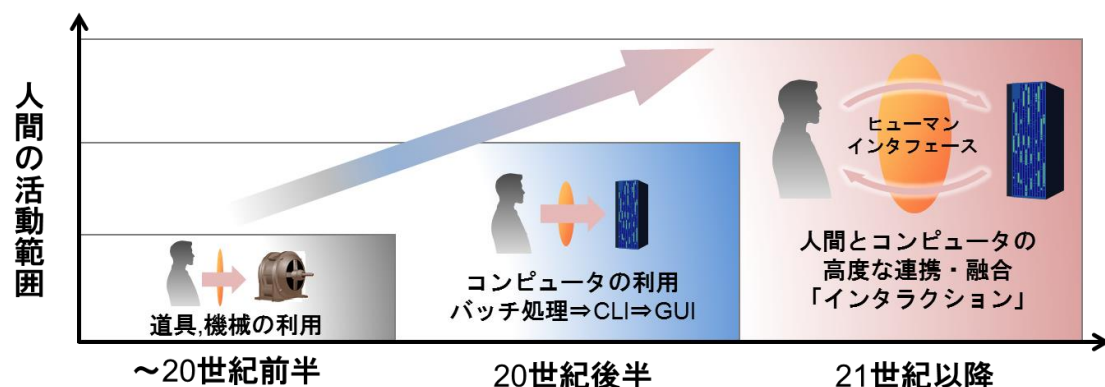


図 1.1 コンピュータの利用による人間の活動範囲の拡大

1.2 ヒューマンインタフェースの役割と研究の目的

1.2.1 ヒューマンインタフェースの役割

人間とコンピュータのインタラクションにおけるヒューマンインタフェースの役割について述べる。

まず、人間にとってのヒューマンインタフェースは、日常的に無意識に行う行為で使えるような直感的な使いやすさが、コンピュータを利用する新たな活動の根源となると考える。例えば、先に述べたスマートフォンの普及を支えたタッチパネルディスプレイのヒューマンインタフェースにおいては、指の動きに画面内のグラフィックが連動して、物を動かす、方向を変えるなど、実環境において人が日常的に無意識に行っている行為が取り入れられた。このような直感的な操作は、それまではボタンを押す操作が中心だった携帯端末の使い勝手を向上させただけでなく、スマートフォンという新たな製品やそれによって提供されるサービスを人間の活動の中に取り入れて利用する根源となっていると考える。

次に、コンピュータにとってのヒューマンインタフェースは、より高度な人間とのインタラクションのために、人間の行為を引き出し、行為の意味を把握する役割が大きいと考える。人間は常に具体的な実環境の中におり、人間の知性は何らかの物や周辺環境と接するときに表出する。それ故に、人間がその時に行っている行為には常に意味があり、行為は常にある特定の物や周辺環境との相補的な関係によってあらわになる。ユーザである人間の行為の意味をコンピュータが把握し、さらにコンピュータがその意味を踏まえたフィードバックを人間に与えることで、人間と連携、融合した活動がより広がると考える。例えば、文字入力で学習データを用いて予測候補を提示することや、現在位置や端末の方向に応じてユーザが認知しやすいように画面の表示構成を変更することなどは、行為の意味を把握したフィードバックの一例として挙げられる。

人間が直感的な操作によってコンピュータに指示を出し、コンピュータは特定の仕事やサービスを担い、人に提供する。さらに、コンピュータは仕事やサービスに対応する独特の人間の行為から意味を抽出して、仕事やサービスの効率化や改善に生かす。こうしたヒューマンインタフェースを界面としたインタラクションのループが回ることにより、人間とコンピュータがひとつのシステムを構成して活動していると捉えることもできる。この概念を図 1.2 に示す。従って、ヒューマンインタフェースは人間にとっての使いやすさを超えて、高度なシステムの質や価値を維持するために必要な要素であると考えられる。

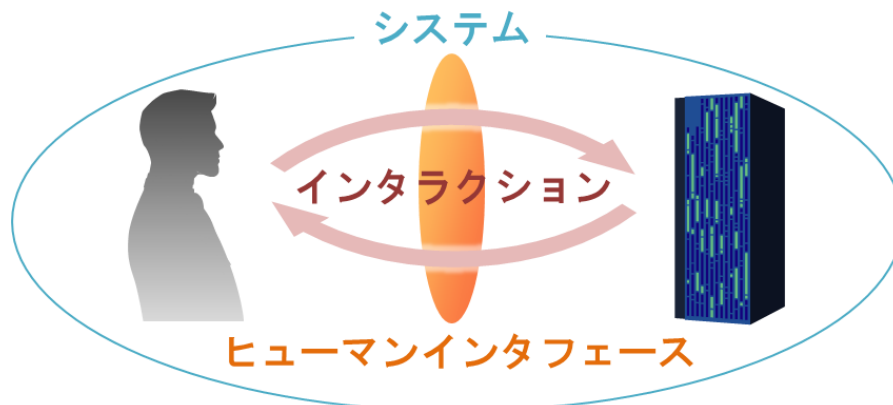


図 1.2 人間とコンピュータのインタラクションで構成されるシステム

1.2.2 次世代のヒューマンインタフェースの方向性

次世代のヒューマンインタフェースの方向性は、主に次の3つのコンセプトに分類できると考える。第一のコンセプトは、知的インタフェースである。機械学習や深層学習などの急速に進展した AI 技術により、音声アシスタントなどを介してコンピュータが人間的に立ち振る舞って対話するものが中心となる。第二のコンセプトは、仮想世界指向インタフェースである。基本的な考え方として、コンピュータの中に実世界を取り入れた仮想世界で人間が活動するためのヒューマンインタフェースである。ヘッドマウントディスプレイなどのハードウェアの性能向上に伴い、用途やコンテンツが拡大している。第三のコンセプトは、実世界指向インタフェースである。人間の五感を介してコンピュータとインタラクションするものであり、物に触れる、物を動かすなどの行為によって、コンピュータに直接的な入力を行う。ここには、マウスやキーボードなどのデバイスを介した間接的な入力は含まれない。

本研究は、これらのヒューマンインタフェースのコンセプトにおいて、実世界指向インタフェースを対象とする。この理由は、人間は常に具体的な環境の中にいるため、実世界を基本としたヒューマンインタフェースは、人間の活動において最も基本的であり、広く一般に影響を及ぼすと考えたためである。また、実世界指向で直感的な操作性を実現した快適なヒューマンインタフェースは、情報機器製品としてコンピュータの魅力を高める大きな要因となっている。この一例として、先に述べたスマートフォンが挙げられる。タッチパネルディスプレイを指で直接触ることや、端末そのものを傾かせることは、実世界指向インタフェースの一種である。このように、身近な生活の中で人間とコンピュータのインタラクションの拡張を牽引していく可能性が高いヒューマンインタフェースであると考えられる。

ここで、本研究で対象とする実世界指向インタフェースを次のように定義する．

- ・人間が五感によって直接的にコンピュータの出力を受け，手や体を動かすなど，人間が自然に行う行為によって直接的にコンピュータへの入力を行うヒューマンインタフェース

また，上記の定義における，「人間が自然に行う行為」とは，本研究においては，人間が日常生活において特に意識することなく行う，手や体の動きを示す．

1.2.3 研究の目的

実世界指向インタフェースにおいて，コンピュータから人間への出力は，視覚，聴覚，触覚，味覚，嗅覚なからなる五感を用いたものとなる．このうち，人間の情報判断の 8 割以上を占めるのは視覚と考えられており，一般に普及するデバイスにおいてもディスプレイを介して視覚を利用するインタフェースが中心である．この視覚に対して，人間が自然に行う行為として，目で見えているままに手で動かすことが挙げられる．人間からコンピュータへの入力として，この手を動かす行為を利用することは直感的な操作に結びつく．従って，実世界指向インタフェースにおいて，「見て，動かす」操作は人間が自然に利用でき，尚且つ，最も利用頻度が高い操作のひとつであると考ええる．

一方で，コンピュータが人間に見せる画面は，表示デバイスの進化に伴い多種多様になっている．例えば，ディスプレイは液晶や有機 EL を用いたものを中心に大型化はもちろんのこと，視覚特性に優れる曲面型形状も実用化されている．また，プロジェクタは高輝度，高コントラスト化を基本として，モバイル端末にも内蔵可能な超小型化が進み，実空間で様々な用途の広がりを見せている．さらに，グラス装着型等のウェアラブルデバイスにおいても，実空間に映像を重畳して表示可能なデバイスが増え，性能向上が進んでいる．特に，プロジェクタやウェアラブルデバイスは，物理的なディスプレイデバイスが存在しない場所や位置で人間に画面を見せられることが特徴である．このように，コンピュータが人間に見せる表示画面は，デバイスの前提や概念が徐々にとり払われていると考える．

これらの観点から，本研究では，実世界指向ヒューマンインタフェースによるインタラクション拡張のために，表示デバイスの大きさや種類に関わらず，「見て，動かす」直感的な操作を可能にするヒューマンインタフェースを実現することを目的とした．

ここで，「直感的な操作」とは，人間が操作方法を予め知ることなく，表示を見て判断するだけで，コンピュータに設けられた所定の操作を実行できることを示す．

図 1.3 に「見て，動かす」実世界指向インタフェースの概念を示す．コンピュータ

は表示画面を介して、人間に伝えるべき情報を表現する。人間は、その表現された情報を認知、判断し、表示画面に対して操作を行う。コンピュータはセンサ等を介して、人間の操作を認識し、その結果を表示画面に反映する。このようなループを、表示デバイスに関わらず円滑に回してインタラクションを拡張することが、「見て、動かす」実世界指向インタフェースの役割となる。

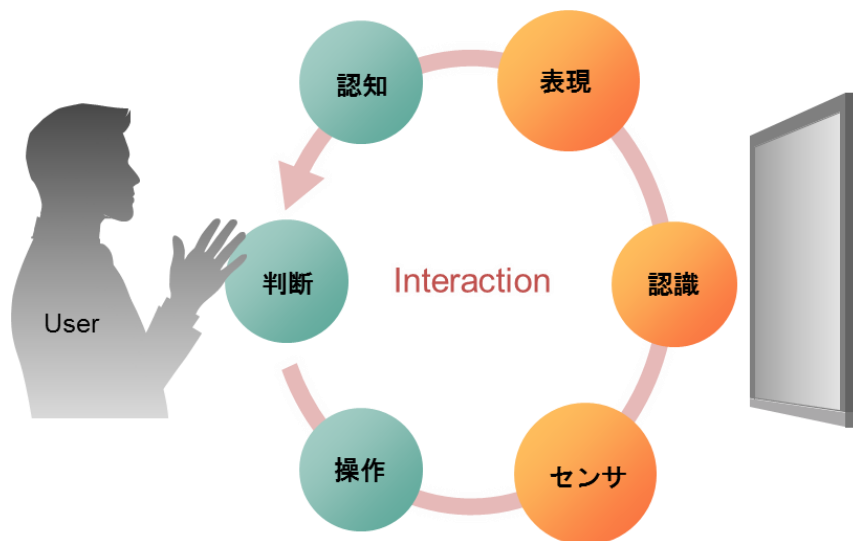


図 1.3 「見て、動かす」実世界指向インタフェース

1.3 研究のアプローチ

「見て、動かす」直感的な操作は、近年、スマートフォンやタブレットなどでのタッチ操作を中心として洗練されてきた。これは、「中小型」「手元」「ディスプレイ」という限定された実環境でのみ、直感的な操作が実現されていると言い換えることができる。実世界指向ヒューマンインタフェースによるインタラクションを拡張するためには、このように、デバイスの大きさや種類に限定されることなく直感的な操作を実現する必要があると考える。次に、この観点を実世界における画面の「大きさ」「距離」「種類」という基本的な要素に分けて論じる。

・ 大きさ

現在の「見て、動かす」直感的な操作は、手が届き扱いやすい中小型の画面を対象にしたタッチ操作が中心である。このような画面の大きさに限定されることなく、大画面であっても直感的に操作できることが求められる。この大画面は、本研究では 40 インチ以上のサイズと定義する。40 インチは、アスペクト比が 16:9 の画面の場合に画面の横幅が約 90cm となる。一般的に、この横幅全体が視界に入る距離では画面に手が届かず、タッチ操作が困難となる。

- ・ 距離

大画面は視認性や情報の一覧性に優れる。しかしながら、この長所を担保できる、大画面を見やすい距離は、一般的に画面の高さの3倍程度とされる。本研究では、この距離を「最適視距離」と定義する。当然ながら、この距離は中小型の画面を手元で操作する場合とは大きく異なり、最適視距離では、手を伸ばしても画面に触れることができない。

一方で、大画面は近づいて操作することも求められる。この一例として、画面をホワイトボードのようにインタラクティブに使用することが挙げられる。画面の近くに立って、表示している内容进行操作しながら回りの人に説明する、もしくは、複数人で画面を囲んで書き込みなどの操作をしながら議論する、といったユースケースが挙げられる。

従って、直感的な操作が求められる距離という観点では、特に大画面において最適視距離に離れて見ていて手が届かない状況と、画面に近づいて手が届く状況のどちらについても求められる。

- ・ 種類

画面に手を触れて直接的に操作することは直感的であり自然に行われるが、広く一般に普及するタッチ操作は、操作対象として物理的なディスプレイが存在し、タッチパネル付きディスプレイとして使用できるものが中心である。しかしながら、人間の目に見える画面は多様化してきており、プロジェクタやウェアラブルデバイスのように物理的なディスプレイが存在しない場合が増えている。このような物理的にディスプレイが存在しない場合でも、見えている画面に手を触れて操作することが求められる。

上記で述べた観点を整理すると、次の2つの状況に対して、インタラクションを拡張することが求められると考える。図 1.4 にこれを図示する。

- ・ 大画面を最適視距離で見る状況は、画面の視認性が良く、画面全体を眺めることができる。また、一覧性も良いため、沢山の情報を並べて一覧することに向く。しかしながら、最適視距離では手を伸ばしても画面に触れることができない。従って、この状況において、実世界指向で直接的に「見て、動かす」という操作を可能にすることが求められる。
- ・ 大画面は近づいて操作することも求められる。具体的には、プレゼンテーションなどで画面の近くに立って、表示している内容进行操作しながら回りの人に説明す

る状況である。また、複数人で画面を囲んで書き込みなどの操作をしながら議論する状況も挙げられる。このような画面に近づいて操作する状況において、プロジェクタやウェアラブルデバイスのように物理的なディスプレイが存在しない場合、画面に手を触れて操作することができない。従って、このように画面が非ディスプレイの場合でも、実世界指向で直接的に「見て、動かす」という操作を可能にすることが求められる。

実世界指向ヒューマンインタフェースによるインタラクションを拡張するために、表示デバイスの大きさや種類に関わらず、「見て、動かす」直感的な操作を可能にするには、この2つの状況に対応できるユーザインタフェースが不可欠であると考える。そこで、それぞれの問題を解決する技術を開発し、さらに試作検証により主に実用性の観点からそれらの技術を評価した。本論文ではこれらの取り組みを、以下の2つの観点でまとめる。

- (1) 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース
- (2) 非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース

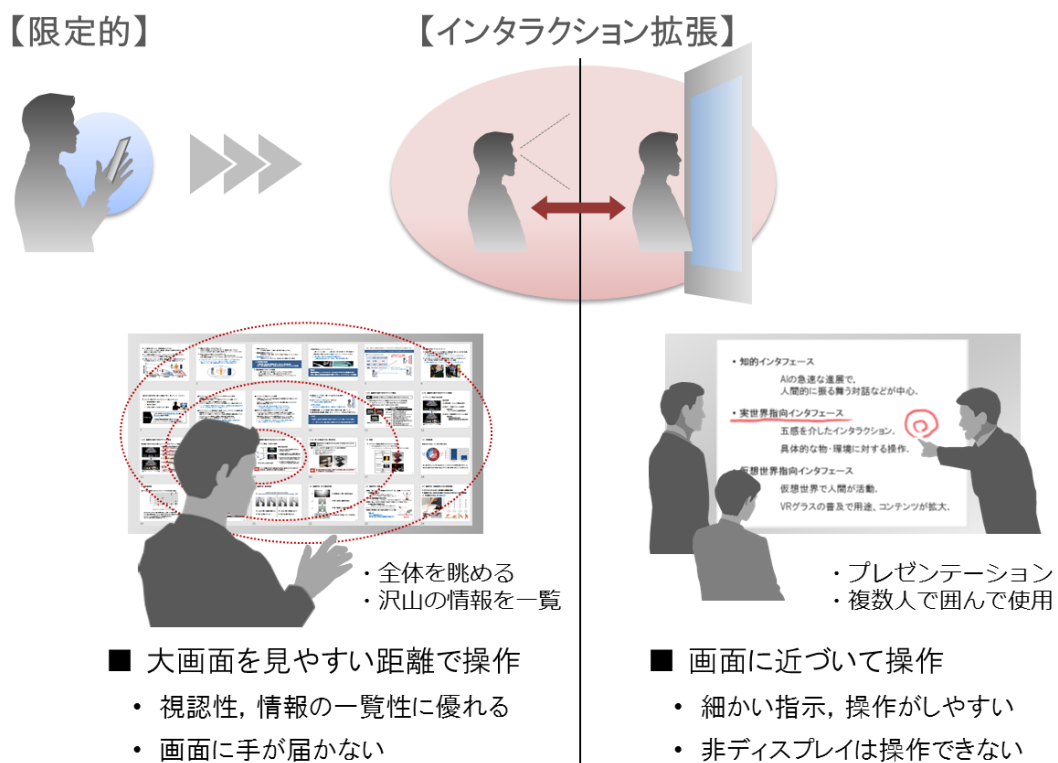


図 1.4 インタラクションの拡張が求められる2つの状況

1.4 本論文の構成

本論文は，結論を含めて5章から構成される．第1章は序論で，研究の背景とヒューマンインタフェースの役割を述べ，研究の目的とアプローチを明らかにする．第2章では，従来研究について論述し，その課題について議論する．

第3章と第4章は，論文の主内容として，インタラクションの拡張に向けて研究開発したヒューマンインタフェースを述べる．第3章は大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースに向けた，ジェスチャ操作を用いたインタラクティブデジタルサイネージの開発について述べる．第4章では，非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースに向けたタッチ検出技術の開発について述べる．

第5章は，結論として，それぞれの研究の成果をまとめる．さらに今後の課題と，マルチタスク型のヒューマンインタフェースへの展開について自動車を例にして議論する．

第2章 従来研究と課題

2.1 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース

2.1.1 用途の具体化

実世界指向で直接的に「見て、動かす」という操作を、大画面の最適視距離において実現しようとする場合、手が届かないために操作する手段がないという問題が生じる。大画面を最適視距離で操作することを実現するためには、まず、大画面をどのような目的で使い、そこに何が表示され、どう使うべきかを具体的にすることが必要である。ヒューマンインタフェースは、人が目的とする活動が具体的であるほど、その構成や方式などが最適化されていくと考える。そこで、大画面の用途を具体的に定め、その用途を対象とした操作およびシステムを統合的に開発することで、大画面を最適視距離で操作するための基本技術を確立する方針とした。

この具体的な用途として、デジタルサイネージを選定した。この理由を次に述べる。大画面を使ったデジタルサイネージの設置数は、商業施設や駅などの公共の場を中心に急速に増えている。この多くは広告や交通情報等の一方向の情報提供に留まっている。ユーザが必要な情報をインタラクティブに取得するためには、大画面を直感的に操作できるヒューマンインタフェースが求められる。また、デジタルサイネージは公共の場で様々な人が利用するため、情報機器に不慣れな人でも気軽に利用することや、個々の利用者が短時間で必要な情報を得られ多くの人が効率的に利用できることが重要となる。従って、操作が直感的であり、なおかつ、効率的であることが強く求められる。加えて、インタラクティブに利用するデジタルサイネージは、ユーザが所望の項目を選択して情報を閲覧するという基本的な操作が求められる。このような操作はデジタルサイネージに限定されるものではなく、ユーザが多くの情報から所望のものを直感的かつ効率的に選択するという、コンピュータの操作において多用され基本性が高い操作であると考えられる。これらの理由から、デジタルサイネージを具体的な用途とすることで、大画面を最適視距離で操作するための基本技術が確立できると考えた。

デジタルサイネージにタッチパネルディスプレイを搭載してインタラクティブに操作できるものが存在する。利用場面やコンテンツの構成によっては、タッチ操作が有用であることはもちろんであるが、操作するために画面に近づくことにより、大画面ならではの視認性や情報の一覧性の良さが低減するため、最適視距離で操作することができないという問題が残る。

筆者らは、これまでに情報機器に適した快適なヒューマンインタフェースのひとつとして、3D カメラを使って手の動きを認識することにより機器の操作を行うジェスチャ操作の研究開発を進めてきた[4][5]。ここで、ジェスチャ操作とは、手を動かす方向や手が動いた軌道や速度、距離によって操作することを示す。ジェスチャ操作はデジタルサイネージに適した操作方法のひとつであると考え、以下にその理由を示す。

- ・ 最適視距離での操作：ジェスチャ操作は手が届かない距離でも操作できるため、最適視距離での操作が可能となる。
- ・ 衛生的な操作：デジタルサイネージは公共で不特定多数の人に利用される。そのため、タッチパネル等の機器への接触が必要な UI の場合、汚れや感染等の衛生面で懸念を持つ利用者がいる。ジェスチャ操作は非接触で操作できるため、衛生的に操作できる。
- ・ 体格や姿勢への依存が少ない操作：デジタルサイネージの利用者は子供から高齢者、車いす使用者まで多様である。ジェスチャ操作は利用者が操作する位置の自由度が高いため、体格や姿勢への依存が少ない操作を提供しやすい。

そこで、ジェスチャ操作を用いたインタラクティブデジタルサイネージを具体的な研究開発の対象として、これを通じて大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースの基本技術を確認する方針とした。

2.1.2 従来研究

本研究の対象とするジェスチャ操作を用いたインタラクティブデジタルサイネージに関する従来研究について論述し、その課題について議論する。

(1)インタラクティブデジタルサイネージ

デジタルサイネージをインタラクティブに利用するための研究は数多く行われてきた。遠藤らは大画面マルチタッチパネルを利用して複合商業施設に複数人で来訪した客がタイムライン上に希望の店舗やイベントを割り付けてプランニングできるデジタルサイネージシステムを提案している[6]。また、木原らはカメラセンサにより得られる映像ディスプレイ前の人の位置移動に基づいてリアルタイムで状況に意味付けすることにより、人々にタイミング良く刺激コンテンツを提供する状況即応型デジタルサイネージを提案している[7]。しかしながら、これらの研究では、ユーザが能動的に店舗等の情報を得ようとする場合に、個々の利用者が短時間で必要な情報を得られ、多くの人が効率的にディスプレイを利用できるようにすることは考慮されていない。

デジタルサイネージと携帯端末の連携によりインタラクティブに情報取得できるシステムも提案されている。例えば、宮田らはユーザが携帯端末を用いてデジタルサイネージ上で各自のポインタを操作でき、任意のコンテンツ概要を選択すると対応するコンテンツ詳細が各自の携帯端末上で閲覧できる端末連携方式を提案している[8]。また、小川らはデジタルサイネージから配信される情報を、時間と場所の要素で限定し、その時その場所にいた人々の携帯端末にクーポンが配信されるインタラクションモデルを提案している[9]。しかしながら、デジタルサイネージは公共の場で様々な人が利用するため、携帯端末と連携した情報取得は、情報機器に不慣れな人が気軽に利用することが難しいという課題がある。

(2) ジェスチャ操作

ジェスチャを用いて大型ディスプレイを操作するインタラクションは、手の動きと操作コマンドの対応付けの方法やメニューのデザイン、種々の状況や環境に適応した認識精度の向上等、様々な観点で研究されている。

木村らは広視野ディスプレイとジェスチャ操作を組み合わせた広視野電子作業空間の実現に向けた基幹システムと基本ジェスチャコマンドを開発している[10]。また、大槻らは多数のパーツから構成される仮想の3Dオブジェクトの分解・観察に適したジェスチャでの操作法を提案している[11]。これらの研究は特定の作業に関わる操作を快適にするものではあるが、予め操作方法を理解することや操作に慣れることが必要になる。

前野らはジェスチャ操作ではユーザが操作コマンドを記憶する必要があることを指摘し、位置入力、回転入力、方向入力の3つのジェスチャをメニュー操作に利用することを想定して広視野電子作業空間に適したメニューデザインを検討している[12]。また、中野らはジェスチャ操作において種々の状況や環境に適応して良好な認識状態を保つために、システム側からユーザに認識状態を提示することで、認識状況が良くなるように人の支援を効果的に得る手法を提案している[13]。長谷川らは深度カメラを用いた空中での手によるジェスチャの認識において、深度情報を用いてユーザの姿勢を考慮することで、ユーザの向きによらずジェスチャを認識可能にするシステムを提案している[14]。このように、メニューデザインや認識状況の提示、ユーザの姿勢の考慮等で、ジェスチャ操作をより快適にするための研究がなされているが、ユーザが大型ディスプレイを見るときや操作するときの位置や姿勢を考慮して、いかに身体への負担が少ない使い方ができるようにするかは考慮されていない。

(3)ジェスチャを用いたデジタルサイネージ

ジェスチャ操作をヒューマンインタフェースに採用することで、コンテンツの操作を可能にしたデジタルサイネージが製品化されている[15] [16]. これらの製品は、画面から離れた距離からコンテンツの表示位置に合わせて手を動かす必要があり、手の位置合わせが難しいという課題がある. また、大画面に向かって手を出して操作するため、画面を見上げながら手を上げ続ける姿勢となり、身体への負担が大きい. デジタルサイネージは、子供から高齢者、車いす使用者まで様々な人が利用するため、ユニバーサルデザインへの配慮が必要となる.

指先の動きによる操作コマンドを定義することで、デジタルサイネージを手の小さな動きで操作できる UI ソリューションが提供されている[17]. しかしながら、操作コマンドとして用いる手の形や手の動きのパターンをユーザが理解して使う必要がある. デジタルサイネージでは、不特定多数の人が不定期に利用し、接する時間が短いため、ジェスチャ操作に不慣れな人でも直感的に使えることが求められる.

2.1.3 課題

これまでに述べた従来研究を踏まえ、ジェスチャ操作を用いて公共の場での利用方法に適したインタラクティブデジタルサイネージを開発するための課題を検討した.

まず、デジタルサイネージは公共の場で様々な人が利用するため、ユーザが情報機器に不慣れであることも想定しなければならない. 従来研究で、タッチパネルで自由度の高い操作ができるものや、携帯端末と連携して操作できるものを示したが、これらは情報機器に不慣れなユーザが必ずしも気軽に利用できるとは限らない. また、ジェスチャ操作を用いた従来研究の多くに当てはまる、操作方法について予め理解したり慣れることが必要なものは、はじめて利用するユーザが多いデジタルサイネージに適用することが困難である. 従って、情報機器に不慣れな人でも直感的に操作できなければならないことが課題である.

