

平成 2 6 年度修士論文

ジェスチャUIと光学シースルーHMDによる
ハンズフリーマニュアルの提案

大学院情報システム学研究科
情報ネットワークシステム学専攻

学 籍 番 号 : 1352017

氏 名: 千竈 航平

主任指導教員: 入江 英嗣 准教授

指 導 教 員 : 吉永 努 教授

指 導 教 員 : 森田 啓義 教授

提出年月日: 平成 2 7 年 1 月 2 6 日

(表紙裏)

目次

第1章	序論	1
第2章	関連研究	3
2.1	HMD に親和性の高いハンドジェスチャUI	3
2.2	仮想空間の利用方法	4
第3章	提案	5
3.1	ジェスチャUI と光学シースルー HMD によるハンズフリーマニュアル	5
3.2	マニュアルをハンズフリーで参照	5
3.3	作業に対応するマニュアルの選択	5
3.4	ハンドジェスチャによるマニュアル操作	6
3.5	HMD 搭載のカメラを利用した記録	6
第4章	実装	8
4.1	実装環境	8
4.2	提案システムの処理の流れ	8
4.3	ハンズフリーマニュアルの表示方法	9
4.3.1	二次元バーコードから文字列取得	9
4.3.2	表示システムの実装	10
4.3.3	Body-stabilized なマニュアルの表示法	12
4.4	ジェスチャによるハンズフリーマニュアルのページ送り/戻し	12
4.4.1	ハンドジェスチャのロバストな認識	12
4.4.2	ハンドジェスチャ	12
第5章	評価	14
5.1	ハンズフリーマニュアルの基本性能に関する評価	14
5.1.1	実験環境	14
5.1.2	評価結果	14
5.2	料理の支援	20
5.2.1	実験環境	20
5.2.2	料理支援の評価結果	21
5.3	工業製品の組立の支援	22
5.3.1	実験環境	22
5.3.2	工業製品の組立支援の評価結果	30
第6章	議論	33
6.1	工場における使用試験及び実務者評価	33

第 7 章 結論	35
謝辭	36
参考文献	38

目 次

3.1.1 提案システム図	6
3.5.1 ファイルでページごとに属性を決定	7
4.2.1 提案システム処理フロー	9
4.3.1 表示システムフロー	10
4.3.2 マニュアルのページ作成	10
4.3.3 マニュアルの表示	11
4.3.4 ヘッドトラッキングのイメージ	13
5.1.1 雑音の少ない背景	15
5.1.2 条件 1:小麦粉で汚した手	16
5.1.3 条件 2:手袋をする	17
5.1.4 画像検索結果(認識成功)	18
5.1.5 画像検索結果(認識不可)	19
5.2.1 環境 1(調理室)	20
5.2.2 環境 2(家庭のキッチン)	21
5.2.3 利用したレシピ画像	24
5.2.4 被験者 1 が調理したマカロニグラタンの完成品	25
5.2.5 被験者 2 が調理したマカロニグラタンの完成品	25
5.2.6 被験者 3 が調理したマカロニグラタンの完成品	26
5.2.7 料理支援時の画面表示についての評価	26
5.2.8 料理支援時の操作感についての評価	27
5.2.9 料理支援のページごとの評価	27
5.3.1 使用した作業台	28
5.3.2 従来の手順書での工業製品組立の様子	29
5.3.3 ハンズフリーマニュアルでの工業製品組立の様子	29
5.3.4 組立支援時の画面表示についての評価	30
5.3.5 組立時に勘違いが発生しなかったかの評価	31
5.3.6 組立支援時の操作感についての評価	32
5.3.7 ハンズフリーマニュアルの組立支援のページ毎の評価	32
6.1.1 工場でのハンズフリーマニュアルの作業者テスト	34

表 目 次

4.1	EPSON MOVERIO BT-200 基本スペック [15]	8
5.1	ページをめくるジェスチャ認識スピードの実験結果	15
5.2	ページをめくるジェスチャ認識スピードの実験結果	15
5.3	人による記録した画像の認識成功率	16
5.4	工業製品の組立実験結果	30

第1章 序論

近年，各社から身につけて持ち歩くことができるコンピュータ，ウェアラブル端末が続々と発表・発売され，より私たちの生活に身近になってきた．その中でも HMD (Head Mount Display) は，メガネ型のウェアラブル端末であり，顔の向きや体勢にかかわらず眼前に仮想画面を表示できるため，研究，商用，エンターテインメント等，様々な用途への発展が期待されている．

1968 年，Ivan Sutherland が Ultimate Display を提案した [1]．Ultimate Display は，天井から吊したディスプレイを頭に固定して眼前に仮想世界の映像を映し出す，世界初の HMD である．以来，ディスプレイや計算機の小型化，高性能化技術により HMD のサイズを小さくすることが可能になり，現在では，EPSON MOVERIO や Oculus Rift また Goole Glass のような HMD として，身につけて移動することができる大きさまで進化した [2, 3, 4]．また，これらの HMD はいずれも一般ユーザーが手に入れることができる価格になってきている．

HMD には没入型 HMD とシースルー型 HMD の 2 種類が存在する．Oculus Rift のような没入型 HMD は，仮想世界の映像を直接目の前に表示して，その映像に没入して利用する HMD である．一方，EPSON MOVERIO や Google Glass のような光学シースルー HMD は，仮想映像を見ながら同時に現実世界を遅延なく見ることができるため，現実世界と仮想世界の協調が可能である．

HMD の利用用途には，エンターテインメントにとどまらず，外部コンピュータとの連携，リアルタイムな情報提供，ユーザの作業支援等が挙げられる．また，ネットワークを通じた情報取得により，その場面に応じた情報の提示も可能である．光学シースルー HMD の利点として，現実と仮想画面で協調して情報を提供できることが挙げられる．したがって光学シースルー HMD は，部品組立や料理といった煩雑な分りにくい作業でも，作業をしながら支援を受けられるツールとしても期待できる．

本研究では，ジェスチャUI と光学シースルー HMD によるハンズフリーマニュアルを提案する．提案システムは，仮想的な手順書を光学シースルー HMD で空間にオーバーレイで表示させ，手のジェスチャで操作するものである．

提案システムでは，特別なデバイスを装着しなくとも状況に合わせて手の色を認識し，ハンドジェスチャにより操作できる．また，HMD に搭載しているジャイロセンサを使うことで，ディスプレイを広く使うことができる．提案システムを使用することで，一人で作業している最中に，光学シースルー HMD を通して，ハンズフリーで仮想的な手順書の参照を実現する．提案システムではユーザを取り巻くようにマニュアルを浮遊させるので，工程が多い場合でも全工程を一度に見渡せる．また，手が汚れているときや手袋をしているときでも，操作が可能といった利点がある．評価として，提案システムにおける基本性能の評価，提案システムによる料理支援の使用感アンケート調査を行った．更に，工業製品の組み立てを従来の手順書と提案システムを利用して行い，作業の正確さと使用感をアンケート調査した．結果，ハンズフリーマニュアルを利用して工業製品の組立を行うと製品の誤りが 1/3 に減少した．

