

2013年度 卒業論文

作業段階重畳型機器操作誘導

2014年2月18日

大阪大学 基礎工学部
システム科学科 生物工学コース
脇田 卓

主査: _____ 日付: _____

作業段階重畳型機器操作誘導

脇田 卓

概要

人は古来より様々な道具を用いてきた。しかし、科学技術の発展に伴って道具は複雑化し、取扱説明書のみでは使用法を理解することが困難となってきた。近年、拡張現実 (Augmented Reality:AR) を用いて、対象機器に直接操作箇所等を重畳することで、視覚的に理解しやすい説明を行う研究が行われている。しかし、AR を用いた作業支援においても、取扱説明書を見て作業を行う場合と同様に、作業が完了したかの判断は作業者に委ねられている。

本研究では、センサを設置した対象機器の状態をシステムが常に把握することで、現在の作業段階や操作箇所、操作方法を作業者に提示し、さらに誤作業が行われた場合に直ちに間違いを修正させるマニュアルを構築することで、誤った状態で作業が進行することを防ぐシステムを提案する。実装では、プリンタを模した箱を対象に、可動部部分の蓋の開閉状態を、加速度センサを用いて検出した。また、適切な種類の紙が正確な向きで設置されているか否かの確認として、近接センサであるリードスイッチを用いた。

評価実験を行い、紙のマニュアルを用いて作業を行った場合と、本システムを用いて作業を行った場合で作業時間および作業完了時の誤りの数を比較した。作業時間に関しては、紙のマニュアルを用いた場合に対して提案したシステムの方が優位であるという結果は得られなかったが、作業完了時の誤りの数は、紙のマニュアルを用いて作業を行った被験者では平均 0.6 個であったのに対して、本システムを用いた被験者では 0 個だった。

キーワード：拡張現実、作業支援、加速度センサ、リードスイッチ

Operation guidance system with work steps superimposition

Suguru Wakita

Abstract

People use various instruments since ancient times. However, many instruments in recent years become complicated according to technological development. Recently there are many studies to simplify operating instructions visually using Augmented Reality(AR) technology. Nevertheless, it is left to the judgment of operators whether or not his/her operations are done correctly.

In this study, the author proposes the system that monitors the statements of target objects by attached sensors, superimposes the stage of operations and operation parts on HMD, and warns the operator for a mistake. This time, the author made the box that imitates a printer with the accelerometer to detect the inclination of the lid and the reed switches to detect paper kind and direction.

In the experiments, the author compared the working times and the number of mistakes when the operation are finished between subjects who use paper manual and those who use the proposed system. From the view point of working time, two groups did not show a significant difference. Compared to the number of mistakes, the subjects who used paper manual made 0.6 mistakes averagely, and the subjects who used this proposed system made no mistake.

Keywords : Augmented Reality(AR), Operating Instruction, Accelerometer, Reed Switch

目次

| | | |
|-----|-----------------------|----|
| 第1章 | はじめに | 1 |
| 第2章 | 作業支援における情報提示技術 | 3 |
| 2.1 | 協調作業支援 | 3 |
| 2.2 | 電子マニュアルによる作業支援 | 4 |
| 2.3 | 作業支援システムにおける情報提示手法 | 6 |
| 2.4 | AR技術における位置姿勢合わせ手法 | 16 |
| 2.5 | 本研究の位置付け | 21 |
| 第3章 | 作業支援システムの構成 | 22 |
| 3.1 | システム概要 | 22 |
| 3.2 | 位置姿勢推定 | 23 |
| 3.3 | 作業支援マニュアルの作成 | 27 |
| 3.4 | センサによる状態把握 | 28 |
| 第4章 | システムの実装と評価 | 30 |
| 4.1 | 対象物体 | 30 |
| 4.2 | 状態検出 | 31 |
| 4.3 | 作業マニュアル | 35 |
| 4.4 | 実装システムの構成 | 36 |
| 4.5 | 動作確認 | 41 |
| 4.6 | 被験者実験による作業時間および誤り数の比較 | 44 |
| 4.7 | 考察 | 46 |
| 第5章 | おわりに | 47 |
| | 謝辞 | 48 |
| | 参考文献 | 49 |

目次

| | | |
|------|-----------------------------|----|
| 1.1 | AR 作業支援 | 2 |
| 2.1 | 遠隔協調作業支援 | 3 |
| 2.2 | 電子マニュアルの例 | 5 |
| 2.3 | 画像合成位置による提示手法の分類 | 6 |
| 2.4 | 情報提示手法概観 | 7 |
| 2.5 | 作業空間への教育ビデオ重畳表示システム | 8 |
| 2.6 | AR を用いた遠隔地間での作業教示システム | 9 |
| 2.7 | HMD による軍事設備のメンテナンス | 10 |
| 2.8 | HMD による 3D パズルの組み立てシステム | 10 |
| 2.9 | ビデオ型シースルーデバイスとして用いられる ARPad | 11 |
| 2.10 | スマートフォンを用いたナビゲーションシステム | 12 |
| 2.11 | HUD による電子部品検査の作業支援環境 | 13 |
| 2.12 | 自動二輪用 HUD による情報提示 | 14 |
| 2.13 | プロジェクタ投影による連続的作業空間 | 15 |
| 2.14 | 三次元遠隔指示インタフェース | 16 |
| 2.15 | 屋外での位置・姿勢推定に用いられるセンサ外観 | 18 |
| 2.16 | ARToolKit の処理手順 | 19 |
| 2.17 | 特徴点ベースの手法 | 20 |
| 2.18 | CAD による輪郭線モデル | 21 |
| 2.19 | 投影画像 | 21 |
| 3.1 | フローチャート | 22 |
| 3.2 | 本システムで取り扱う座標系 | 24 |
| 3.3 | マルチマーカ | 24 |
| 3.4 | CG 重畳による操作内容の教示 | 27 |
| 3.5 | 電子マニュアル | 28 |
| 3.6 | 電子レンジの例 | 29 |

| | | |
|------|-------------------|----|
| 4.1 | 作成した箱 | 30 |
| 4.2 | 加速度センサによる傾き検出 | 32 |
| 4.3 | リードスイッチ動作原理 | 33 |
| 4.4 | 紙設置部分 | 33 |
| 4.5 | 青色の紙 | 33 |
| 4.6 | 黄色の紙 | 33 |
| 4.7 | 紙の種類 | 34 |
| 4.8 | 紙の内側 | 34 |
| 4.9 | 作業段階フローチャート | 35 |
| 4.10 | システム外観図 | 36 |
| 4.11 | 作業風景 | 36 |
| 4.12 | HMZ T-2 | 37 |
| 4.13 | Webcam C300 | 37 |
| 4.14 | 状態計測に用いた回路図 | 38 |
| 4.15 | Arduino UNO | 38 |
| 4.16 | 加速度センサとリードスイッチ | 38 |
| 4.17 | 箱の内装 | 39 |
| 4.18 | AR マーカの位置関係 単位:mm | 40 |
| 4.19 | 作業段階別教示内容 | 41 |
| 4.20 | 作業段階動画 | 42 |
| 4.21 | 間違った作業が行われた場合 | 43 |
| 4.22 | 誤り教示動画 | 43 |
| 4.23 | 実験に用いた紙マニュアル | 44 |

表 目 次

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 2.1 | 情報提示手法まとめ | 17 |
| 4.1 | コンピュータの仕様 | 37 |
| 4.2 | HMZ T-2 仕様 | 37 |
| 4.3 | Webcam C300 仕様 | 37 |
| 4.4 | 紙に書いたマニュアルを用いた被験者の作業結果 | 45 |
| 4.5 | 本システムを用いた被験者の作業結果 | 45 |

第1章 はじめに

人類は古来より道具を製作し、発展させることによって文明の開化を遂げてきた。18世紀半ば、産業革命を経て、道具に代わって人力を必要としない機械が用いられるようになった。機械の発明当初、機械は労働現場で生産効率を高める目的で用いられることが主だったが、高度経済成長期以降、三種の神器に代表されるように、一般家庭に電化製品が普及し、多くの人々が機械を用いるようになった。印刷器具を例にとると、活字を彫刻して作った木版に墨を塗り、紙を押し付けることによって行われる活版印刷から始まり、現在では全自動で印刷を行うことが可能なプリンタまで発展し、一般家庭に普及している。

しかし、機械の発展に伴って、使用方法が複雑になり、初見で機械の使い方を理解することは困難となった。機械の使用法を解説する手段として紙媒体の文字や図を用いた伝達が行われていた。現代において使用法を伝達する手段として、取扱説明書がある。取扱説明書は、商品を購入した消費者が、商品の使い方を理解するために利用する。しかし、近年発売されている新製品の多くは、従来製品と比較して形状が変化したり、操作箇所が増えたりして、操作方法が容易に想像できなくなったため、多くのページを用いて説明が行われている。したがって、機器を用いる度に該当部分を検索することは億劫であり、さらに、説明書に描かれている説明図と実際の機器を対応付けるのが困難である。また、操作中に説明書を保持することで片手での作業となり非効率であるといった問題も挙げられる。

作業の非効率性を解決するために、拡張現実 (Augmented Reality : AR) 技術により CG を現実空間に重畳することで、視覚的で理解しやすい説明を実現しようとする研究が幅広く行われている。図 1.1 にヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display : HMD) を用いた AR 作業支援の例を示す。

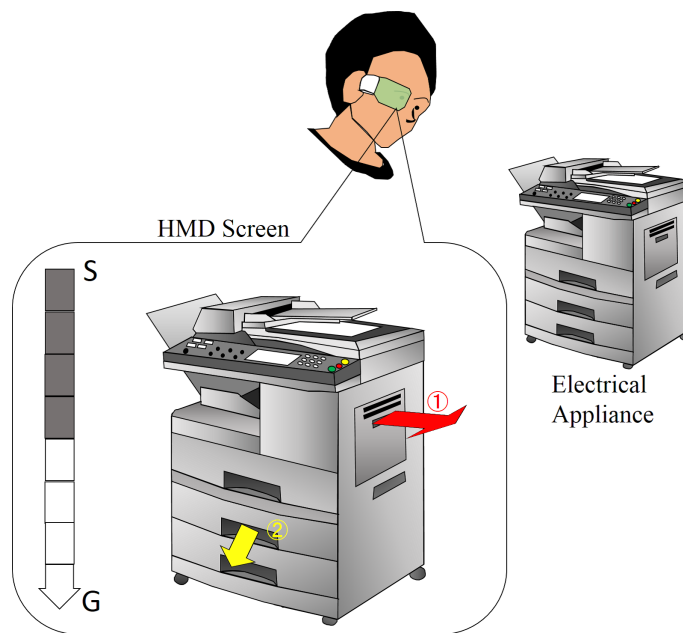


図 1.1: AR 作業支援

AR とは、バーチャルリアリティ(Virtual Reality : VR) の変種であり、周囲の現実環境に情報を付加したり強調させたりすることで人間から見た現実世界を拡張する技術を指す。VR が人工的に構築された現実感と現実を差し替えるのに対し、拡張現実とは現実の一部を改変する技術である。しかし、作業支援に AR を用いるだけでは、取扱説明書を用いた場合と同様に、作業が正確に遂行されたかどうかの判断は作業者に委ねられてしまうため、作業が正確に行われていない状態で、誤りに気づかずに次の作業に移行してしまう可能性がある。

本研究では、対象機器の状態や動作を検出するためにセンサを設置し、対象機器の状態を常にシステムが把握することで、現在の作業段階および操作箇所や操作方法を CG 重畳により教示し、さらに誤作業が行われた場合に直ちに間違いを修正させるマニュアルを構築することで、誤った状態で作業が進行することを防ぐ作業段階重畳型機器操作誘導システムを提案する。

第2章 作業支援における情報提示技術

本章ではまず、近年行われている技術的な作業支援手法を、協調作業支援と電子マニュアルによる作業支援の二種類に分けて説明する。その後、双方の手法の中で取り入れられている情報提示技術に関して、提示手法と位置姿勢合わせ手法の観点からそれぞれ説明する。最後に本研究の位置づけと方針について述べる。

2.1 協調作業支援

作業者に操作方法を伝える手段として、熟練者が遠隔地から指示することによって行われる協調作業支援がある。図 2.1 に協調作業支援システムの概要を示す。協調作業支援では、作業者の作業空間にカメラ等を設置することで、作業空間情報を遠隔地にいる指示者に伝達する。指示者は、カメラ等から得られる情報をもとに、音声や身振り手振り、描画などの手段を用いて操作方法を作業者に伝達する。作業者は、作業空間に設置されたモニターや、音声から情報を受け取り、指示に従って作業を進行する。協調作業支援は、取扱説明書と違って、人が作業を支援するため、作業者が分からないことや獲得したい情報を、指示者に質問することでの確かかつ即座に得ることができる。また、作業工程を指示者が常に監視しているため、誤った作業が行われたときに即座に修正できるという利点があり、最も対話的な作業支援と言える。

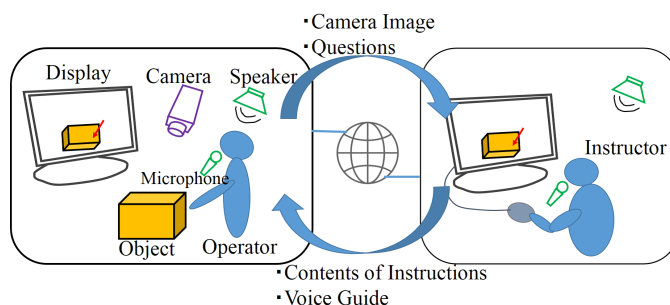


図 2.1: 遠隔協調作業支援

しかし、遠隔から実空間に対する指示や参照を行い、円滑な意思疎通を行う協調作業支援システムを実現させるためには、指示や参照を行う指示者および作業者の周囲の実空間を遠隔地間で互いに共有する必要がある。例として、空間内の任意の物体を参照し、指示者に伝える場合、作業者は物体の見える位置に移動し、物体に向かって指差し「これ」と発話することで参照を行う。そのため、作業者が何を参照しているかを指差しと指示語から容易に理解するためには、意思疎通を図る周囲の実空間を互いに共有しなければならない [1] [2]。さらに、実空間の共有ができていなければ、指示者の指示対象が作業者の視野範囲にあるかどうか、あるいは視野範囲内のどの部分に当たるかが不明瞭であり、また指示者が提示する情報と作業空間内の対象物との関連性が対応付けられなくなるといった問題も生じる。また、作業空間と指示空間の双方にカメラやモニタ等のインフラ設備を必要とするため、高コストであるといった点や、作業者と指示者が共に通信できる環境下にいなければ、システムを扱うことができないといった欠点がある。