次に、デジタルサイネージは公共の場で多くの人が利用できるようにすることを考慮する必要がある. 従来研究で述べたタッチパネルで自由度の高い操作ができるものは、必要な全ての操作を終えるまでに時間を要する. また、携帯端末と連携して操作するものは、事前に携帯端末の通信設定の準備などに時間を要することが想定される. 従って、個々の利用者が短時間で必要な情報を得られ、多くの人が効率的にディスプレイを利用できるようにすることが課題である.

さらに、デジタルサイネージのユーザは、子供から高齢者、車いす使用者まで様々である. デジタルサイネージには大画面が用いられることが多いため、ジェスチャを用いたデジタルサイネージの従来研究について述べたように、大画面に向かって手を

出して操作する際の、姿勢や身体への負担を考慮する必要がある。従って、画面を見ることがや操作することによる身体への負担を少なくしなければならないことが課題である。

以上から、ジェスチャ操作を用いて公共の場での利用方法に適したインタラクティブデジタルサイネージを開発するための課題は下記の3つと考える。

- (i) 情報機器に不慣れな人でも直感的に操作できなければならない
- (ii) 多くの人が効率的に利用できなければならない
- (iii) 画面を見ることがや操作することによる身体への負担を少なくしなければならない

2.2 非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース

2.2.1 用途の具体化

実世界指向で直接的に「見て、動かす」という操作を画面に近づいて行おうとする場合に、その対象が物理的なディスプレイがない画面である場合には、手を触れて操作することができないという問題が生じる。従って、このような非ディスプレイ面でも触れて操作できるインタフェースが求められる。

物理的なディスプレイが存在せず画面を表示するデバイスとして、モバイル型プロジェクタや HMD（ヘッドマウントディスプレイ）などがあり、身近な空間に画面を表示することが可能である。また、手を触れて直接的に操作する方法としては、スマートフォンやタブレット端末など指でのタッチ操作が普及しており、広く一般に受け入れられる直感的な操作はタッチ操作であると考えられる。これらの観点から、非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースの最も有用な用途は、周囲の実空間の様々な面に画面を重畳して表示し、重畳した画面に直接タッチ操作できるシステムであると考えられる。

このようなシステムを実現するためには、身の回りにある机上や壁面などの様々な面上で指先のタッチ検出を行う必要がある。これらの面は、物が置かれる、突起物があるなどの状態が多い。面上や面の周囲の様々な状態に対応してタッチ検出できることが求められる。

従って、非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースは、操作方法そのものについては、タッチ操作とすることで直感的な操作となるが、身の回りにある様々な面上でどのようにタッチを検出するかが重要となる。本研究では、身の回りにある様々な面を「平面上に物体や突起物が存在する非ディスプレイ面」として定義する。

2.2.2 従来研究

身の回りにある面をタッチ操作に利用するシステムの提案は古くから行われている．Roerber[18]らは，ラインレーザを面に対して平行に照射し，面と接触した指が反射する光を検出することでタッチを検出するシステムを提案した．また，同様の仕組みを利用した光学式タッチパネルは，現在様々な場所ですでに利用されている．しかし，この方式では操作対象面が平面でなければならず，面上に物体を置くことはできないという制約がある．また，センサを面上に設置する必要がある．

これらの制約を解決する手法として，Kinect などの 3D カメラを用いた接触認識技術が多数提案されている[19,20,21,22,23,24]．また，ステレオカメラを用いてタッチパネル操作を支援するシステムも提案されている[25,26,27]．Wilson[19]が提案したように，多くの手法ではデプス情報を用いてあらかじめ操作対象面の 3 次元形状を取得し，指が操作対象面に近づくと接触したと認識する．また，一部の手法では，指以外の物体が操作対象面に近づいても誤認識しないように，デプス情報に加えて，カラーカメラの情報を利用する手法が提案されている[28]．3D カメラを用いる手法は，面と指を区別して見分けることが比較的容易なことや，キャリブレーションなどにより物体や突起物のある面にも対応して認識できるというメリットがある．しかし，3D カメラの奥行き推定精度が低く接触の誤認識が発生しやすい．また，3D カメラは画角が狭くなりやすいため，操作対象面が広い場合にはカメラと操作対象面の距離を確保するためのスペースが大きくなるという課題が存在する．例えば，操作対象面のサイズを 80 インチとした場合，画角 70° のカメラでは設置方向に関わらず 120cm 以上の距離を確保する必要がある．

Wilson[29]の研究では，指と面の距離に応じて影の形状が変化することに着目し，ひとつの赤外カメラとひとつの赤外照明を用いて指の側面に出る影の幅を検出することで，指先の接触を認識する．しかし，指先の影の幅は様々な理由によって大きく変化する．例えば，カメラと指との位置関係や，指がどのような姿勢で面に接触しているかによって影の幅は変化する．従って，指の影の幅だけでは高精度に接触を認識することは難しいと考えられる．

タッチ操作を検出するためには，「指先の接触」と「指先の位置」を認識する必要がある．Wilson のように面上にカメラを設置しない手法では，指と面の隙間がカメラの死角となり直接観察することができない．従って，撮影画像で確認できる他の現象を介して接触を認識する必要がある．どのように接触検出の精度を確保するかが問題となる．

2.2.3 課題

これまでに述べた従来研究から、非ディスプレイ面でタッチ検出を行う主な方式を図 2.1 に示すように整理し、課題を検討した。

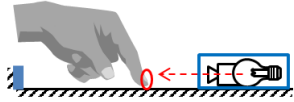
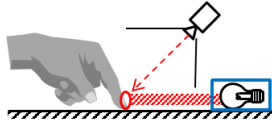
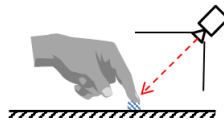
方式	a. 光学式タッチパネル	b. ラインレーザ	c. 3Dカメラ
概要	専用フレームを面に貼り付け、横からカメラで撮影して認識 	指に反射した光をカメラで認識 	TOFやステレオカメラのデプス情報を利用 
メリット	・ロバストなタッチ検出	・ロバストなタッチ検出	・設置が容易 ・平面以外でも使える
デメリット	・専用フレームの設置が必要 ・平面でしか使えない	・面に光源の設置が必要 ・平面でしか使えない	・接触の誤認識が発生しやすい ・設置スペースが大きい

図 2.1 従来の非ディスプレイ面のタッチ検出

まず、図 2.1 の a.光学式タッチパネルと b.ラインレーザは、どちらも、面上に対して所定の距離に近づいた指をロバストに検出可能であるが、面上にセンサや光源を設置しなければ利用できないことが課題である。また、面上が平面でない場合や物が置かれている場合には、面そのものや物体がセンサで検知され続ける、もしくは、面そのものや物体が光源に反射し続けてしまうため、タッチ検出を利用できない。従って、完全な平面でしか使えないことが課題である。

次に、図 2.1 の c.3D カメラを用いた技術は、面上にセンサを設置することや、面上が平面でなければならないことなどの制約はない。しかしながら、3D カメラの奥行き推定精度が低く、さらに面上と指の間の距離を直接観測することはできないため、高精度に接触を認識することが難しく、接触の誤認識が発生しやすいことが課題である。この課題は、従来研究で述べた Wilson[29]の研究の、指の側面に出る影の幅を検出する手法についても同様である。以上から、課題は下記の3つと考える。

- (i) 面上にセンサや光源を設置せねばならず、また、設置するためのスペースが大きい
- (ii) 面上に物体や突起物が存在する場合にタッチ検出できない
- (iii) 高精度に指の接触を認識することが難しい

第3章 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース

本研究は、実世界指向ヒューマンインタフェースによるインタラクションの拡張に向け、人間が自然に利用でき、尚且つ、最も利用頻度が高い「見て、動かす」直感的な操作を実現することを目的とする。特に大画面においては、最適視距離で画面を見ている状況では、手を伸ばしても画面に触れることができず、「見て、動かす」操作を行うことができないという問題が生じる。本章では、この問題の解決に向けた研究開発について論じる。

3.1 研究の対象と解決すべき課題

大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースの基本技術確立するためには、まず、大画面をどのような目的で使い、そこに何が表示され、どう使うべきかを具体的にすることが必要である。そこで、ジェスチャ操作を用いたインタラクティブデジタルサイネージを具体的な対象とした。先に述べた従来研究を踏まえ、本研究開発で解決すべき課題を以下の3つと定義する。

- (i) 情報機器に不慣れな人でも直感的に操作できなければならない
- (ii) 多くの人が効率的に利用できなければならない
- (iii) 画面を見ることや操作することによる身体への負担を少なくしなければならない

上記の課題解決に向け、インタラクティブデジタルサイネージの具体的なコンテンツとしてフロアガイドを選定し試作検証を行った。試作検証を通して、各課題を解決するインタラクションの仕組みとして、以下の3つを備えるテーブル型のインタラクティブサイネージを開発した。

- (i) 直感的に操作できるグラフィック構造
- (ii) 短時間で操作するためのジェスチャ操作
- (iii) 身体への負担が少ない端末形状

さらに、一般被験者でのユーザビリティ評価により、端末を初めて使う人でも利用方法を説明することなく目的の操作を実行できることを確認し、公共用途に適した実用性を示す。

3.2 アプローチ

3.2.1 コンテンツの選定

課題解決に向けたアプローチとして、デジタルサイネージの具体的なコンテンツと要件を定めて試作検証を行うことにした。そこで、具体的なコンテンツとして、以下の理由によりフロアガイドを選定した。

- 国内のデジタルサイネージ市場の 8 割以上は商業施設向けであり[30]、フロアガイドを必要とする施設である。
- 商業施設にある掲示板や印刷媒体において、顧客のフロアガイドの利用頻度が高い。
- フロアガイドは適用できる業態が多く、役所、学校、病院等への展開が想定できる。

3.2.2 フロアガイドの利用状況調査

フロアガイドは、主に掲示板や印刷媒体として店舗に設置されている。このようなフロアガイドの現状を把握するために、複数の実店舗で利用状況を調査した。図 3.1 に利用状況調査の様子を示す。調査では、フロアガイドの外観や情報の内容の確認と、フロアガイドを見る人の立ち位置や行動を観察した。調査結果を表 3.1 に示す。



図 3.1 フロアガイドの利用状況調査

3.2.3 要件定義

利用状況調査での人の行動の観察から、以下のようにフロアガイドに必要な要件を定義した。

- (1) 店舗の一覧：特に目的なくウィンドショッピングしている人が、イメージ写真等でどのような店舗があるかを一覧できる。
- (2) 店舗の検索：目的はあるが店舗が決まっていない人が、利用目的に合った店舗を検索し、店舗の情報を確認できる。
- (3) 場所の確認：既に目的の店舗が決まっている人が、店舗を簡単に発見し地図上の位置を確認できる。

これらの要件を満たす機能を、グラフィカルユーザインタフェース（以下、GUI）で実現する方針とした。また、その機能をユーザが利用する上で、前章で述べた課題を解決するためのインタラクションを検討した。

なお、課題(ii)「多くの人が効率的に利用できなければならない」の解決方法には、①一人の人が短時間で利用できるようにする、②同時に複数人が利用できるようにする、の2つがあると考えるが、本検討では①の解決方法を選択した。この理由を次に述べる。公共にある物を利用する際に、特に日本では先に利用している人の順番を待つことを礼儀とする文化があり、他の人が利用中に同時に使い始めることに抵抗がある人が多い。先の調査でも板面を指さす際に、先に板面近くにいる人が離れるのを待つ様子が見られた。そこで、一人ずつ利用する仕組みとし、一人が短時間で必要な情報を得られるようにすることを検討した。

表 3.1 利用状況調査の結果

調査の観点	結果
板面のサイズ， 設置方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 板面の各辺のサイズは概ね 1～1.5m ・ 壁面設置が 7～8 割，その他はテーブル型設置で板面が 20～30° 程度傾斜
情報の内容， レイアウト	<ul style="list-style-type: none"> ・ 情報の種類： 地図，店舗名一覧，店舗のジャンル分類，飲食店のイメージ写真 ・ レイアウト： 概ね以下の通り <ul style="list-style-type: none"> - 地図と店舗名一覧を番号で対応付け - 店舗名一覧を，各階ごとに五十音順で並べ，ジャンルで色分け - 飲食店のイメージ写真一覧を別枠に用意
フロアガイドを見る人の 立ち位置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 壁面設置： 板面から 1m 程度離れた位置に立つ人が多数 ・ テーブル型設置： テーブルの間際の位置に立つ人が多数
フロアガイドに対する 人の行動	<ul style="list-style-type: none"> ・ 板面を指でさし示すように手を近づける人が多数，その際の手形は様々 ・ 近づき方は，1m 程度の距離で立ち止まり，指をさし示す際にさらに近づく傾向 ・ 特に二人以上で一緒に見ている場合は，ほとんどの人が指をさしながら会話 ・ 多くの人が時間を要するのは「店舗名一覧で番号を確認し，地図上でその番号を探す」行動

3.3 インタラクション設計

3.3.1 直感的に操作できるグラフィック構造

情報機器に不慣れな人でも直感的に操作できるようにするためには、ユーザが利用できる機能や操作方法を、GUIの外観からイメージできることが求められる。そこで、GUIのグラフィック構造を検討した。

(1) プロトタイピングによる定性評価

試作する GUI は「店舗の一覧」「店舗の検索」「場所の確認」の 3 つの要件を満たす機能を備える必要がある。項目の一覧や検索を行う GUI では、項目の並べ方やメニュー階層の構成が使いやすさに影響する。そこで、これらが異なるグラフィック構造を複数試作し定性評価を行った。図 3.2 に試作したグラフィック構造の一例を示す。

定性評価では、まず前節で述べた要件に基づいて表 3.2 に示す評価の観点を設定した。

次に、本研究に関わるエンジニアとデザイナーの 5 名が、グラフィック構造の外観から操作方法を想定しながら問題点を抽出した。また、想定される画面サイズにグラフィックを印刷し、画面の設置方法なども含めて実際に想定した様々な状況を試行するペーパープロトタイピングを並行して行った。グラフィック構造に対してジェスチャ操作としてイメージできる手の動きを実際に試しながら、外観の見え方と手の動きの関連に違和感がないかなどの観点を議論した。

さらに、各グラフィック構造を改良しつつ、各々の良い部分を抽出してひとつのグラフィック構造にまとめていく検討を反復的に行った。



図 3.2 グラフィック構造の定性評価に用いた試作の一例

表 3.2 グラフィック構造の定性評価の観点

要件	評価の観点
店舗の一覧	<ul style="list-style-type: none"> ・ 店舗のイメージ画像の位置，サイズ ・ 一度に表示できる店舗画像の数 ・ 店舗のジャンルの見分けやすさ
店舗の検索	<ul style="list-style-type: none"> ・ 店舗のジャンルの見分けやすさ ・ 店舗選択までの階層，操作ステップの少なさ ・ 店舗詳細情報の表示の位置，サイズ ・ 外観からの操作方法の理解のしやすさ
場所の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地図上の現在位置と店舗位置の見つけやすさ ・ 地図全体の位置，サイズ ・ 地図と店舗詳細情報の対応のとりやすさ ・ 外観からの操作方法の理解のしやすさ

(2) グラフィック構造の検討結果

検討結果としてまとめたグラフィック構造を図 3.3 に示す．画面上側に地図を配置し，画面下側に操作メニューを配置した．また，操作メニューは「ジャンル階層」と「店舗階層」の2つのメニュー階層からなる．操作手順は以下となる．

① 初期状態： ジャンル階層を表示

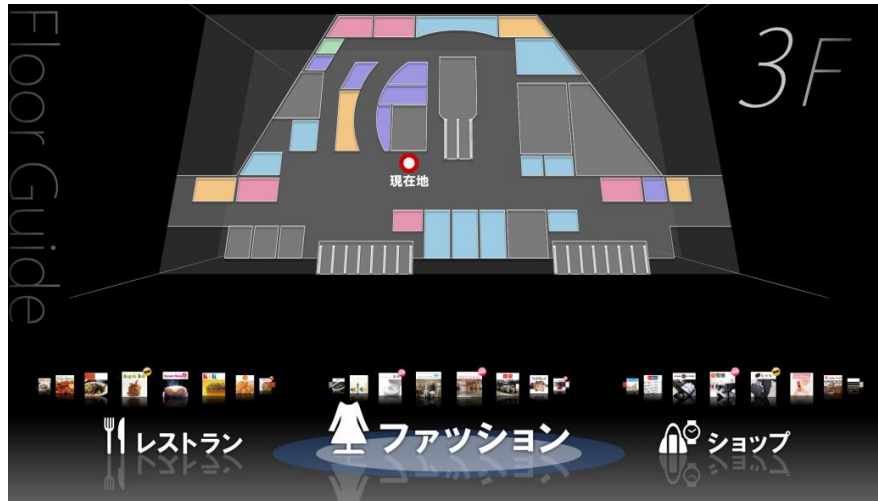
② 操作1： 店舗のジャンルを選択

【操作結果】 ジャンルに対応する店舗階層を表示

③ 操作2： 店舗画像のスクロール移動と選択

【操作結果】 店舗の詳細情報を表示．また同時に，店舗画像と地図を線で結び，店舗の場所を表示

(a) Genre Selection View



↓ Operation-1

(b) Shop Selection View

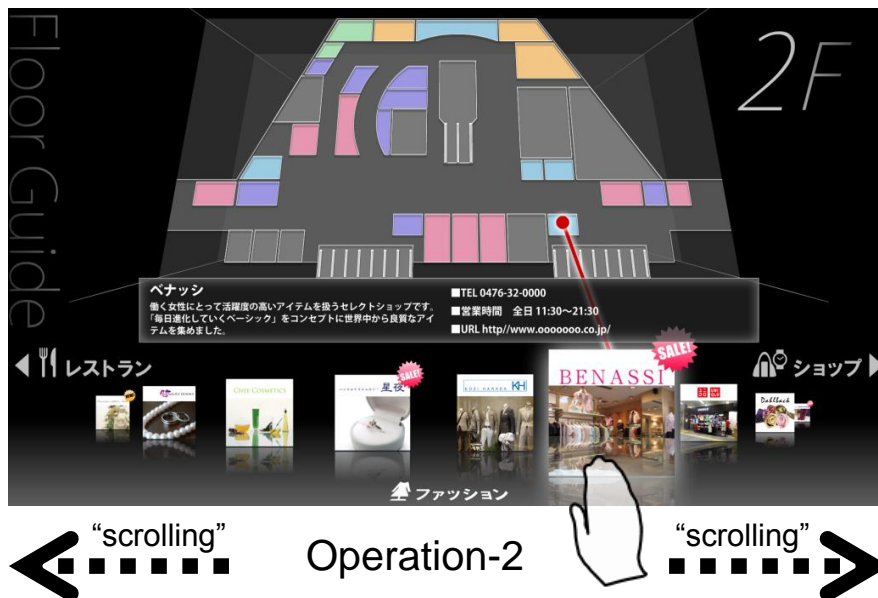


図 3.3 グラフィック構造

フロアガイドの3つの要件への対応は以下となる。

(1) 店舗の一覧

- ・ 初期状態で表示されるジャンル階層で、全ジャンルの店舗画像を一覧できる。
- ・ 操作1で表示される店舗階層で、大きく表示される店舗画像をスクロール操作しながら一覧できる。

(2) 店舗の検索

- ・操作1でジャンルごとに店舗数が絞り込まれるため、利用目的に沿った店舗を検索できる。
- ・操作2で店舗の詳細情報が確認できる。

(3) 場所の確認

- ・操作2で選択した店舗の場所を地図で確認できる。

このようなグラフィック構造により、以下の効果が得られる。

- 画面上側に常時地図を表示することで、場所を確認する機能があることがわかりやすい。
- 画面下側に配置した操作メニューに操作の対象となるグラフィックを集約しているため、画面内のどこを操作するかがわかりやすい。
- 操作メニューをジャンルで大きく区切り、ジャンル名称を大きく表示しているため、ジャンルから店舗を探す機能があることがわかりやすい。
- ジャンル階層でジャンル名称に対応して店舗画像を表示しているため、ジャンル階層と店舗階層の2つのメニュー階層で操作することが把握しやすい。
- 店舗階層で左右の端にいくにつれて店舗画像が小さく表示されるため、スクロール移動の操作ができることがわかりやすい。

以上のグラフィック構造の検討により、フロアガイドの3つの要件を満たし、情報機器に不慣れな人でも直感的に操作することを可能とした。

3.3.2 短時間で操作するためのジェスチャ操作

デジタルサイネージは公共の場で利用されるため、一人の人が必要な情報を短時間で得られ、多くの人が効率的に利用できることが求められる。前節で述べたグラフィック構造には2つのメニュー階層があり、階層を辿る操作や、ある項目から他の項目に表示を切り替えるために階層を行き来する操作に時間を要することが想定される。そこで、このようなメニュー階層の操作を、ジェスチャ操作を用いて短時間で行うための認識アルゴリズムを検討した。

(1)手の近づきを利用したメニュー階層の操作

前節で述べた利用状況調査で、利用者がフロアガイドを指でさし示すように手を近づける動きが多く観察された。そこで、このように利用者が自然に行う「手を近づける」動きを利用して、メニュー階層を効率良く短時間で選択できる操作方法を考案した。具体的には以下となる。

- 画面に手を近づける：手を近づけた位置に対応する下位の階層が表示される。
- 画面から手を遠ざける：表示中の階層の上位の階層が表示される。

画面内で操作対象となるグラフィックに対して、手を近づける動きを認識するアルゴリズムを開発した。図 3.4 に認識アルゴリズムの概要を示す。なお、同図はディスプレイの側面から見た場合の、手とディスプレイの位置関係を示す。

- (a) ディスプレイの物理的な設置位置と、画面内で操作対象となるグラフィックの表示位置に基づき、操作のターゲット位置 P_t を設定する。
- (b) P_t に対する手の近づきを判定するため、 P_t と手の位置 P_h の間の距離 D_{t-h} に関して、閾値 D_{yz} を設ける。
- (c) $D_{t-h} < D_{yz}$ になる場合、手が近づいたと判定する。また、手を近づけたまま左右に移動させるなどの、手が近い状態を保持して行われる操作を安定して認識するために、閾値 D_{yz} の距離を長くする。
- (d) $D_{t-h} \geq D_{yz}$ になる場合、手が遠ざかったと判定する。また、手を遠ざけたまま左右に移動させるなどの、手が遠い状態を保持して行われる操作を安定して認識するために、閾値 D_{yz} の距離を短くする。

ここで、閾値 D_{yz} の値は以下のように設定した。

- (c)で $D_{t-h} < D_{yz}$ になり手が近づいたと判定する際の閾値 D_{yz} は、指を伸ばしさえすれば画面に触れる距離とし、日本人の人差し指の長さの平均である 69.5mm[31]に偏差を考慮した 100mm とした。
- (d)で $D_{t-h} \geq D_{yz}$ になり手が遠ざかったと判定する際の閾値 D_{yz} は、手首から先の動きでは画面に触れられない距離とし、日本人の指先から手首までの長さの平均である 184.2mm[31]に偏差を考慮した 200mm とした。

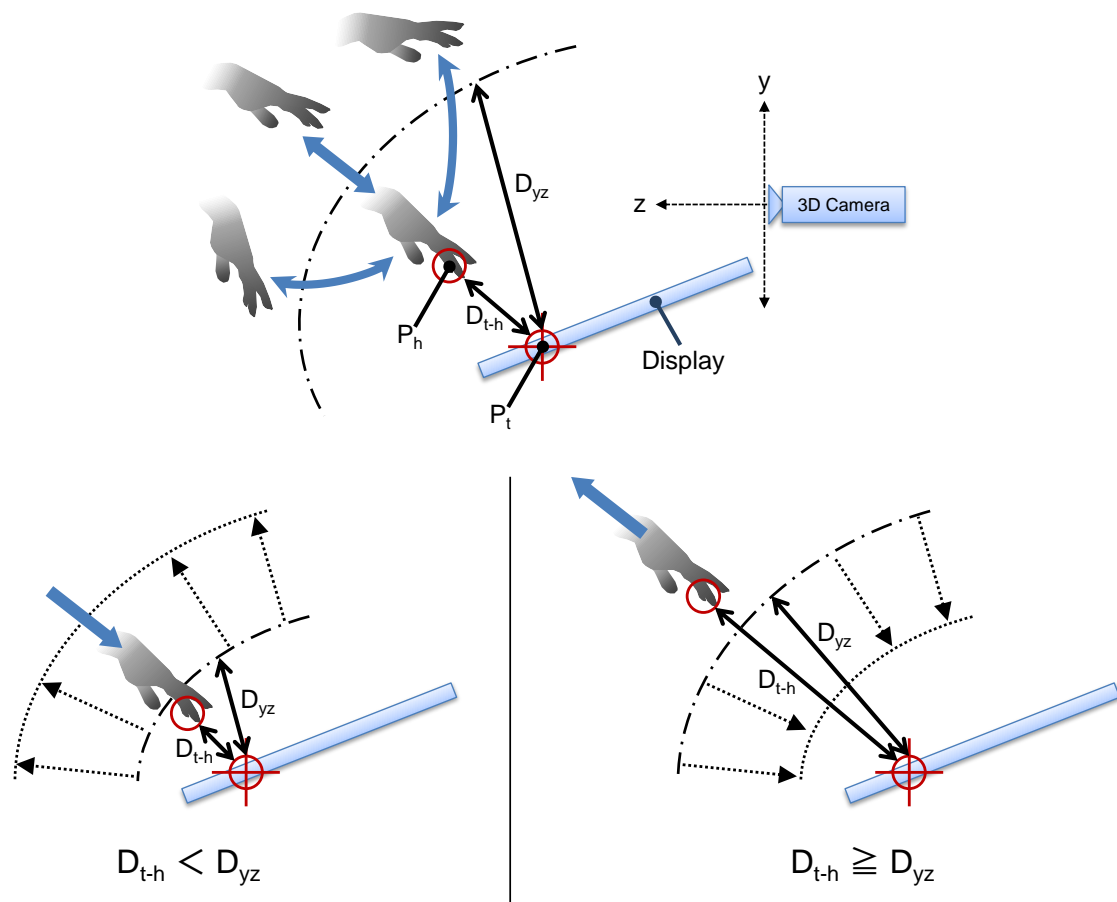


図 3.4 手の近づきの認識アルゴリズム

(2) グラフィック構造への操作の適用

前節で述べたグラフィック構造に手の近づきによる操作方法を適用した．図 3.5 に示すように，手を近づける動きにより画面表示が変更される．

- (a) 手が画面から遠い場合は，ジャンル階層が表示される．また，画面左右方向の手の位置に対応して，ジャンルが選択される．
- (b) 手が画面に近づくと，選択中のジャンルに対応した店舗階層が表示される．
また，店舗階層では，画面左右方向の手の位置に対応して，店舗が選択される．