本論文は以下のように構成される．2 章では，関連研究及び関連技術について述べる．3 章では，提案手法について述べ，4 章で実装方法について述べる．5 章では，提案手法を実装して，評価を

行う．6 章では，議論を行い，7 章で結論を述べる．

第2章 関連研究

2.1 HMD に親和性の高いハンドジェスチャUI

HMD を利用すると仮想映像をあたかも現実のように感じることができる．仮想映像を現実のように感じたとき，私たちはつい何もないのに仮想映像へその手を伸ばし触って動かそうとしてしまう．この自然な動きを入力や操作に利用するハンドジェスチャUI は数多くの研究がなされている．Kojima らはビデオシースルー HMD 環境でユーザの手の親指と人差し指とその付け根にカラーマーカーを付けて，色検出された座標 3 点の座標からカメラからの手の距離と親指と人差し指の指先の距離を計算し，仮想の三次元オブジェクトを手もとに表示させ，仮想物体をつかんでいるようなハンドジェスチャを実現している [5]．また，Mistry らは“SixthSense”というハンドジェスチャを利用する UI 提案している．“SixthSense”では，小型のプロジェクターとカメラを胸にブレスレットのように身につけ，プロジェクターで仮想オブジェクトを壁や腕などに投影する．これを胸元のカメラから取得した画像から両手の人差し指と親指の 4 本にカラーマーカーを付けて色認識で指先を認識させ，画像上の座標からそれぞれの指先の動きを追跡してジェスチャとして認識させている [6]．

カラーマーカーを用いて色認識を利用して指先の位置を検出する手法は計算量の軽量化を見込めるが，あらかじめ，指先等の認識させたい場所に，決まった色のものを付ける必要がある．もし，これらの指先の検出をマーカー無しでできるとより直観的なハンドジェスチャUI が実現できる．この利点からマーカーレスで指先を検出するハンドジェスチャUI の研究もなされている．蔵田らによる“ハンドマウス”では，一部制限をかけた EM アルゴリズムを使い手の色領域を学習して手の領域を切り出し，そこから手のモデルとのマッチングによって人差し指の曲げ伸ばしでのハンドジェスチャを実現させている [7]．これに対して，Störring らはビデオシースルー HMD 環境で手の色の認識を行いそこから肌の色だけを 2 値化し，モデルとのマッチングではなく，2 値化画像に異なる同心円上を走査して手の色の連続領域を数えて指の本数と指先の位置を認識することで，指の位置をポインティングでき，親指を横に広げて戻すクリックジェスチャを実現させている [8]．また，加茂らはビデオシースルー HMD 環境の“AirSurface”で手の色と輪郭を用いたマーカーレスの指先認識を行っている．“AirSurface”では，検出された指同士がそれぞれ平行、または直交することを利用して，両手の親指と人差し指で作った矩形ジェスチャを認識し，その手の三次元位置に仮想平面を描画し，その仮想平面に対してハンドジェスチャを行う [9]．

カラーマーカーを用いずハンドジェスチャを行うと，より直観的な UI となるが，マーカーレスでの認識のため画像から手だけを抜き出すのは，雑音や光環境の変化により難しく，アルゴリズムが複雑になり計算量が増える．そのため認識の計算には HMD とは別に計算機を用意して指先を認識していた．これが HMD 端末単体でハンドジェスチャの認識が可能となると，より利便性や可搬性が向上する．これらの利点から我々は端末単体でのハンドジェスチャUI の実現を研究している，そして我々は“AirTarget”という光学シースルー HMD に利用可能な，指をマーカー無しでポインティングデバイスとして用いることができる UI を HMD 端末単体で実現させている．カメ

ラでキャプチャされた画像から手の色だけを検出して2値化し、ノイズを取り除くためモルフォロジー処理を行い、2値化された手の色だけの画像に、輪郭抽出を行い指先の座標を取得する。また、HMDの仮想平面を直接指先で操作する感覚をユーザーへ与えるため、カメラ画像の指先位置とユーザーが見ている指先位置のずれを補正する。そのために現実の指が動く平面と仮想ディスプレイ画面の比率を求め、カーソル位置の座標変換を行い、補正して、ユーザーが見ている指先にカーソルをオーバーレイ表示する [10]。

2.2 仮想空間の利用方法

HMDは仮想映像を常に眼前に表示できるデバイスのため、エンターテインメントにとどまらず、リアルタイムな情報提供、ユーザの作業支援等の利用が考えられる。これらの利用場面には、ユーザーが見ている現実空間に仮想空間の情報をオーバーレイ表示させる技術が必要である。そのためにはビデオシースルー表示と光学シースルー表示の2通りの方式を選択する必要がある。ビデオシースルー方式では、没入型HMDに搭載しているカメラを用いて取得される現実世界の映像に、仮想映像のCGを合成する。この場合、正確な合成ができるが、直接外界を見ることができず、また、カメラの映像からなので微妙に遅延が発生し、視界が限られるため安全に利用するためには制限がかかる。一方、光学シースルー方式では肉眼の視界に対し仮想映像のCGをオーバーレイ表示させる。この場合、仮想映像の表示部分に制限はあるが、視界は広く、現実世界を直接遅延なく見ることができるため、移動中や作業時の支援に適している。光学シースルー方式において、肉眼で見える現実世界のオブジェクトとCGの表示位置を合わせるとき、カメラから取得した画像の現実世界のオブジェクト座標にCGを直接合成して表示するだけでは、カメラの視点とユーザの視点が異なるために意図した座標からずれてしまう。そのため、ユーザの視点の座標に変換して仮想映像を表示しなくてはならない。従って光学シースルー方式は、ビデオシースルー方式と比較して、現実世界のオブジェクトにCGをオーバーレイ表示することが困難である。

HMDを使用した作業支援システムの例として、Billinghurstらは光学シースルーHMDを用いて、協調作業のためのMR(Mixed Reality)環境を提案した [11]。Billinghurstらの手法では頭の向きを測定(ヘッドトラッキング)してCGの表示を調整し、あたかも仮想画面が現実空間に対して静止しているように見える“Body-Stabilized”であり“World-Stabilized”な表示を実現している。この表示方法において、遠隔で協調作業をする人のアバターをユーザのすぐ近くに表示する環境や、同じ場所にいる協調作業をする者同士で空中に浮いたブラウザ画面を共有する環境が示されている。

空間に静止した仮想オブジェクトを仮想窓越しに見るBody-StabilizedなUIは、HMDだけでなく小型プロジェクターにも応用されている。YeeらはPDA端末の小さな画面を窓として、PCマウスの原理を応用し端末を動かすことにより、表示されない外側の広い仮想画面をのぞき見る環境を実現している [12]。また、Caoらは小型のプロジェクターを手に持ち、プロジェクターをモーションキャプチャーで向きを判断し、サーチライトで照らすように大きな仮想画面の一部を表示する環境を実現している [13]。