2.2 電子マニュアルによる作業支援

前章で述べたように、紙媒体のマニュアルである取扱説明書は、検索性に優れないといった問題がある。さらに、作業対象に追加機能が搭載されてもマニュアルの更新が行われず、説明書と作業対象との間で視線を交互に移しながら作業をしなければならないため、どの工程まで作業が進んでいるのか把握できなくなり、作業工程を重複または省略してしまうといった問題がある。これらの問題に対処するために、近年紙媒体のマニュアルの電子化が進められている。図 2.2 に、電子マニュアルの例を示す [3]。電子化されたマニュアルは、常に最新の情報に更新できる利点のほかに、従来の紙媒体のマニュアルでは文字や写真、図表のみだった情報が、音声や動画などを利用することで理解が容易になったり、階層別の案内形式にすることや、キーワード検索欄を設置することで、検索時間が短縮されるといった利点を持つ。

電子マニュアル

📖 使いかた

Windows 8: 基本操作

各部名称

設置する

ネットワーク/インターネット

接続する

設定する

再生する

バックアップ/リカバリー

セキュリティ

その他の使いかた

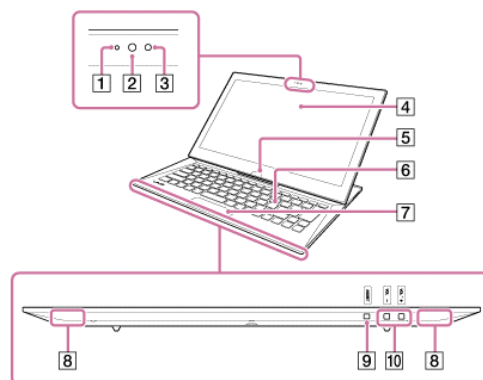
お知らせ

? よくある質問

📖 コンテンツ一覧

本体正面の各部名称

本体正面のボタンやランプ、その他の機能について説明します。




- 1 本体前面内蔵カメラランプ（内蔵カメラを使う（カメラ機能搭載モデル））
- 2 本体前面内蔵カメラ（内蔵カメラを使う（カメラ機能搭載モデル））
- 3 照度センサー（画面の明るさを変更する）
- 4 液晶ディスプレイまたはタッチパネル（タッチパネルの操作方法（タッチパネル搭載モデル））
- 5  (Windows) ボタン

図 2.2: 電子マニュアルの例 [3]

しかし、単なる紙媒体マニュアルの電子化のみでは、実物体に直接操作箇所や操作方法を提示することはできないので、説明箇所と実物体との対応付けは作業者に委ねられている。近年、このような紙媒体のマニュアルの電子化に加え、ARによるマニュアルの効果的な提示技術が注目されており、数多くの研究が報告されている。次節では、遠隔協調作業支援、電子マニュアルによる操作支援の両方に応用されている情報提示手法について述べる。

2.3 作業支援システムにおける情報提示手法

現在提案されている AR を用いた作業支援システムにおける情報提示手法は、デスクトップ型、HMD(Head Mounted Display) 型、ハンドヘルド型、HUD(Head Up Display) 型、映像投影型に大別される。図 2.3 に画像合成位置による提示手法の分類を示す。また、各手法の概観を図 2.4 に示す。

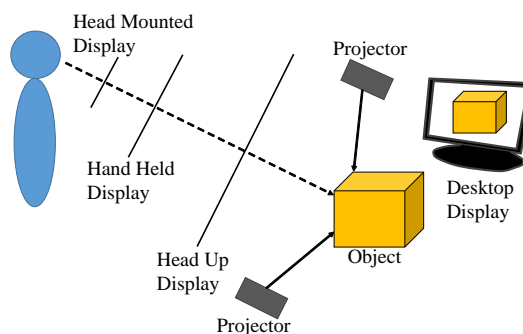


図 2.3: 画像合成位置による提示手法の分類

以下では、各手法の特徴および関連研究について述べる。

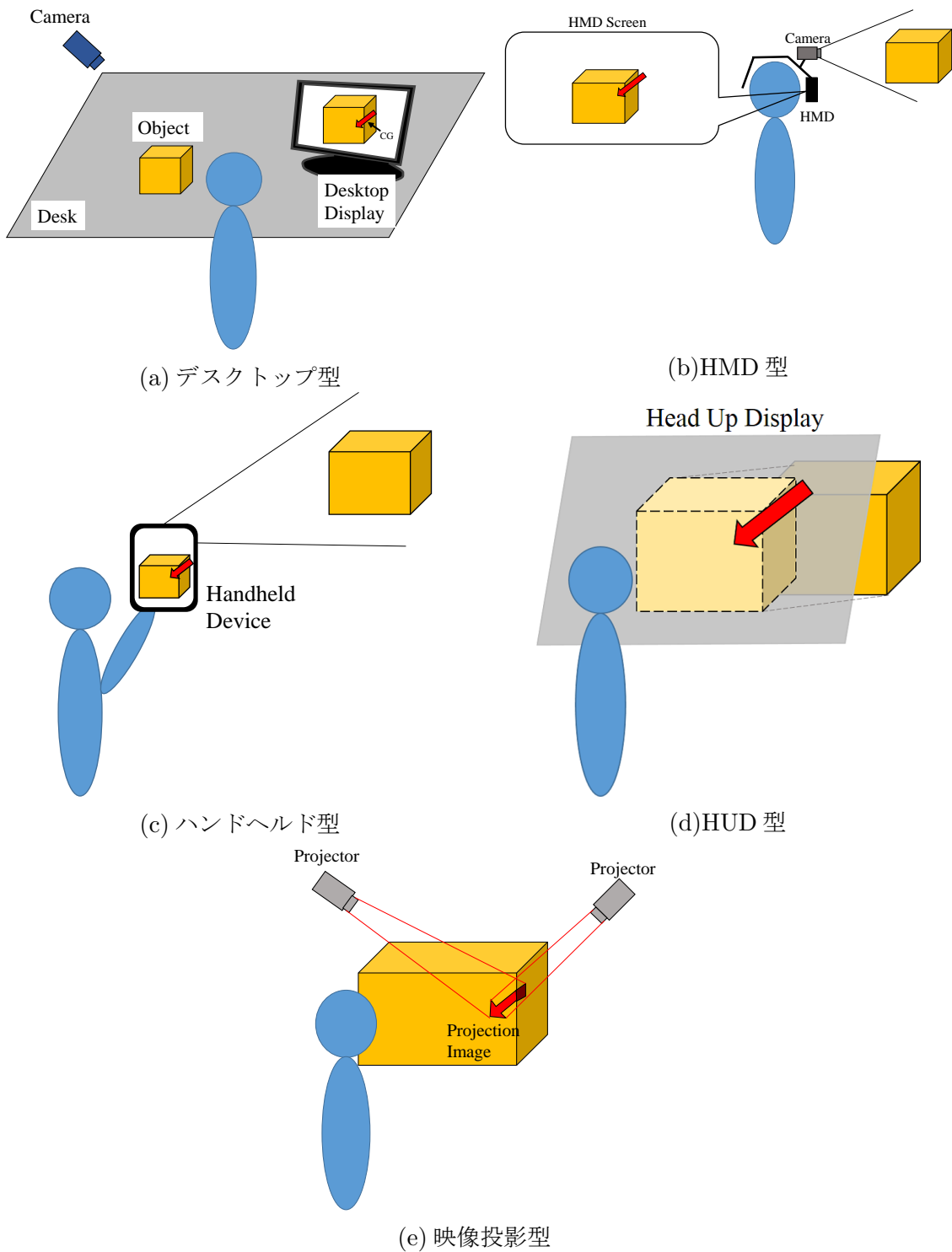


図 2.4: 情報提示手法概観

2.3.1 デスクトップ型

モニタディスプレイは情報提示装置の中で最も簡易的に使用できるものであり、近年の作業支援システムでは、モニタ画面上に映し出された物体に操作方法や操作箇所を重畳したり、文章や動画によって電子マニュアルを提示するものが一般的である。しかし、電子マニュアルを直接提示するような従来システムでは、紙媒体のマニュアルと同様に図と実際の対象物体との対応は作業者に委ねられるため、作業に間違いが生じる可能性がある。

後藤らは、折り紙を折る作業と、ブロックを配置する作業を AR によって支援するシステムを提案している [4]。後藤らのシステムでは、ユーザの身体に装着したカメラ画像をディスプレイ上に表示し、作業内容を作業段階ごとに分割した動画を作業空間に重ね合わせて映し出すことで、作業者が動画内の物体と実物体の対応付けを容易に行うことを可能にしている。さらに、映し出す動画の透明度を変化させたり、輪郭線の強調表示などの様々な加工を施すことによって、動画の映像と実物体を視覚的に混同するといった問題を解決している。

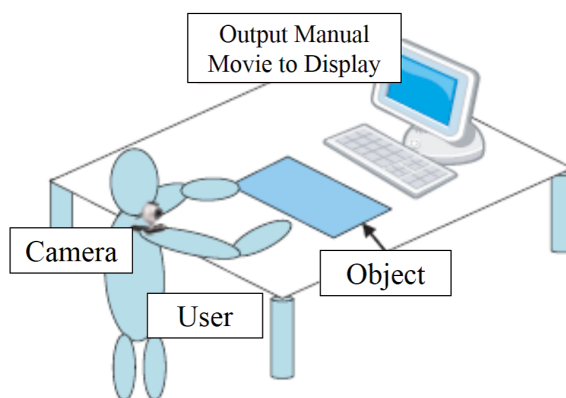


図 2.5: 作業空間への教育ビデオ重畳表示システム [4]

また、Ouらは、ARを用いた遠隔地間での作業教示システムを提案している [5]。図 2.6 に、システム概要を示す。Ouらのシステムでは、遠隔地の指示者は、作業側側の作業空間に設置されたカメラ映像に対して、スタイラスペンを使って作業指示を行う (図 2.6 左下)。作業者は、モニタディスプレイを介して指示者の指示付き作業映像を見ながら作業を進めていく。Ouらのシステムは、実際の作業空間の映像に対して、教示内容を重畳することで作業対象の把握を容易にしておき、遠隔地間における円滑な作業指示を可能とした作業提示システムを実現している。

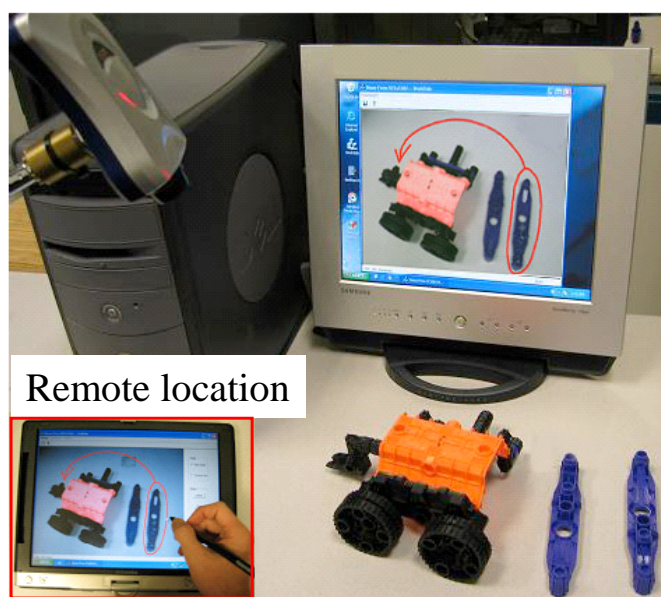


図 2.6: AR を用いた遠隔地間での作業教示システム [5]

本手法の利点として、容易に入手できるモニタディスプレイを用いるためにシステムの構築が容易である点や、作業者が機器を装着する必要がなく拘束感がないといった点があげられる。しかし、作業者はディスプレイに表示された映像を見ながら作業を行う必要があるため、ディスプレイと作業物体との間で視線移動を交互に行わなければならない、作業効率が低下してしまうという問題が生じる。また、ディスプレイの設置によって作業空間が狭まり、作業空間がディスプレイが見える位置に制限されるという問題がある。

2.3.2 HMD 型

HMD とは、頭部に装着するディスプレイ装置のことである。HMD を用いて実世界に作業支援情報を重畳することで作業の把握が容易になり、さらに両手が自由であることによる作業効率の向上という点から、HMD を用いた作業支援が数多く提案されている [6] [7]。

Henderson らは、HMD を用いて、軍事整備士が装甲車等のメンテナンスを行うシステムを提案している [8]。図 2.7 に作業風景を示す。HMD に、操作方法、操作箇所を示す吹き出し注釈や矢印、操作方法のアニメーションを映し出すことで作業支援を行っている。実証実験として、Henderson らが提案した、作業物体のトラッキングを行った上で HMD スクリーンへ情報提示を行ったものと、何もトラッキングを行わずに HMD スクリーンに情報提示を行ったものと、固定されたモニタに情報提示を行ったもので、作業内容を比較している。その結果、作業速度および正確さで、提案された手法が最も良い結果を示し、さらに、作業中の頭部の動きが最も少ないことが示されている。