この操作方法により，以下の効果が得られる．

- 手を近づける過程でジャンルが選択されるため，ジャンル選択する際に，タッチ操作のようにタッチして手を引き戻すような操作ステップがなく，操作時間が短縮される．

- 手を遠ざける過程で、店舗階層からジャンル階層に遷移するため、ジャンル階層に戻るための操作を行う手間がない。
- 手が遠い場合には、ジャンル階層に戻るため、操作する人が入れ替わった場合に、すぐにジャンル階層から操作を始めることができる。
- ジャンル階層、店舗階層の各階層において、画面左右方向の手的位置に応じて、常にどこかのジャンルもしくは店舗が選択状態になるため、タッチ操作のように何度も画面をタッチする動きが不要になる。
- ジャンル階層、店舗階層の各階層において、画面に近い位置で大きなグラフィックを選択するため、グラフィックに対する手の正確な位置合わせが不要になる。

以上の検討により、メニュー階層の選択や切り替え、操作する人の入れ替わり、操作時の手の動きの効率が良く短時間で行える操作方法を実現した。

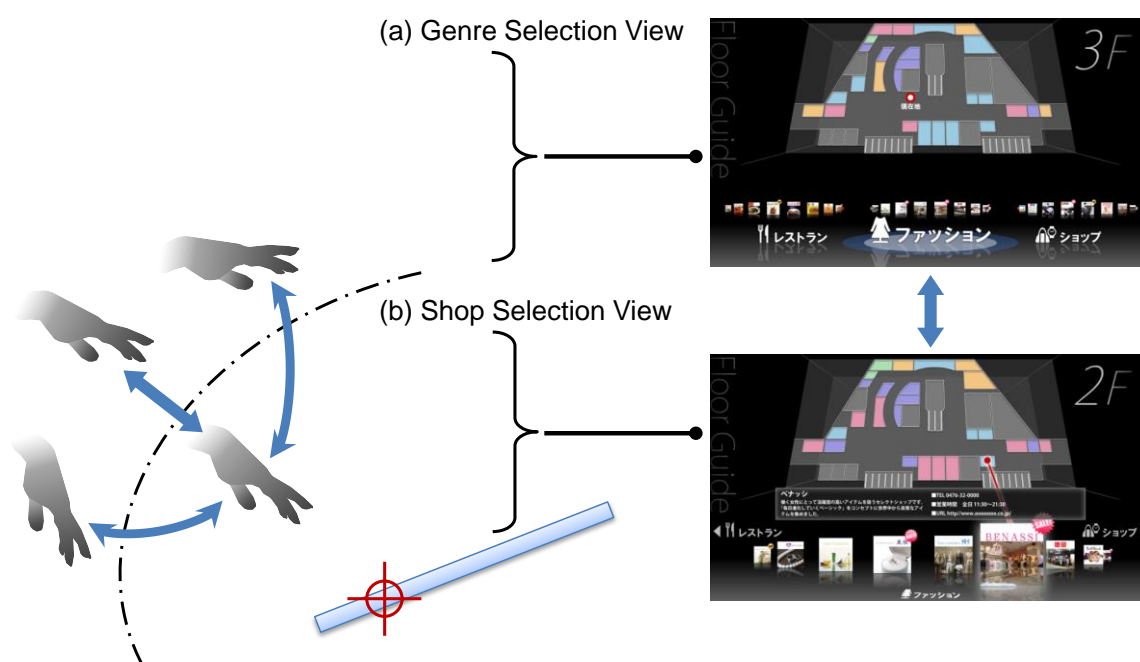


図 3.5 手の近づきによる表示の変更

3.3.3 身体への負担が少ない端末形状

デジタルサイネージを利用する人は、子供から高齢者、車いす使用者まで様々であるため、画面を見ることや操作することによる身体への負担を少なくすることが求められる。そこで、以下の理由により、ディスプレイを水平に設置するテーブル型の端末形状を採用することとした。

- 画面を見るとき身体の負担が少ない

子供や高齢者、車いす使用者などが利用する場合、頭の位置が低いことがあるため、高い位置にあるディスプレイを見上げることによる身体への負担が大きい。ディスプレイを平置きし、低い位置に設置することで、大画面であっても、上から見下ろす楽な姿勢で画面全体を見渡すことができる。前節で述べた利用状況調査で確認したテーブル型のフロアガイドも同様の配慮がなされたものと考えられる。

- 周囲の視線が気になりにくい

公共の場で情報端末を利用する場合には、周囲の人に見られながら操作することへの抵抗感が生じると想定される。ディスプレイを平置きすることにより、画面から離れた所にいる人に詳細な操作状況を見られにくいようにできる。このような例に銀行の自動取引機や交通機関や店舗のチケット発券機がある。

- 操作に適した距離に立ちやすい

前節で述べた利用状況調査では、壁面設置のフロアガイドに比べテーブル型の方が、ユーザが近い位置に立つことがわかった。従って、操作に適した距離まで、ユーザが自然に近づくことが想定される。また、画面に近い位置に立つことで、操作する手を無理なく差し出すことができる。

図 3.6 にリファレンスデザインとして開発した筐体の外観を示す。また、同図右に示す液晶ディスプレイを用いた筐体の仕様を表 3.3 に示す。ディスプレイのサイズは既存のフロアガイドの板面サイズを参考にして 52 インチを選定した。

リファレンスデザインの筐体は、デジタルサイネージで一般的に用いられる壁面設置のデザインと比較した場合のメリットとして、先に述べた 3 点に加え、ディスプレイ下部にスペースがあり車いす利用者が近づきやすいことや、ディスプレイ周囲に設けた手すりにつかまれるため利用中の身体の負担を軽減できることが挙げられる。一方で、デメリットとしては、物理的な設置場所の制約が生じることや筐体から離れた位置から画面が見えにくいことがある。



図 3.6 筐体のリファレンスデザイン

表 3.3 筐体の仕様

寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 幅： 1460mm ・ 高さ： 1170mm ・ 奥行き： 1010mm
重量	約 100 kg
ディスプレイ	52 インチ液晶モニタ ディスプレイ面の水平に対する傾斜：20 度

3.4 実装

前章で述べた設計を基に，フロアガイドの機能を提供するデジタルサイネージのプロトタイプを開発した．

プロトタイプの全体構成を図 3.7 に示す．ハードウェアは，センサ，ディスプレイ，PC の 3 つで構成される．プロトタイプに適用するジェスチャ操作は，前章で述べたディスプレイに対する手の近づき等，3 次元で手を動かす動きになる．この動きを認識するために，センサには 3 次元距離画像カメラ[32]を用いた．ジェスチャ操作の認識や GUI の表示処理は PC のソフトウェアで行う．

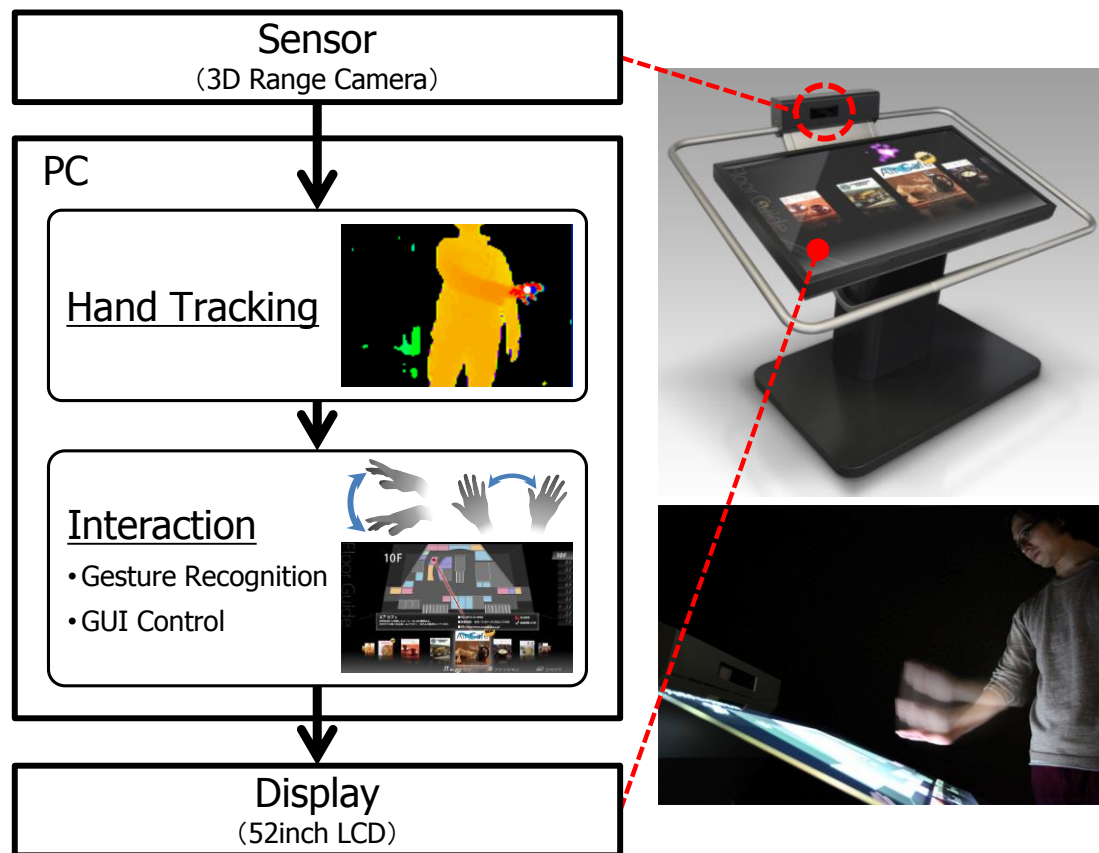


図 3.7 プロトタイプの全体構成

3.4.1 ハードウェア構成

図 3.8 にハードウェア構成を示す．GUI やジェスチャ認識を行うソフトウェアは PC 上で動作しており，HDMI を経由して GUI をディスプレイにモニタ出力する．以下，各ハードウェアの基本的な仕様を示す．

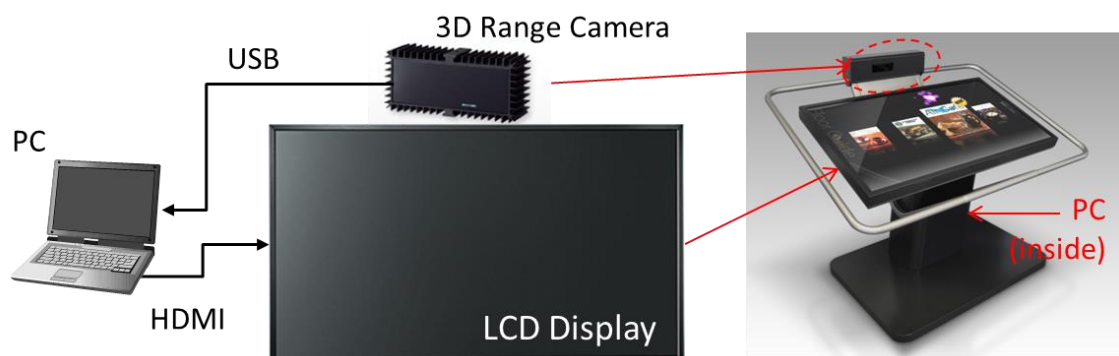


図 3.8 ハードウェア構成

(1)PC

PC はデジタルサイネージで多く利用される産業用ボックスコンピュータを用いた。

- ・ CPU : Intel Core Duo プロセッサ 1.2GHz
- ・ メモリ : 1GB

(2)ディスプレイ

ディスプレイには三菱電機社のデジタルサイネージ用の液晶ディスプレイ MDT52IS を用いた。本液晶ディスプレイの仕様を表 3.4 に示す。PC からは HDMI を介してディスプレイに解像度 1080p(1920×1080pixel)の映像を出力する。

表 3.4 ディスプレイの仕様

Brightness	700 cd/m2
Contrast	2000:1
Response Time	8 ms

(3) 3D カメラ

ジェスチャの認識には 3D カメラを用いた。この理由を以下に示す。

- ・ 距離情報を利用することで、手先と、手先以外の腕、体、背景とを、精度良く分離して認識できる。
- ・ カメラが自発行する光源で撮像するため、照明などの外光の影響が少ないロバストな認識ができる。

3D カメラは、オプテックス株式会社製の ZC 1070U を用いた。本 3D カメラは、筐体に設けられた LED 光源から赤外線を照射し、その赤外線が物体に反射してイメージセンサで受光されるまでの飛行時間を計測する TOF (Time of Flight) 方式より、距離情報を含む画像データ (以下、距離画像) を取得する。本 3D カメラの仕様を表 3.5 に示す。

3D カメラからは、フレーム毎に以下の情報を取得できる。3D カメラで取得できる距離画像および赤外面像を図 3.9 に示す。

- ・ カメラを原点とした奥行方向の距離情報 (世界座標系の Z 座標値)
- ・ カメラを原点とした横方向(左右)の距離情報 (世界座標系の X 座標値)
- ・ カメラを原点とした縦方向(上下)の距離情報 (世界座標系の Y 座標値)
- ・ 赤外線の反射強度

表 3.5 3D カメラの仕様

FOV Angle	70° /55° /90°
Effective	160x120 pixel (176x132)
Light Source	Infrared LED (850nm)
Measuring Range	0.5～4.0 m
Accuracy	X, Y direction : $\pm 5\%$, Z direction: $\pm 2\%$
Usage Environment	10,000 lux or below

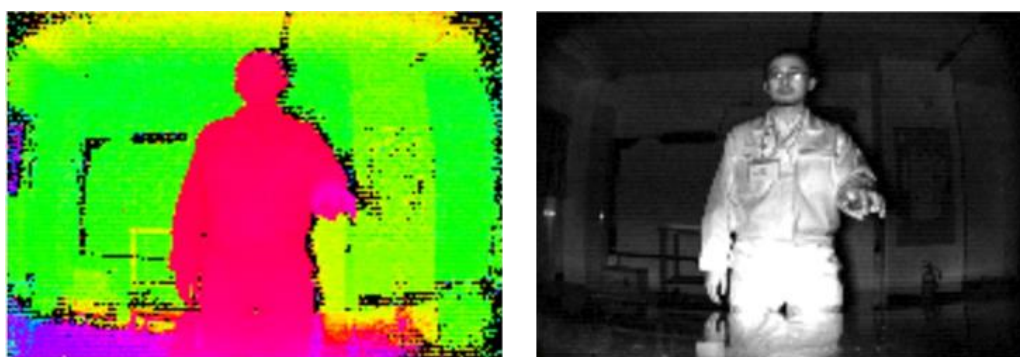


図 3.9 3D カメラの距離画像と赤外画像

3.4.2 ソフトウェア構成

ソフトウェアは大きく以下の 2 つで構成される。

- ・ ハンドトラッキング
距離画像から撮像範囲内にある物体の 3 次元形状を解析することにより，ユーザの手の位置を検出，追跡する．実装は C++を用いた．
- ・ インタラクティブアプリケーション
手の動きからジェスチャを認識し，認識した動きに応じて GUI の表示を変更する．実装は Adobe Systems 社の Flash (Action Script) を用いた．

上記 2 つのソフトウェア間の通信は，Local Connection によるプロセス間通信を用いた．Local Connection は，Memory-Mapped File (ファイルマッピングオブジェクトによる共有メモリ) を排他制御しながらプロセス間通信を行うインタフェースであり，通信プロトコルには Flash Action Script の独自バイナリ形式となる AMF(Action script Message Format)を使用する．

3.4.3 ハンドトラッキング

図 3.10 に 3D カメラを用いたハンドトラッキングの処理の概要を示す。ハンドトラッキングでは、大きく以下の 3 つの処理を行う。

(1)検出エリアの設定

操作する手を検出するエリアを設定する。このエリアは、3 次元の世界座標系において立方体形状のエリアとなる。

(2)最近傍点の検出

検出エリア内で、3D カメラから最近傍となる座標を検出する。ユーザが操作する手を画面に差し出している場合、最近傍点は手先の位置となる。

(3)手のオブジェクト抽出

上記(2)で検出した最近傍点の周辺物体の大きさを見て、手として扱うオブジェクトを抽出する。抽出したオブジェクトが、手のサイズとして小さすぎる、あるいは大きすぎる場合は、最近傍点をノイズとして扱い、検出済みの最近傍点周辺を除いた領域で新たな最近傍点を探索する。

(4)手の位置推定

上記(2)で得られた手のオブジェクトの中心座標を計算し、この座標を操作中の手の位置として出力する。

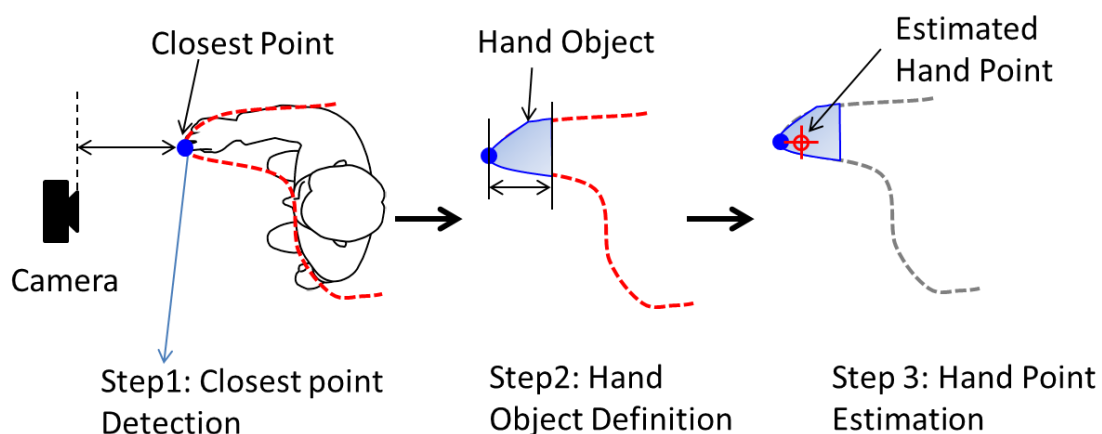


図 3.10 ハンドトラッキングの処理の概要

3.5 評価

3.5.1 思考発話法によるユーザビリティ評価

開発したデジタルサイネージのユーザビリティを評価するためにユーザ評価を実施した。この評価では、ある目的に沿ったタスク実行の過程でユーザが考えていることをその場で発言してもらうユーザビリティテストの方法のひとつである思考発話法[33]を用いた。発話思考法は特に、使いにくさの原因を洗い出すのに適した評価方法である。被験者および評価の条件は下記とした。

【被験者の条件】

- ・ 被験者数：20名（全て一般人）
- ・ 年齢：20代～60代の10歳刻みで各4名
- ・ 性別：男女半々

【評価の条件】

- ・ テスティングルームで1名ごとに実施し、評価時間はタスクの実行やインタビューを含めて1名あたり約40分とした。
- ・ テスティングルーム内は、被験者とインタビューアの2名のみとし、他の評価者はマジックミラー越しでの直視もしくはカメラ映像で被験者を観察した。
- ・ 被験者には操作方法を説明せず、デジタルサイネージがフロアガイドの機能を提供することのみ伝えた。



図 3.11 ユーザ評価

評価の実施から分析、使いにくさの原因の抽出までの手順を以下に示す。また評価実施時の様子を図 3.11 に示す。なお、フロアガイドには 42 店舗を掲載した。

(1) ユーザ評価の実施

被験者にショッピングモールに来ていると想定させ、下記のタスクを実行させる。被験者にはタスクが完了したことを口頭で言わせる。その際にインタビューが、被験者がタスクを実行しながら考えていること、感じていることをインタビューする。

- ① インタビューアが被験者に店舗名称を伝え、被験者がその店舗の場所を確認する
- ② インタビューアが被験者に「食事をする」などの目的を設定し、被験者が利用したい店舗を検索し決定する

また、被験者に 5 段階で思い通り使えるか (1:とても使えない, 2:使えない, 3:どちらでもない, 4:使える, 5:とても使える)を評価させるとともに、操作方法や身体への負担に関して自由にコメントさせる。

(2) 事実の把握

以下を事実として記録する。

- ・ 被験者がタスクを実行したときの様子や行動、発話内容
- ・ 操作開始からタスク完了までのタスク実行時間

(3) 状況の分析

記録した事実に基づき、主に以下の観点で定性的に分析する。

- ① 「店舗の場所の確認」と「利用店舗の検索と決定」のタスクを実行できたか。
- ② 操作方法を理解して直感的に操作できていたか。
- ③ 階層を切り替える操作や、店舗のスクロール・選択を行う操作を円滑に実行できたか。
- ④ 無理のない姿勢や手の動きで操作できたか。

(4) 使いにくさの原因の抽出

分析結果に基づき、使いにくさの原因を抽出する。また、抽出した原因を「グラフィック構造・デザイン表現」「ジェスチャ操作・認識」「端末形状」の観点で分類し対策を検討する。

3.5.2 評価結果

ユーザ評価の結果を以下に示す．全ての被験者がタスクとして与えた「店舗の場所の確認」と「利用店舗の検索と決定」を実行できた．思い通り使えるかを評価した結果を図 3.12 に示す．思い通り使えると回答した人は、4:使える、5:とても使える、の回答を合わせると 60%であった．その他の回答であった人からは、思い通り使えないと感じる原因として「手を引いたときに選択した店舗が解除されるまでの時間が短い」「スクロールの速度が速い」のコメントを多く得た．

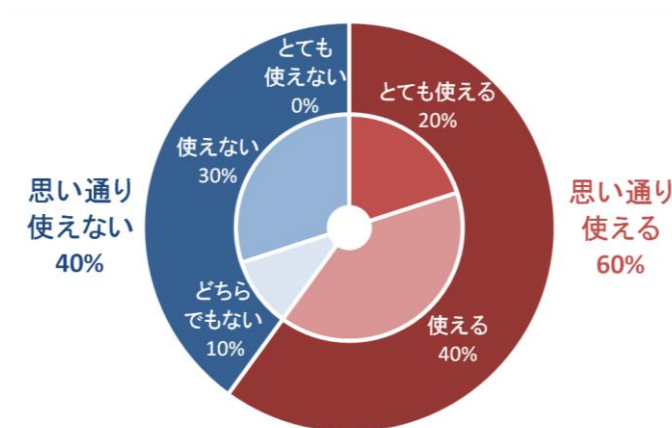


図 3.12 思い通り使えるかの評価結果

図 3.13 は、指定した店舗の場所を確認するタスクの実行時間の平均値を示している．また、図 3.13 ではタスク実行時間を思い通り使えるかの評価結果に対応付けている．思い通り使えた人は、思い通り使えない人の半分以下の時間で操作できており、優位な差がみられた．基本的な操作方法の理解の度合いがタスク実行時間に現れていると考えられる．

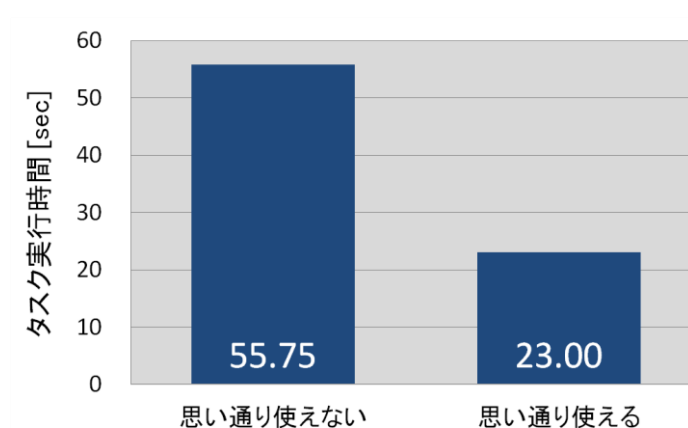


図 3.13 タスク実行時間の平均値

図 3.14 は、被験者を年代別に分けて、指定した店舗の場所を確認するタスクの実行時間の分布を示している。年代別では、特に 50 代以上でタスク実行時間が短い人と長い人の差が大きいことがわかる。タスク実行時間が長かった人の行動には、操作する手を止めて画面を見る時間が長い傾向があったため、操作方法の理解に時間を要したと考えられる。また、図 3.14 では各被験者のタッチデバイスの日常的利用の有無を同時に示しており、日常利用する人は被験者全体の 35%であった。タッチデバイスには、スマートフォン、タブレット端末、タッチパネル搭載ゲーム機が含まれる。GUI やグラフィック構造の理解は、タッチデバイスの操作経験の有無により異なると考えられるが、特にタスク実行時間に有意差はなかった。

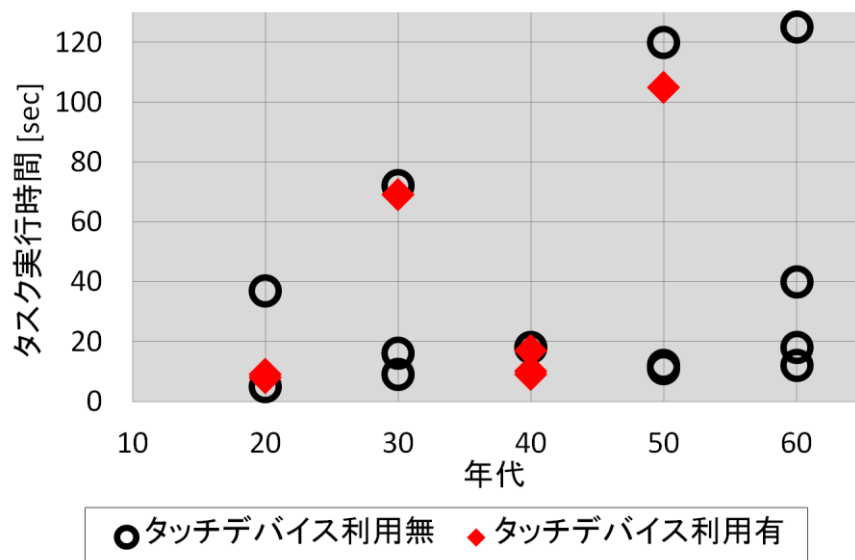


図 3.14 タスク実行時間の分布

3.5.3 考察

以下、先に述べた 3 つの課題に対して評価結果を考察する。

(i) 情報機器に不慣れな人でも直感的に操作できなければならない

ユーザ評価では被験者に操作方法を説明しなかったが、全被験者が「場所の確認」「利用店舗の検索」のタスクを実行できている。また、被験者の過半数以上が思い通り使えると回答しており、直感的な操作を実現できたと考えている。一方で、思い通り使えない人にはタッチデバイスを日常的に利用する人もいた。タスク実行時にも全被験者の約 8 割の人に操作中に画面をタッチする行動が見られ、特に店舗階層で店舗を選択した状態を保持させようとしてタッチする行動が顕著であった。タッチ操作には、操作後の状態が確実に保持されるという安心感があるため、今後はタッチパネルとの併用でより使いやすくすることも検討していきたい。