環境に仮想オブジェクトを静止させるだけでなくユーザが自由に配置を変更できる環境も実現されている。Haらは“AR-Wand”において、ビデオシースルーHMDを装着したユーザがスマートフォンを持ち、AR環境内にある仮想オブジェクトをスマートフォンに搭載されているジャイロセンサとタッチパネルを利用して、仮想オブジェクトの表示位置を適切な速度で三次元的に操作する手法を実現させている [14]。

第3章 提案

3.1 ジェスチャUIと光学シースルー HMD によるハンズフリーマニュアル

本論文では、ジェスチャUIと光学シースルー HMD によるハンズフリーマニュアルを提案する。提案システムは、仮想的な手順書を光学シースルー HMD によって現実空間に浮かせるようにオーバーレイ表示させて、ハンドジェスチャによって操作するものである。図 3.1.1 に提案システム概要を示す。

図の中央にある眼鏡の形態をしたデバイスが光学シースルー HMD、右下の作業するものに付加してあるバーコードを HMD に搭載のカメラで読み込み認識することにより、作業するものの手順書が自動的に選択され、HMD の目の前の空中に Body-stabilized な状態で眼前にオーバーレイ表示され、その手順書をカメラからの画像処理でハンドジェスチャを認識し操作するシステムである。したがって、作業している最中に光学シースルー HMD を通して、ハンズフリーで作業支援を受けられる。加えて HMD に搭載しているカメラの画像処理でマーカレスかつ状況に応じた手を検知し、ジェスチャ認識をして操作を行うため、手が汚れたり手袋をしていたりしていてもハンドジェスチャで操作が可能といった利点がある。

3.2 マニュアルをハンズフリーで参照

現実世界を遅延なく直接見ることができる光学シースルー HMD は、作業中 HMD にマニュアルを表示させることで、作業支援としての利用が期待できる。そこで、作業の邪魔にならず効率良くマニュアルを参照できるような表示方法を考えたい。しかし、すぐに情報にアクセスできるよう常に目の前にマニュアルを表示させておくと、かえって作業の邪魔になってしまう。また、画面端にマニュアルを小さく表示させておいた場合、作業の邪魔にはならないが視認性が悪くなってしまう。加えて、HMD の画面サイズに制限があるため、広く使うためには工夫が必要である。

そのため、ユーザが指定する任意の空間にマニュアルを配置し、ハンズフリーで参照することを実現したい。そこで図 3.1.1 のように、Billinghurst らの Body-Stabilized な表示方法 [11] と Yee や Cao らの表示されない外側の広い仮想画面をのぞき見られる方法 [12, 13] を用いる。ユーザが決定した任意の仮想空間に左から右へ巻物のような連続した空間に、一工程ずつマニュアル用紙を貼り付けていくイメージで表示させ、頭を左右に動かして次の作業と前の作業の確認を行えるようなマニュアルの表示を行う。このように作業中ユーザの任意の位置にマニュアルを表示しつけられ、マニュアルと作業中の手元との最小限の視線移動で作業を効率よく進められる。

3.3 作業に対応するマニュアルの選択

家電の使い方を知るマニュアルは取扱説明書、料理の作り方を知るマニュアルはレシピ、模型や製品の組み立てを行うマニュアルは組み立て手順書のように、マニュアルには数多くの種類が

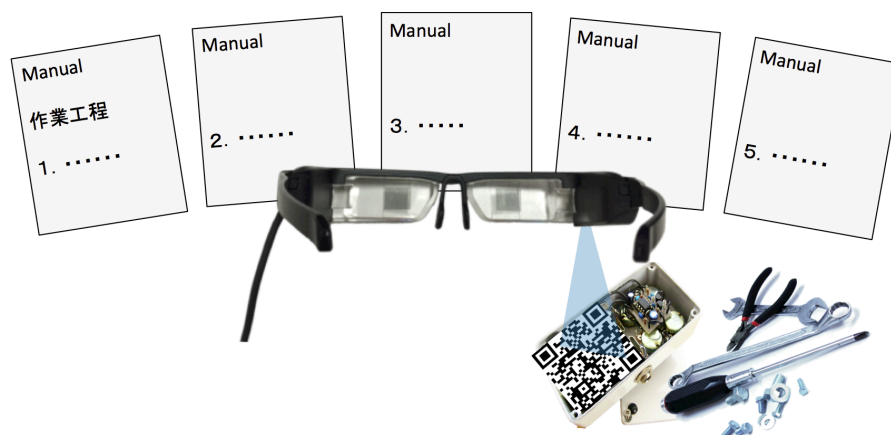


図 3.1.1: 提案システム図

存在する．また，マニュアルを使うときの状況としては，作業の手順や様子が全くつかめず，まずはじめに何から手を付けて良いのかも分かっていない場合が多い．もし，その時の作業に対応したマニュアルが自動で HMD に表示されれば，作業をスムーズに開始できる．

そのため，作業対象物に二次元バーコードを付け，それを HMD のカメラで読み込み認識することで，対応するマニュアルを自動で要求し表示する．この方式により，ユーザは作業対象を見るだけで必要なマニュアルの表示を得ることができる．

3.4 ハンドジェスチャによるマニュアル操作

ユーザが HMD に表示されているマニュアルに対し，前ページへ移動，次ページへ移動といった操作を行いたいとする．このとき，料理の作業中に小麦粉で手が汚れてしまったり，製品組み立てのときに安全のために手袋を装着している場合に HMD 付属のコントローラーが使えないため，手を洗ったり手袋を外したりして作業を中断せざるを得ない状況がしばしば発生する．そのため，HMD 付属コントローラ等ではなく，我々の研究する AirTarget のハンドジェスチャで操作できると作業を中断することがなくなる．しかし，作業によって手が汚れたり手袋を装着したりして手の色が変わると手の色を決め打ちして検知して手を認識し，ハンドジェスチャを行うシステムでは認識のための色の変化に対応出来ずにジェスチャ認識に影響を受ける．そこで，AirTarget を拡張して色環境にロバストにするため，作業の状況によって手の色が変わったとしても，いつでも手の色を抽出してハンドジェスチャをロバストに認識させる．このシステムにより，手が汚れて認識しなくなって手を洗うような作業を中断せずに，作業をしながらマニュアルの操作をシームレスに行える．

3.5 HMD 搭載のカメラを利用した記録

マニュアルに従って作業をしている際，作業の完了した様子や途中の状態を記録したい場合がある．例として，料理の出来上がりを SNS を投稿したい場合や，工場での部品組み立てのような