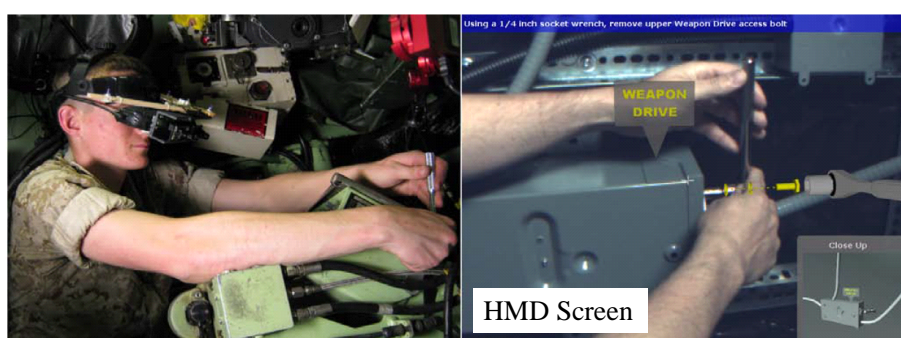


図 2.7: HMD による軍事設備のメンテナンス [8]

また、Salonen らは、幾何形状が複雑な 3D パズルの組み立てを、HMD スクリーン上に次に組み立てるべき部品を CG を用いて教示することで、作業を効率化し、組み立てにかかる時間を減少させるシステムを構築した [9]。図 2.8 にシステムの概要を示す。

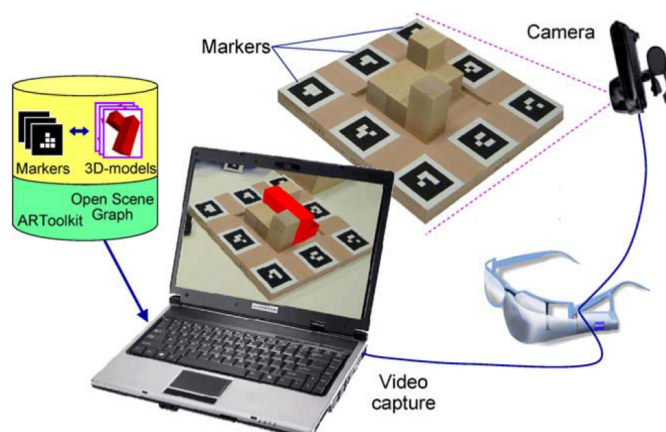


図 2.8: HMD による 3D パズルの組み立て教示システム [9]

HMD を用いた情報提示は両手を自由に使用できるといった点や、作業中に視線の移動を行う必要がない点、視線に近い位置にカメラがあるので作業が把握しやすくなるといった利点が挙げられる。しかし、HMD の装着により、視野が狭くなることや、頭部に装着するために拘束感があり、作業動作が制限されてしまうといった問題が挙げられる。

2.3.3 ハンドヘルド型

ハンドヘルド型とは、スマートフォンやタブレット PC といった、カメラを搭載した小型デバイスを用いることによってビデオ式シースルーを実現し、カメラ映像に情報を重畳するものである。

Moglev らはハンドヘルド型デバイスとして ARPad を提案している [10]。図 2.9 に ARPad の概要を示す。ARPad は、カメラ、ディスプレイ、コントローラの三つの部分で構成されている。ユーザが、実世界に配置された正方形の二次元マーカにカメラを向けると、カメラで撮影した画像情報から ARPad の位置および姿勢を推定し、ディスプレイに映し出されている実空間に CG を重畳する。さらに、コントローラ部分を用いてディスプレイに映し出されている CG を選択し、回転や平行移動、拡大縮小を行うことができ、提示された情報を見るだけではなく、操作することができる。また、ARPad 同士の通信が可能であり、あるユーザが操作した情報をもう一方のユーザの ARPad 上のモニタに反映させることで、作業空間を共有することが可能となっている。



図 2.9: ビデオ型シースルーとして用いられる ARPad [10]

また、中藤らはハンドヘルド型デバイスとしてスマートフォンを用いて、屋内環境におけるナビゲーションシステムを構築している [11]。図 2.10 にナビゲーションシステムの実験風景を示す。スマートフォンはカメラとディスプレイを有するほか、加速度センサと地磁気

センサを内蔵しているため、ユーザの向きを各センサの値を用いて推定し、また、ユーザの位置は加速度センサの値を積分することで推定することができる。加速度積分によって得られる移動量には蓄積誤差が生じるため、位置情報が既知の二次元マーカを用いて修正する。推定した位置と向きに応じて、スマートフォンの画面に表示されたカメラ画像に矢印を重畳表示させることで、ユーザに対して進行方向を提示するシステムを実現している。

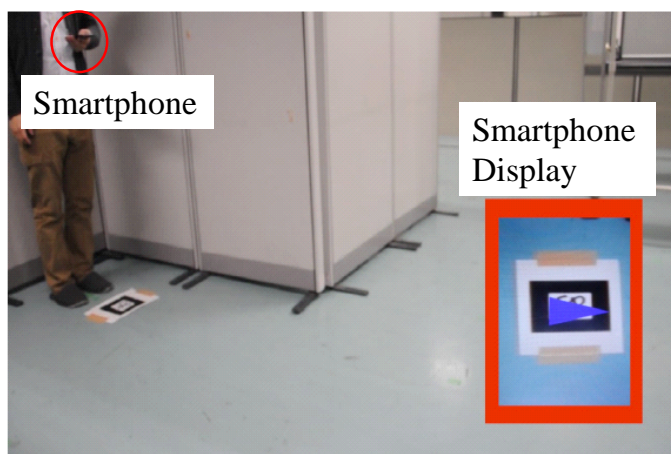


図 2.10: スマートフォンを用いたナビゲーションシステム [11]

本手法の利点として、小型でどこでも使用できるといった利点のほかに、HMD 型と異なり頭部の動きや視界を制限しないという点が挙げられる。しかし、ハンドヘルド型は情報参照時にデバイスを手で持つ必要があるため、作業を片手で行わなければならない、作業効率が下がってしまう。また、用いるデバイスの画面が狭い、小型であるために CPU の性能が PC より劣る、カメラ視点とユーザの肉眼視点が異なるといった問題も挙げられる。

2.3.4 HUD 型

HUD 型は、作業者の通常の視界と重なるように透明のディスプレイやハーフミラーを介して情報を提示する手法である。この技術は、1960 年代に軍用途として実用化され、攻撃・戦闘用航空機を主体とした軍事システムに適用されていた。ヘッドアップディスプレイの最大の利点は、前方視界内に設置された透明スクリーン上へ情報が投影されることにより、パイロットが計器類を目視することなく各種データを得ることができ、結果として目標を視認しながら航空機の操縦が可能になったことである。近年では軍事応用にとどまらず、大型輸送機や旅客機、自動車などの様々な分野で実用化が進められている [12]。HUD 型では、飛行機のコックピットや自動車の操縦席といった視点位置の変動が少ない場面において、環境中に固定して配置し、作業者の視界と重ねて作業指示情報を提示する装置として用いら

れることが多い。

伴らは、AR を用いて、HUD を介して指示情報を提示する電子部品検査の支援 AR システムを提案している [13]。図 2.11 にヘッドアップディスプレイによる作業支援システムを示す。PC 内に作業手順がデータベースとして登録されており、カメラから取得された作業対象の特徴点配置に基づき対象の種類が同定され、種類ごとの作業項目と作業箇所がデータベースにより動的に引き出され、作業箇所に強調マーカが重畳される。作業領域の左右に 2 台のカメラを配置し、対象物体を撮影することにより、作業中の手指によって対象が隠蔽されることを防いでいる。また、ハーフミラーを用いて、ディスプレイに映し出されたバーチャル世界の像と、実世界の対象物体を、ハーフミラー上で融合させることができるので、微小な誤差で実空間の物体に情報を重畳させることができ、作業箇所が細かい物体に対しても、作業者が誤認することなく作業を進められるシステムを構築している。

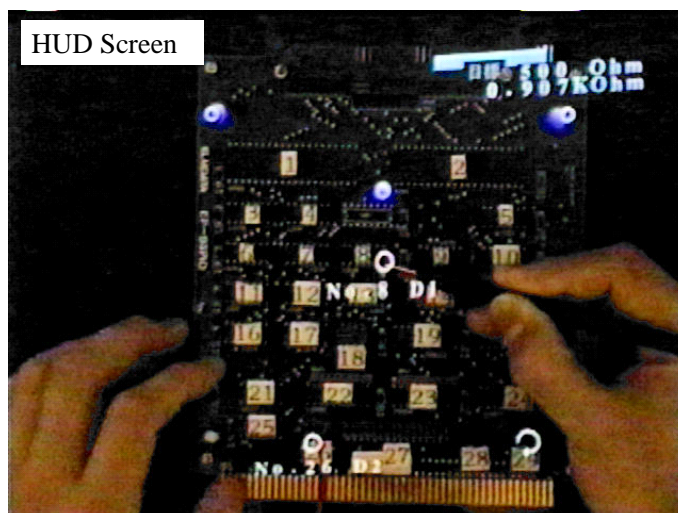


図 2.11: HUD による電子部品検査の作業支援環境 [13]

また、伊藤らは、レーザ光プロジェクタを用いた HUD の技術を用いて自動二輪乗用車向けの新たなナビゲーションシステムを提案している [14]。図 2.12 にシミュレーション風景を示す。このシステムは、自動二輪乗用車のウィンドシールドを HUD として利用し、高色彩、高コントラスト、高輝度という特徴を持つレーザ光プロジェクタを用いることにより、昼夜問わず必要な情報を運転中に提示することができる。検証実験により、レーザ光プロジェクタを用いた HUD によるナビゲーションシステムは、運転者の運転中の視線を妨げることなく情報提示できることが示されている。

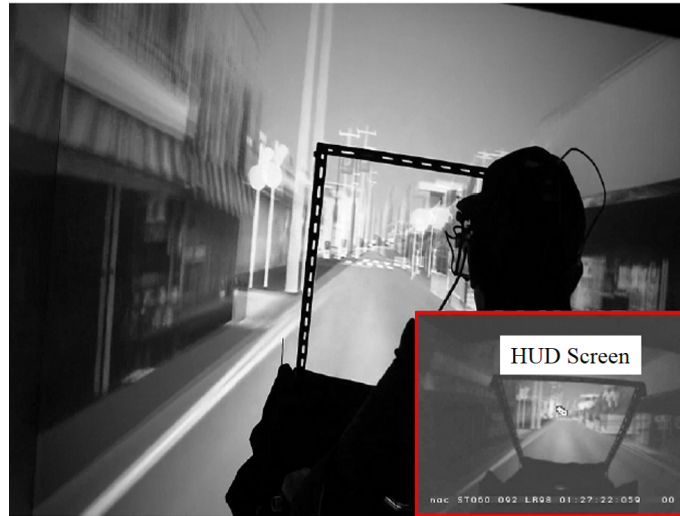


図 2.12: 自動二輪用 HUD による情報提示 [14]

HUD 型には、作業中の視点移動が少なく、実物体と仮想物体の位置合わせ精度が高いという利点が挙げられる。しかし、システムを構成するうえで、自由な位置に仮想物体を表示することができないため、作業者が支援情報を見る位置が固定されてしまうといった問題や、大型のスクリーンが必要であるといった問題点が挙げられる。

2.3.5 映像投影型

映像投影型は、プロジェクタを用いて作業対象に直接支援情報を投影する方法である。映像投影型による作業支援システムが近年数多く提案されている。

暦本らはプロジェクタを用いて、空間的に連続な作業空間を構築している [15]。図 2.13 に、連続的な作業空間を用いた共同作業の様子を示す。暦本らのシステムは、天井にプロジェクタを設置することで、PC や、タブレットのモニタに映された情報を、机や壁などの平面上に移動させることを可能としている。カメラ画像をもとに物体を認識し、机や壁、机に置かれたビデオテープ等に PC のディスプレイ上の情報をマウスによって移動することで、指定した場所にプロジェクタを用いて情報を重畳することができる。暦本らのシステムを用いて PC 内の情報を共有することで、対人同士の意思疎通や、作業空間の共有が容易に実現されている。

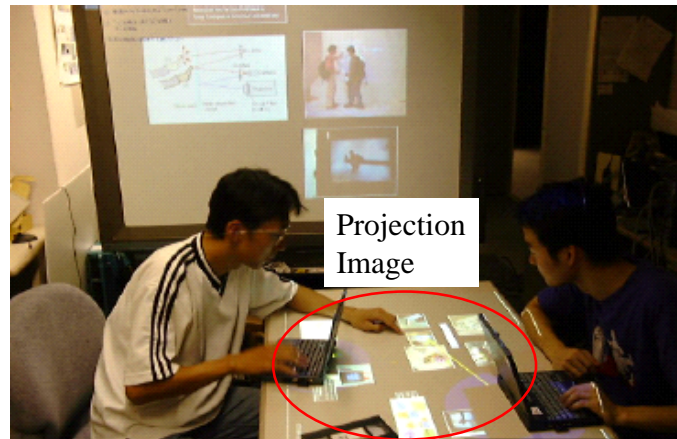


図 2.13: プロジェクタ投影による連続的作業空間 [15]

また、東城らは、プロジェクタを用いた三次元遠隔指示インタフェースを構築している [16]。図 2.14 に映像を対象物に投影した画像を示す。東城らのシステムでは、作業側でカメラとプロジェクタにより構成されたレンジファインダを用いて作業空間の形状を計測する。指示者側の操作画面上には計測されたデータをもとに作成された CG モデルが提示され、指示者が操作画面でマウスを用いて操作を行うと、作業空間上に液晶プロジェクタにより指示が投影される。作業対象の三次元形状を計測しているため、指示者の視点や対象の形状に関わらず常に正確な位置に指示を投影することが可能である。また、二組のカメラプロジェクタを用いることにより、対象物の両側からの形状の計測と投影を可能にすることで、作業側によって投影光が遮蔽されてしまう問題に対応している。