(ii) 多くの人が効率的に利用できなければならない

被験者の過半数以上であった思い通り使える人は平均で 23 秒という短時間でタスクを完了している。また、思い通り使えない人も含め全体の 75%の人が 40 秒以内でタスクを完了しており、公共用途としての実用性を確保することができたと考えている。思い通り使えない人の理由は「手を引いたときに選択した店舗が解除されるまでの時間が短い」「スクロールの速度が速い」ことであった。これらの時間や速度の最適化や、操作状態をより理解しやすくするフィードバックの拡充により、さらに一人の人が短時間で必要な情報を得られ、多くの人が効率的に利用できるようになると考えている。

(iii) 画面を見ることや操作することによる身体への負担を少なくしなければならない

ユーザ評価での被験者の観察において、被験者が自然に立った姿勢で画面を眺めて操作できていることが確認できた。また、被験者に画面の見やすさや操作する手の出しやすさについてヒアリングした結果でも、操作中の姿勢に特に無理を感じた人はいなかったため、身体への負担を少なくすることができたと考えている。しかしながら、スクロールする操作で手を伸ばす範囲が広いことに負担を感じた人がおり、この範囲を狭くするなどして動作の観点からもさらに身体への負担を少なくすることを検討していきたい。

上記の考察で示したように、先に述べた 3つの課題を解決したインタラクティブデジタルサイネージを実現できたと考えている。また、評価に際してはプロトタイプの操作性の満足度と利用意向についてヒアリングしており、9 割の人から「公共の場にこのデジタルサイネージがあれば利用したい」との回答を得ることができた。

しかしながら、操作方法をよく理解していた人や、思い通り使うことができると感じた人の割合はまだ十分ではなく、さらなる改良が必要である。この改良方法として、図やアニメーションによる基本的な操作方法の提示や、操作方法をそれとなく示す表現のグラフィックへの追加など、適度な操作ガイドを画面内に取り入れることが考えられる。

被験者へのヒアリングでは、機能追加の要望もあった。特に多かったものには、フロア階を指定して一覧したい、地図を直接操作して店舗を見つけたい、などがある。説明なく使える公共用途としての実用性を確保しつつ、ニーズに合わせてより自由度の高い使い方ができることが必要と考えている。

3.6 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースのまとめ

本研究は、実世界指向ヒューマンインタフェースによるインタラクションの拡張に向け、人間が自然に利用でき、尚且つ、最も利用頻度が高い「見て、動かす」直感的な操作を実現することを目的とした。特に大画面においては、最適視距離で画面を見ている状況では、手を伸ばしても画面に触れることができず、「見て、動かす」操作を行うことができないという問題が生じる。本章では、この問題の解決に向けた研究開発について論じた。

大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースの基本技術確立するために、ジェスチャ操作を用いたインタラクティブデジタルサイネージを具体的な対象として行った研究開発を行った。まず、インタラクティブデジタルサイネージとジェスチャ操作の従来研究から、解決すべき課題を明らかにした。また、インタラクティブデジタルサイネージの具体的なコンテンツとしてフロアガイドを選定し試作検証を行った。試作検証を通して、課題を解決するインタラクションの仕組みとして、以下の3つの成果を得た。

- (i) 直感的に操作できるグラフィック構造として、操作対象の情報を階層化するとともに、画面の奥行き方向を利用して階層を可視化する表現が有効である。
- (ii) 直感的かつ効率的に操作可能なジェスチャ操作として、手が近づく動きのジェスチャを認識してメニュー階層の選択操作に適用することが有効である。
- (iii) 大画面の操作は、画面を寝かせて見やすくするなど、身体への負担軽減の配慮が必要である。

さらに、上記の成果を適用したテーブル型のインタラクティブサイネージを開発した。一般被験者でのユーザビリティ評価により、端末を初めて使う方でも利用方法を説明することなく目的の操作を実行できることを確認し、公共用途に適した実用性を示した。これらの研究開発の取り組みにより、大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースの基本技術確立した。

開発したインタラクティブサイネージは、ユーザが所望の項目を選択して情報を閲覧するという基本的な機能を備えている。コンテンツについては、本章で述べたフロアガイドに限定されるものではなく、実際に各種店舗での商品カタログの閲覧や各種展示場での展示物の紹介等に応用展開している。従って、グループ化および階層化された多数の情報から、ユーザが所望の情報を直感的かつ効率的に選択するという、コンピュータの操作において多用され基本性が高い操作を実現しているものであると考える。今後は、最適視距離での大画面のより様々な使い方に対応していくため、さらに用途の自由度が高いインタラクションを考案していく。

第4章 非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマン インタフェース

本研究は、実世界指向ヒューマンインタフェースによるインタラクションの拡張に向け、人間が自然に利用でき、尚且つ、最も利用頻度が高い「見て、動かす」直感的な操作を実現することを目的とする。特に大画面においては、画面に近づいて操作する際に、画面がプロジェクタやウェアラブルデバイスのように物理的なディスプレイが存在しない場合には、画面に触れて「見て、動かす」操作することができないという問題が生じる。本章では、この問題の解決に向けた研究開発について論じる。

4.1 研究の対象と解決すべき課題

非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースの基本技術の確立に向けて研究開発したタッチ検出技術について述べる。まず、先に述べた従来研究を踏まえ、解決すべき課題を以下の3つと定義した。

- (i) 面上にセンサや光源を設置せねばならず、また、設置するためのスペースが大きい
- (ii) 面上に物体や突起物が存在する場合にタッチ検出できない
- (iii) 高精度に指の接触を認識することが難しい

上記の課題解決に向け、赤外カメラと2つの赤外照明を用いて指先の左右にできる影を利用して指先の接触を検出する新たな手法を提案する。また、提案手法の基本原則と目標を論述し、提案手法により実際にタッチ検出を行うシステムを示す。タッチ検出精度の評価により、80インチの操作対象面の全面において高精度にタッチを検出できることを確認し、提案手法の有効性を示す。

4.2 提案手法

先に述べた課題を解決できるタッチ検出を実現するために、指と面の距離に応じて指の影の形状が変化することに着目した。また、指と面の距離が影に表れやすくするために、ステレオカメラでの測距のように視差の効果を利用することを検討した。その結果、2つの照明により指の左右に影を作り、影そのものに視差と同様の効果が生じるようにすることを考えた。

提案手法は、2つの照明で作る影をカメラで撮影し、左右の影の距離や形状の変化を画像認識することで指先の接触を判定する。提案手法は従来手法に比べて以下の利点を有する。

- ・ センサ類を面上に設置する必要がなく、カメラと2つの照明を一箇所に集約して並べるため、設置性に優れ、壁面や机上など様々な面に適用できる。
- ・ 物体や突起物がある面においても影の変化は観察できるため、平面に限らず利用できる。
- ・ カメラに広角レンズを使用しても影の変化は観察できるため、カメラと操作領域の距離を大きく離すことなく広い操作領域に対応できる。
- ・ 影の形状の変化に加え、左右の影の距離や形状の違いを認識に利用するため、高精度にタッチを検出できる。

4.2.1 基本原理

提案手法における指先の影の変化を図 4.1 に示す。図 4.1 では左右2つの照明の中央にカメラを配置した際に、カメラで撮影される影が変化の様子を示している。指先が面から離れているときは、指の左右にある2つの影の距離が離れる。また、影の先端の形状は、指と同じように丸みを帯びる。一方で指先が面に接しているときは、左右2つの影が指先に近づき、指先に向かって影の形が細くなる。

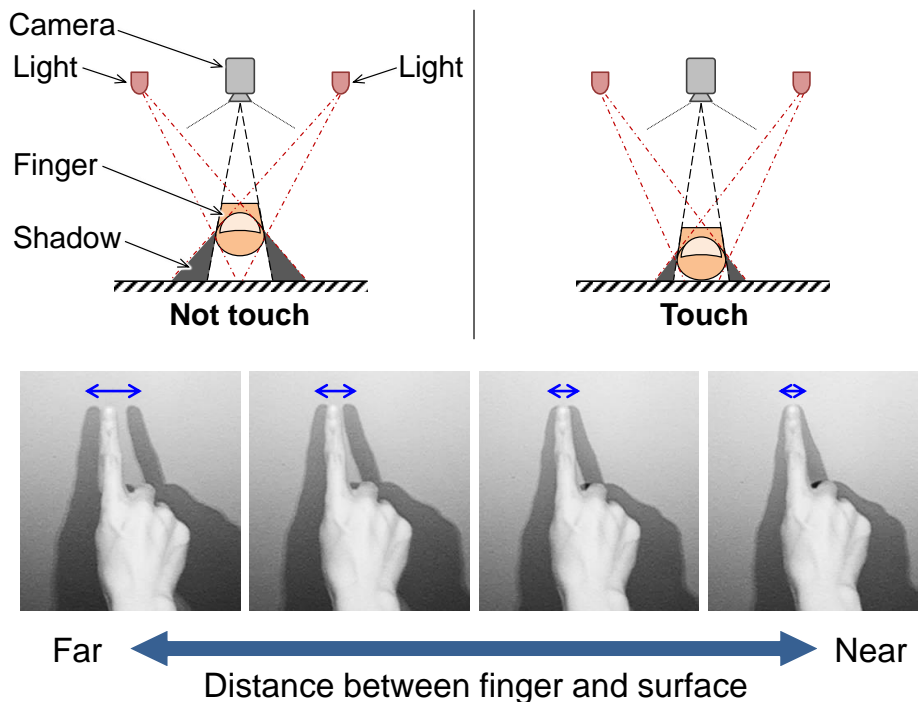


図 4.1 指先の影の変化

このように指と面の距離に応じて、2つの影の距離や形状が変化する。従って、カメラでは直接観察できない指と面の近づき具合を、影の変化により認識することができる。

提案手法におけるタッチ検出の手順を図 4.2 に示す。手順は以下となる。

- (a) 背景差分の輝度の変化に基づき、影の領域を抽出する。
- (b) 影の領域の輪郭を検出する。
- (c) 影の輪郭から先端位置などの特徴点を抽出する。
- (d) 左右2つの影の先端同士の距離が近いなど、特徴点の状態からタッチを判定する。

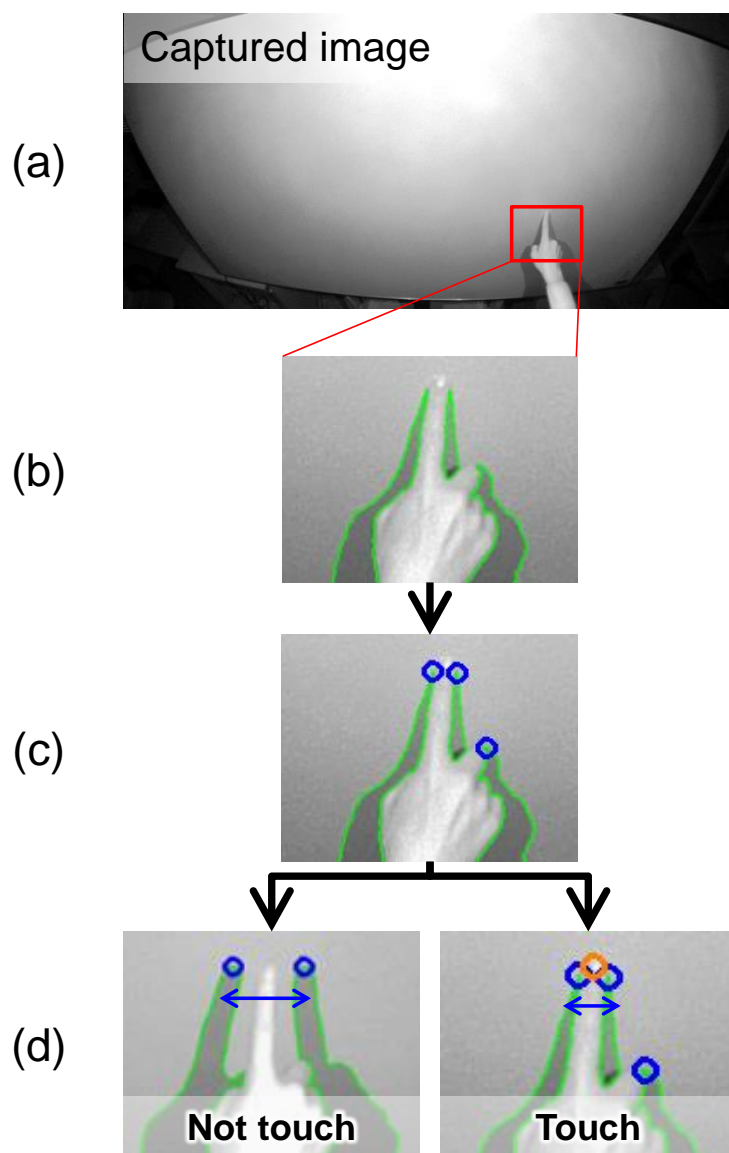


図 4.2 タッチ検出の手順

4.2.2 タッチ検出精度の目標値

上述の通り，提案手法のように面上にカメラを設置しない手法では，タッチ操作において「指先の接触」を検出することが難しいため，本研究ではこの指先の接触を精度良く検出することに重きを置いた．そこで，本研究において検出するタッチの定義を，80 インチの操作対象面の全面において指が 5mm 以内に近づいた状態とし，カメラ撮影の 1 フレームにおいてタッチの検出精度 90%以上を目標にした．この理由を次に述べる．

(1) タッチとして検出する操作対象面と指の距離

まず，操作対象面に 5mm 以内に近づいた指をタッチとして検出する理由を述べる．この目標値を設定するにあたり，実際のタッチ操作において，操作対象面と指が離れている距離を測定する実験を行った．図 4.3 に，本実験の環境と実際の測定の様子を示す．タッチ操作の対象は，ボタンを模擬した図を印刷した紙を用いた．タッチ対象のボタンは 7mm×7mm サイズの正方形とし，このボタンを格子状に 9 個並べ，中央にある赤いボタンをタッチ操作のターゲットとした．9 個のボタン間は 2mm の隙間を開けて配置した．

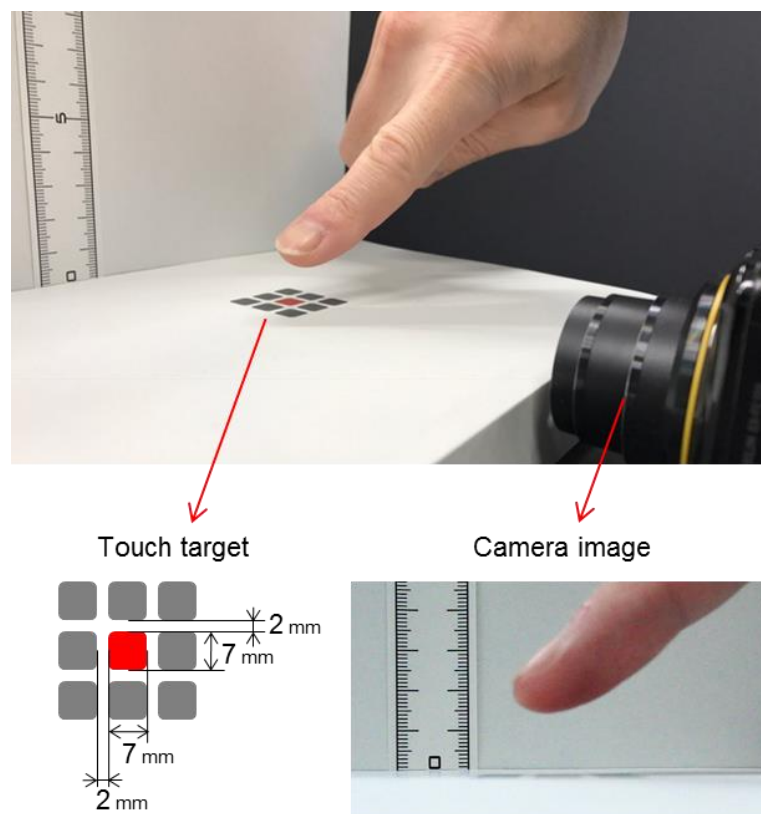


図 4.3 タッチ操作の測定実験

このようにボタンのサイズおよびボタン間の隙間の距離を設定した理由を次に述べる．現在，多くのモバイルデバイスにおいてタッチパネルが利用されているが，Microsoft や Apple, Google などのモバイルデバイス向け OS を提供している会社は，モバイルデバイスにおける最小タッチ領域サイズのデザインガイドラインを公開している[34, 35, 36]．具体的には，Microsoft は最小タッチ領域サイズを 7mm 四方（ただし，9mm 四方を推奨）としており，同様に Apple は 6.85mm 四方，Google は 7~10mm 四方を推奨している．本実験のボタンのサイズおよびボタン間の隙間は，これらのデザインガイドラインにおいて，タッチ操作の対象として定義されているオブジェクトにおいて，mm 単位に四捨五入した最小値から設定した．

測定実験で被験者が行う操作はダブルタップとした．ダブルタップでは，指が操作対象面から一度触れ，即座に再び指が操作対象面に触れる．従って，様々なタッチ操作の指の動きの中でも，最も指が操作対象面を離れる距離が短いと考える．従って，ダブルタップ中に指が操作対象面を離れる距離が判別できれば，ほぼ全てのタッチ操作が検出可能になると考える．測定実験では，ダブルタップ中の指を，側面から高速カメラで撮影し，1 回目のタップと 2 回目のタップの間で，指が最も離れた距離を測定した．図 4.4 に測定データの一例を示す．図 4.4 中のグラフは，操作対象面から指が離れた高さを示している．黄色の円で囲まれた部分がダブルタップ中に最も指が高く上がったところになり，実験での測定対象になる．

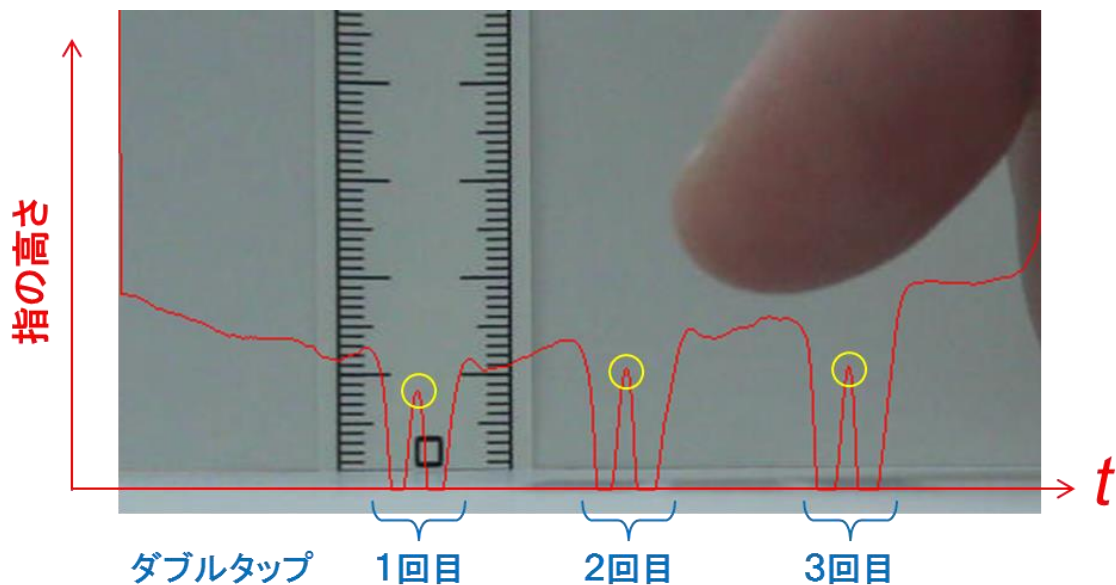


図 4.4 タッチ操作の測定データの例

また、操作対象面の角度の条件として、机上を想定した水平と、壁面を想定した垂直の2種類を設定した。さらに、操作中の手の姿勢として、手の一部を机上および壁面に接触させて支えながらタッチ操作する姿勢と、手を浮かせた状態で支えずにタッチ操作する姿勢の2種類を設定した。従って、水平と垂直のそれぞれの面に対して、手を支える場合と支えない場合を測定し、計4パターンの測定を行った。測定実験は、10人の被験者で実施し、各状況で3回のダブルタップ操作を行った。

この結果を図4.5に示す。操作対象面から指が離れる距離の平均は14.6mmであり、最小値は5mmであった。この結果から、操作対象面から指が5mm以上離れたことが判別できれば、ほぼ全てのタッチ操作を検出できることと言える。そこで、タッチとして検出する操作対象面と指の距離を5mm以内とした。

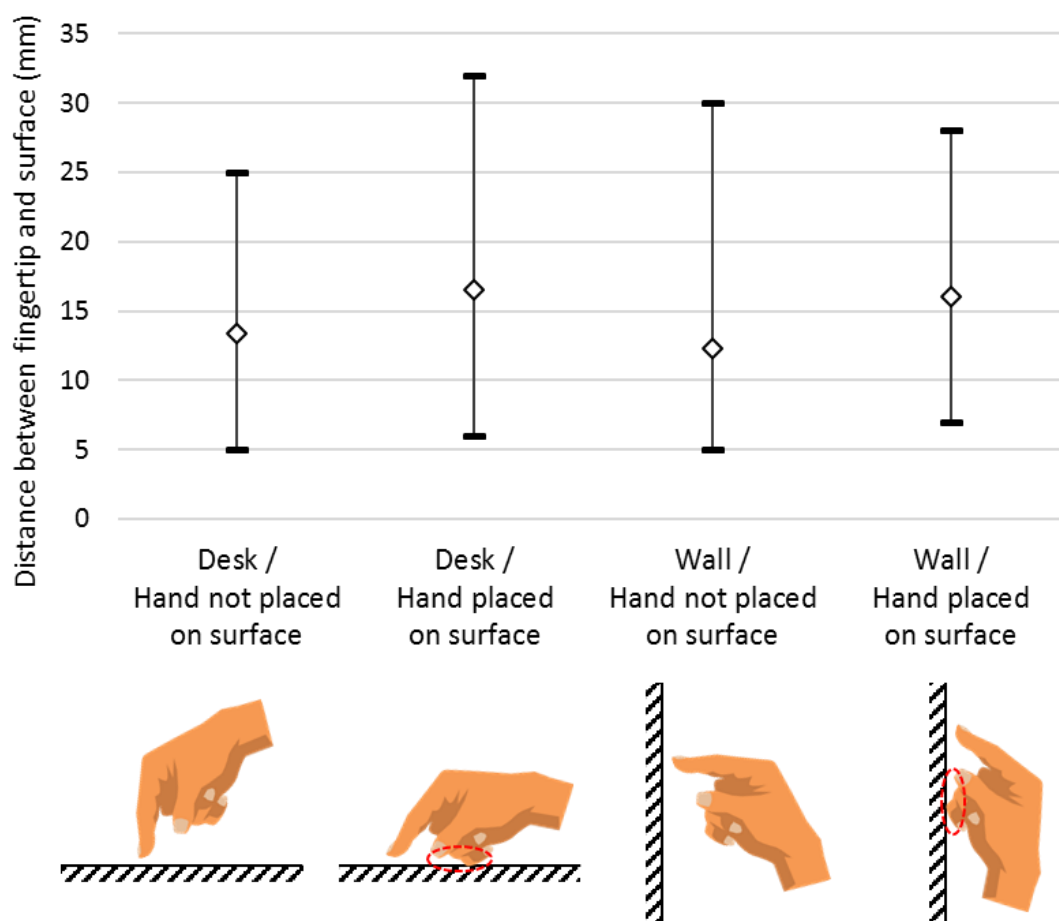


図 4.5 タッチ操作の測定実験の結果

なお、大画面のホワイトボードやディスプレイにタッチパネル機能を付加する方式として、従来方式として述べた光学式タッチパネルが多く用いられる。実用化されて

いる光学式タッチパネルを検証したところ、タッチ判定の精度は約 5~10mm であった。面に対して指が 5~10mm の距離まで近づいたときにタッチが検出されるため、タッチ判定精度の最小値は 5mm となる。また、公共で利用されるタッチパネルディスプレイでは、画面保護のために 5mm 厚の強化ガラスを表面に張ったものがあり、この場合は表示面から 5mm 手前に離れた面をタッチ操作することになる。タッチとして検出する操作対象面と指の距離が 5mm 以内であれば、このような既存製品に用いられているタッチ操作と同等以上の性能であると言え、人が操作したときの違和感は少ないと考える。

(2)操作対象面のサイズ

次に、操作対象面のサイズを 80 インチとした理由を述べる。80 インチの操作対象面の横幅は約 170cm であり、人が面の中央に立った場合に、立ち位置を変更することなく面の端から端まで手を伸ばすことができる限界に近いサイズとなる。また、80 インチはミーティング用のホワイトボードや大型ディスプレイで多く利用されるサイズでもあり、身近な環境で利用する実用的な操作対象面として最も広いと考える。

(3)タッチ検出の精度

最後に、カメラ撮影の 1 フレームにおいてタッチの検出精度 90%以上を目標とした理由を述べる。まず、本研究は連続性を伴う人の操作の検出が対象であり、リアルタイムなカメラ撮影画像に対して画像認識を行う。このような画像認識では 2 つ以上のフレームを用いて認識結果を補間することが多くなされる。タッチ検出精度 90%以上は、誤検出 10%以下と言い換えることができ、1 フレームで誤検出が 10%以下であれば、2 フレーム連続で誤検出することは 1%以下となる。従って、フレーム間の補間によりタッチ誤検出 1%以下、即ちタッチ検出精度 99%以上にできると考える。このような理由で、1 フレーム毎のタッチ検出精度が 90%以上であれば、ユーザ操作に影響あるタッチ検出精度として 100%に近い精度を実現できると考え、これを目標値とした。

4.2.3 提案システム構成

先に述べた基本原理による高精度なタッチ検出の実現可能性を確かめるため、実際に動作するシステムを構築した。図 4.6 に提案システムの構成を示す。提案システムは 2 つの赤外照明とひとつの赤外カメラで構成され、左右の赤外照明によってつくられた指の影を、中央の赤外カメラで撮影する。赤外の照明およびカメラを使用する理由は、可視光でできる影の影響を受けないようにするためである。赤外照明と赤外カメラは 850nm の波長に対応するものを用いた。赤外カメラの解像度は 1920*1080 で

あり、視野角が約 120 度の広角レンズを用いることで、80 インチの広い撮影面に対応した。赤外照明は放射強度 210mW/sr、照射半値角 $\pm 75^\circ$ の LED を片側に各 3 個使用した。

また、カメラと照明の設置位置については、本提案システムの適用対象の一例として短焦点型プロジェクタを想定し、一般に実用されている短焦点型プロジェクタの筐体サイズおよび設置位置に収めることを基準にした。提案システムと操作対象面の位置関係を図 4.6 の下部に示す。操作対象面の大きさは 80 インチである。操作対象面が全て撮影可能となるようにカメラと照明の位置および向きを設計し、提案システムの位置は、操作対象面の端からおよそ水平方向に 25cm、垂直方向に 53cm 程度離れた位置とした。また、カメラと左右の照明の距離は、カメラの広角レンズに照明の直接光が入らないように設計し、それぞれ約 20cm とした。