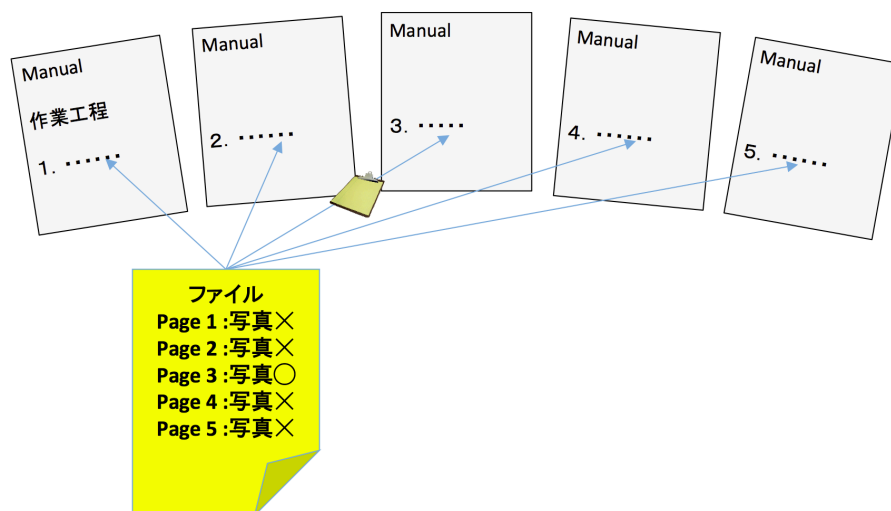


図 3.5.1: ファイルでページごとに属性を決定

途中の状態を記録する必要がある場合が挙げられる．その場合に，マニュアルに従った作業の流れの中で，作業を中断することなく写真撮影ができ，また，撮影した写真が作業のどの段階のものか明確であると効果的な作業支援が可能となる．作業の流れの中で写真を撮影したい場合，デジタルカメラ等の HMD とは別のデバイスを使用する，カメラアプリケーションを使用する，特定のハンドジェスチャに写真撮影を紐づけるといった方法が考えられる．しかしいずれの場合も，一時的に作業を中断する必要がある，テンポ良く作業を進めなくてはならない場合には適さない．

そこで，図 3.5.1 のようにマニュアルのページに写真撮影をするかどうかの属性を付加し，マニュアルをハンドジェスチャによってめくる際に同時に写真撮影が行われるようにする．これにより，明示的なカメラを取るというアクションを行わずともカメラ撮影が可能になる．また，撮影された写真はマニュアルの順番に関連付けられて保存されるので，後から作業内容を確認しやすい．以上から，作業中の写真撮影をスムーズに行えるので，作業記録や品質管理が容易になる．

第4章 実装

4.1 実装環境

光学シースルー HMD の EPSON MOVERIO BT-200 へ提案システムを実装した．MOVERIO BT-200 はヘッドセットとコントローラ両方にジャイロ/加速度/地磁気センサーを備えており，また，ヘッドセットにカメラを有している．基本的な MOVERIO のシステム仕様を表 4.1 に示す．

表 4.1: EPSON MOVERIO BT-200 基本スペック [15]

Categor	Description
メインプロセッサ	OMAP4460 (dual core ARM Cortex A9)
システムクロック	Max 1.2GH (システム負荷，温度に応じて自動調整)
液晶パネル画素数	960x540(QHD) / 16:9 / リフレッシュレート 60Hz
仮想画面サイズ	8 " (仮想視聴距離 50cm 時)
3D 表示	side by side
トラックパッド	シングルタッチ，マルチタッチ (2 本まで可能)
Wi-Fi	IEEE 802.11b/g/n, Wi-Fi Direct
Bluetooth	A2DP, HSP, HID, OPP, SPP
センサー	Gyro / 加速度 / 地磁気
GPS	コントローラーに内蔵
カメラ	ヘッドセットに内蔵 (解像度 VGA)
主記憶装置 (RAM)	1GB
内部保存領域 (emmc)	8GB (うち 2GB はシステム予約)
外部記憶領域	MicroSD / MicroSDHC (Max32GB 可)
システムソフトウェア	Android 4.0.4 / Linux 3.0.21
CPU/ABI	ARMv7 armeabi
Android API レベル	15

4.2 提案システムの処理の流れ

図 4.2.1 に提案システムの処理フローを示す．システムを起動した後，あらかじめ表示したいマニュアル名の文字列で制作した二次元バーコードを光学シースルー HMD に搭載されているカメラで読み込み，その文字列を取得する．この文字列を以降レシピ id と呼ぶ．その後，取得した文字列フォルダと CSV ファイルが HMD のストレージ上で指定される．そして，フォルダ内の画像の数だけ CSV ファイルで写真撮影の有無と画像の位置をマニュアルの 1 ページ毎に紐づける．そ

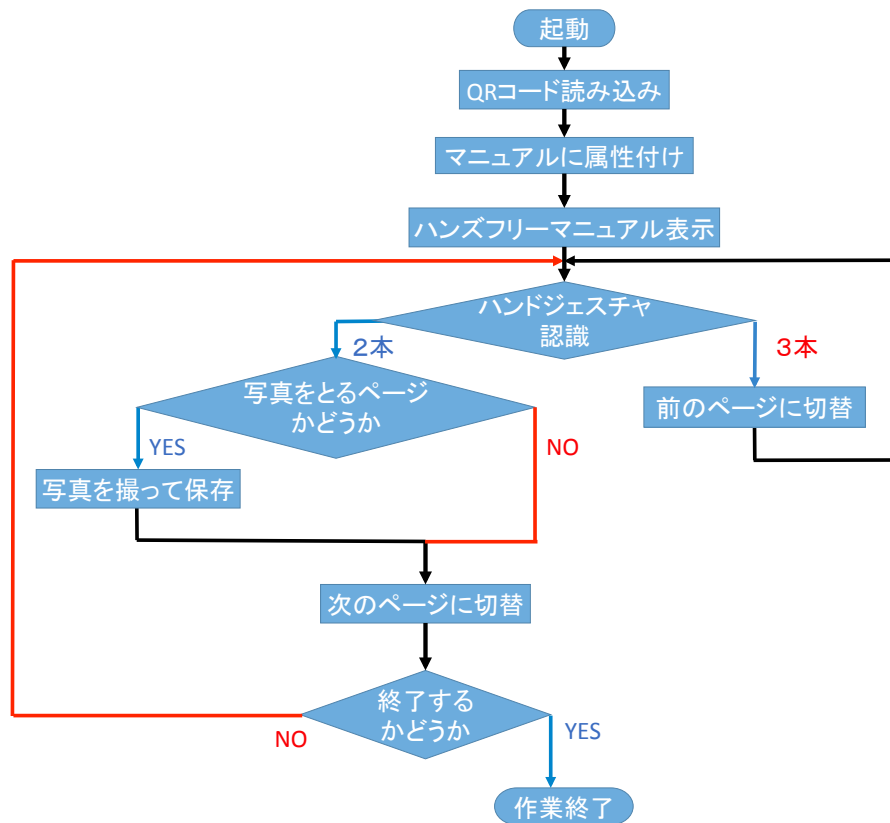


図 4.2.1: 提案システム処理フロー

の後，属性を付けられたマニュアルを 1 ページ毎左から右へ順番に光学シースルー HMD の画面に Body-stabilized な状態でオーバーレイ表示させる．表示されてからは，ハンドジェスチャを認識し指先が 2 本であれば，記録の必要がある工程のページでは写真を保存し，次のページにマニュアルを 1 ページ進める．ハンドジェスチャを認識し指先が 3 本であればマニュアルを前のページに 1 つ戻す．次のページに進めたとき，最後のページであれば作業の終了を判定されアプリケーションが終了するフローになっている．