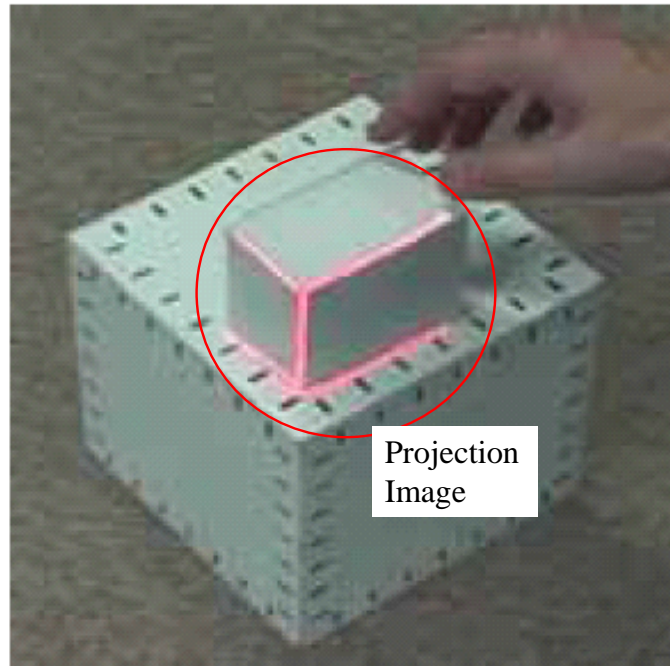


図 2.14: 三次元遠隔指示インタフェース [16]

映像投影型は、対象物に直接映像を投影することにより、ハーフミラー等が不要であり、投影面上で高い融合性が得られるといった利点がある。また、プロジェクタで投影するCGの像を作成する際に、照明を調節することで、光源の影響を再現することが可能である。さらに、作業者に拘束物がない点や、作業対象に直接情報が重畳されるので視点移動をする必要がないといった利点があげられる。しかし、作業対象の表面が情報を鮮明に投影できる光学的な反射特性を持ったものに制限されることや、作業中に対象を手で覆うとCGが見えなくなることや、投影面に凹凸がある場合に投影像が歪むといった問題が挙げられる。

2.3.6 情報提示手法まとめ

最後に上に挙げた情報提示の各手法の利点、欠点を表 2.1 にまとめる。

2.4 AR 技術における位置姿勢合わせ手法

本節では、拡張現実感における位置および姿勢合わせ手法について述べる。位置および姿勢推定の手法を、センサによる位置および姿勢合わせ手法、画像処理による位置および姿勢合わせ手法の二種類に分類し、それぞれの特徴について述べる。画像処理による位置合わせおよび姿勢合わせ手法に関しては、AR マーカ等の幾何形状目印を用いたマーカベースの位

表 2.1: 情報提示手法まとめ

| 情報提示手法 | 利点 | 欠点 |
|---------|-----------------------|-----------------------------|
| デスクトップ型 | システムの構築が容易である。非拘束である。 | 視線移動がある。実物体との対応付けが必要である。 |
| HMD 型 | 両手が自由である。視点移動がない。 | 視野が狭くなる。拘束感がある。 |
| ハンドヘルド型 | 視界を制限しない。非拘束である。 | 両手での作業が不可。カメラ視点とユーザ視点が異なる。 |
| HUD 型 | 視点移動がない。位置合わせ精度が高い。 | CG 重畳場所が制限される。ハーフミラーが必要である。 |
| 映像投影型 | ハーフミラーが不要である。視点移動がない。 | 対象物が制限される。対象物が隠れると投影できない。 |

置姿勢合わせ手法と、事前に作成したトラッキング対象の三次元形状を用いるモデルベースの位置姿勢合わせ手法に分類して説明する。

2.4.1 センサによる位置および姿勢合わせ手法

センサによる位置および姿勢合わせは、磁気センサやジャイロセンサ、加速度センサ、GPS(Global Positioning System) 受信機を対象物に取り付け、センサの値から物体の位置および姿勢を算出する [17-20]。センサのみを用いた位置姿勢合わせは、画像処理を用いる手法に比べて計算コストが低いため、スマートフォンでも容易に処理できる。また、視点や環境の変化にロバストであり、ユーザやカメラの位置姿勢を容易に計測することができるため、作業空間やユーザの身体的動作が制限されることがないといった利点が挙げられる。

しかし、AR システムに応用する場合に、センサのみによる位置合わせではカメラとセンサの 3 次元位置および姿勢の関係を精密に測定しなければならない。また、細かい作業等を AR で支援する際には、センサや GPS のみでは計測値の僅かな誤差や遅延が現実環境への仮想物体の CG の重畳に大きな誤差を引き起こしてしまう。また GPS 受信機を用いた位置・姿勢推定は、数十 m 程度の誤差が生じてしまうため、厳密な位置合わせを要求しない屋外の広大な空間での利用に限られる。図 2.15 にセンサによる位置・姿勢推定システムの例として、GPS 受信機と加速度センサおよびジャイロセンサを搭載した INS(Inertial Navigation System) を併用した事例を示す。



図 2.15: 屋外での位置・姿勢推定に用いられるセンサ外観 [18]

2.4.2 画像処理による位置および姿勢合わせ手法

画像を用いて実物体の三次元位置および姿勢を求める方式はセンサを用いる方法に比べて、必要なセンサがカメラのみであるために費用が安く、またセンサとカメラ間の正確なキャリブレーションが不要であるといった利点がある。しかし、計算量がセンサと比べて多いという問題がある。画像処理を用いた位置姿勢合わせ手法は、形状と色が既知である基準マーカを用いるマーカベースの位置姿勢合わせ手法 [21] [22] と、追跡対象の三次元モデルを用いる位置姿勢合わせ手法 [23] [24] の二種類に大別できる。

マーカベースの位置姿勢合わせ手法

マーカベースの位置姿勢合わせ手法は、幾何形状が既知である人工的なマーカを追跡対象に貼付し、カメラから見たマーカの大きさと傾きからカメラとマーカ間の相対的な位置関係を算出する。二次元画像マーカを用いた事例として ARToolKit [21] が挙げられる。

ARToolKit の基本処理は、PC に接続されたカメラによって画像を入力し、カメラ画像中に映る正方形のマーカを抽出、位置姿勢計算し、マーカ上に仮想物体を表示することである。図 2.16 に示すように、入力された画像を二値化し、矩形領域の抽出、四頂点の座標値にもとづくマーカ座標系からカメラ座標系への変換行列の算出を行った後、マーカ座標系で表現された仮想物体の表示を行う。

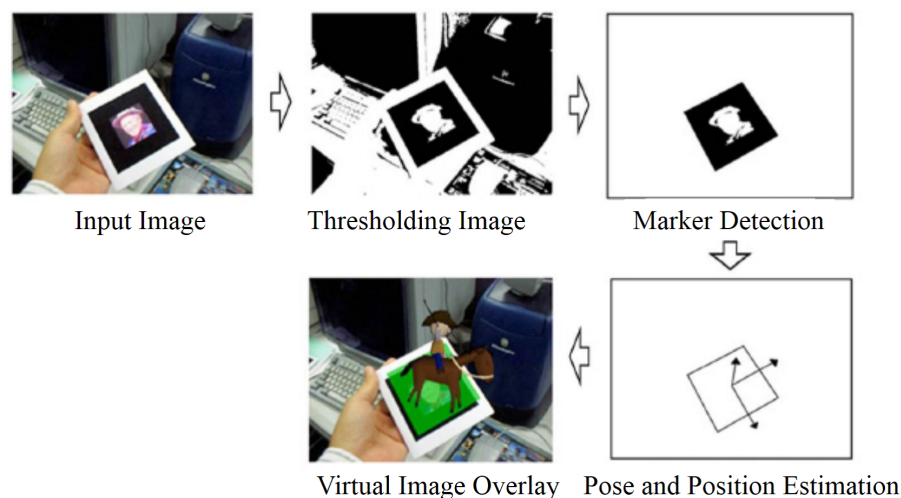


図 2.16: ARToolKit の処理手順 [21]

マーカを用いた位置姿勢合わせは、マーカが撮影画像中に入っていれば安定かつ高精度でマーカに対するカメラの位置および姿勢を求めることができる。一方で、AR マーカを作業対象に張り付ける必要があるため、景観やデザイン性を損ねるといった問題がある。これに対して、再帰性反射材を用いた目立たないマーカが提案されている [25]。この手法では、赤外光のみを反射する不可視マーカによって、カメラの位置・姿勢を推定することに成功している。

モデルベースの位置および姿勢合わせ手法

操作対象の三次元形状が既知の場合、一般的に、モデルベースの位置および姿勢合わせ手法が用いられる。モデルベースの手法では、事前に対象物の三次元モデルを作成し、三次元モデルの投影像と画像中の自然特徴点との距離を最小化することで位置・姿勢の推定を実現する。モデルベースの位置姿勢合わせ手法は、特徴点ベースの手法と、輪郭線ベースの手法に大別することができる。

特徴点ベースの手法は Harris [26]、SIFT(Scale Invariant Feature Transform) [27]、SURF (Speeded Up Robust Features) [28] 等の特徴点検出アルゴリズムによって検出される対象物の自然特徴点をフレーム間に対応付けることで、カメラの位置・姿勢を推定する [29] [30]。Skrypnyk らは対象物体から特徴点を検出し、その三次元位置をデータベースに登録するオフライン処理と、入力画像から得られた特徴点とデータベースに登録された特徴点の対応付けを行うオンライン処理によって、対象物体の位置・姿勢を推定している [31]。特徴点ベースの手法は、対象物体の一部が隠れている場合でも可視領域の情報から位置・姿勢推定が可

能である。しかし、輪郭線ベースの手法と比較すると、特徴点検出の計算量が多くなるといった問題がある。また、表面にテクスチャがない物体や繰り返し模様が多く存在する物体に適用することは困難である。図 2.17 に特徴点ベースの手法の例を示す。

Reconstructed feature patches Matched features in the live image



図 2.17: 特徴点ベースの手法 [30]

輪郭線ベースの手法では、対象の線特徴に基づき、位置・姿勢の推定を行う [32] [33] [23]。図 2.18 に CAD(Computer Aided Design) により作成した三次元エッジモデル、図 2.19 に実画像に投影した画像を示す。輪郭線の手法では、対象物の三次元モデルの輪郭線と画像上に映る輪郭線との残差を最小化することで、モデルの位置・姿勢を推定する。この手法は、計算コストが少なく、照明条件の変化に対してロバストであるため、様々な環境において適応可能であるという特徴を持つ。しかし、輪郭線ベースの位置・姿勢合わせ手法は、曲面で構成された物体を対象とする場合、対象の三次元モデルは多数の平面で近似されたものを用いるため、輪郭線抽出による位置・姿勢推定は困難である。

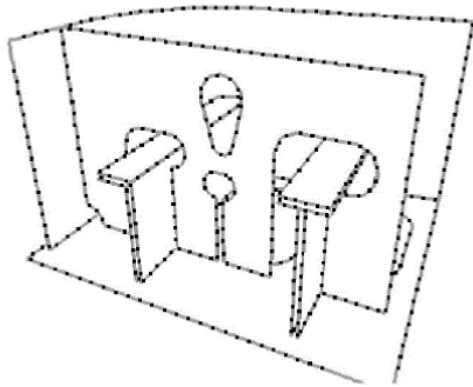


図 2.18: CAD による輪郭線モデル [32]

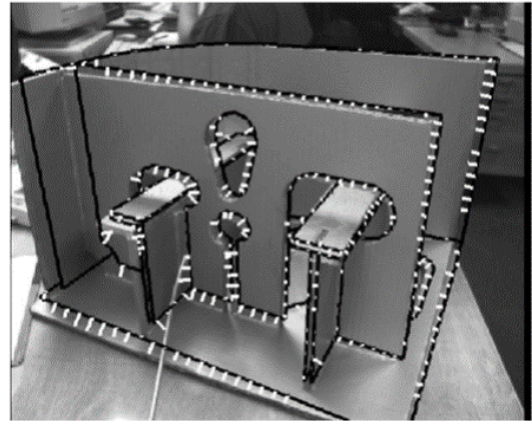


図 2.19: 投影画像 [32]

2.5 本研究の位置付け

本研究では、紙媒体のマニュアルと比較して、以下の要件に重点を置いた機器操作支援システムの構築を目指す。

- 説明書やデバイス等を持つことなく、両手を用いて作業を行うことを可能にする。
- 視点の移動を減らすことで、作業者の負担を少なくする。
- 容易にかつ誤差なく位置姿勢推定を行う。
- 作業対象の状態を常に把握し、誤った作業が行われたときに作業者に修正の指示を出す。

以上の要件を満たすために、情報提示手法として、前節で挙げた手法の中から、両手を用いることができ、視線移動が少ないといった利点を持つ HMD を用いる。また、位置姿勢合わせ手法として、対象機器に貼付するだけで容易にかつ誤差なく位置姿勢推定を行うことができる AR 二次元マーカを用いる。さらに、対象機器の状態、形状を常に把握するために、作業者ではなく対象機器にセンサを取り付けることで、対象機器の状態ならびに作業者からどのような作業が行われたかを認識し、現在の状態に即した教示内容の提示や、作業が誤って行われた場合に、作業者に修正の指示を出すシステムを構築する。

第3章 作業支援システムの構成

本章では、センサによって対象機器の状態を把握し、機器の状態に応じた AR 作業支援を行う、本研究の提案システムの構成について述べる。

3.1 システム概要

本システムの処理手順のフローチャートを図 3.1 に示す。

本システムでは、センサによって対象機器の状態を把握し、機器の状態に応じた AR 作業支援を行うシステムを構築する。作業者はカメラを備え付けた HMD を装着し対象機器の操作を行う。指示情報を適切な位置へ重畳するための作業者 (カメラ) の位置・姿勢推定は、対象機器に貼付した AR マーカーによって行う。対象機器の状態は、対象機器に取り付けられた各種センサによって取得し、対象機器の状態に応じた指示内容を HMD に重畳する。