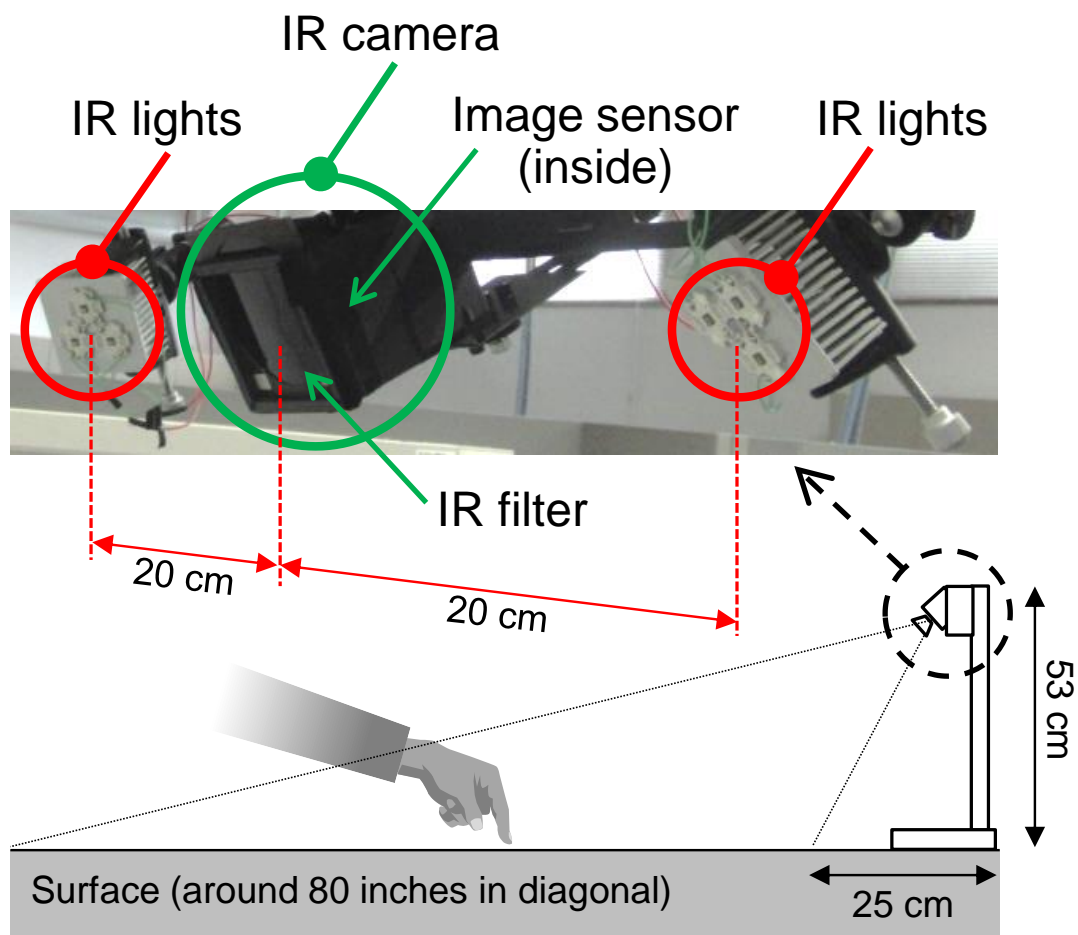


図 4.6 システム構成

4.2.4 事前検証による課題抽出

提案システムを用いて事前検証を行った。事前検証は操作対象面の様々な位置でタッチする動作を行い、その際にカメラ映像で視認できる影の濃さや形状を観察した。この結果、以下の2つの課題が明らかになった。

課題1：操作対象面の全面での影領域の抽出

操作対象面内の位置によって赤外照明の明るさが異なるため、全面で漏れなく影の領域を抽出できるようにすることが課題となる。特に、面の端で照明から遠くなる所は暗くなるため、カメラ映像で視認できないほど影が薄くなってしまう。面の端を明るくするために赤外照明の照度を上げること考えられるが、あまり照度を高くすると照明から近い所でカメラ映像が飽和して一部画素の輝度が最大となる、いわゆる白とびが発生するため、影の輪郭が不鮮明となる。従って、カメラ映像が飽和しない照明の照度において、面の端の薄い影を抽出できるようにする必要がある。

課題2：面内の位置によって異なる影の変化への対応

操作対象面内の位置によって影の形状や左右の影の距離の変化が異なるため、この違いに対応して精度良く接触を判定することが課題となる。特に、面の端でカメラから遠くなる所では、カメラ映像の中で指が小さくなり、指の左右の影の距離の変化も小さくなるため、タッチを検出しにくくなる。また、面の中央と端では左右の影の距離や影の太さなどの変化の仕方が異なるため、面内の全ての位置で一様の影の変化によってタッチ検出することはできない。

上記の2つの課題を解決するために開発した技術を次に述べる。

4.3 影領域の抽出技術

影領域の抽出は、主に画像中の物体検出を行う場合などに前処理として影を除去するために多くなされている[37]。Horprasert[38]らは、色変動のモデルに基づく背景差分により影領域を抽出する手法を提案している。また、森田[39]らは、複数照明環境下における照明の明るさ変化を考慮した背景モデルに基づいて、影除去を行う手法を提案している。しかしながら、これらの研究では色情報に基づいて影領域を抽出する手法を用いており、本研究では赤外照明と赤外カメラを用いた輝度のみの画像を扱うため、色情報に基づく手法が有効に利用できないと考える。そこで本研究では、赤外画像の輝度に基づく背景差分と、背景差分で得られた画像に対して以下に述べる補正を行うことで、影領域を抽出することとした。

操作対象面内の赤外照明の明るさの違いに対応し、全面で漏れなく影を抽出するた

めに以下(1)(2)(3)の3つの技術を開発した。影領域の抽出は、以下(1)(2)(3)の処理をフローとして順に行う。

(1) 背景差分による影領域の抽出

影領域は、操作対象面のみを予め撮影した背景画像と、操作対象面にかざされた手・指などを含む現在の画像を比較し、背景画像から輝度が低下している画素の背景差分を取ることで抽出する。

影領域の抽出に際しては、赤外カメラのイメージセンサの性能や赤外ライトのちらつきによって、画像の輝度にノイズが発生することを考慮する必要がある。図4.7に一定の撮影環境において各画素の輝度の変化を計測した結果を示す。

図4.7(a)は輝度を計測したポイント、図4.7(b)は各ポイントの輝度を256段階で表した際に、連続して撮影した100フレームでの輝度の変化を示している。例えば、画面中央下部の#377の位置では輝度は概ね140～160の間で推移しており、ノイズによる輝度の振幅は約±10であることが分かる。

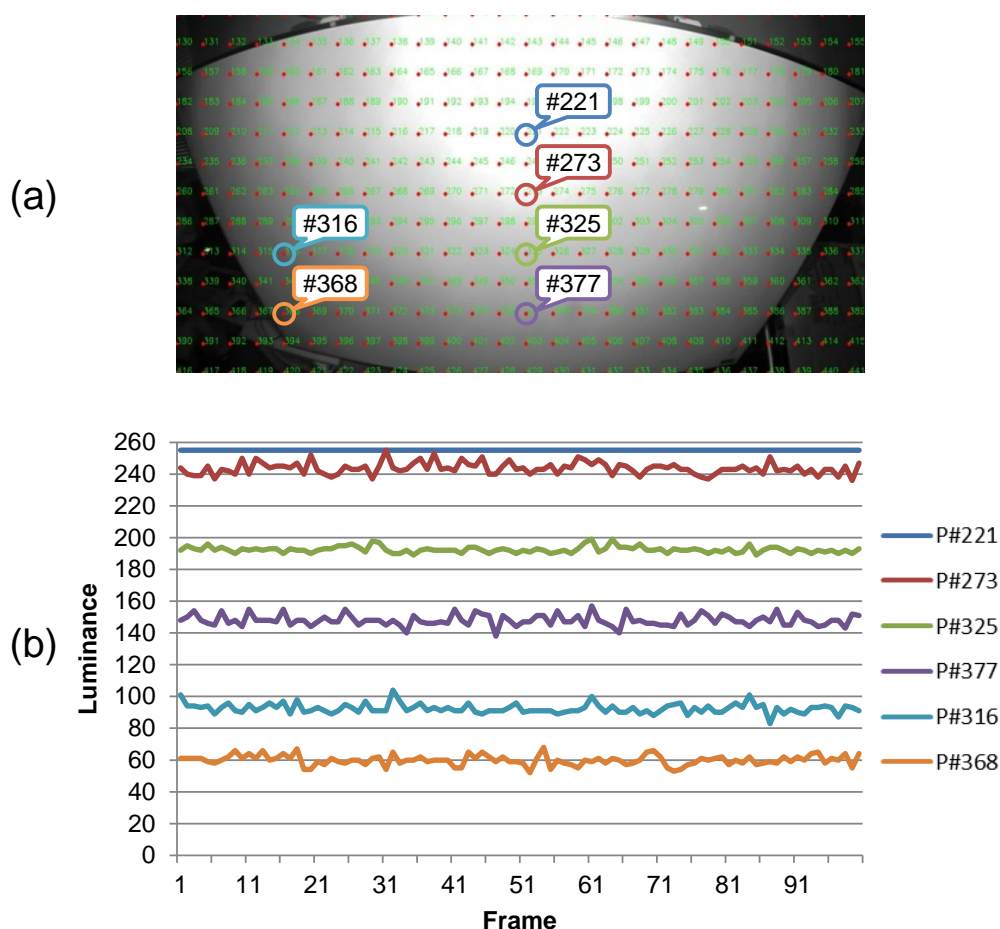


図 4.7 輝度の測定

この測定結果から、背景差分に用いる背景画像には、予め撮影した複数枚の画像を利用することにした。画像内のどのポイントでも 30 フレーム以内には輝度の振幅の上限・下限に近い値があるため、一定の撮影環境において連続した 30 フレームの画像を記録し、平均輝度画像 I_{mean} 、および標準偏差画像 I_{sd} を求めた。

(2) 画素ごとの閾値適用

先に述べた背景画像を用いて撮影した画像から影領域を抽出した。画像のある座標 (x, y) の輝度 $I(x, y)$ が、 $I_{mean}(x, y)$ の輝度よりも低下している場合、その画素を影領域として抽出する。また、輝度の低下の判定には閾値を設けた。これは、撮影時のノイズによる輝度の低下を考慮したためである。この閾値は、 I_{sd} においてノイズレベルが大きい画素の輝度の振幅から定め、画像全体で一括してひとつの閾値を用いた。従って、この閾値の幅を超えて平均輝度画像 I_{mean} から輝度が低下した画素が影領域となる。

図 4.8 (a) に影領域の抽出結果を示す。図 4.8 (a) は面に人差し指が接触した状態であり、緑色の線で囲まれた範囲が影領域として取得できた。図 4.8 (a) では、指の左側では影領域を正しく取得できているが、指の右側では実際の影の領域の一部しか取得できておらず、領域がまばらに途切れている。これはノイズレベルが大きい画素に合わせて閾値を設定した結果、画面の端などの暗い場所で、輝度の低下幅が小さい影領域を取得できていないためである。

そこで、標準偏差画像 I_{sd} を用いて画素ごと閾値を定めることにした。提案システムではノイズがガウス分布に従っていると仮定し、95%信頼区間に収まるノイズ値以上に輝度が低下した画素が影であるとして、下記条件式に基づいて判定した。

$$I_s(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } I(x, y) < I_{mean}(x, y) - 2 * I_{sd}(x, y) \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

ただし、 I_s は影領域の画素のみ 1 の値をとり、それ以外は値が 0 となる画像とする。以下、 I_s を影画像と呼ぶ。

上記条件式により画素ごとに閾値を適用したことにより、図 4.8 (b) に示す影領域が取得できた。同図では、指の右側の影領域の改善が確認できる。

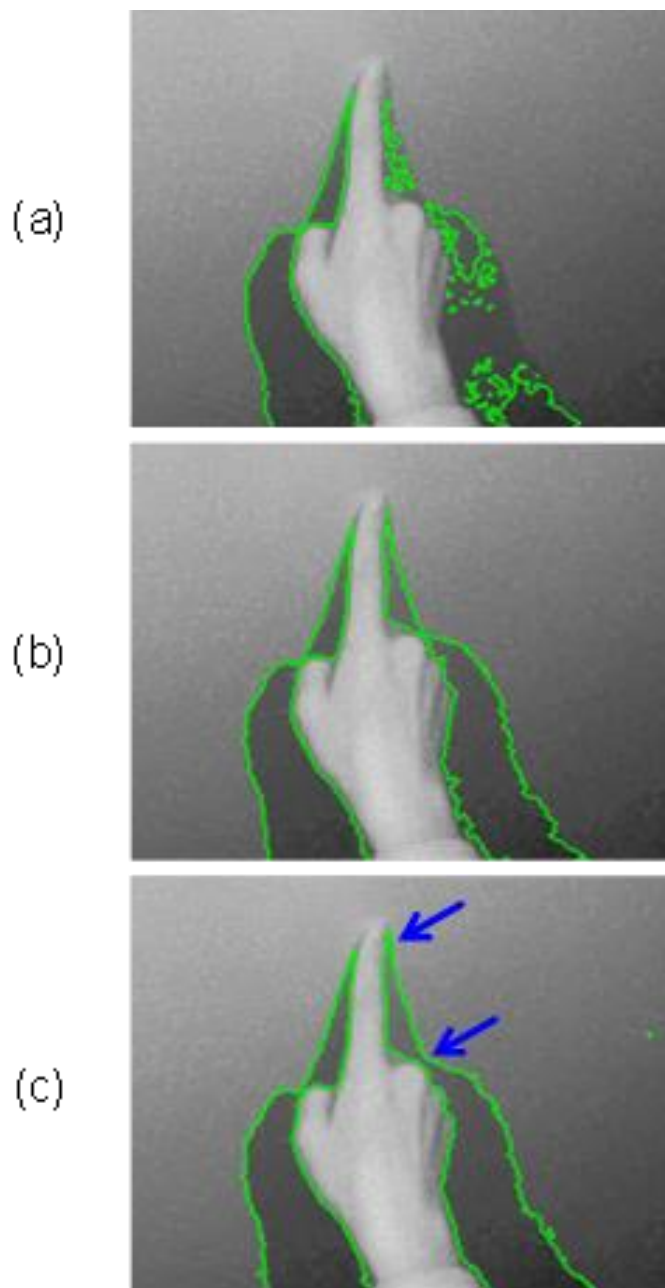


図 4.8 影領域の抽出

(3) 既得影領域の周辺の補正

画素ごとの閾値適用のみでは、指の先端付近などで影領域が取得できない部分が残る．図 4.8 (b)では指の右側で先端付近の影領域が途切れていることがわかる．この原因は、輝度の低下幅が小さいことに加え、面に接している指先付近では、赤外照明の光が指に反射して面を照らし返すことで、影がより薄くなっていることが考えられる．

そこで、図 4.8 (b)で既に取得できている影領域の周辺には影が繋がる画素が残されている可能性が高いと考え、既得の影領域の周辺では輝度低下を判定する閾値をさらに小さく設定して、影を再探索する仕組みを取り入れた。その結果、図 4.8 (c) に示す影領域が取得できた。同図では、特に矢印で示した指の先端付近などで、影として正しく取得できる領域が拡大したことが確認できる。

4.4 影の変化の検出技術

次に、抽出した影領域の変化から、タッチを検出する技術について述べる。影の変化を用いてタッチを検出する方式として、Wilson[29]らは、ひとつの赤外カメラとひとつの赤外照明を用いて指の側面に出る影の幅を検出することで、指先の接触を認識する手法を提案している。しかしながら、指先の影の幅は様々な理由によって大きく変化する。例えば、カメラと指との位置関係や、指がどのような姿勢で面に接触しているかによって影の幅は変化する。従って、指の影の幅などの限られた特徴だけを使って高精度にタッチを検出することは難しいと考えられる。図 4.9 に、操作対象面上でカメラから離れた位置において、指先が面から 10mm 離れるように浮かせたときと、指先をタッチしたときの影の領域を示す。この2つを比較すると影の変化が小さいことが分かり、特に画面から離れた位置では単一の特徴からはタッチを判定することは難しい。操作対象面内の位置によって影の形状や左右の影の距離の変化が異なるため、この違いに対応して精度良くタッチを判定しなければならない。そこで、提案システムでは複数の影の変化の特徴を組み合わせて指のタッチ判定を行い、精度向上を図った。タッチの判定に用いた影の変化を検出する方式は3種類ある。以下、これらを順に説明する。

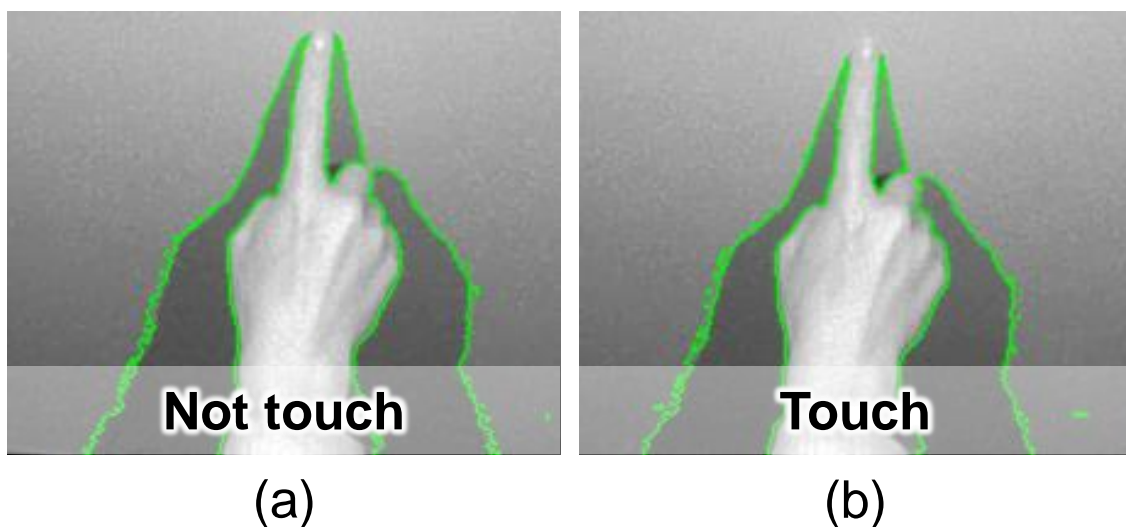


図 4.9 面の下端における影の変化

(1) 2つの影の先端同士の距離（方式 A）

4.2 節で述べたように、指を面にかざすと指の左右それぞれに影ができ、左右の影同士の距離は、指が面に近いときほど近くなる。従って、各影領域の先端部分を検出し、その先端同士の距離が所定値よりも近ければ、影の先端同士の中間位置で面に指先が近づいていると判定することができる。これを方式 A とした。

しかしながら、先に述べたように方式 A は、特に面上でカメラから離れた位置で指先と面の距離が近い場合には、2つの影の先端同士の距離の変化が小さくなる。従って、方式 A は主に、面内に複数の影領域がある場合に、ある程度の距離まで指先と面が近づいた箇所を選別するために有用となる。

(2) 影の先端の尖り具合（方式 B）

影の先端の角度を計測し、その角度がある一定値よりも尖っていればタッチ、そうでなければタッチしていないと判定することとし、これを方式 B とした。

図 4.9 に着目すると、図 4.9 (a)で指先が 10mm 浮いているときは、爪の先端にまわり込むように影ができているため、影の先端がやや丸みを帯びた形状になる。一方、図 4.9 (b)で指先がタッチしているときは、左右の影の先端の形状は鋭角に尖っている。このように指先が面に近づいた状態では、影の先端の尖り具合から、指先と面の近づきのより小さい変化を検出することができる。

(3) 影の先端の位置関係（方式 C）

面の端では、2つの赤外照明の光が同じ方向から指に照射されるため、影の変化は上記方式 A や B で述べたものとは必ずしも同じではない。図 4.10 は、2つの赤外照明より右側の位置で指先が面に近づいているときの様子を示している。図 4.10 (a)では指先が面から 10mm 浮いており、図 4.10 (b) では同位置で指先がタッチしている。指先がタッチしているときは、左右の影の先端位置の高さに差異がある。一方で指先が 10mm 浮いたときはその差異はほとんどない。

この現象は、指をタッチしたときに赤外照射の光が指に反射して面を照らし返すことに起因する。2つの赤外照明は2つとも指の左上の方向から光を照射しているため、指に反射する光の量も多くなる。図 4.10 (c) は、輝度が背景画像のノイズの振幅を超えて上昇した領域を黄色に色づけして示しており、指の左側に輝度が上昇した領域が集中していることがわかる。この領域では薄い影が輝度の上昇に打ち消されてしまい、ほぼ視認できない状態となる。その結果、指の左側では影の先端位置が下がり、右側の影の先端位置との差異が生じる。

そこで、面の端で、指に対して2つの赤外照明の光が同じ方向から照射される位置では、左右の影の先端位置の差異が所定値よりも大きければタッチ、そうでなけ

ればタッチしていないと判定することとし、これを方式 C とした。

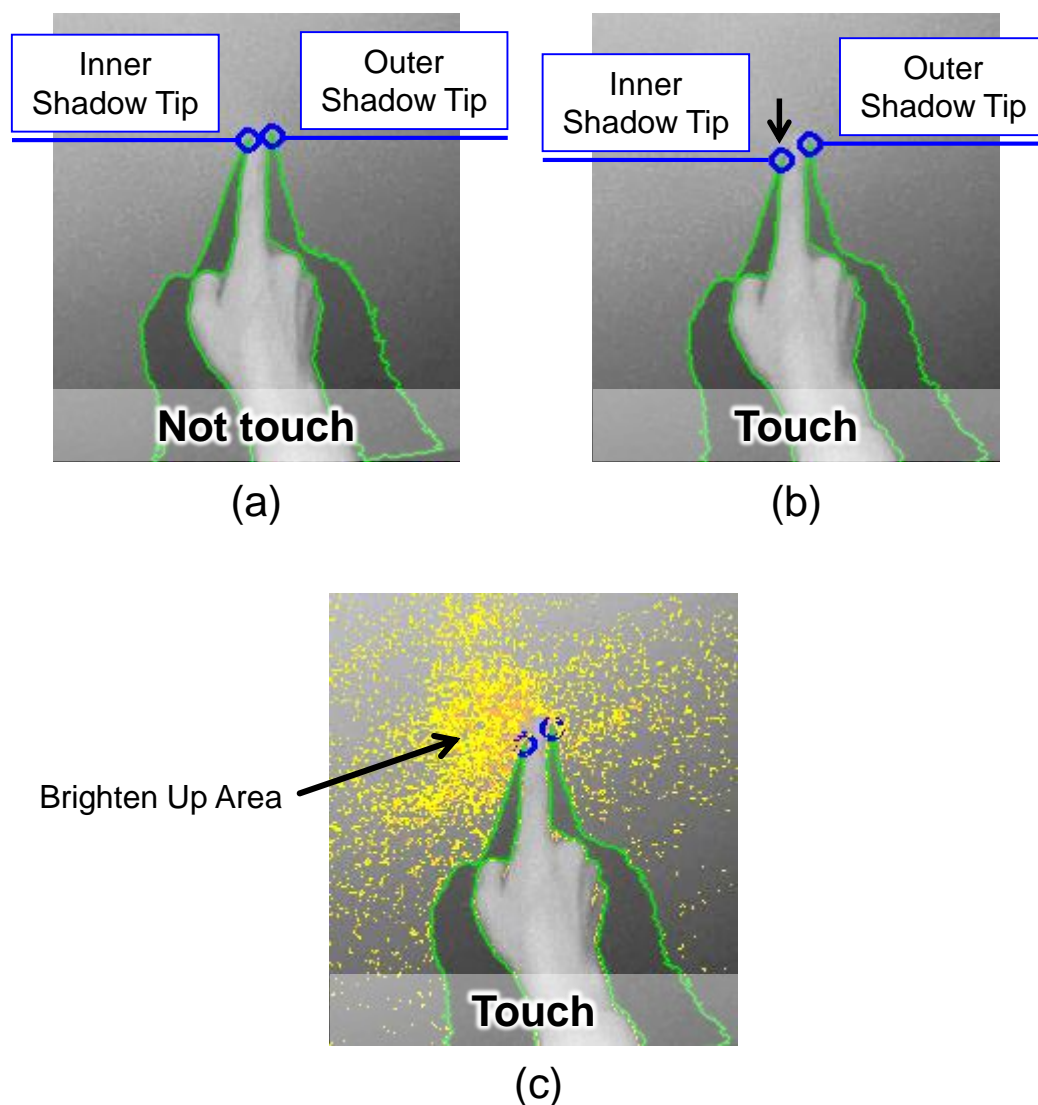


図 4.10 面の右端における影の変化

以上の方式 A, B, C を組み合わせてタッチの判定を行うこととした．次に，各方式の適用効果を確認するための事前評価を行った．

4.5 影の変化の検出の事前評価

影の変化を検出する各方式の適用効果を確認するために，方式 A のみを適用した場合と，方式 B, C をそれぞれ追加適用した場合について事前評価を行った．事前評価では，4.2.3 で述べた提案システムを使用し，評価点として図 4.11 に示すように 80 インチの操作対象面上に等間隔に並んだ 25 点を設定した．また，この事前評価では，

操作対象面内の位置の違いによるタッチ判定への影響を確認するため、各方式におけるタッチ判定の閾値は、全ての評価点で同一の値を用いた。各評価点において、指先が面にタッチ状態と、指先が面から 10mm 浮いた状態の認識結果を確認し、この結果を以下の 3 段階で評価した。

- ・ Good : タッチした状態と 10mm 浮いた状態の両方が検出できる。
- ・ Fair : タッチした状態が検出でき、10mm 浮いた状態が検出できない。
- ・ Poor : タッチした状態が検出できない。

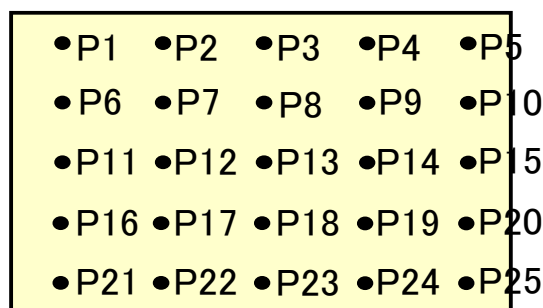


図 4.11 影の変化の検出の事前評価を行った面上の位置

表 4.1 に事前評価の結果を示す。同表中の 5×5 の各セルは、評価点 P1～P25 の位置と対応する。また、同表中では、Good を 1, Fair を 2, Poor を 3 で示す。

まず、方式 A のみを適用した場合、最下段にある P21 と P23 の 2 点が Good, P25 が Poor, それ以外の 23 点は Fair という結果であった。全 25 点に対する Good の割合は 8%となる。次に、方式 B を加えて適用すると、主に面の中央から上側となる 2 段目と 3 段目 (P6～P15) で検出結果の改善が見られ、Good の割合は 32%となった。さらに方式 C を加えて適用すると、主に面の上部の 1 段目 (P1～P5) で検出結果の改善が見られ、Good の割合は 44%となった。この事前評価の結果から、方式 A, B, C を組み合わせることで、タッチ判定の精度が向上することが確認できた。

一方、主に面の下側の 4 段目と 5 段目では、各方式を適用することによるタッチ判定結果の変化はなかった。面の下側はカメラからの距離が遠く、面や指が撮像されるサイズが小さくなり、面上側で撮像されるサイズとは大きく異なる。本事前評価では、全ての評価点でタッチ判定の閾値を同じにして行ったため、面の下側や左右の端など、面の位置に応じてタッチ判定の閾値を設定することにより、面内の全ての位置において、上記の各方式を組み合わせることによる精度向上の効果が得られると考える。

表 4.1 影の変化の検出の事前評価の結果

Applied Method	A					A + B					A + B + C				
Results at P1-P25	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	1	2	1	1
	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1
	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	1	2	3
Percentage of "Good"	8%					32%					44%				
1: Good, 2: Fair, 3: Poor															
Each cell within 5 by 5 grids corresponds to P1-P25.															