以下では，二次元バーコード読み込み作業用のハンズフリーマニュアルを選択する実装について，マニュアルに撮影可/不可の属性付け方法について，選択されたハンズフリーマニュアルの表示方法について，ハンドジェスチャによるページ送り/戻し，その時のハンズフリーマニュアルにおける写真撮影の実装について述べる．

4.3 ハンズフリーマニュアルの表示方法

4.3.1 二次元バーコードから文字列取得

起動するとまず二次元バーコードをカメラで読み取る機能が開始する．HMD に搭載されているカメラ映像をディスプレイに表示させ，ユーザはその映像を見ながら二次元バーコード付きのレシピア部品をカメラ画角に入れる．するとシステムは映像から画像を毎フレーム取得しバーコー

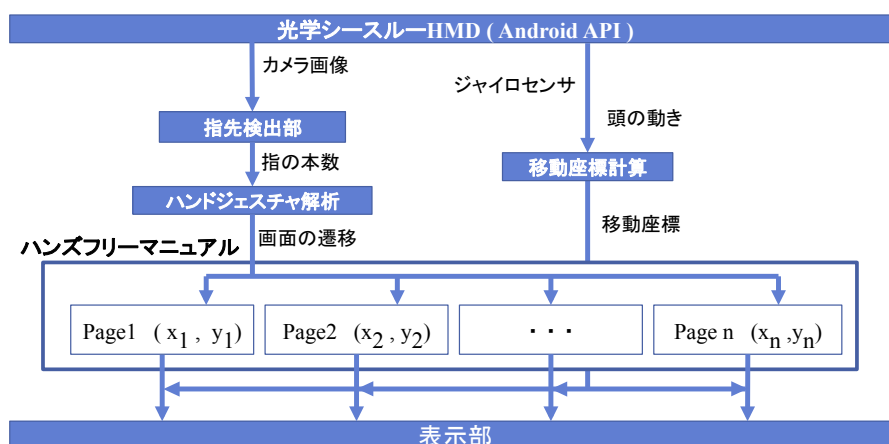


図 4.3.1: 表示システムフロー

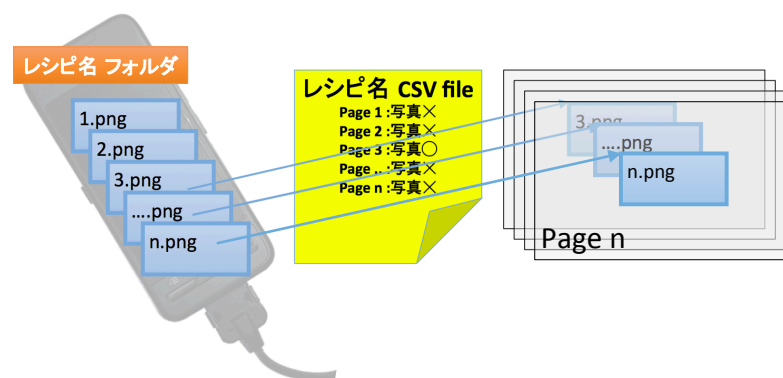


図 4.3.2: マニュアルのページ作成

ドが無い探索する。

取得したフレームからレシピや部品とともにバーコード画像があるフレームを認識すると、フレーム画像からデコードして文字列を取得する。その文字列をレシピ id とする。この二次元バーコードの認識、デコードについてはオープンソースの一次元/二次元バーコードを読込できる Zebra Crossing ライブラリを利用した [16]。

4.3.2 表示システムの実装

図 4.3.1 にハンズフリーマニュアルにおける表示システムのフローを示す。左のカメラ画像からの処理の流れは、ジェスチャ解析と表示部分の協調した流れの模式図で、まず、カメラ画像から画像解析を行い、指先検出を行う。指先検出によって、指先の本数が得られジェスチャ解析が行われる。ジェスチャ解析によってページを操作するジェスチャだと解析されると、ハンズフリーマニュアル全体の座標が移動し、HMD 上にマニュアルが描画されるという処理になっている。



図 4.3.3: マニュアルの表示

次に、右のジャイロセンサからの処理の流れはヘッドトラッキングと表示部分の協調した流れの模式図である。ジャイロセンサから頭の動きが検出されるとその時の移動座標が計算され、その移動座標をハンズフリーマニュアルの1ページごとに座標を変更させHMD上にマニュアルを表示させる処理になっている。

ハンズフリーマニュアルにおける、ページ作成時の属性付けの模式図を図4.3.2に示す、まず、バーコードからレシピidを取得すると、ストレージ内からレシピidと同じ文字列のフォルダとレシピidと同じ文字列のCSVファイルが選択される。ここで、フォルダ内にはマニュアルの各ページが入っており、CSVファイル一行あたりには、対応するマニュアル1ページの属性情報が書かれている。提案システムでは、CSVファイルは対象ページで写真を撮るか撮らないかという情報を持っている。以上のようにレシピidに対応したフォルダとCSVファイルが選択されると、CSVファイルにある属性情報を付加した状態で、ハンズフリーマニュアル上に各ページが作成される。

次に、ハンズフリーマニュアルの各ページが持つ情報と、マニュアル全体を管理する方法について述べる。ハンズフリーマニュアルマニュアル表示の模式図を図4.3.3に示す。ハンズフリーマニュアルは1ページごとに、

- レシピid
- 表示する画像ファイル
- 写真撮影の有無
- ページそのものの座標
- ページ内に表示する画像の座標

という情報を持つ。

マニュアル全体は以下のように制御される。現在見ているページ番号をカウンタに保持し、ページが送られるアクションでカウンタを増加、戻されるアクションでカウンタを減少させることで、現在、目の前に表示されているページ番号を判別する。そして、そのカウンタの増減に合わせて

全ページのマニュアル座標を，HMD ディスプレイの横幅の大きさ分増減させることで，目の前に表示されるページを変更する．以上のようにすることで，ページめくりを実現している．

4.3.3 Body-stabilized なマニュアルの表示法

画面に Body-stabilized でマニュアルを表示するために，ジャイロセンサによるヘッドトラッキングを利用する．ヘッドトラッキングのイメージを図 4.3.4 に示す．ヘッドトラッキングはジャイロセンサを用いて，まず頭が X/Y 軸方向に動いたときの角速度を検知して，頭が動いた数値を毎サイクル取得する．次に，その得られた頭の動きの数値に対して，表示物の表示位置を相殺させるように，表示物の毎サイクルの座標を X/Y 軸の反対の方向に動かす．この毎サイクル表示物の表示座標をずらすことであたかも表示物がその場の空間に静止しているように見えるようになる．