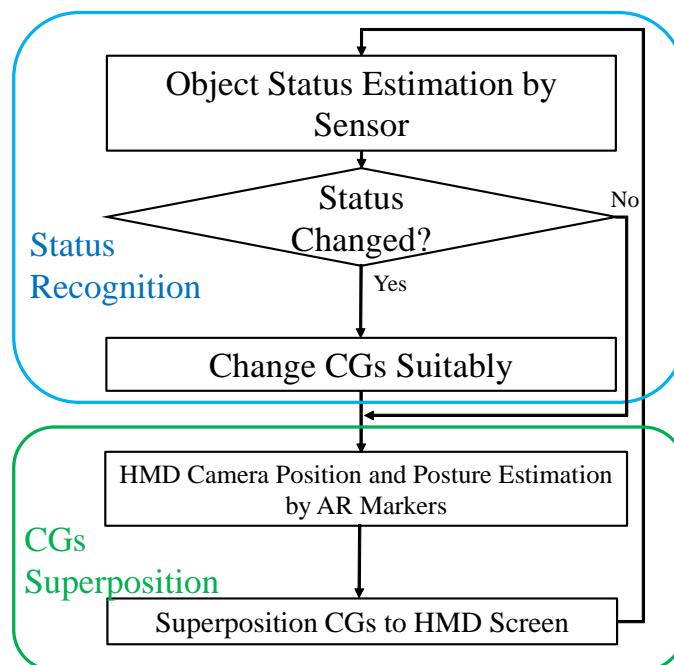


図 3.1: フローチャート

- 対象機器に取り付けられた各種センサによって対象機器の状態を把握する。
- センサによって対象機器の状態変化を検出した場合、変化した状態に対応する指示情報へと変更する。
- HMDに取り付けられたカメラによってARマーカを検出し、マーカに登録された位置姿勢情報から作業者の位置・姿勢推定を行う。
- ARマーカによって取得された位置姿勢情報をもとに、カメラ画像上の適切な箇所へ指示情報を重畳する。

3.2 位置姿勢推定

本節では、ARToolKitを用いた複数のARマーカによる位置・姿勢推定について述べる。

3.2.1 座標系

図3.2に本システムで取り扱う座標系を示す。カメラ座標系を (X_c, Y_c, Z_c) とし、マーカ座標系を (X_m, Y_m, Z_m) とする。画像平面座標系における座標値 (x_c, y_c) は、カメラ座標系の透視変換モデルで表される。HMDはビデオシースルー型を用いるため、HMDのスクリーン座標系における座標値 (x_s, y_s) はカメラにより取得された画像平面座標系における座標値と一致する。

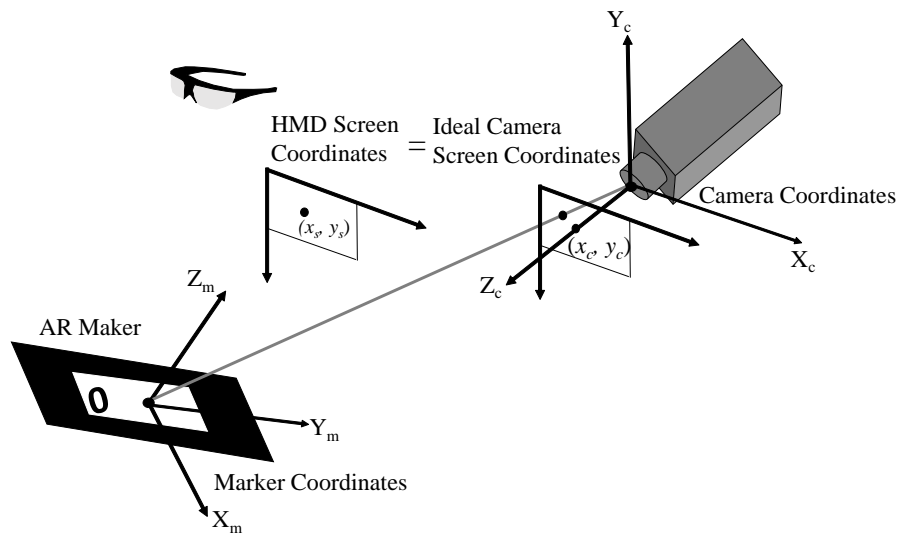


図 3.2: 本システムで取り扱う座標系

3.2.2 マルチマーカ

本研究では、箱に複数のマーカを設置し、マーカが一つでもカメラ画像に収まっていればCGの重畳を行えるようにする。図 3.3 に示す例のように、マーカ 0 が箱の上面に、マーカ 1 が箱の側面に貼付されていて、マーカ 0 上に CG を重畳させたいとする。

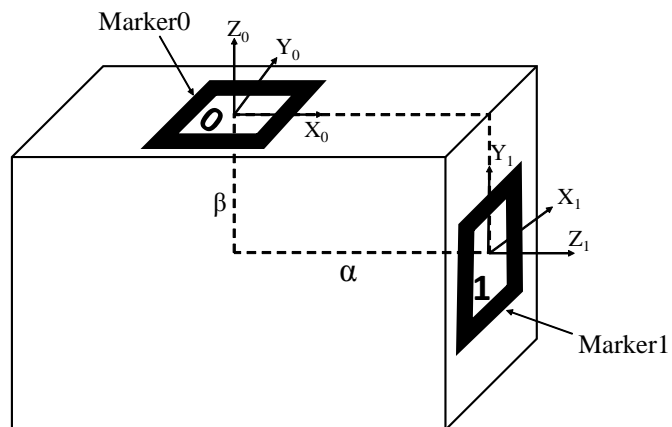


図 3.3: マルチマーカ

マーカ 0 がカメラ画像に収まっている場合、マーカ 0 座標系からカメラ座標系への変換行列を \mathbf{M}_{0C} 、カメラ座標系を (X_c, Y_c, Z_c) とすると式 (3.1) の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{0C} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

マーカ 0 座標系からカメラ座標系への変換行列 \mathbf{M}_{0C} は、ARToolKit の処理によって算出される。 \mathbf{M}_{0C} は回転移動成分 $R_{11} \sim R_{33}$ と、平行移動成分 $T_1 \sim T_3$ を用いて式 (3.2) のように表される。

$$\mathbf{M}_{0C} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

マーカ 0 がカメラ画像に収まっておらず、マーカ 1 がカメラ画像に収まっている場合、ARToolKit の処理によって得られる変換行列は、マーカ 1 座標系からカメラ座標系への変換行列 \mathbf{M}_{1C} であり、式 (3.3) の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{1C} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

一方、マーカ 0 座標系から、マーカ 1 座標系への変換行列を、 \mathbf{M}_{01} とすると、式 (3.4) の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{01} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

式 (3.3)、(3.4) より式 (3.5) が得られる。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{1C} \mathbf{M}_{01} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

式 (3.5) より、マーカ 0 がカメラ画像に収まっていなくてもマーカ 0 座標系からカメラ座標系への変換行列が得られる。従って、マーカ 0 からマーカ 1 への変換行列 \mathbf{M}_{01} 、つまり、マーカ 1 座標系でのマーカ 0 座標系の原点の座標値および軸の対応関係が事前に分かっているならばマーカ 0 座標系からカメラ座標系への変換行列を得ることができる。

図 3.3 の場合を例として、 \mathbf{M}_{01} の導出方法について述べる。 \mathbf{M}_{01} は、平行移動成分 \mathbf{T}_{01} と X_1 周りの回転成分 \mathbf{R}_x と Y_1 軸周りの回転成分 \mathbf{R}_y に分解できる。図 3.3 に示すように、マーカ 0 座標系はマーカ 1 座標系に対して、 Y_1 軸方向に β 、 Z_1 軸方向に $-\alpha$ の平行移動と、 X_1 軸周りに $-\pi/2$ 、 Y_1 軸周りに $-\pi/2$ の回転移動をしているので、 \mathbf{T}_{01} 、 \mathbf{R}_x 、 \mathbf{R}_y は式 (3.6)、(3.7)、(3.8) のように表される。

$$\mathbf{T}_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & 1 & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

従って、 \mathbf{M}_{01} は式 (3.9) で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{01} &= \mathbf{T}_{01}\mathbf{R}_x\mathbf{R}_y \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & 1 & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\alpha \\ 0 & -1 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9) \end{aligned}$$

このように、マーカ同士の相対的な位置関係を事前情報として登録しておくことで、マーカごとの変換行列が算出され、箱に貼付した複数のマーカの中からどのマーカを認識しても、同じ位置に CG を重畳させることが可能となる。

3.2.3 CGによる操作内容の教示

ARToolKitを用いることで、マーカを用いたカメラの位置姿勢推定が可能になり、適切な場所へCGを重畳することができるようになる。提示するCGの種類には、操作箇所や操作方法を三次元オブジェクトを用いて教示するものや、作業段階や操作部分の名称を文章を用いて教示するものがある。図3.4にCG重畳による作業教示例を示す。

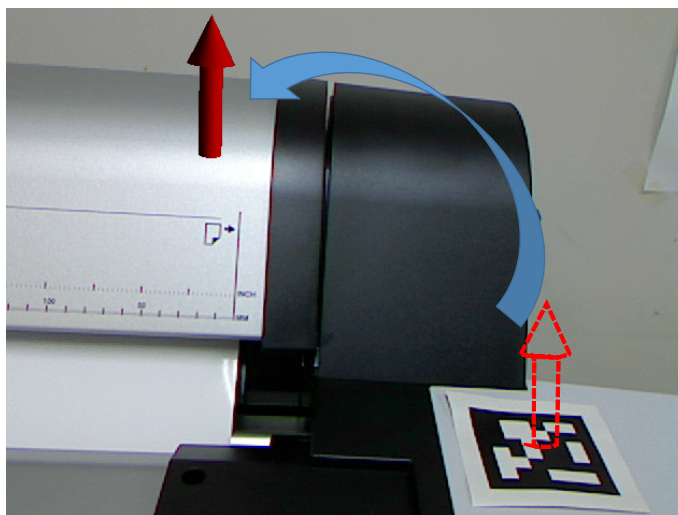


図 3.4: CG 重畳による操作内容の教示

3.3 作業支援マニュアルの作成

本研究では、作業者を支援するための電子マニュアルを作成する。図3.5に示すように、一連の作業を工程ごとに分割する。ある工程において、正しく作業が行われたことが認識されたら次の工程に進み、間違った作業が行われ、誤操作が検出された場合は次の工程には進まず、正しく作業が行われるまで同じ工程を繰り返す。また、検出された誤操作の種類に応じて、作業工程をどこまで戻すのかを分類する。現段階の作業工程が完了される前に、次の段階の作業工程が完了された場合は、現段階の作業が完了されると次の作業の教示を省略して先へと進む。

本システムのような作業支援マニュアルを実現するためには、作業中に常に対象機器の状態や動きを把握し、作業が正しく行われたか、どの種類の誤操作が生じたのかを認識する必要がある。従って本研究では、対象機器にセンサを設置することによって、対象の状態や動きを常に把握し、誤操作に対して適宜対処することを可能にする。

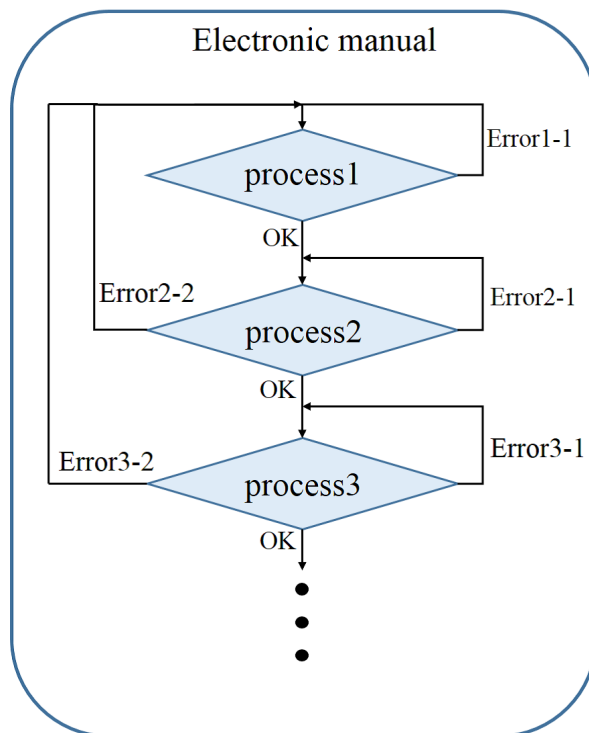


図 3.5: 電子マニュアル

3.4 センサによる状態把握

前節で述べたように、誤操作が検出された場合に、正しい作業が行われている工程まで作業提示内容に戻す電子マニュアルを構築するためには、対象機器の状態や動きをシステムが把握する必要がある。本研究では、対象機器にセンサを設置し、状態や動きを検出する。機器を操作する上で把握する必要がある状態・動きは、以下の三つに大別される。

- 押されたボタンの種類の把握
- 対象機器の物理的な状態変化の把握
- 対象機器に設置されている物体の種類や、設置されている場所、向き of 把握

選択されたボタンの把握は、ボタン自体がセンサとしての役割を持っているので、実現することは容易である。

把握したい物理的な状態変化として、回転する部分の動きや直線的な物体の動きの検出がある。対象機器として電子レンジを例にとると、図 3.6 に示すように開閉部である蓋や、回すつまみ部分が挙げられる。回転部分を検出するセンサとして、ポテンショメータ (可変抵抗器) や、ロータリエンコーダがある。直線的な動きを検出するものとしてはリニアエン

コーダや差動変圧器といったものがある。また、上下に開閉する蓋の状態把握は、重力加速度を測定することで検出が可能となるので、加速度センサを利用することができる。

図 3.6 に示すような電子レンジや、プリンタ等の機器の状態把握において重要な要点として、物体の有無や、物体位置、設置状態の把握がある。検出するセンサとしては、マイクロスイッチや光電センサ、近接スイッチ等がある。