4.6 タッチ検出のアルゴリズム

以上で述べた方式 A, B, C を組み合わせてタッチの判定を行うアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムでは、面上の位置に応じて、各方式に用いる閾値等のパラメータと、各方式の判定結果を適用する優先度や変更している。以上に述べた処理を含む、提案システム全体のタッチ検出のアルゴリズムを図 4.12 に示す。

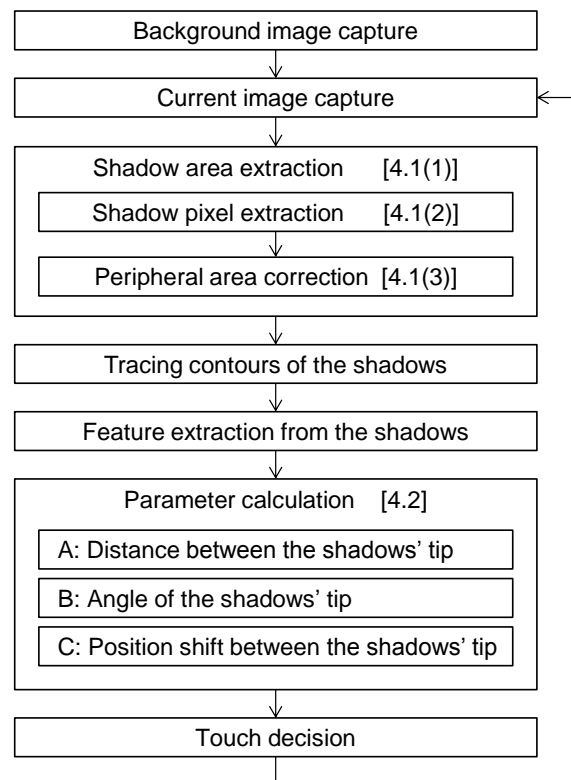


図 4.12 タッチ検出のアルゴリズム

4.7 タッチ操作の検証

提案システムで検出したタッチを，プロジェクタで映像投射した PC アプリケーションに反映して実際のタッチ操作を検証した．図 4.13 に斜面状の突起物がある面においてタッチ操作を検証した様子を示す．同図では，タッチ操作で色が変わるボタンを複数配置したアプリケーションを用いている．突起物の上や周囲でタッチ操作を確認し，全てのボタンにおいてタッチ操作できることを確認した．また，図 4.14 にプロジェクタで映像投射した描画アプリケーションを操作している様子を示す．タッチ操作により面上に文字を描画することが可能であり，斜面状の突起物や半球状の突起物の上などの平面ではない部分でも操作できることが確認できた．しかしながら，面上にある突起物周囲の一部において，赤外カメラの撮影画像内で突起物によって指先が隠れてしまう場所や，突起物による影ができていない場所については，タッチ操作を検出することができなかった．このタッチ操作が検出できない場所は，図 4.14 においてプロジェクタが投射した光で影ができていない部分に概ね該当する．

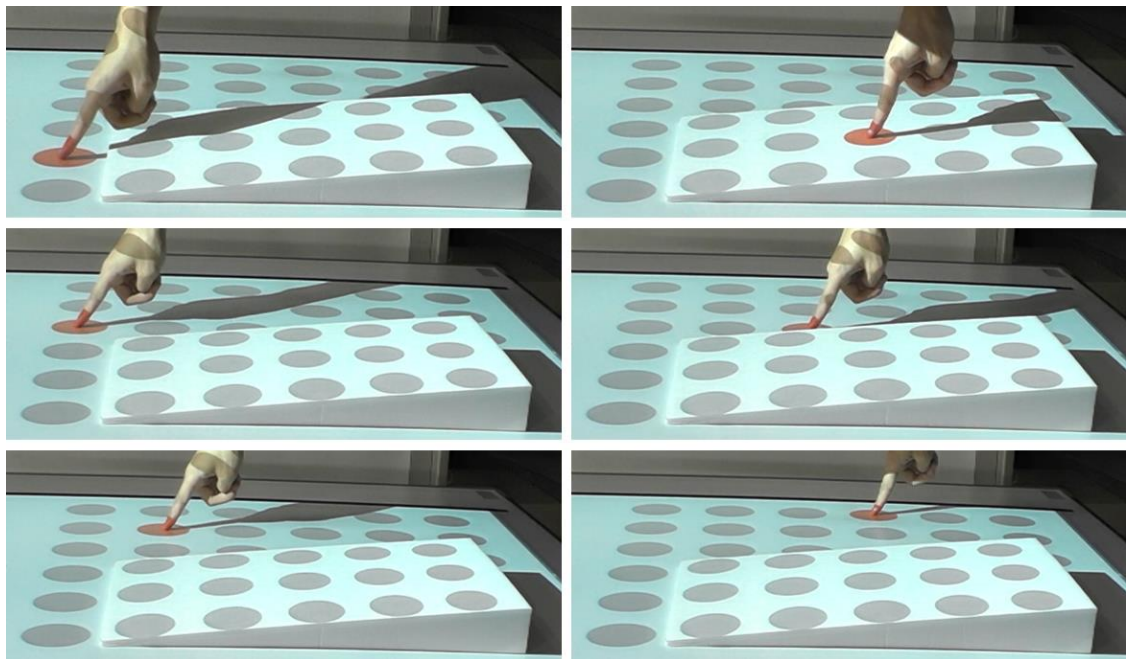


図 4.13 突起物がある面でのタッチ操作の検証



図 4.14 タッチ操作による文字の描画

4.8 タッチ検出精度の評価

提案システムのタッチの検出精度を評価した。以下、詳細について述べる。

4.8.1 評価方法

本評価では、操作対象面の複数の位置において、指先をタッチしている場合と 5mm 程度指を浮かせている場合の 2 種類の画像を取得し、それぞれにおいてどの程度正しくタッチを検出できるかを評価した。評価用画像は以下のように取得した。

- ・ 接触位置：169 通り（図 4.15 (a)）
- ・ 指の姿勢：3 通り（図 4.15 (b)，静止状態で 3 通り）
- ・ 接触状態：2 通り（タッチ，非タッチ：5mm）

評価を行う接触位置は、図 4.15 (a)に示すように、80 インチサイズの端から端までの間に、縦方向と横方向それぞれ 13 ヶ所を等間隔に設定し、操作対象面の全面に渡って設けた。接触位置の間隔は、縦方向が約 8cm，横方向は約 15cm であり、特に縦方向についてはカメラ映像に写る面のサイズが上下で異なるため、接触位置の密度を高くした。取得した評価用画像はタッチ時 507 枚（169 箇所×3 姿勢），非タッチ 507 枚（169 箇所×3 姿勢）である。なお、実験環境の照明の照度は 500～600lx であり、これは一般的なオフィス環境や学校の教室と同じ程度である。

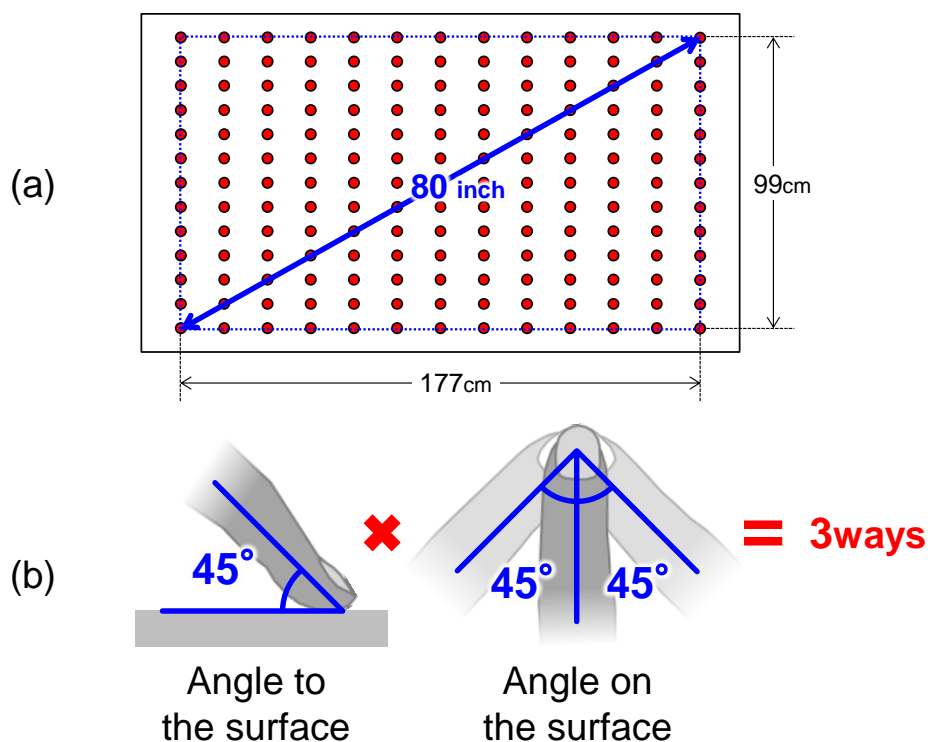


図 4.15 タッチ検出精度の評価方法

4.8.2 結果

表 4.2 にタッチ検出精度の評価結果を示す．タッチ状態の画像をタッチとして検出する真陽性は 95.9%，また，非タッチ状態の画像を非タッチとして判定する真陰性は 95.5%であり，全体での検出精度は 96.1%となった．また，偽陽性は 4.53%，偽陰性は 3.35%であり，陽性反応的中率は 95.5%，陰性反応的中率は 96.6%であった．なお，タッチ状態の画像を非タッチとして検出する偽陽性は，指の姿勢が傾いている場合に多くあった．

評価結果より，80 インチの操作対象面において，タッチした状態と 5mm 浮かせた状態との識別精度は 96.1%，偽陽性は 4.54%，偽陰性は 3.35%となったことを確認した．以上の結果から，80 インチの操作対象面の全面において 5mm 以内に近づいた指をタッチしていると検出し，タッチの検出精度を 90%以上にするという目標を達成した．

表 4.2 タッチ検出精度の評価結果

		True Condition		
		Condition positive	Condition Negative	
Predicted condition	Test outcome positive	True positive 490	False negative 23	Positive predictive value 95.5%
	Test outcome negative	False positive 17	True negative 484	Negative predictive value 96.6%
		Sensitivity 95.9%	Specificity 95.5%	

4.8.3 考察

評価において特に偽陽性が発生した画像では、指の姿勢が傾いているものが多かった。指の姿勢が傾いている場合には、左右の影の先端同士的位置が左右方向に大きくずれるため、特に先に述べた方式 A において、影の先端同士の距離が所定値まで近づかなかったことが影響していると考えられる。

また、偽陽性は操作対象面内でカメラから遠い位置で誤検出が多く発生していた。図 4.16 は評価において偽陽性が発生した位置を青丸で示している。カメラから遠い位置では影が小さく写るため、指が 5mm 浮いている状態と接触している状態で影の変化も小さく、誤検出が発生しやすくなっているためと考えられる。カメラから遠い位置は画面の端であるため、レンズの歪みが影の変化の認識に影響したことも考える。また、特に面の右側で誤検出が多く発生している。これは照明の当たり方が左右均一ではなかったことが影響していると考えられる。



図 4.16 偽陽性の誤検出の発生位置

次に，図 4.17 に評価において偽陰性が発生した位置を赤丸で示す．偽陽性と比較して，偽陰性は投写面の中央上方での発生が多いことがわかる．操作対象面中央上方はカメラからの距離が近いため，面全体とくらべると指の姿勢の変化による影の変化が大きく，そのような相対的に特殊な影の変化が非接面として認識されやすくなってしまった可能性があると考えられる．

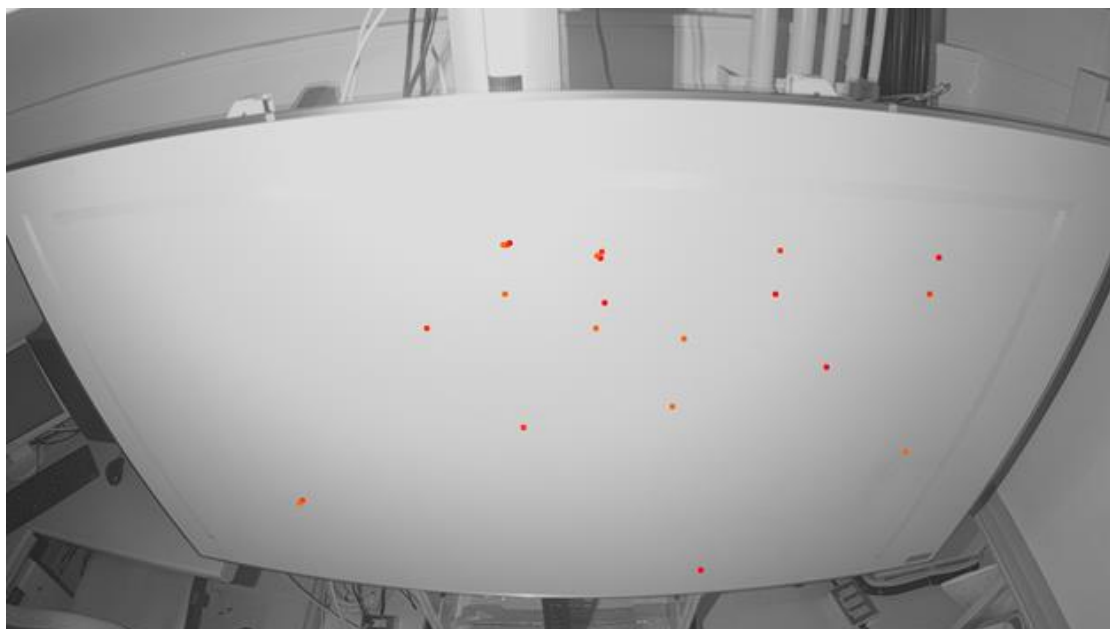


図 4.17 偽陰性の誤検出の発生位置

以上の誤検出の要因と考えられる観点は、事前検証で抽出した課題と共通するものがあるが、評価結果は先に述べた開発技術によって誤検出の発生が低減された結果であると考ええる。従って、開発技術の適用に際して、各種判定の閾値を操作対象面の位置や指の傾きに応じて調整することで誤検出のさらなる低減ができると考えている。

4.9 タッチ位置の補正

これまでに述べたタッチ操作の検証および評価の過程で、新たな課題が明らかになった。この課題は、面上での位置や手の姿勢によって、検出されるタッチ位置が大きくずれることである。

ユーザがタッチ操作を行う場合、面に対してどのような姿勢で指をタッチさせるかは、状況によって異なる。特に、面上のどの位置にタッチしているか、および面と指とがどのような角度でタッチしているかによって、カメラで撮像した画像中の影の形状が大きく変化する。これまでは、左右の影の先端の中点に対して、カメラ画像中の位置に応じて予め設定した補正值を加えることでタッチ位置としていたが、面上の位置や手の姿勢によっては実際のタッチ位置とずれてしまうことがわかった。従って、面上の位置や手の姿勢の影響に対応しながら、精度良くタッチ位置を検出することが課題となる。そこで、タッチ位置を補正する検討を行った。

4.9.1 タッチ位置精度の目標値

タッチ位置の補正を行うにあたり、精度の目標値として、80 インチサイズの操作対象面において $\pm 5\text{mm}$ 以内の位置精度でタッチ位置を検出することを設定した。この理由を以下に述べる。

まず、先に述べたように、モバイルデバイス向け OS を提供会社が公開するデザインガイドラインにおいて、最小タッチ領域サイズは 7mm 四方であり、タッチ位置精度はこのサイズに収まることが望ましい。ただし、モバイルデバイスの小さな画面での指の動きに比べ、大画面に対する指の動きは大きくなる。従って、インタフェースデザインの観点から考えると、上記ガイドラインは大画面でのインタラクションにおける接面位置の精度を直接的に示唆するものではない。

Wang らの研究[40]によれば、FTIR (Frustrated Total Internal Reflection) 方式を用いたタッチパネルにおいて目標位置に対してタッチ動作を行った場合、平均 2.34mm 、分散 1.23mm の誤差が発生することが報告されている。加えて、タッチ動作の位置精度に対して 95%の信頼区間は $0.3\sim 4.38\text{mm}$ であると報告されている。これは、ある目標物にタッチする際の、人間の身体制御の精度の限界と考えることができる。

これらを踏まえ、人間が実際に触れた位置とシステムに認識されるタッチ位置の誤差が上記の値とほぼ同等であれば、人間が操作した際の違和感は少ないと考えた。そこでタッチ位置精度の目標を、80インチサイズの操作対象面において位置精度 $\pm 5\text{mm}$ とした。

4.9.2 回帰分析を用いたタッチ位置補正の検討

これまでに述べたタッチ検出では、左右の影の先端位置の midpoint に対し、カメラ画像中の位置に応じて予め設定した補正値を加えて指先に相当する位置を算出し、これをタッチ位置としていた。しかし、実験を繰り返す中で、面内のどの位置にタッチしているか、または、面に対して指がどのような角度で接しているかによって、カメラ画像中の影の形状が大きく変化する。この変化がタッチ位置のずれに影響することがわかった。特に、面の横方向（x 方向）へのずれは大きくなりやすい。図 4.18 に、面に対して指が傾いていた場合にタッチ位置がずれる様子を示す。同図の左のように指が面に対してまっすぐ向いている場合は、推定されたタッチ位置（緑丸で示す）が実際の指先位置と近い位置にある。一方で、同図の右のように指が傾いている場合には、推定されたタッチ位置が実際の指先位置よりも大きく左にずれていることがわかる。

そこで、影の形状などから指の姿勢を表す特徴量を新たに計算し、重回帰分析を用いることでタッチ位置を補正することを検討した。以下、この詳細を説明する。

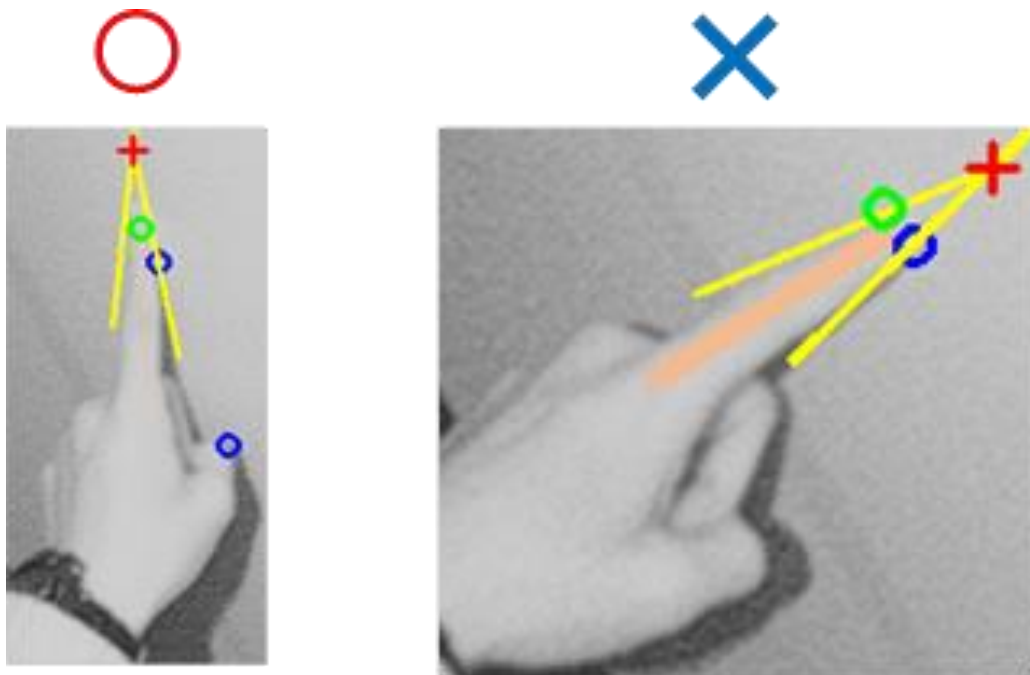


図 4.18 指の傾きによるタッチ位置のずれの違い

4.9.3 指の姿勢を表す特徴量の計算

タッチ位置を計算する際、これまでは影の先端位置のみを用いていた。しかしながら、操作対象面上の位置や手の姿勢に応じてタッチ位置を補正するには、指と影に関してより多くの特徴量を計算し、その特徴量に基づいて補正量を計算する必要がある。そこで、図 4.19 に示すように全部で 12 種類の特徴量を計算し、これらをタッチ位置の補正量の計算に用いた。

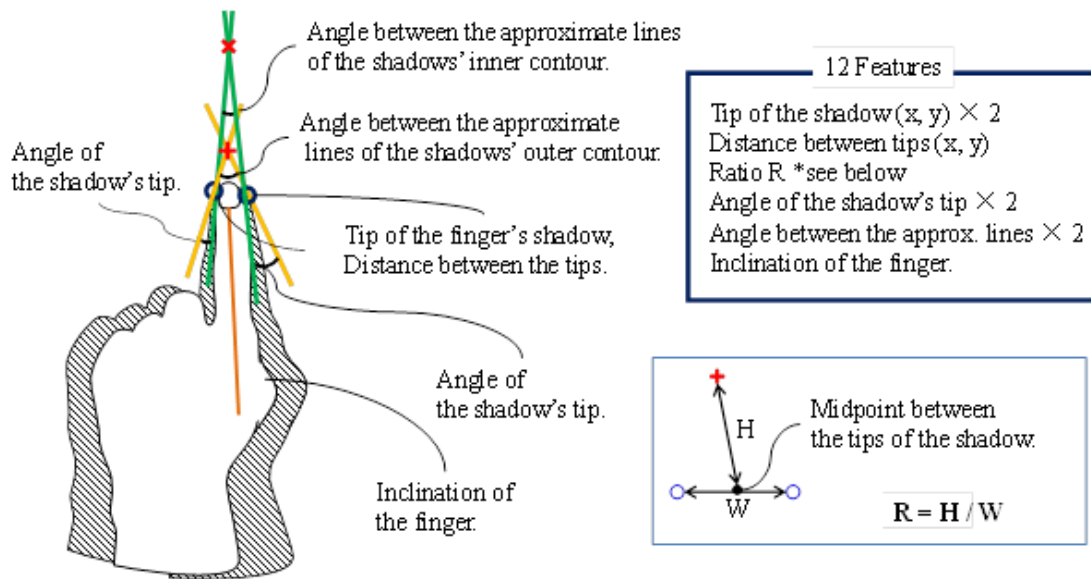


図 4.19 タッチ位置の補正に用いる特徴量

4.9.4 重回帰分析を用いたタッチ位置補正量の計算

先に述べた特徴量を用いて、タッチ位置の補正量を計算する必要がある。そこで、重回帰分析を用いて補正量を求めることにした。なお、重回帰分析とは、多変数による回帰分析のことであり、 x 方向のタッチ位置の補正量を dx 、指の特徴量を $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}^T$ とすると、以下のように表現できる重みベクトル $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}^T$ を求める手法である。

$$dx = \omega^T \theta = \omega_1 \theta_1 + \omega_2 \theta_2 + \dots + \omega_n \theta_n$$

ただし、実際には予め用意した全ての特徴量が補正量の計算に必要であるとは限らないため、AIC（赤池情報量規準）を用いた段階的アルゴリズムで、補正量に寄与する特徴量の特定と重みベクトルの計算を並行して行った。

重回帰分析に用いるデータを収集するため、図 4.20(a)に示すような画像を操作対象面に対してプロジェクタで投写し、赤い丸の表示された 9 箇所の上で指をタッチさ

せた．タッチさせるときの指の姿勢は，図 4.20(b)に示すように 5 通りとした．各姿勢に対して実際のタッチ位置を目視で確認し，正しいタッチ位置と影の特徴量をセットにして記録した．

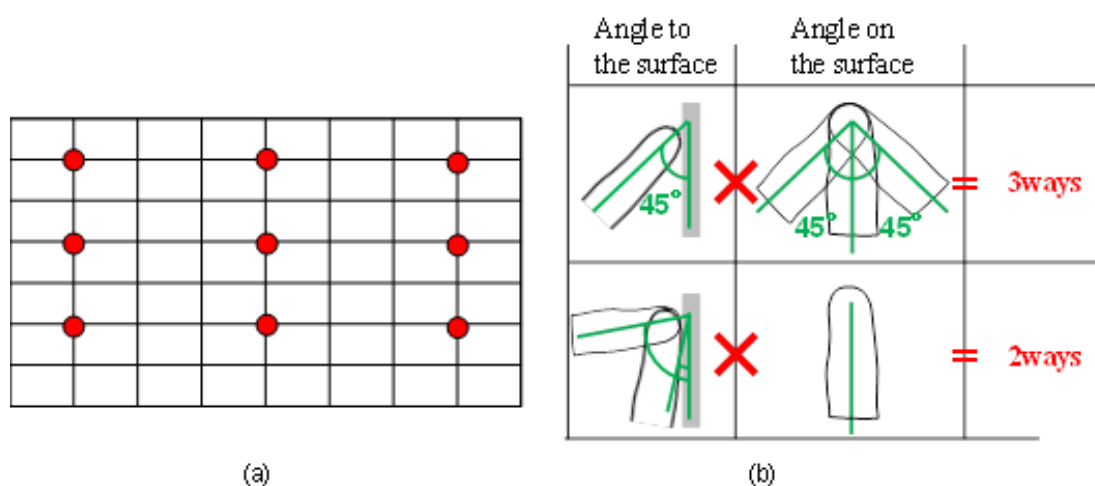


図 4.20 重回帰分析に用いるデータ収集方法

以上の方法でデータを集め，重回帰分析を行った結果，下記のような回帰式を得た．

$$dx = -4.30179 + 0.03237 \times \theta_1 - 0.03099 \times \theta_2 - 0.48902 \times \theta_3 - 12.1437 \times \theta_4 + 4.51663 \times \theta_5$$