表示物を空間に静止しているようにさせるように見せることにより，表示できる画面に制限なく仮想画面を大きく利用でき，Body-stabilized なマニュアルの表示を実装した．

4.4 ジェスチャによるハンズフリーマニュアルのページ送り/戻し

4.4.1 ハンドジェスチャのロバストな認識

我々は，AirTarget において光学シースルー HMD 向けのジェスチャUI を研究している．これは HMD 端末単体で動作する特殊なデバイスを用いずに画像処理でマーカレスに手を認識し，直観的なジェスチャを行えるため，現実作業に対してシームレスな支援ができる．この利点より，ハンズフリーマニュアルのジェスチャUI に AirTarget を利用した．

また，AirTarget のハンドジェスチャを手の色が作業の状況で変化しても認識するようにした．そのためにシステムのどの処理にいても手の色の登録を再設定できるように，カメラの映像が暗くなる時間が一定値を超えると手の色登録の再設定が起動するようになっている．

4.4.2 ハンドジェスチャ

ハンズフリーマニュアルのハンドジェスチャ操作に AirTarget の指先の本数認識を利用した．ハンドジェスチャは指の本数の変化をトリガとしている．今回，指を 1 本から 2 本にする状態変化のトリガはマニュアルのページ送りを行い，指を 1 本から 3 本にする状態変化ではマニュアルのページを戻す操作を割り当てた．

ハンドジェスチャによりページが送られた瞬間に写真撮影を行っている．カメラの画像フレームは AirTarget 用に利用しているが，ページを送った次の画像フレームを Mat で取得し jpg に変換してストレージに保存する．保存時にユニークなファイル名とするため，マニュアルのページ数と時間を付加した名前とした．

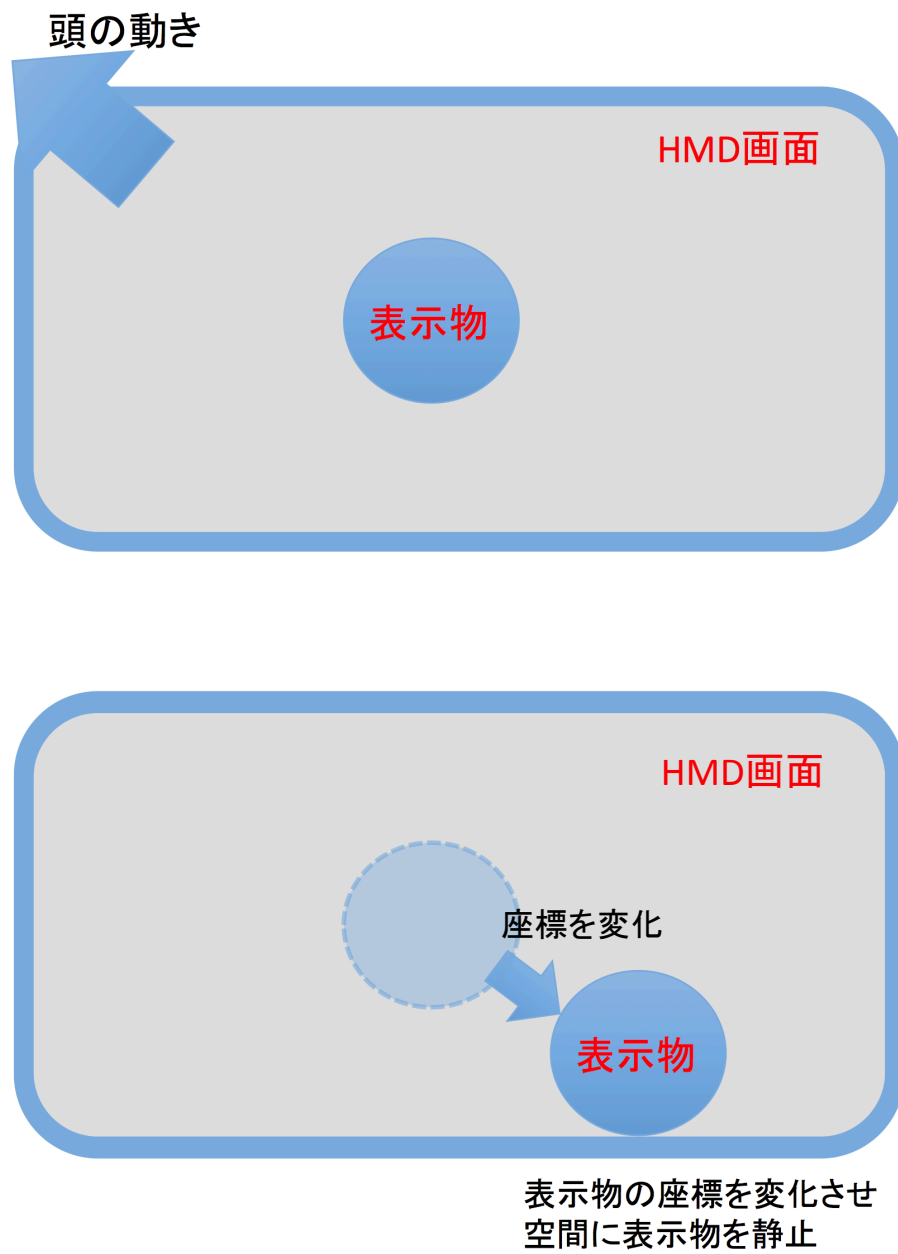


図 4.3.4: ヘッドトラッキングのイメージ

第5章 評価

5.1 ハンズフリーマニュアルの基本性能に関する評価

5.1.1 実験環境

ハンズフリーマニュアルの基本性能として、ジェスチャ認識精度、ジェスチャを利用した記録を認識して製品管理に使えるかを評価する。まず、基本性能の評価では、背景変化による影響を除いて比較するために実験環境として図 5.1.1 のように雑音の少ない背景を用いた。

実験内容として以下の3項目を行い、評価した。

- マニュアルのページをめくるジェスチャ認識スピードの実験
- 手が汚れたり手袋を使ったりしてもマニュアルのページをめくることができるかの実験
- 記録する画像が管理や認識に使えるかの実験

マニュアルのページをめくるジェスチャ認識スピードの実験では、30秒間で何回ジェスチャを認識できるかを計測した。対象ジェスチャとして、ページを送るジェスチャと戻るジェスチャを使用した。6人の被験者に実験をしてもらい、評価を行った。