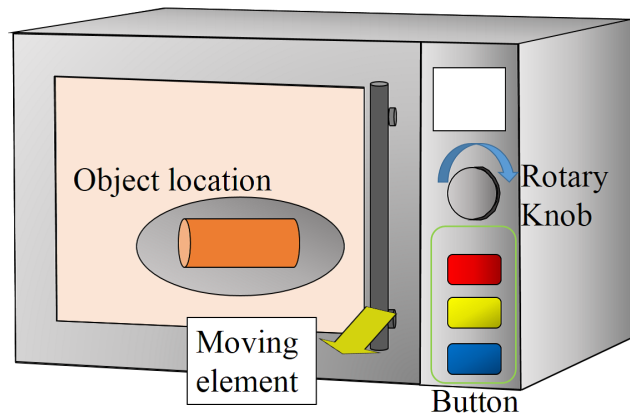


図 3.6: 電子レンジの例

第4章 システムの実装と評価

本章では、システムの実装および評価について述べる。本研究では、対象機器として、プリンタを模した箱を作成し、箱の形状や状態を把握するためのセンサを適宜取り付け、実験を行う。

4.1 対象物体

本システムで対象機器として作成した箱を、図4.1に示す。箱は、可動部である蓋、スイッチ、紙の設置部分からなる。蓋には傾きを検出するセンサとして加速度センサ、紙設置部分には紙の種類や向きを検出するセンサとしてリードスイッチをそれぞれ設置する。

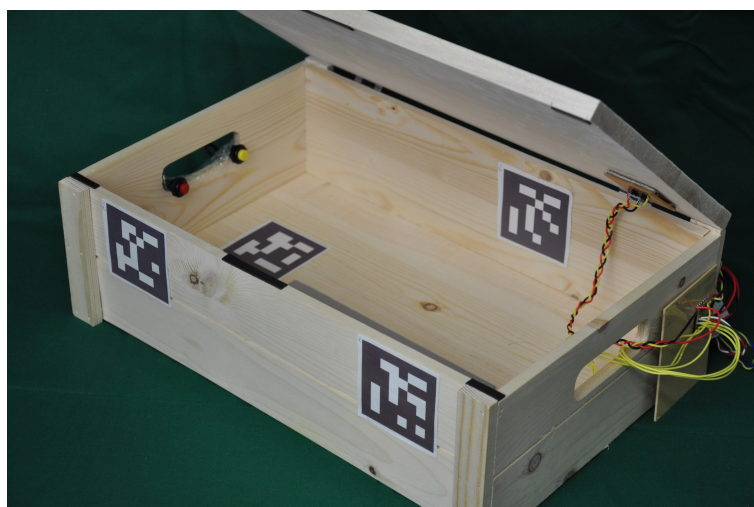


図 4.1: 作成した箱

4.2 状態検出

作成した箱の中から検出する主な情報として、ボタンの押下状態、蓋の開閉状態、紙設置部に設置された紙の種類と向きの三種類がある。蓋の開閉状態は、傾きセンサとして加速度センサを、紙設置部の状態検出は、リードスイッチをそれぞれ用いる。

4.2.1 加速度センサによる蓋の傾き検出

箱の蓋部分の傾きを検出するために、加速度センサを用いる。加速度センサは、加速度の変化を電圧の変化として出力するセンサで、主な計測方式にはピエゾ抵抗型と、静電容量型がある。地球上の物体には常に重力加速度 g が加わっているため、加速度センサによって重力加速度を検出することで、水平面からの傾きを推定することができる。図 4.2 に示すように蓋が角度 θ だけ傾いた場合、センサの取り付け方向には重力加速度 g の成分 $g \sin \theta$ が加わることになる。したがって、出力加速度 V_{out} は式 (4.1) で表される。

$$V_{\text{out}} = g \sin \theta \quad (4.1)$$

θ が $-\pi/2$ から $\pi/2$ まで変化すると、 $\sin \theta$ の値は -1 から 1 まで変化する。最も傾いた $\theta = \pi/2$ の時、 $g \sin \theta$ は $1g$ に等しくなる。重力方向の軸に沿って加速度センサを回転させた場合の出力は、正弦波の関係に従うので、加速度から角度への変換は、式 (4.2) に示すように逆正弦関数を使用して行われる。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{V_{\text{out}}}{g} \quad (4.2)$$

傾き θ と加速度センサの出力加速度 V_{out} は、 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ において一対一関係にある。従って、加速度センサから出力される電圧の変化を、傾き角の変化に変換するためには、まずセンサを水平に配置した時の出力電圧を基準として、垂直に配置した時までの変化幅を求めて基準となる電圧値を取得し、現在の電圧と基準電圧の差を求め、最後に逆正弦関数を用いて電圧の差を角度へと変換する。

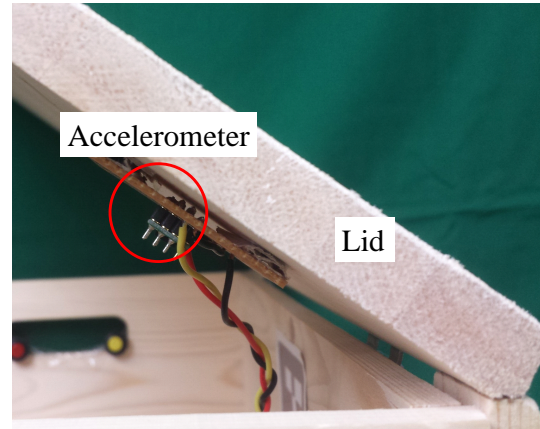
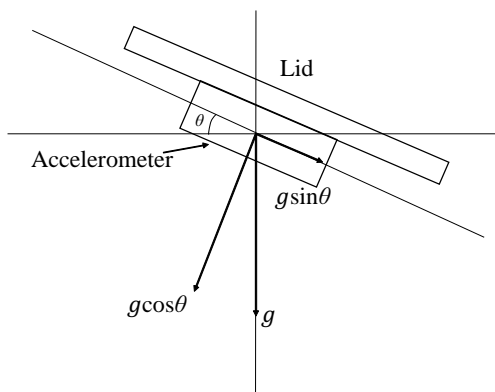


図 4.2: 加速度センサによる傾き検出

4.2.2 リードスイッチによる紙の種類・向き検出

設置されている紙の種類と向きを検出するためにリードスイッチを用いる。リードスイッチとは、磁気型近接スイッチを指し、磁気検出素子と磁石の組み合わせにより、検出物体が接近してきた際の磁束変化を利用して物体の有無を検出するセンサである。リードスイッチは、小さなガラス管の中に、二つの金属板が重なり合う位置で、隙間を開けた状態で封入されている。リードの軸方向に磁界を外部から加えると、図 4.3 のように二本のリードは磁化され、リードを通して中の金属板も磁化し、金属板が互いに引き寄せられて接触し、スイッチを閉じることができる。本来は、一方のリードには磁石の N 極を、もう一方には S 極を近づける必要があるが、実際には片方のリードにだけ近づけても導通させることができる。磁石を遠ざけて磁界を小さくすることで、リードの弾性により回路を開くことができる。また、ガラス管の中には窒素ガスが充填されているため、リードスイッチの接点部は外部環境から遮断され一定の環境を維持できる構造となっており、高い安定性を実現している。

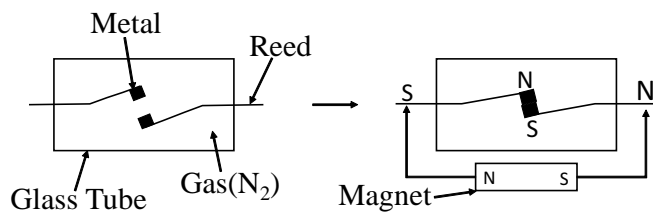


図 4.3: リードスイッチ動作原理

リードスイッチを箱の底面に並べ、紙の種類によって取り付ける磁石の位置を変えることで、設置された紙の向きや種類が正しいか否かを作業者に提示できるようにする。箱内部に作成した紙設置部分および用いる紙の種類を図 4.4、図 4.5、図 4.6 に示す。実験では、正しいである青色の紙と間違いである黄色の紙の二種類を用意した。

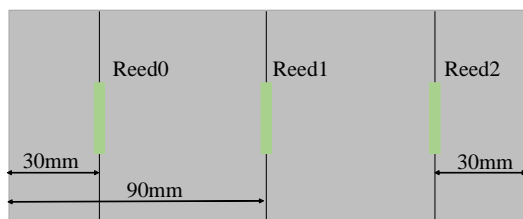


図 4.4: 紙設置部分



図 4.5: 青色の紙

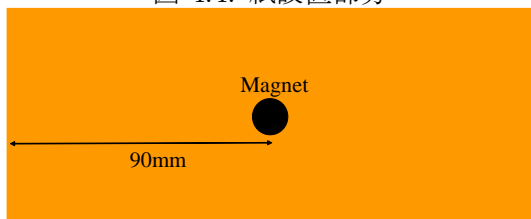


図 4.6: 黄色の紙

青色の紙が正しい向きで設置された場合、リード0が紙に取り付けられた磁石によって閉じられる。青色の紙が間違っただけで設置された場合、リード2が閉じられ、紙が間違っただけで置かれていることをシステムが認識し、誤りを教示する。同様に、黄色の紙が設置された場合、リード1が閉じられ、間違っただけで置かれたことをシステムが認識し、誤りを教示する。図4.7に実際に作成した紙を示す。図4.8に示すように紙の内側に磁石を取り付けている。

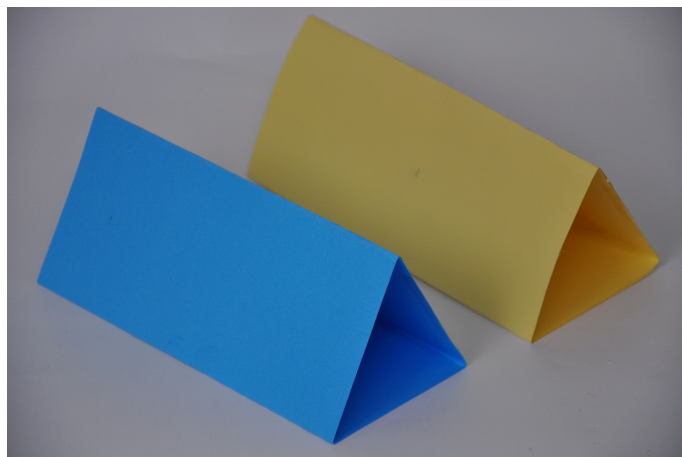


図 4.7: 紙の種類

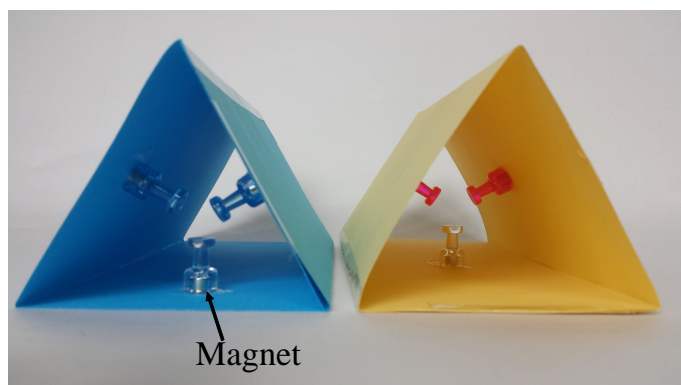


図 4.8: 紙の内側

4.3 作業マニュアル

図 4.9 に作成した箱の作業段階フローチャートを示す。

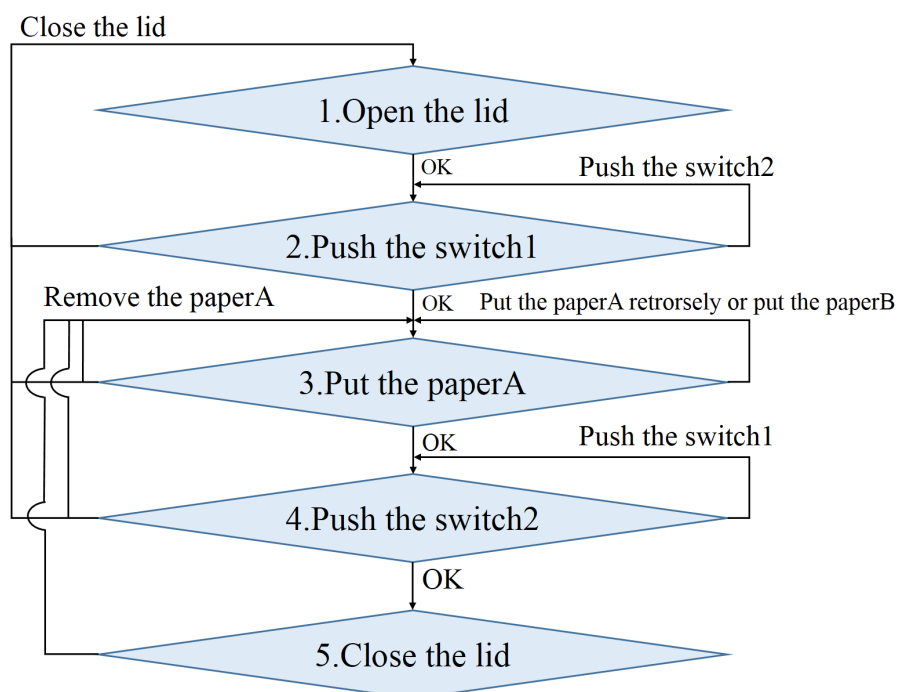


図 4.9: 作業段階フローチャート

フローチャートの作成にあたって、注意した点は以下の通りである。

- スイッチを押す際に、別のスイッチが押されたときは間違っていることを教示する。
- 紙を配置する際に、紙の向きや種類が間違っていたら、間違いを教示する。
- 紙が配置された後に、紙が取り外されたら紙を配置する作業まで戻る。
- 途中で蓋が閉じられたら作業をはじめからやり直す。