ただし， $\theta_1 \sim \theta_5$ はそれぞれ，指の左側の影の先端の x 座標，指の右側の影の先端の x 座標，比 R，指の傾き，指の右側の影の先端の角度である．

4.10 タッチ位置精度の評価

指の姿勢を変化させた場合のタッチ位置の分散を評価した．重回帰分析を用いたタッチ位置の補正により，分散が低減されることが期待される．

4.10.1 評価方法

一般に，誤差にはバイアス（平均誤差）とばらつき（分散）という 2 つの指標が存在するが，今回の重回帰分析を用いたタッチ位置補正の導入の意図は，指の姿勢の変化に伴うタッチ位置のばらつきを抑えることであるため，本評価では算出されたタッチ位置のばらつきを評価した．具体的には，操作対象面上のある位置をタッチしたまま，指の姿勢を変化させた場合に，算出されたタッチ位置がどの程度変化するかを評価する．

評価用のデータ取得は、重回帰分析用データ取得時と同様に図 4.20(a)の画像をプロジェクタで投写し、赤い丸の表示された 9 箇所の上で指をタッチさせて行った。各位置において、面と指の角度 0 度、45 度の 2 つ姿勢を基準として、この状態から、指を様々な角度に回転させ、その時に算出されたタッチ位置を評価用データとして取得した。

なお、評価に用いた赤外線カメラおよび赤外線ライトは先に述べたものと同じであり、評価用の投写映像のサイズが 80 インチとなるようにプロジェクタを配置した。

4.10.2 結果

図 4.21 に評価結果を示す。図 4.21 中の各数字は、指の姿勢を変化させたときに算出されたタッチ位置の分散（単位：ピクセル）を示している。

重回帰分析を用いたタッチ位置の補正前では、指の姿勢を変えることによるタッチ位置の分散が、最低 3.21 ピクセル、最大 10 ピクセルであった。一方で、補正後の分散は最小で 0.93、最大で 2.51 ピクセルとなり、分散を大きく低減することができた。面全体での平均で分散を比較すると、補正前が 4.65 ピクセル、補正後が 1.47 ピクセルであることから、面全体平均で約 68%分散を低減した。

なお、本研究で利用したカメラは Full-HD サイズの画像が撮像可能なため、撮像した画像全体に 80 インチサイズの操作対象面が写っている状況では約 0.9 mm/Pixel の精度を得ることができる。これにより、カメラ座標系でのタッチ位置の誤差が±5 ピクセル以内であれば、実世界での接触位置の誤差を±5mm 以内に収めることができる。

評価結果より、重回帰分析を用いたタッチ位置の補正を導入した効果により、80 インチサイズの操作対象面において、指の姿勢が変化した場合のタッチ位置の分散は平均で 1.47 ピクセルとなり、実世界での誤差±5mm を十分実現可能であることを確認した。以上の結果から、80 インチサイズの操作対象面において±5mm 以内の位置精度でタッチ位置を検出するという目標を達成した。

- ・ センサ類を面上に設置する必要がなく，カメラと2つの照明を一箇所に集約して並べるため，設置性に優れ，壁面や机上など様々な面に適用できる．
- ・ 物体や突起物がある面においても影の変化は観察できるため，平面に限らず利用できる．
- ・ カメラに広角レンズを使用しても影の変化は観察できるため，カメラと操作領域の距離を大きく離すことなく広い操作領域に対応できる．
- ・ 影の形状の変化に加え，左右の影の距離や形状の違いを認識に利用するため，高精度にタッチを検出できる．

さらに，実際にタッチ検出を行うシステムを開発した．この開発を通じて，以下の成果を得た．

- (i) タッチ検出に必要な精度を明らかにするための測定実験を行い，操作対象面から指が 5mm 以上離れたことが判別できれば，ほぼ全てのタッチ操作を検出できることを明らかにした．
- (ii) 影領域を抽出する手法として，画素ごとの閾値適用と既得影領域の周辺補正の技術を開発し，操作対象面の全面で影を漏れなく抽出することを実現した．
- (iii) 影の形状からタッチを検出する手法として，①2つの影の先端同士の距離，②影の先端の尖り具合，③影の先端の位置関係，の3つの影の変化を認識してタッチを判定するアルゴリズムを開発し，面上の位置によって異なる影の変化に対応できる高精度なタッチ検出を実現した．
- (iv) タッチ位置を補正する手法として，12種類の指と影の特徴量を計算して重回帰分析によりタッチ位置の補正量を決めることで，操作対象面の全面で位置ずれの少ないタッチ操作を実現した．

タッチ検出精度の評価により，80インチの操作対象面の全面において高精度にタッチを検出できることを確認し，提案手法の有効性を示した．

今後は，操作対象面上で誤検出が多く残る位置への対策を行い，タッチ検出精度の向上を図る．また，提案手法は面上にある突起物の周囲の一部ではタッチ検出ができない．この点は今後の課題として，操作対象となる映像の表示方法と合わせて解決を図るなどを検討する．

検証および評価については，指1本で操作するシングルタッチ操作について行ったが，提案手法は複数の指先に対して同様の検出を行うことでマルチタッチ操作にも適用可能と考えており，引き続きマルチタッチ操作に関する検証を進める．

また、提案システムは、赤外カメラや照明の設置位置と操作対象面のサイズが固定である。従って次のステップとして、これらを変更してもタッチ検出精度を維持できるように、操作対象面の位置やサイズを事前計測してタッチ検出を補正する仕組みを取り入れたい。さらには、操作対象面の位置やサイズがリアルタイムに変化する HMD などで利用可能とするために、操作対象面を動的に計測するなどして、システム適用の自由度の向上を図りたい。

第5章 結論

5.1 成果のまとめ

コンピュータは人間の知的，創造的，感性的な活動を拡張するための道具として進化を続けている．人間の活動を阻害することなくコンピュータのパワーを利用するために，ヒューマンインタフェースは重要な役割を担ってきた．近年では，人間がコンピュータを単に利用するというよりも，人間とコンピュータが高度に連携，融合するインタラクションによって，人間が活動範囲を広げる，もしくは，人間の経験価値が向上するという傾向が増している．インタラクションの拡張を通じて人間の活動範囲を広げるために，人間とコンピュータの界面となるヒューマンインタフェースがより重要度を増している．ヒューマンインタフェースを界面としたインタラクションのループが回ることにより，人間とコンピュータがひとつのシステムを構成して活動していると捉えることもでき，ヒューマンインタフェースは人間にとっての使いやすさを超えて，高度なシステムの質や価値を維持するために必要な要素である．

ヒューマンインタフェースの次世代のコンセプトにおいて，実世界指向で直感的な操作性を実現した快適なヒューマンインタフェースは，情報機器製品としてコンピュータの魅力を高める大きな要因となっている．このような実世界指向インタフェースは，人間は常に具体的な環境の中にいるが故に，人間の活動において最も基本的であり，広く一般に影響を及ぼす．本論文では，人とコンピュータのインタラクションの拡張のための，画像認識を用いた実世界指向ヒューマンインタフェースの研究について述べた．

実世界指向インタフェースにおいて，コンピュータから人間への出力は五感を用いたものとなり，このうち人間の情報判断の8割以上を占めるのは視覚である．一般に普及するデバイスにおいてもディスプレイを介して視覚を利用するインタフェースが中心となる．この視覚に対して，人間が自然に行う行為として，目で見えているままに手で動かすことが挙げられ，人間からコンピュータへの入力としてこの手を動かす行為を利用することは直感的な操作に結びつく．この観点から，実世界指向インタフェースにおいて，「見て，手を動かす」操作は人間が自然に利用でき，尚且つ，最も利用頻度が高い操作のひとつである．そこで，本研究では，表示デバイスの大きさや種類に関わらず，「見て，動かす」直感的な操作を可能にするヒューマンインタフェースを実現することを目的とした．

「見て、動かす」直感的な操作は、近年、スマートフォンやタブレットなどでの小型のディスプレイにおけるタッチ操作を中心に洗練されてきた。実世界指向ヒューマンインタフェースによるインタラクションを拡張するためには、このように画面の「大きさ」「距離」「種類」が限定されることなく直感的な操作を実現する必要がある。特に画面の大きさが大画面の場合、次の2つの「見えても、動かせない」問題が生じる。第一の問題は、大画面の視認性や情報の一覧性の良さが生かされる、大画面を見やすい距離に離れている状況では、手を伸ばしても画面に触れることができず、「見て、動かす」操作を行うことができない。第二の問題は、大画面に近づいて操作する際に、画面がプロジェクタやウェアラブルデバイスのように物理的なディスプレイが存在しない場合には、画面に触れて「見て、動かす」操作することができない。中小型のディスプレイのみに限定されている「見て、動かす」直感的な操作を、大画面を含む、画面の「大きさ」「距離」「種類」によらず可能とするためには、この2つの「見えても、動かせない」問題を解決することが不可欠と考える。そこで、それぞれの問題を解決する技術を開発し、さらに試作検証により主に実用性の観点からそれらの技術を評価した。本論文ではこれらの取り組みを、以下の2つの観点でまとめた。

- ・ 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース
- ・ 非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース

以下、それぞれの取り組みの成果を示す。

(1) 大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース

大画面は視認性や情報の一覧性に優れる。しかしながら、このような長所を保つことができる、大画面の最適視距離は、一般的に画面の高さの3倍程度であり、画面に手を触れて操作することができない。従って、画面の大きさと距離という観点で制約されることなく直感的な操作を実現するためには、大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースが大いに役立つ。

ヒューマンインタフェースは、人が目的とする活動が具体的であるほど、その構成や方式などが最適化され则认为。そこで、大画面の用途を具体的に定め、その用途を対象とした操作およびシステムを統合的に開発することで、大画面を最適視距離で操作するための基本技術確立の方針とした。この具体的な用途として、デジタルサイネージを選定した。デジタルサイネージは公共の場で様々な人が利用するため、情報機器に不慣れな人でも気軽に利用できることや、個々の利用者が短時間で必要な情報を得られ多くの人効率的に利用できることが重要となる。従って、操作が直感

的であり，なおかつ，効率的であることが強く求められる．また，デジタルサイネージに適した操作方法としてジェスチャ操作を適用した．ジェスチャ操作は手が届かずとも操作でき，物に触れる必要がないため公共用途であるデジタルサイネージでは衛生的に操作できる利点もある．さらに，操作する人の体格や姿勢への依存が少ないため，公共の場での様々な利用者に対応しやすい．そこで，従来研究を踏まえて，本研究開発で解決すべき課題を以下の3つと定義した．

- (i) 情報機器に不慣れな人でも直感的に操作できなければならない．
- (ii) 多くの人が効率的に利用できなければならない．
- (iii) 画面を見ることや操作することによる身体への負担を少なくしなければならない．

これらの課題の解決に向け，インタラクティブデジタルサイネージの具体的なコンテンツとしてフロアガイドを選定し試作検証を行った．試作検証を通して，各課題を解決するインタラクションの仕組みとして，以下の3つの成果を得た．

- (i) 直感的に操作できるグラフィック構造として，操作対象の情報を階層化するとともに，画面の奥行き方向を利用して階層を可視化する表現が有効である．
- (ii) 直感的かつ効率的に操作可能なジェスチャ操作として，手が近づく動きのジェスチャを認識してメニュー階層の選択操作に適用することが有効である．
- (iii) 大画面の操作は，画面を寝かせて見やすくするなど，身体への負担軽減の配慮が必要である．

さらに，上記の成果を適用したテーブル型のインタラクティブサイネージを開発した．一般被験者でのユーザビリティ評価により，端末を初めて使う方でも利用方法を説明することなく目的の操作を実行できることを確認し，公共用途に適した実用性を示した．

開発したインタラクティブサイネージは，ユーザが所望の項目を選択して情報を閲覧するという基本的な機能を備えている．従って，コンテンツがフロアガイドに限定されるものではなく，グループ化および階層化された多数の情報から，ユーザが所望の情報を直感的かつ効率的に選択するという，コンピュータの操作において多用され基本性が高い操作を実現するものである．開発したインタラクティブサイネージは，実際に用途をフロアガイドに限定することなく，各種店舗での商品カタログの閲覧や各種展示場での展示物の紹介等に応用展開した．

これらの研究開発の取り組みにより，大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースの基本技術を確立した．

（２）非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース

画面の大きさの大小に関わらず，画面に手を触れて直接的に操作することは直感的であり自然に行われるが，プロジェクタやウェアラブルデバイスのように物理的なディスプレイが存在しない画面に手を触れて操作することができない．このような画面の種類という観点で制約されることなく直感的な操作を実現するためには，非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースが大いに役立つ．

物理的なディスプレイが存在せず画面を表示するデバイスとして，モバイル型プロジェクタや HMD などがあり，身近な空間に画面を表示することが可能である．また，手を触れて直接的に操作する方法としては，スマートフォンやタブレット端末など指でのタッチ操作が普及しており，広く一般に受けいられる直感的な操作はタッチ操作であると考え．これらの観点から，非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースの最も有用な用途は，周囲の実空間の様々な面に画面を重畳して表示し，重畳した画面に直接タッチ操作することであると考え．しかしながら，身の回りにある机上や壁面などの様々な面上は，物が置かれる，突起物があるなどの状態が多い．従って，非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースは，身の回りにある様々な面上や面の周囲の様々な状態に対応してタッチ検出することが求められる．従来研究を踏まえ明らかとなった課題は次の３つである．

- (i) 面上にセンサや光源を設置せねばならず，また，設置するためのスペースが大きい．
- (ii) 面上に物体や突起物が存在する場合にタッチ検出できない．
- (iii) 高精度に指の接触を認識することが難しい．

これらの課題を解決できるタッチ検出を実現するために，指と面の距離に応じて指の影の形状が変化することに着目した．また，指と面の距離が影に表れやすくするために，ステレオカメラでの測距のように視差の効果を利用することを検討した．その結果，２つの照明により指の左右に影を作り，影そのものに視差と同様の効果が生じるようにすることを考えた．そこで，赤外カメラと２つの赤外照明を用いて指先の左右にできる影を利用して指先の接触を検出する新たな手法を提案した．提案手法は従来手法に比べて以下の利点を有する．

- ・ センサ類を面上に設置する必要がなく，カメラと2つの照明を一箇所に集約して並べるため，設置性に優れ，壁面や机上など様々な面に適用できる．
- ・ 物体や突起物がある面においても影の変化は観察できるため，平面に限らず利用できる．
- ・ カメラに広角レンズを使用しても影の変化は観察できるため，カメラと操作領域の距離を大きく離すことなく広い操作領域に対応できる．
- ・ 影の形状の変化に加え，左右の影の距離や形状の違いを認識に利用するため，高精度にタッチを検出できる．

提案手法を用いてタッチ検出を行うシステムを開発した．この開発を通じて，以下の成果を得た．

- (i) タッチ検出に必要な精度を明らかにするための測定実験を行い，操作対象面から指が 5mm 以上離れたことが判別できれば，ほぼ全てのタッチ操作を検出できることを明らかにした．
- (ii) 影領域を抽出する手法として，画素ごとの閾値適用と既得影領域の周辺補正の技術を開発し，操作対象面の全面で影を漏れなく抽出することを実現した．
- (iii) 影の形状からタッチを検出する手法として，①2つの影の先端同士の距離，②影の先端の尖り具合，③影の先端の位置関係，の3つの影の変化を認識してタッチを判定するアルゴリズムを開発し，面上の位置によって異なる影の変化に対応できる高精度なタッチ検出を実現した．
- (iv) タッチ位置を補正する手法として，12種類の指と影の特徴量を計算して重回帰分析によりタッチ位置の補正量を決めることで，操作対象面の全面で位置ずれの少ないタッチ操作を実現した．

タッチ検出精度の評価により，80インチの操作対象面の全面において高精度にタッチを検出できることを確認し，提案手法の有効性を示した．これらの研究開発の取り組みにより，非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースの基本技術を確立した．

5.2 今後の課題

本研究においては、人とコンピュータのインタラクションの拡張のための、画像認識を用いた実世界指向ヒューマンインタフェースとして、大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース（第3章）、非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース（第4章）の2つの形で研究開発を行い、いずれも、それぞれに掲げた目標を達成した。

大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェース（第3章）については、一般被験者でのユーザビリティ評価により、端末を初めて使う方でも利用方法を説明することなく目的の操作を実行できることを確認し、公共用途に適した実用性を示した。しかしながら、操作方法をよく理解していた人や、思い通り使うことができると感じた人の割合はまだ十分ではなく、さらなる改良が必要である。この改良方法として、図やアニメーションによる基本的な操作方法の提示や、操作方法をそれとなく示す表現のグラフィックへの追加など、適度な操作ガイドを画面内に取り入れることが考えられる。また、被験者へのヒアリングでは、機能追加の要望もあった。特に多かったものには、フロア階を指定して一覧したい、地図を直接操作して店舗を見つけない、などがある。説明なく使える公共用途としての実用性を確保しつつ、ニーズに合わせてより自由度の高い使い方ができることが必要と考えている。

開発したインタラクティブサイネージは、ユーザが所望の項目を選択して情報を閲覧するという基本的な機能を備えている。従って、グループ化および階層化された多数の情報から、ユーザが所望の情報を直感的かつ効率的に選択するという、コンピュータの操作において多用され基本性が高い操作を実現しているものであると考える。今後は、最適視距離での大画面のより様々な使い方に対応していくため、さらに用途の自由度が高いインタラクションを考案していく。

非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェース（第4章）については、タッチ検出精度の評価により、80インチの操作対象面の全面において検出精度96.1%で高精度にタッチを検出できることを確認し、提案手法の有効性を示した。今後は、操作対象面の約4%にあたる、誤検出が多く残る位置への対策を行い、タッチ検出精度の向上を図る。また、提案手法は面上にある突起物の周囲の一部ではタッチ検出ができない。この点は操作対象となる映像の表示方法と合わせて解決を図るなどを検討する。

また、検証および評価については、指1本で操作するシングルタッチ操作について行ったが、提案手法は複数の指先に対して同様の検出を行うことでマルチタッチ操作にも適用可能と考えており、引き続きマルチタッチ操作に関する検証を進める。

さらに、提案システムは、赤外カメラや照明の設置位置と操作対象面のサイズが固定である。従って次のステップとして、これらを変更してもタッチ検出精度を維持できるように、操作対象面の位置やサイズを事前計測してタッチ検出を補正する仕組みを取り入れたい。さらには、操作対象面の位置やサイズがリアルタイムに変化するHMDなどで利用可能とするために、操作対象面を動的に計測するなどして、システム適用の自由度の向上を図りたい。

次に、ヒューマンインタフェースによる人間とコンピュータのインタラクション拡張という上位概念の観点から、今後の課題について論じる。本研究の主内容とした2つのヒューマンインタフェースは、実世界指向インタフェースにおいて「見て、動かす」操作は人間が自然に利用でき、尚且つ、最も利用頻度が高い操作のひとつであるという観点から、画面を介して人間とコンピュータとが向き合った状態において、操作の使いやすさや精度を検証するというというスタイルで構築されている。

しかしながら、人間とコンピュータとがより高度に連携、融合する今後においては、画面を介して人間とコンピュータが向き合う状況に限らず、様々な状況、場面でインタラクションが生まれ得る。こうした多様なインタラクションの拡張を踏まえて、新しいヒューマンインタフェースの形を主導していく必要がある。

この代表的な例のひとつが自動車であると考える。自動車では、交通事故の削減に向けて、車両に数多くのセンサとコンピュータを搭載して、ドライバの運転操作の一部を支援する先進運転支援システムが積極的に導入されている。また、世界的な超高齢化に伴うドライバの運転技能低下や、新興国でのモータリゼーションの急速な発達を背景に、ヒューマンエラーのない自動運転実現への期待が高まっている。さらに、カーナビゲーションを中心としたIVIS(In-Vehicle Infotainment System)がインターネットと接続されるコネクテッド化も進展している。これにより、運転とは直接関わりのない、メールやSNS、インターネットコンテンツ等のいわゆるインフォテイメントを含めた情報に、ドライバが車室内からアクセスできるようになってきている。図5.1にこのような次世代の車室内環境のコンセプトイメージを示す。従って、自動車を利用して人間が安全かつ快適に移動するという行動は、運転する人間と、特定の状況で自動走行する車両と、様々な情報にアクセスできるインフォテイメントシステムとの、インタラクションによってなされることができると考えることができる。

ここで、人間とインフォテイメントシステムだけの関係に焦点を置いた場合、PCやスマートフォンを利用する状況に極めて近いと、本研究の中心として述べた人間とコンピュータとが向き合う状況と同等であると考えられる。しかしながら、自動車を

利用して人間が移動するという行動においては、人間にとっては車を運転することがメインタスクである。また、自動車にとっては安全に走行することがメインタスクとなる。従って、人間が行うタスクという観点では、自動車を運転するメインタスクと、車両による走行制御を把握するサブタスクと、さらには、インフォテインメントシステムを介して各種情報にアクセスするサブタスクとを含む、マルチタスクを行う環境となる。このような環境は、自動車による移動における安全と快適の両立を目指したものであるが、その課題も多く、ヒューマンインタフェースとしても新しい形や価値が求められると考える。



図 5.1 次世代の車室内環境のコンセプトイメージ

そこで、以下では自動車の HMI (Human Machine Interface) におけるマルチタスク型のインタラクションの観点から以下の 2 つについて議論する。

- ・ 人間への情報提示の統合の視点
- ・ 人間のメインタスクを阻害しない操作の視点

このことは、自動車による移動という人間の行動を一例として、人間の行動範囲のさらなる拡張に向けて、人間とコンピュータ、さらには自動車のような新たな要素を含めて、新しい協調を提案することにつながる。

(1) 人間への情報提示の統合制御の視点

自動車の HMI では、衝突警告等の運転支援情報や、IVIS によるインフォテイメント情報などのドライバに提示する情報が増加している。これに対応し、多種多様な情報を効率よくドライバに伝えるために、カーナビゲーション画面(以下、センター画面)や HUD(Head Up Display)を組み合わせたマルチディスプレイの搭載とこれを活用した情報提示の統合制御が進んでいる。マルチディスプレイは、地図等の情報を高精細に確認できるセンター画面や、前方からの視線移動が少なく情報を視認できる HUD などの各ディスプレイの特徴を活かすことで、マルチタスク型の運転環境において情報提示の安全性と利便性の両立に貢献することが期待される。

運転者に情報提示する HMI については、これまで提示の位置や方法に関する研究が多く行われてきた。センター画面やメータ画面の提示位置は、右折待ちなどの運転状況によって見落としが多くなることが報告されている[41]。また、HUD は前方からの視線移動が少なく視認できるが、煩わしく感じる懸念があり表示位置や表示色に関する要件が検討されている[42]。これらから、個別の画面での情報提示に留めず、マルチディスプレイを効果的に利用することが必要と考える。そのための課題として、運転支援やインフォテイメント等の運転中に提供される情報の量や種類の増加に対応し、マルチディスプレイを活用して人間のメインタスクである運転への集中を妨げない提示を行うことが挙げられる。この解決に向けたアプローチとして、以下の観点がある。

(i) 情報優先度の規定

多種多様な情報から運転者に提示すべきものを取捨選択する必要がある。

(ii) 提示パターンの規定

マルチディスプレイを効果的に活用するためには、情報の提示方法をパターン化する必要がある。例えば、以下のような観点がある。

- ・ ドライバが画面の位置と情報の内容に対応付けて認知できるように、各画面の役割を定義する。この一例を図 5.2 に示す。
- ・ 画面内のグラフィックの位置や形状の違いが、ドライバの情報認知に影響しないように、画面内を部品化して表示領域を固定する。
- ・ 視覚情報以外も活用するために、提示方法のパターンに効果音等を含めて規定する。

(iii) 提示制御アーキテクチャ

上記の情報優先度と提示パターンを利用して、統合的な情報提示を行うための提示制御のアーキテクチャが必要となる。このアーキテクチャは、例えば、以下のような処理フローを行うことを想定する。この一例を図 5.3 に示す。

- ① 各種アプリケーションから提示要求を受付
- ② 情報優先度に基づいて提示要求の優先度を判定しキューイング
- ③ 車両の制御状態や周辺のセンシング状態に基づいて、ドライバの運転負荷（ワークロード）を推定し[43]、これに応じて上記キューから提示可能な範囲を決定
- ④ 提示パターンを用いて、各画面の表示更新や音声出力を指示

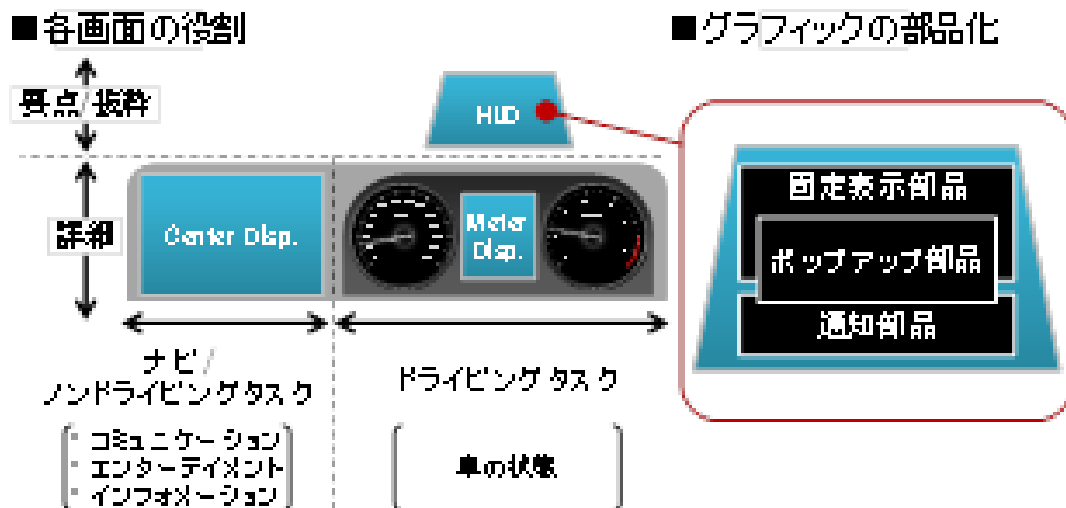


図 5.2 マルチディスプレイの各画面の役割の定義

上記のアプローチを評価する観点としては、安全性の評価のための情報提示への反応時間の測定や、利便性の評価のための情報提示の煩わしさの計測などが考えられる。

人間にどのように情報を伝達するかという視点は、ヒューマンインタフェースにおける基本であり、上記のようにマルチタスク型の環境において具体的な課題抽出と課題解決を行うことは、今後の人間の行動範囲の拡大に向けて大きく貢献すると考える。