手が汚れたり手袋を使ったりしてもマニュアルのページをめくることができるかの実験では、ジェスチャを行う手に条件付けをし、ジェスチャ認識が可能かを評価した。ジェスチャを行う手への条件付けとして、図 5.1.2 のように料理中を想定して手が小麦粉で汚れたとき、図 5.1.3 のように工場で安全作業を想定して手袋をつけたときの2種類を用意した。それぞれの条件で、ページめくりジェスチャの認識スピードを測定し、評価した。

記録する画像が管理や認識に使えるかの実験では、システムで記録する画像を人間または機械が管理、認識する場合にどの程度使用可能かを評価した。実験は以下のように行う。まず、ジェスチャを利用して撮影した7パターンの画像を用意する。次に、6人の被験者に56[mm]x42[mm]に印刷した7パターンの画像を見てもらい、一つ一つ何が写っているか口頭で答えてもらい正しく物が認識できる画像かどうかを評価する。更に、google 画像検索に解像度 640x480 の画像を通し、その画像が物を機械的に認識できる画像であるかを評価する。以上より、システムで記録する画像が、人間、機械両方から認識できるかどうかの評価できる。

5.1.2 評価結果

マニュアルのページをめくるジェスチャ認識スピードの評価結果を表 5.2 に示す。

表 5.2 より、ページを送るジェスチャは1分間に12回以上認識されている。また、ページを戻すジェスチャは1分間に6回以上認識されている。以上より一番遅い場合で、1分間に6ページというスピードであった。しかし、1ページあたりの工程には10秒以上の作業である場合がほとんど



図 5.1.1: 雑音の少ない背景

表 5.1: ページをめくるジェスチャ認識スピードの実験結果

被験者	ページ送り [Page/min]	ページ戻し [Page/min]
1	16	10
2	12	12
3	14	8
4	12	6
5	12	8
6	16	16
平均	13.7	10

どなので，1 分間に 6 ページというスピードはページ操作のジェスチャ認識として十分な速度であると考えられる．

手が汚れたり手袋を使ったりしてもマニュアルのページをめくることができるかの実験の結果を表 5.2 に示す．表 5.2 から，小麦粉で粉まみれにした場合，手袋を使った場合ともに，状況に合わ

表 5.2: ページをめくるジェスチャ認識スピードの実験結果

条件	ページ送り [Page/min]	ページ戻し [Page/min]
小麦粉	10	10
手袋	20	14



図 5.1.2: 条件 1:小麦粉で汚した手

せた手の色を認識することで，1 分間に 10 ページ以上めくることが可能である．以上から，ページ操作の認識として十分な速度であることが分かった．

7 人の被験者に記録した 7 枚の画像を見せた時の認識成功率を表 5.3 に示す．

表 5.3: 人による記録した画像の認識成功率

被験者	認識率 %
1	100
2	100
3	100
4	86
5	100
6	100
7	100
平均	98



図 5.1.3: 条件 2:手袋をする

記録した映像を google 画像検索に通し、認識成功の結果を図 5.1.4 に、認識失敗の結果を図 5.1.5 に示す。

表 5.3 , 図 5.1.4 , 図 5.1.5 から、人の場合は 98% , 機械の場合は 71% の精度で認識可能であった。すなわち、システムによって撮影された映像は、人が管理する場合は、98% , 機械が管理する場合は 71% の精度で利用できる。



図 5.1.4: 画像検索結果 (認識成功)

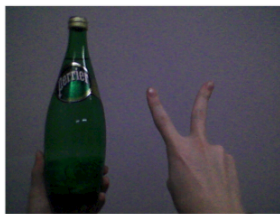


図 5.1.5: 画像検索結果 (認識不可)



図 5.2.1: 環境 1(調理室)

5.2 料理の支援

5.2.1 実験環境

ハンズフリーマニュアルを料理の支援に利用する実験を行った．実際の環境で料理の支援に使えるかを評価するため，実験場所として，エッジが多く肌の色に近い物品が多い，指先を誤認識する可能性のある，生活環境に近い一般的な家庭のキッチン2ヶ所を環境1(図 5.2.1)，環境2(図 5.2.2)として用いた．実験内容として，3人の被験者に依頼し実験を行った．3人の被験者の内，被験者1(料理未経験者)と被験者2(料理経験者)は環境1で，被験者3(料理経験者)は環境2で，同様のレシピでマカロニグラタンを作ってもらった．

表示したマニュアルのページ毎のレシピ画像を図 5.2.3 に示す．ページ毎の文言とレシピ画像はオレンジページ net のマカロニグラタンを引用し作成した [17]．

評価として，ハンズフリーマニュアルの画面表示について，

- 文字のサイズは見やすいか
- 画像のサイズは見やすいか
- レシピ全体のサイズは見やすいか
- 1 ページずつの配置は見やすいか

また，ハンズフリーマニュアルの操作感について，

- めくりやすさ



図 5.2.2: 環境 2(家庭のキッチン)

- ハンズフリーマニュアルは作業の邪魔にならなかったか

次に、各ページについて、

- ハンズフリーマニュアルが役にたったか

上記すべての項目に対して VAS 法でアンケートを実施した。

この VAS(Visual Analog Scale) 法は、両端に対照的な項目を記載した 10cm の横線に、被験者の感じた程度に応じて縦線を書き込み直線上の位置を測るものである。VAS 法を使用することで、被験者の主観的な評価を数値化できるため利用した。

5.2.2 料理支援の評価結果

料理支援を行った時の被験者 1, 被験者 2, 被験者 3 の料理完成写真をそれぞれ図 5.2.4, 図 5.2.5, 図 5.2.6 に示す。このように被験者全員がチキンマカロニグラタンを完成させた。

料理支援時の画面表示についての評価結果を図 5.2.7 に示す。横軸は画面表示についての各項目を表し、縦軸の単位が%で数値が大きければポジティブな結果であることを示している。

以上から、文字、画像、レシピ全体のサイズはどの被験者も 50%以上を示し、問題なく見ることができていることが分かった。1 ページずつの配置については料理経験者の被験者 2 と被験者 3 が 20%前後であり、見にくいという結果を示し、被験者 1 が 90%以上の値を示し、見やすいという結果になった。

このことから、レシピのページ配置において料理経験者において見にくい配置ではあったが、料理未経験者にとって見やすい、料理未経験者用のレシピ配置になっているという評価になった。

次に、料理支援時の操作感についての評価結果を図 5.2.8 に示す。横軸は操作感についての各項目を表し、縦軸の単位は%で数値が大きくなるとポジティブな結果であることを示す。図 5.2.8 から、めくりやすさについていずれの被験者も 30%を下回り、めくりにくいという評価になった。このときの理由は後述する。

料理支援のページ毎の評価結果を図 5.2.9 に示す。横軸は各ページ数を表し、縦軸の単位は%で数値が大きくなるとポジティブな結果であることを示す。以上から、1 ページ目について 3 人の被験者が一番役に立ったことを示した。このページは料理の材料を表示するページで、料理経験者も未経験者も同じように必要なページである。