4.4 実装システムの構成

本システムの外観図を図 4.10 に、本システムを用いた作業風景を図 4.11 に示す。また、本研究で用いたコンピュータの仕様を表 4.1 に示す。

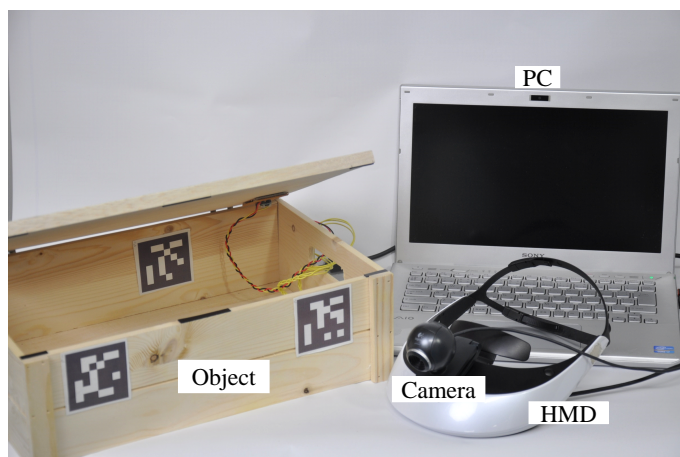


図 4.10: システム外観図

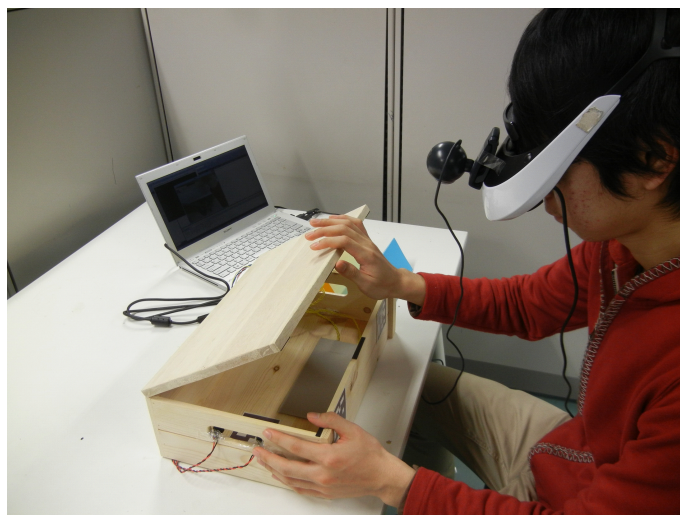


図 4.11: 作業風景

HMD には Sony 社の HMZ-T2 を用いた。また、カメラは、Logicool 社の Webcam C300 を用いた。それぞれの仕様を表 4.2、表 4.3 に示す。また、実物を図 4.12、図 4.13 に示す。

表 4.1: コンピュータの仕様

| | |
|--------|----------------------------|
| 項目 | |
| OS | Microsoft Windows 8.1 |
| CPU | Intel Core i7-3540M 3.0GHz |
| Memory | 12.0GB |

表 4.2: HMZ T-2 仕様

| | |
|---------|-------------|
| 項目 | |
| 解像度 | 1280×720 画素 |
| 視野角 | 約 $\pi/4$ |
| 仮想画面サイズ | 750 インチ |

表 4.3: Webcam C300 仕様

| | |
|-----------|--------------|
| 項目 | |
| 有効画素数 | 130 万画素 |
| 最大フレームレート | 30fps |
| 最大解像度 | 1280×1024 画素 |



図 4.12: HMZ T-2



図 4.13: Webcam C300

次に、対象物の状態計測に用いた回路図を図 4.14 に示す。

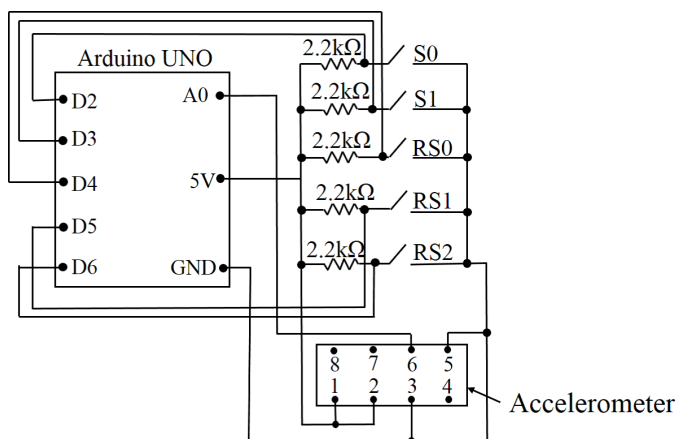


図 4.14: 状態計測に用いた回路図

A/D 変換器には、Arduino UNO を用いた。S は押しボタン式スイッチ、RS はリードスイッチ、A は Arduino のアナログピン、D はデジタルピン、GND は接地を指す。リードスイッチには FR2S-1015、加速度センサには三軸加速度センサ KXR94-2050 を用いた。図 4.15、図 4.16 に Arduino UNO と各種センサを示す。



図 4.15: Arduino UNO

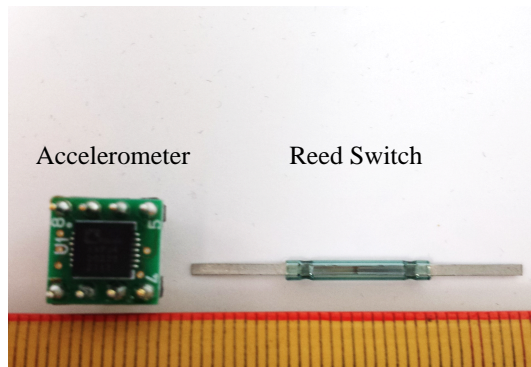


図 4.16: 加速度センサとリードスイッチ

各種センサを取り付けた箱の内装を図 4.17 に示す。

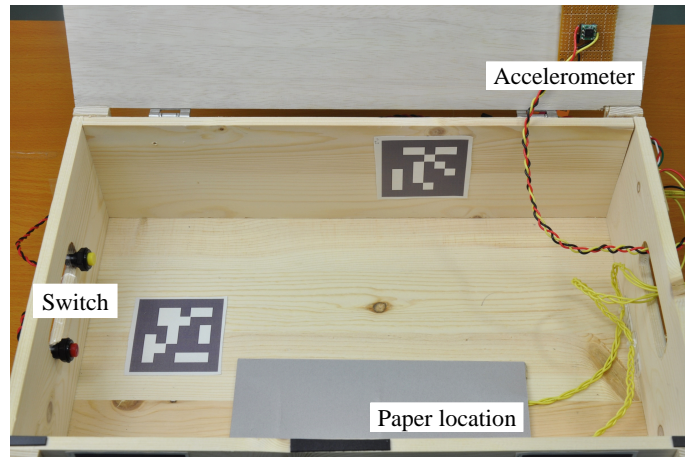


図 4.17: 箱の内装

図 4.18 に、箱に貼付した AR マーカの相対的位置関係を示す。数値の単位は mm である。今回は四つのマーカを使用した。マーカ 0 からマーカ 1、マーカ 2、マーカ 3 への変換行列をそれぞれ \mathbf{M}_{01} 、 \mathbf{M}_{02} 、 \mathbf{M}_{03} とすると、式 (4.3)(4.4)(4.5) のように表される。この変換行列を事前情報として登録しておくことで、どのマーカ座標がカメラによって取得されても、マーカ 0 を基準とした座標位置へと CG を重畳することができる。

$$\mathbf{M}_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -85 \\ 0 & 0 & 1 & -125 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{M}_{02} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -240 \\ 0 & 1 & 0 & -85 \\ 0 & 0 & 1 & -125 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{M}_{03} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -175 \\ 0 & 1 & 0 & -55 \\ 0 & 0 & 1 & -100 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

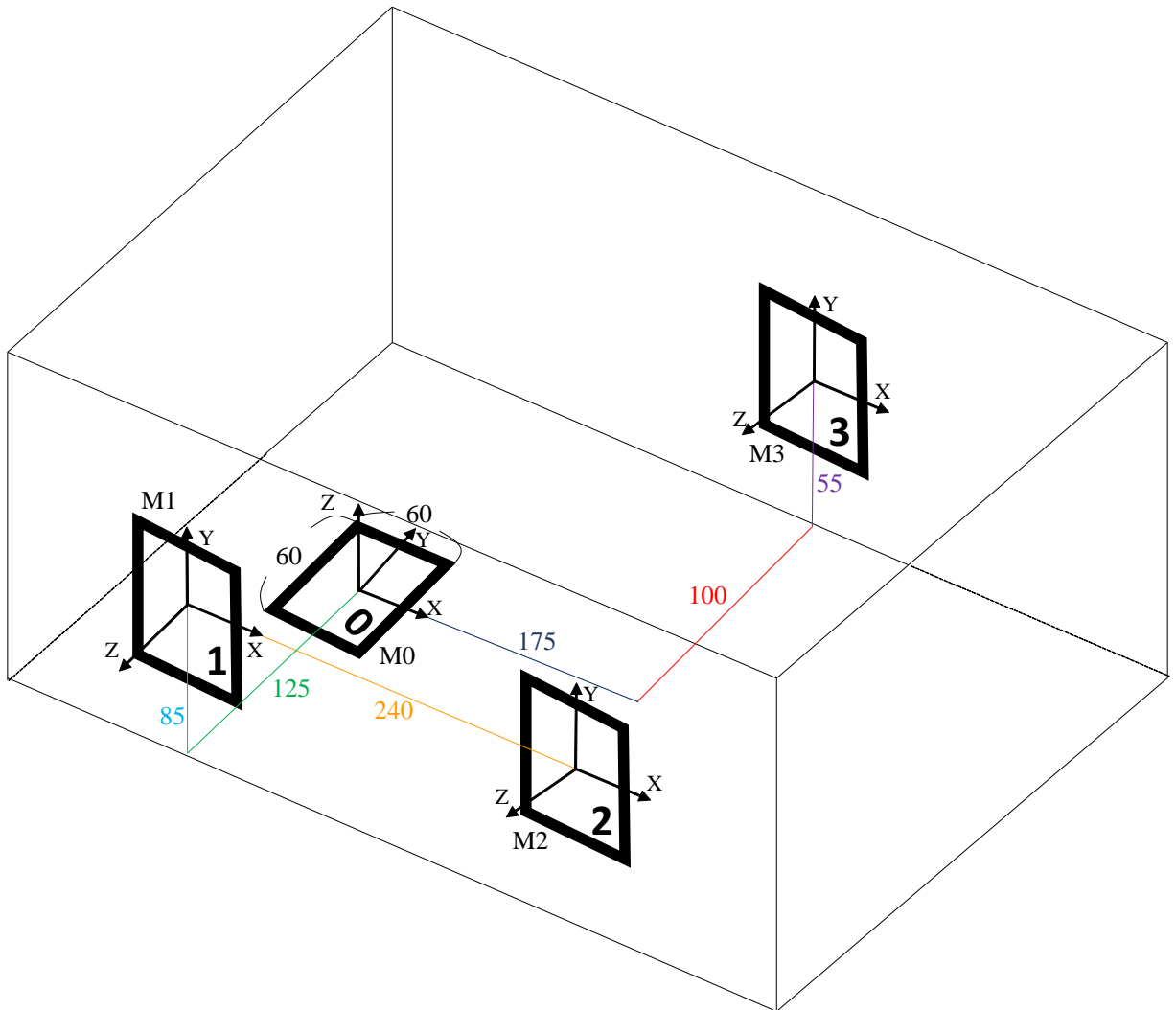


図 4.18: AR マーカの位置関係 単位:mm

4.5 動作確認

構築したシステムが、作業段階に応じた教示内容を正しく表示できているかを確認した。図 4.19 にそれぞれの作業段階での教示内容を示す。現段階の作業が正しく行われた場合、作業が完了したことをシステム側が認識し、次の作業段階の教示内容へと進むことを確認した。

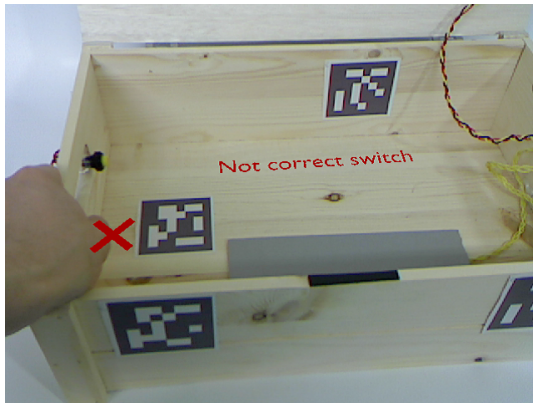


図 4.19: 作業段階別教示内容

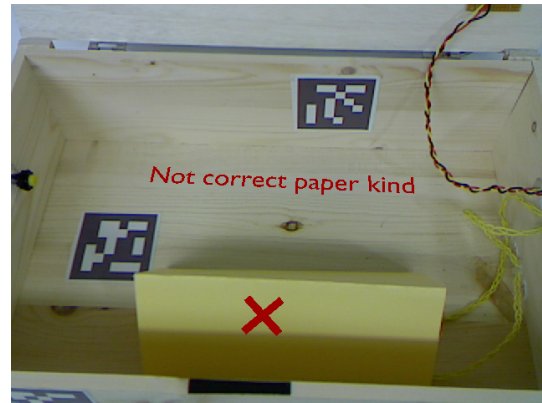
図 4.20: 作業段階動画

次に、間違っただ作業が行われた場合に誤りが提示されているかを確認した。図 4.21 に教示内容を示す。予測されるそれぞれの間違いに対して、間違いに応じた教示内容が提示されていることを確認した。