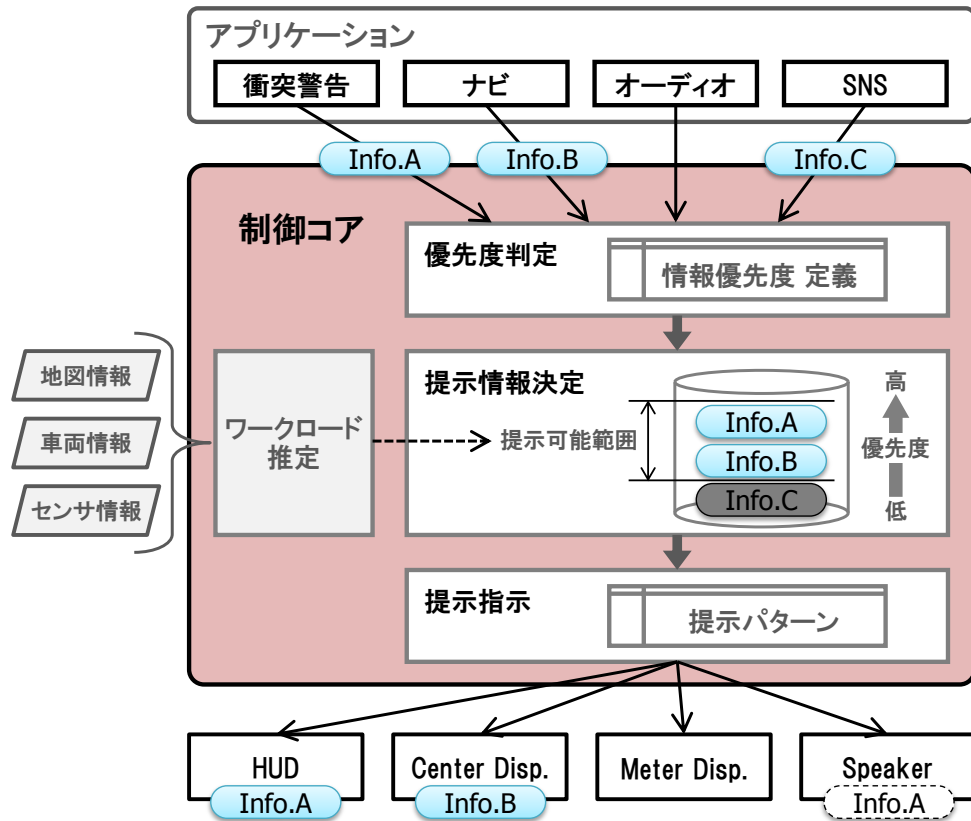


図 5.3 提示制御アーキテクチャの一例

(2) 人間のメインタスクを阻害しない操作の視点

自動車の搭載機能の増加や、IVIS の進化に伴い、ドライバによる各種機能や機器の操作負担は増している。特に運転中にカーナビゲーションなどの機器を操作することによって、運転行動のパフォーマンスが低下するドライバー・ディストラクションの問題が提起されている[44]。運転中の人間のメインタスクである運転行動を阻害することがないように、車載機器の操作に伴うディストラクションを低減することが求められる。

機器操作に伴うディストラクションの低減の取り組みはこれまでも各所でなされている。音声認識・合成技術を用いた音声 HMI は、ドライバの視線を奪うことなく操作が可能で、負担は少ないと考えられる。しかしながら、運転中の様々な操作の中では、例えばリストからの選択のように、情報を視認した方が効率も良く、記憶負担も少ない場合が存在するため、全ての操作を音声で行うことは困難であるとする。ジェスチャ操作やコマンドスイッチ操作を用いることで、ディストラクションを低減できるという報告がある [45][46]。しかしながら、これらはセンターディスプレイ上

の情報を視認しながら操作を行うため，少なからず前方からの視線逸脱が発生し得ると考えられる．一方で，車室内においてドライバに情報提示を行うディスプレイの発展はめざましく，特に HUD は，前方からの視線移動が少なく様々な情報を視認できるディスプレイとして，ディストラクション低減への期待が大きい[47]．

上記を踏まえて，機器操作によるディストラクションを低減する施策の一例として，HUD への情報提示とドライバの手かざしや手振りなどのジェスチャ操作を組み合わせた新しい操作 HMI が考えられる．この HMI の一例を図 5.4 に示す．

この HMI は，特に，複数の選択肢の中から所望のものを選択する操作において，ディストラクションを低減する効果が大きいと考える．例えば，オーディオの曲目選択や，メールや SNS などのメッセージ送信における定型文や絵文字などの選択の操作などである．これらの操作は，提示された情報の視認が必要で，かつ素早く操作できることが望まれるユースケースである．

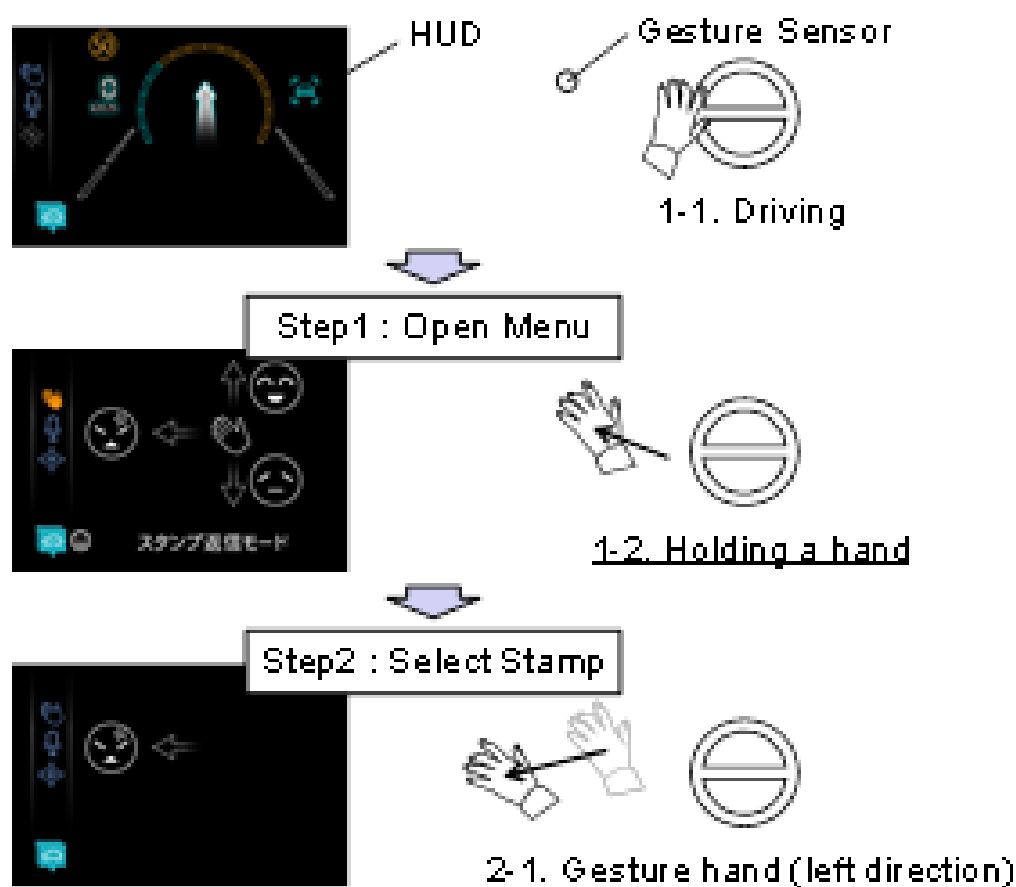


図 5.4 HUD とジェスチャを組み合わせた操作

図 5.4 では、メッセージ送信時に複数のスタンプ（絵文字）を選択する操作を例にして HMI の操作フローを示しており、以下の施策によるディストラクションの低減への貢献が考えられる。

(i) HUD への選択肢の表示

視認が必要となる選択肢を HUD に表示する。その際、前方の視界を塞ぐことが無いよう、写真や画像などを表示しないことと、文字はできるだけ少ない文字数で表示することに留意する必要がある。画面中央付近にスタンプの絵柄を示す 3 つの選択肢が表示される。画面左側には操作状態に関わる表示を行う。このように HUD へ選択肢の表示を行うことで、情報の視認に伴う前方からの視線逸脱を大きく低減できることを期待する。

(ii) ジェスチャによる選択操作

HUD に表示された選択肢に対する操作手段としてジェスチャ操作を用いる。これは、前方に映し出された情報を操作する際に、直感的に素早く操作が可能であることと、比較的低コストなデバイスで実現できるためである。

通常の運転時は、HUD には運転に関する案内などが表示される。本 HMI では、まずドライバが手かざしを行うとスタンプの選択肢が HUD 上に表示される (Step1)。手かざしの検知状態は効果音と HUD 左側のアイコン変化によって通知される。表示された選択肢の中から対応した方向に手を振ることで、所望の選択肢を選択することができる (Step2)。このように、ジェスチャ操作と HUD 表示を連動させた操作により、以下の効果を期待する。

- ・ ドライバが操作の意思表示をした場合にのみ HUD に操作メニューが表示され、運転を妨げない。
- ・ 操作メニュー表示に続けて、選択肢の選択操作が可能のため、素早く短時間で操作を行うことができる。

上記の HMI を評価する観点としては、メインタスク（運転操作）とサブタスク（メニュー選択操作）を同時に行う二重課題法などを用いて、サブタスク実施時のディストラクションに関わる、前方からの視線逸脱時間、操作時間、運転車両の操舵ぶれなどを計測することなどが考えられる。

また、本論文の主内容として述べた 2 つの研究についても、上記の HMI に貢献することが可能であると考えられる。まず、大画面を最適視距離で操作できるヒューマンインタフェースに関しては、操作対象が大画面ではない場合でも、例えば HUD やセン

ターディスプレイなどは、手が届かない、もしくは、手が届きにくい画面であるという点で共通しており、先に述べた手の近づきを利用した操作を適用することが有効であると考える。また、非ディスプレイ面に触れて操作できるヒューマンインタフェースに関しては、運転席回りのディスプレイではない面でタッチ操作を可能にすることで、HMI の操作の自由度を向上させることができると考える。

人間のメインタスクを阻害することなく、効率的にサブタスクの操作を行うという視点は、人間が同じ時間、同じ状況の中でできることをヒューマンインタフェースの進化によって広げることであると考えられる。上記のような具体的なユースケースに基づく施策を検討することは、今後の人間の行動範囲の拡大に向けて大きく貢献すると考える。

発表論文リスト

1. 査読付き学術雑誌

- [1] 松原孝志, 新倉雄大, 成川沙希子, 森直樹, 田野俊一 : 指先の影を用いた非ディスプレイ面へのタッチ検出技術の開発, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム(CDS), Vol.7, No.2, pp.106-114, 2017.
- [2] 松原孝志, ボンダン スティアワン, 松本和己, 徳永竜也, 中島一州 : 3次元ジェスチャ操作によるテーブル型インタラクティブデジタルサイネージの開発, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム(CDS), Vol.4, No.3, pp.1-10, 2014.

2. 査読付き国際会議発表

- [1] Takashi Matsubara, Takehiro Niikura, Naoki Mori, Shun'ichi Tano : Touch Detection Method for Non-Display Surface Using Multiple Shadows of Finger, IEEE, Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2017.
- [2] Takehiro Niikura, Takashi Matsubara, Naoki Mori : Touch Detection Technique for Various Surfaces Using Shadow of Finger, Proc. of 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces (ISS), pp.337-342, 2016.

3. 国内口頭発表

- [1] 松原孝志, 新倉雄大, 成川沙希子, 森直樹, 田野俊一 : 指先の影を用いた非ディスプレイ面へのタッチ検出技術の開発, 情報処理学会, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS), 2016-CDS-17(3), pp.1-7, 2016.
- [2] 新倉雄大, 松原孝志, 森直樹 : 交互点灯照明による指先の影を用いた実平面への接触認識技術の開発, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2016.
- [3] 松原孝志, ボンダン スティアワン, 松本和己, 徳永竜也, 中島一州 : 3次元ジェスチャ操作によるテーブル型インタラクティブデジタルサイネージの開発, 情報処理学会, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS), 2014-CDS-9(10), pp.1-8, 2014.
- [4] ボンダン スティアワン, 松原孝志, 松本和己, 徳永竜也, 中島一州 : テーブル型端末への3次元ジェスチャ操作適用, 映像情報メディア学会冬季大会, 2011.

4. その他の業績（参考論文，発表）

[論文]

- [1] 高田晋太郎, 松原孝志, 森直樹 : 手の近づき検知を利用した車載情報機器の低ディストラクション操作技術の開発, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム(CDS), Vol.5, No.1, pp.47-56, 2015.
- [2] 松原孝志, 臼杵正郎, 杉山公造, 西本一志 : 言い訳オブジェクトとサイバー囲炉裏: 共有インフォーマル空間におけるコミュニケーションを触発するメディアの提案, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.12, pp.3174-3187, 2003.
- [3] 松原孝志, 杉山公造, 西本一志 : Raison d'etre object: A cyber-hearth that catalyzes face-to-face informal communication, LNCS 2480, Springer, pp.537-546, 2002.

[国内会議]

- [1] 松原孝志, 佐々木昭, 内田尚和, 森直樹 : マルチディスプレイ統合型車載 HMI システムへの情報提示制御技術の適用, 情報処理学会, 第 77 回全国大会講演論文集, Vol.2015, No.1, pp.71-72, 2015.
- [2] 高田晋太郎, 松原孝志, 森直樹 : HUD とジェスチャ操作の組み合わせによる運転中の機器操作ディストラクションの低減, 情報処理学会, 第 77 回全国大会講演論文集, Vol.2015, No.1, pp.73-74, 2015.
- [3] 高田晋太郎, 松原孝志, 森直樹 : 手の近づき検知を利用した車載情報機器の低ディストラクション操作技術の開発, 情報処理学会, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム(CDS), 2014-CDS-10(15), pp.1-7, 2014.
- [4] 松原孝志, 徳永竜也 : テレビ向けジェスチャ操作 UI の試作開発, 映像情報メディア学会年次大会, 2010.
- [5] 友部修, 石田隆張, 松原孝志, 小畑信一, 佐藤義人 : テスト系向けワンセグ放送多重装置の検討, 映像情報メディア学会冬季大会, 2005.
- [6] 松原孝志, 尾崎友哉, 是枝浩行, 山口宗明, 横山徹 : 地上デジタル放送対応携帯電話プロトのソフトウェア DEMUX の開発, 映像情報メディア学会年次大会, 2004.
- [7] 松原孝志, 西本一志, 杉山公造 : 言い訳オブジェクト: 共有インフォーマル空間におけるコミュニケーションを触発するメディアの提案, ヒューマンインタフェース学会研究会, 2002.
- [8] 岡本崇宏, 海原康人, 藤崎啓司, 松原孝志, 藤波努 : JAISDAQ—逆評価型・新感覚投資エンタテインメント—, 電気学会, 情報システム研究会, 2001.

[解説等]

- [1] 松原孝志, 徳永竜也, 黒澤雄一, 星野剛史, 尾崎友哉 : 快適操作を提供するユーザーインタフェース技術, 日立評論, Vol.91, No.9, pp.48-53, 2009.

[特許]

※下記の他, 特許国内外出願 66 件, 特許登録 20 件

- [1] 松原孝志, 中出真弓, 尾崎友哉, 塚田有人, 第 5183398 号, 入力装置, 2008.09.29.
[2] 松原孝志, 中出真弓, 山崎正裕, 檜垣宏行, 第 5194673 号, 携帯端末, 及び情報の送受信方法, 2007.09.26.

[受賞歴]

- [1] 情報処理学会 CDS 研究会 優秀発表賞, 2016.
[2] 日本バーチャルリアリティ学会 学術奨励賞受賞, 2016.
[3] 情報処理学会 CDS 研究会 優秀発表賞, 2014.
[4] 情報処理学会 CDS 研究会 優秀論文賞, 2013.
[5] 情報処理学会 CDS 研究会 優秀発表賞, 2013.
[6] ドイツ ユニバーサルデザイン賞 universal design award, 2011.
[7] ドイツ ユニバーサルデザイン賞 universal design consumer favorite, 2011.
[8] CEATEC JAPAN 中国メディアパネルアワード 準グランプリ, 2010.
[9] 公益財団法人日本デザイン振興会 グッドデザイン フロンティアデザイン賞, 2009.

謝辞

本論文は、執筆者が株式会社日立製作所において行った研究をベースとして、電気通信大学でメディア情報学の動向を踏まえてまとめ直しおよび追記を行ったものです。

本研究全般にわたり、主任指導教員として、研究のまとめ方の方向性から論文構成の細部まできめ細かいご指導をいただいた電気通信大学大学院情報理工学研究科 田野俊一教授に深く感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、論文審査をしていただいた電気通信大学大学院情報理工学研究科 広田光一教授、柳井啓司教授、橋山智訓准教授、橋本直己准教授、論文の校閲をしていただいた岸本雅代氏に深く感謝いたします。

本研究にご指導および助言をいただいた増位庄一博士、舩橋誠壽博士、西谷卓史博士、西尾高典先生、鈴木康之氏、研究室で互いに議論を深めた藤林昭氏、天野光司氏に感謝いたします。

本研究の推進にあたり、互いに研鑽を積み、多大なるご協力をいただいた、日立の新倉雄大博士、成川沙希子氏、ボンダン スティアワン氏、松本和己氏、徳永竜也氏、中島一州氏、星野剛史氏、森直樹氏、野添賢彦氏、尾崎友哉氏、桑本英樹氏に深く感謝申し上げます。

執筆者の研究活動および社会人学生生活を精神的に支えてくれた家族に心から感謝します。

上記以外にも、執筆者の研究活動を支えていただいた全ての方々に感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

[第 1 章]

- 1) Wadlow, T.: The Xerox Alto computer, BYTE Mag, Vol.6, No.9, pp.58-68, 1981.
- 2) Weiser, M.: The Computer for the 21st Century, Scientific American 265(3), pp.94-104, 1991.
- 3) Hiroshi Ishii, Brygg Ullmer: Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms, Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems, pp.234-241, 1997.

[第 2 章]

- 4) 松原孝志, 徳永竜也: テレビ向けジェスチャ操作 UI の試作開発, 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集, 2010.
- 5) ボンダンスティアワン, 松原孝志, 松本和己, 徳永竜也, 中島 一州: テーブル型端末への 3 次元ジェスチャ操作適用, 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集, 2011.
- 6) 遠藤隆介, 伊藤雄一, 中島康祐, 岸野文郎: 複合商業施設での複数人によるタイムスロット考慮型プランニングを実現するデジタルサイネージシステム, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-HCI-155, No.9, 2013.
- 7) 木原民雄, 横山正典, 渡辺浩志: 人の位置移動による状況即応型デジタルサイネージの構成法, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.2, pp.868-878, 2012.
- 8) 宮田章裕, 瀬古俊一, 青木良輔, 橋本遼, 渡辺昌洋, 井原雅行: 複数人同時閲覧のためのデジタルサイネージとモバイル端末の連携方式, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-DPS-156, No.22, 2013.
- 9) 小川正幹, マルコユルム, 米澤拓郎, 中澤仁, 徳田英幸: ラッキーなう: 時間と場所情報に注目した公共ディスプレイとのインタラクションモデルとその応用, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-UBI-38, No.10, 2013.
- 10) 木村朝子, 柴田史久, 鶴田剛史, 酒井理生, 鬼柳牧子, 田村秀行: ジェスチャ操作を活用する広視野電子作業空間の設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.4, pp.1327-1339, 2006.
- 11) 大槻麻衣, 大下勉, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 3D 空間における仮想オブジェクトの分解・観察に適した操作法の提案と実装, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.2, pp.227-237, 2011.
- 12) 前野恭平, 藤田誠司, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: ジェスチャ操作を活用する広視野電子作業空間のためのメニューデザインの検討, 情報処理学会研究報告, Vol.2007-HCI, No.99, 2007.

- 13) 中野克己,近藤一晃,小泉敬寛,中村裕一: ジェスチャーインターフェースのためのインタラクション設計, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.MVE-110, No.32, 2010.
- 14) 長谷川秀太,赤池英夫,角田博保: 姿勢を考慮したハンドジェスチャーを利用する機器操作の提案・評価, 情報処理学会研究報告, Vol.2012-HCI-147, No.24, 2012.
- 15) 株式会社キャドセンター: ジェスチャーコントロールソリューション,
<http://www.cadcenter.co.jp/camp/gesture.html>
- 16) 株式会社 N.ジェン:ジェスチャー操作デジタルサイネージソフトウェア gescha,
<http://www.gescha.jp/>
- 17) NEC ソリューションイノベータ株式会社: ジェスチャーUI ソリューション フィンガージェスチャー,
<http://www.nec-solutioninnovators.co.jp/sl/finger/index.html>
- 18) Roeber, H., Bacus, J., and Tomasi C.: Typing in thin air: the canasta projection keyboard a new method of interaction with electronic de-vices, In Proc. CHI EA '03, pp.712-713, 2003.
- 19) Wilson, D. A.: Using a Depth Camera as a Touch Sensor, In Proc. ITS '10, pp.59-72, 2010.
- 20) 渡邊航, 小曳尚, 武山泰豊, 馬場雅裕: プロジェクタとデプスカメラを用いた投影面タッチ UI の開発と操作性向上, SSII2015 第 21 回画像センシングシンポジウム, DS2-02, 2015.
- 21) Benko, H. and Wilson, A. D.: DepthTouch: Using a depth sensing camera to enable free-hand interactions on and above the interactive surface, in Microsoft Research technical re-port, MSR-TR-2009-23, 2009.
- 22) Dippon, A. and Klinker, G.: Kinecttouch: Accuracy test for a very low-cost 2.5d multitouch tracking system, in Proc. ITS '11, ACM, pp.49-52, 2011.
- 23) Kim, D., Izadi, S., Dostal, J., Rhemann, C., Keskin, C., Zach, C., Shotton, J., Large, T., Bathiche, S., NieBner, M., Butler, D. A., Fanello, S., and Pradeep, V.: Retrodepth: 3d silhouette sensing for high-precision input on and above physical surfaces, in Proc. CHI '14, ACM, pp.1377-1386, 2014.
- 24) Parwani, E., Pawar, A., Ajwani,C., and Pole, G.: Virtual touch screen using Microsoft Kinect, in International Journal of Engineering and Computer Science Vol.3, Issue 2, pp.3962-3964, 2014.
- 25) Agarwal, A., Izadi, S., Chandraker, M., and Blake, A.: High precision multi-touch sensing on surfaces using overhead cameras, in Proc. TABLETOP'07, IEEE, pp.197-200, 2007.

- 26) 久野素有, 山下淳, 金子透: ステレオカメラを用いたタッチパネル操作支援システムの構築, 電気学会論文誌 D, Vol.131, No.4, pp.458-465, 2011.
- 27) 久野素有, 山下淳, 金子透: ステレオカメラを用いたタッチパネル操作支援システムにおける指先とパネルの誤接触防止, 精密工学会学術講演会講演論文集, pp.916-917, 2011.
- 28) 奥祐太, 斎藤諒太, 稲垣刀麻, 青木公也, 高橋周, 増田浩二: 3D・2D 画像処理による壁面への指先タッチ判定, ViEW2015 ビジョン技術の実利用ワークショップ, pp.394-398, 2015.
- 29) Wilson, D. A.: PlayAnywhere: A Compact Interactive Tabletop Projection-Vision System, In Proc. UIST' 05, pp.83-92, 2005.

[第 3 章]

- 30) 株式会社シード・プランニング: 2011 年版 デジタルサイネージ市場の現状と今後の方向性, 2011.
- 31) 独立行政法人 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン工学研究センター: 人体寸法・形状データベース, <https://www.dh.aist.go.jp/database/>
- 32) オプテックス株式会社: 3 次元距離画像カメラ,
<http://www.optex.co.jp/product/3d.html>
- 33) 樽本徹也: ユーザビリティエンジニアリング ユーザー調査とユーザビリティ評価実践テクニック, オーム社, 2005.

[第 4 章]

- 34) Guidelines for targeting, Microsoft developers network,
<https://msdn.microsoft.com/en-us/windows/uwp/input-and-devices/guidelines-for-targeting>
- 35) iOS human interface guidelines, Apple developer,
<https://developer.apple.com/ios/human-interface-guidelines/>
- 36) Metrics and grids, Android developers,
<https://stuff.mit.edu/afs/sipb/project/android/docs/design/style/metrics-grids.html>
- 37) A. Sanin, C. Sanderson, BC. Lovell: Shadow Detection: A Survey and Comparative Evaluation of Recent Methods, Pattern recognition, Vol.45 (4), pp.1684-1695, 2012.
- 38) T. Horprasert, D. Harwood, and L.S. Davis: A statistical approach for real-time robust background subtraction and shadow detection, Proc. IEEE ICCV'99 FRAME-RATE Workshop, 1999.
- 39) 森田順也, 岩井儀雄, 谷内田正彦: 室内における背景画像の推定と影の除去, 情

報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), Vol.44, pp.105-114, 2003.

- 40) F. Wang, et al: Empirical Evaluation for Finger Input Properties in Multi-touch Interaction, CHI, 2009.

[第 5 章]

- 41) 田内, 他: 通信利用型運転支援システムにおける支援情報の提示位置に関する実験的検討, デンソーテクニカルレビュー, Vol.15, 2010.
- 42) 森田, 他: ドライバに対する適切な情報伝達方法に関する研究, 交通安全環境研究所報告, 第 14 号, 2009.
- 43) 内田, 他: VACP によるドライバ・ワークロード推定方法の研究, 自動車技術会 2014 年秋季大会 学術講演会前刷集, No.98-14, 2014.
- 44) Michael A. Regan, et al.: DRIVER DISTRACTION Theory Effects and Mitigation, CRC Press, 2009.
- 45) 高田, 他: 手の近づき検知による走行中の車載情報機器操作に伴うディストラクションの低減, 情報処理学会 第 76 回全国大会講演論文集, pp.3-65, 2014.
- 46) 藤原, 他: ヘッズアップコックピットの開発, マツダ技報, No.31, 2013.
- 47) 榎本, 他: ヘッドアップディスプレイにおける複数表示が認知性, 運転行動に与える影響, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.118-14, 2014.

著者略歴

松原 孝志（まつばら たかし）

1998 年 3 月 長野工業高等専門学校 電子制御工学科卒業
1998 年 4 月 群馬大学 社会情報学部編入学
2000 年 3 月 群馬大学 社会情報学部卒業
2000 年 4 月 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 博士前期課程入学
2002 年 3 月 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 博士前期課程修了
2002 年 4 月 株式会社 日立製作所入社
2016 年 4 月 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 博士後期課程 情報学専攻入学
2018 年 3 月 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 博士後期課程 情報学専攻修了