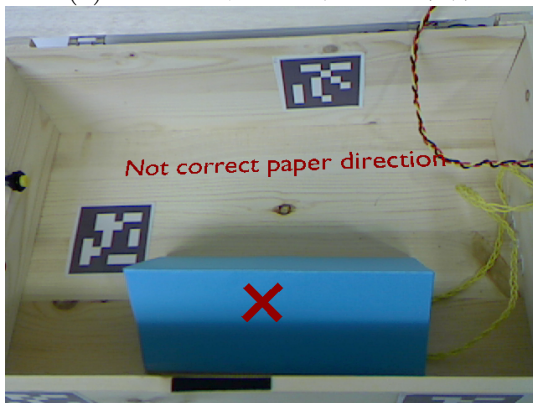
また、作業の途中で蓋が閉められた場合や、紙が配置された後に何らかの形で紙が取り除かれた場合に、作業段階を適切な段階まで戻り、再度蓋を開ける段階や、紙を配置する段階の作業教示が行われていることを確認した。



(a) 別のスイッチが押された場合



(b) 間違った種類の紙が置かれた場合



(c) 紙の向きが間違っていた場合

図 4.21: 間違った作業が行われた場合

図 4.22: 誤り教示動画

4.6 被験者実験による作業時間および誤り数の比較

本システムの有用性を示すために、紙に書いたマニュアルを用いて作業を行った場合と、本システムを用いて作業を行った場合の作業完了までの時間および作業完了時の誤りの数を比較する被験者実験を行った。

被験者実験に用いた紙のマニュアルを図 4.23 に示す。

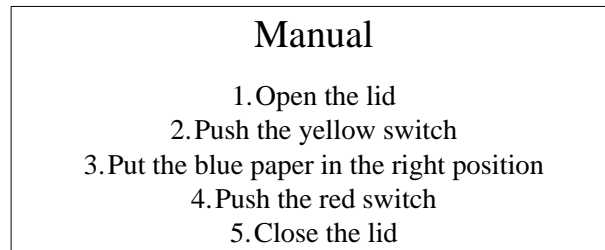


図 4.23: 実験に用いた紙マニュアル

20代の男性10名を被験者とした。被験者のうち5名に紙に書いたマニュアルを用いて作業を行ってもらい、残りの5名に本システムを用いて作業を行ってもらった。

表 4.4 および表 4.5 に結果を示す。

表 4.4: 紙に書いたマニュアルを用いた被験者の作業結果

| 作業者 | 作業時間 (秒) | 誤りの数 (個) |
|------|----------|----------|
| A | 39 | 1 |
| B | 28 | 1 |
| C | 30 | 0 |
| D | 32 | 0 |
| E | 38 | 1 |
| 平均 | 33.4 | 0.6 |
| 標準偏差 | ±4.36 | |

表 4.5: 本システムを用いた被験者の作業結果

| 作業者 | 作業時間 (秒) | 誤りの数 (個) |
|------|----------|----------|
| F | 44 | 0 |
| G | 25 | 0 |
| H | 37 | 0 |
| I | 40 | 0 |
| J | 29 | 0 |
| 平均 | 35.0 | 0.0 |
| 標準偏差 | ±7.01 | |

紙に書いたマニュアルを用いた被験者の平均作業時間は 33.4 秒、作業終了時の平均誤り数は 0.6 個だった。本システムを用いた被験者の平均作業時間は 35 秒、作業終了時の平均誤り数は 0 個だった。

4.7 考察

紙に書いたマニュアルを用いて作業を行った場合と、本システムを用いて作業を行った場合を比較して、作業平均時間は紙を用いて作業を行った被験者の方が僅かに短かった。作業終了時の誤りの数は、紙に書いたマニュアルを用いた場合、紙を設置する際に向きが間違っていた被験者が二人、スイッチを押したつもりで押せていなかった被験者が一人いた。一方、本システムを用いて作業を行った場合は、作業途中で紙の向きを間違えて設置した被験者はいたが、誤りを教示することで作業途中で被験者が紙の向きを修正し、作業終了時に誤りのあった被験者は一人もいなかった。紙のマニュアルを用いて作業を行った場合は、誤った作業がなされても作業者は次の作業へ進むが、本システムを用いて作業を行った場合は、誤りが検出されたときに作業工程の進行を中断し、誤りが修正されるまで次の作業に進まないため、作業時間が紙に書いたマニュアルを用いて作業を行った場合よりも長くなったと考えられる。

本システムを用いて作業を行った被験者からは、HMDに装着したカメラの視野角が肉眼での視野角よりも狭いため、作業空間全体を認識することができなかったという意見や、作業中にHMDが頭部から外れてしまい、ピントが合わなくなり教示内容が見えづらかったという意見があり、HMDの装着に被験者が慣れていなかった点も、本システムを用いた場合の作業時間が長くなった原因であると考えられる。

今回の実験のために作成した作業マニュアルは、単純な操作が多く、作業工程も少なかつたために、紙に書いたマニュアルと比較して時間的な有意差は見られなかった。提案システムは、文章だけでは理解が難しいような複雑な作業や、同じ操作方法の箇所が複数あるような対象機器の操作を支援をする場合により有用性を発揮することが期待される。

第5章 おわりに

本研究では、対象機器の状態をセンサを用いてシステムが把握することで、作業者に対して現在の作業段階を提示するとともに、作業者が誤った作業を行った場合に、直ちに修正させることが可能なシステムを提案した。

提案した作業段階重畳型機器操作誘導システムでは、プリンタを模した箱を対象に、上下に開閉するフタの動きを加速度センサによって検出し、正しい種類の紙が適切な位置・向きで設置されているか否かをリードスイッチによって検出した。また AR によって、現在の作業段階を示すとともに、操作箇所および操作方法を教示することで、視覚的に理解が容易である作業空間を構築した。さらに、誤った作業が行われた場合に作業工程を適宜戻ることによって、誤った状態のまま作業が進行することを防ぐマニュアルを構築した。

提案したシステムの有用性を確認するために被験者実験を行い、紙に書いたマニュアルにより作業を行った場合と、本システムを用いて作業を行った場合で作業時間および作業完了時の誤りの数を比較した。作業時間の観点では、本システムが紙のマニュアルに対して有意性を示すという結果は得られなかったが、誤りの数では紙のマニュアルを用いて作業を行った被験者が作業完了時に平均 0.6 個の間違いを犯していたのに対して、本システムを用いて作業を行った被験者は間違った作業を行った場合でも作業途中で修正し、誤ったまま作業が完了することはなかったという結果が得られた。

AR による視覚的な作業支援において、本システムのように対象機器の動作や状態を常に把握することにより、作業段階の重畳や誤作業の修正教示といった対話的な操作誘導が可能となり、近年の複雑化する電子機器に対しても、年齢問わず誰もが作業を正しく完了できるようになることが期待される。

謝 辞

本研究は、大阪大学基礎工学部で行ったものである。

本研究を行うにあたり、研究環境を与えて頂き、また日々の進捗報告の際に研究の方向性等に関する多大なるご指導を頂き、また本論文の添削指導をして頂きました大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城理教授に深く感謝するとともに、篤く御礼申し上げます。そして、担当教員として、未熟な私に対して研究テーマを決める段階から実装段階に至るまで、親身に一から相談に乗っていただき、論文の構成に関しても何度も的確なアドバイスを頂きました大阪大学 大学院基礎工学研究科 井村誠孝准教授に深く御礼申し上げます。また、研究室に配属された当初、プログラミングに関して無知であった私に、プログラミングの基礎を教えてくださいました大阪大学 サイバーメディアセンター 黒田嘉宏准教授に心より感謝します。そして、AR や VR に関しての専門的な知識や、実装に関して様々な助言を頂きました大阪大学 大学院基礎工学研究科 浦西友樹助教に御礼申し上げます。また、研究の基本的な進め方や、研究者としての姿勢を、学生に近い立場から丁寧に教えてくださいました大阪大学 大学院基礎工学研究科 吉元俊輔助教に感謝いたします。

また、日頃の研究室生活において大変お世話になった大城研究室の先輩方である高畑裕美氏、三宅正夫氏、井手口裕太氏、旗岡亮氏、松崎成敏氏、横畑亮輔氏、團原佑壮氏、長坂信吾氏、中藤寛己氏、豆野裕信氏、和田章宏氏に御礼申し上げます。先輩方には、研究の進め方から研究室生活の過ごし方に至るまで、多くのことを教えていただき、些細な相談にも気軽に乗って頂きました。また、研究生の Rodrigues Victor Matsuguma 氏には、英語でのコミュニケーションを通じて異文化交流の機会を与えてくれたことを感謝します。そして、研究が行き詰まり、悩んでいる時も励ましあい、お互いに議論を交わし切磋琢磨してきた同期である加藤高浩氏、上西健太氏、川口純輝氏、瀧澤洸氏、永田一真氏、藤浪明成氏、古澤大樹氏に深く感謝します。

最後になりましたが、どんな時も私を優しく見守り応援し、悩んでいる時に励ましてくれた両親に、心から感謝します。

本研究における被験者実験は、大阪大学 大学院基礎工学研究科における人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認 (25-6) を得て行ったものである。

参考文献

- [1] 坂内祐一, 玉木秀和, 鈴木雄士, 重野寛, 岡田謙一. 実物体を用いた MR 空間での遠隔協調作業. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 7, pp. 2465–2476, 2007.
- [2] 坂内祐一, 宮狭和大, 鈴木雄士, 重野寛, 岡田謙一. 作業者視点ステレオ映像を共有する複合現実感遠隔作業支援システム. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 381–389, 2005.
- [3] SONY パーソナルコンピュータ VAIO Duo 13 電子マニュアル
<http://vcl.vaio.sony.co.jp/product/manual/svd1321/contents/tp0000053341.html>
(参照 2014-2-13).
- [4] 後藤道彦, 植松裕子, 斎藤英雄, 仙田修司, 池谷彰彦. 作業空間への教師ビデオ重畳表示による AR 支援システム. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 110, No. 28, pp. 1–6, 2010.
- [5] J. Ou Xilin, S. R. Fussell, and J. Yang. Dove: Drawing over video environment. Proc. MM '03, pp. 100–101, 2003.
- [6] 小河謙二. ウエアラブル PC を用いた保全用情報端末システム. 溶接学会誌, Vol. 74, No. 4, pp. 193–196, 2005.
- [7] A. J. Davison. Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera. In *Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 1403–1410, 2003.
- [8] S. J. Henderson and S. Feiner. Evaluating the benefits of augmented reality for task localization in maintenance of an armored personnel carrier turret. In *Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 135–144, 2009.
- [9] S. Tapio and S. Juha. Dynamic visual assembly instruction for configurable products using augmented reality techniques. *Advanced Design and Manufacture to Gain a Competitive Edge*, pp. 23–32, 2008.

- [10] D. Mogilev, K. Kiyokawa, M. Billinghurst, and J. Pair. AR Pad: An interface for face-to-face ar collaboration. In *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 654–655, 2002.
- [11] 中藤寛己. 碁盤構造のネスティングナビゲーション. 大阪大学基礎工学部卒業論文, 2013.
- [12] 岡林繁. ヘッドアップディスプレイ (hud) の自動車への応用. 日産技報, pp. 65–72, 1989.
- [13] 伴好弘, 和田誠一郎, 佐藤宏介, 千原國宏. 強調現実感による電子部品検査の作業支援環境. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 3, No. 3, pp. 185–191, 1998.
- [14] 伊藤研一郎. シミュレータを用いた自動二輪用ヘッドアップディスプレイによる情報提示に関する研究. 慶應義塾大学大学院修士論文, 2012.
- [15] J. Rekimoto and M. Saitoh. Augmented surfaces: A spatially continuous work space for hybrid computing environments. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 378–385, 1999.
- [16] 東城賢司, 日浦慎作, 井口征士. プロジェクタを用いた3次元遠隔指示インタフェースの構築. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 169–176, 2002.
- [17] T. Hollerer, J. V. Pavlik, and S. Feiner. Situated documentaries: Embedding multimedia presentations in the real world. pp. 79–86, 1999.
- [18] 神原誠之, 横矢直和. RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感. 電子情報通信学会技術研究報告., Vol. 104, No. 572, pp. 37–42, 2005.
- [19] R. Tenmoku, M. Kanbara, and N. Yokoya. A wearable augmented reality system using positioning infrastructures and a pedometer. pp. 110–117, 2003.
- [20] C. Randell, C. Djalllis, and H. Muller. Personal position measurement using dead reckoning. In *Proceedings of The Seventh International Symposium on Wearable Computers*, pp. 166–173, 2003.
- [21] H. Kato and M. Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Proceedings of the 2Nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality*, pp. 85–94, 1999.
- [22] 羽原寿和, 町田貴史, 清川清, 竹村治雄. ウェアラブルPCのための画像マーカを用いた広域屋内位置検出機構. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 103, No. 640, pp. 77–82, 2004.

- [23] H. Wuest, F. Vial, and D. Stricker. Adaptive line tracking with multiple hypotheses for augmented reality. In *Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 62–69, 2005.
- [24] Georg K. and David M. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces. In *Proc. Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, November 2007.
- [25] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和. 不可視マーカを用いた位置・姿勢推定システムの構築および評価. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 107, No. 242, pp. 73–78, 2007.
- [26] C. Harris and M. Stephens. A combined corner and edge detector. In *Proc. of Fourth Alvey Vision Conference*, pp. 147–151, 1988.
- [27] D. G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110, 2004.
- [28] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool. Speeded-up robust features (SURF). *Comput. Vis. Image Underst.*, Vol. 110, No. 3, pp. 346–359, 2008.
- [29] Y. Genc, S. Riedel, F. Souvannavong, C. Akinlar, and N. Navab. Marker-less tracking for ar: A learning-based approach. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 295–304, 2002.
- [30] R. Bastos and J. Miguel S. Dias. Fully automated texture tracking based on natural features extraction and template matching. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 180–183, 2005.
- [31] I. Skrypnik and D. G. Lowe. Scene modelling, recognition and tracking with invariant image features. In *ISMAR*, 2004.
- [32] T. Drummond, IEEE Computer Society, and Roberto Cipolla. Real-time visual tracking of complex structures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24, pp. 932–946, 2002.
- [33] V. Lepetit and P. Fua. Monocular model-based 3d tracking of rigid objects: A survey. In *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, pp. 1–89, 2005.