次に 7 ページは料理経験者と未経験者について大きく差が開いた項目である。このページは文字だけの指示で食材の炒め方を指示するページで、未経験者は上から 3 番目に役立ったと答えているが経験者 2 人は一番低い値を示した。このことから、作業の熟練度によってレシピの必要性が変わっていることが分かった。

また被験者から全体的な意見として、鶏肉を切っている時に鶏肉の色を肌色と認識して誤ジェスチャ認識となっていた、マカロニをゆでているときにタイマーか時計が欲しい、手を汚してもそのままレシピが見られるのが良い、調理器具の種類もレシピにあっているかもという意見があった。

この実験から、ハンズフリーマニュアルは実際に物体を触ってページをめくるわけではないため、勝手に動いてしまったりした時それがストレスになり、めくりにくいという結果につながっていることが言える。これを解消するために、何かしらページをめくる際に視覚的なフィードバックが要ることが分かった。これは作業内容に依存せずハンズフリーマニュアル自体の改良として必要であると分かったため、ページをめくる瞬間に視覚的なフィードバックを行うように改良し、次の実験を行った。

5.3 工業製品の組立の支援

5.3.1 実験環境

料理のコメントを受けて、ページめくり時に視覚的なフィードバック表示を導入する改良を行い、その後、工業製品の組立実験を行った。評価環境として、実際に工場で利用されている、部品組み立て練習用作業台を利用した。作業台を図 5.3.1 に示す。

実験では、5 人の被験者に協力を得、製品 A、製品 B の 2 種類の工業製品についての組立を行った。実験手順は以下のとおりである。まずはじめに、A、B どちらかの製品をランダムに選択し、従来の製品の工場で行っている手順書を使用して組み立ててもらった。次に、先ほど A を選択した場合は B を、B を選択した場合は A を、選択し、ハンズフリーマニュアルを利用して組み立ててもらった。最後に、使用感についてのアンケートに答えてもらった。

工場で行っている手順書の指示として、作業内容と急所と品質基準が記されている。今回の実験で利用した部品は、実際に販売する製品を利用しているため、製品の精度が高く、組み立てが素人には難しい。

また、組み立てに製品 A と製品 B の 2 種類の製品を用いたが、違いが分かりにくくなっており、勘違いが発生するような製品である。従来の手順書で作業中の様子を図 5.3.3 に示す。また、ハンズフリーマニュアルで作業中の様子を図 5.3.2 に示す。ハンズフリーマニュアルに表示したレシピ画像は従来の紙媒体の手順書を参考に作成した。

評価として、

- 工業製品の組立作業について慣れているか

ハンズフリーマニュアルの画面表示について，

- 文字のサイズは見やすいか
- 画像のサイズは見やすいか
- レシピ全体のサイズは見やすいか
- 1 ページずつの配置は見やすいか

また，ハンズフリーマニュアルの操作感について，

- めくりやすさ
- ハンズフリーマニュアルは作業の邪魔にならなかったか

次に，各ページについて，

- ハンズフリーマニュアルが役にたったか

上記の項目について，それぞれ VAS 法でアンケートに答えてもらった．

また今回は，紙媒体での従来の手順書を用いて組み立てたときとハンズフリーマニュアルを用いて組み立てたときの製品について，作業時間と，正しく組み立てられたかどうかを確認して評価を行った．



材料 (3人分)

マカロニ	180g	ホワイトソース	
鶏もも肉	3/4枚 (約180g)	小麦粉	大さじ6
玉ねぎ	3/4個	バター	大さじ4.5
生しいたけ	4個	牛乳	3カップ
ピザ用チーズ	90g	塩	小さじ3/4
バター	塩 しょう	しょう	少々

鶏肉は、小さめの一口大に切る。
玉ねぎは芯を取って横半分に切り、縦に幅1cmに切る。
しいたけは軸を切り、幅8mm程度に切る。



1

鍋にたっぷりの湯を沸かし、マカロニを入れて、袋の表示時間どおりにゆでる。ざるに上げて水けをきる。

2

フライパンを中火で熱し、バター大さじ1を入れて溶かす。
鶏肉を入れて炒め、肉の色が変わったら、玉ねぎ、しいたけを加える。
弱火にし、玉ねぎがしんなりするまで炒める。

3

フライパンにマカロニを加えて炒め、塩、しょう各少々をふる。




4

ホワイトソースを作る。
鍋を弱火で熱し、バターを入れて溶かす。
小麦粉を加えて木べらで手早く混ぜ、さらさらの状態になり、細かい泡が立ってくるまで、焦がさないように気をつけながら炒める。



5

鍋に牛乳を一度に加えて中火にし、泡立て器で混ぜ合わせる。
塩、しょうを加え、煮立ってきたら弱火にする。
泡立て器を木べらに替え、全体をまんべんなく混ぜながら、とろりとするまで煮つめる。



6

【4】のフライパンに、ホワイトソースの2/3量を加えて、全体にからめる。



7

耐熱皿に【7】を等分に入れて、残りのホワイトソースをかけ、ピザ用チーズを全体に散らす。
オーブントースターに入れ、チーズが溶けて焼き色がつくまで、10分ほど焼く。



8

図 5.2.3: 利用したレシピ画像



図 5.2.4: 被験者 1 が調理したマカロニグラタンの完成品



図 5.2.5: 被験者 2 が調理したマカロニグラタンの完成品



図 5.2.6: 被験者 3 が調理したマカロニグラタンの完成品

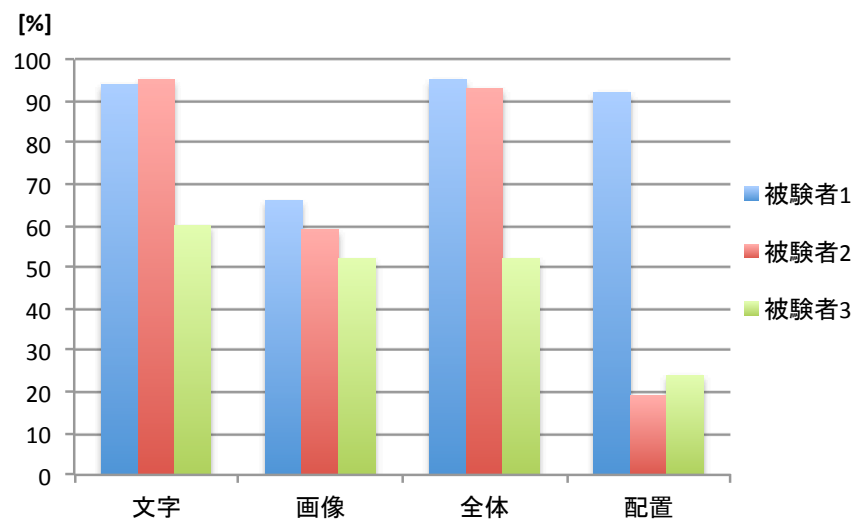


図 5.2.7: 料理支援時の画面表示についての評価

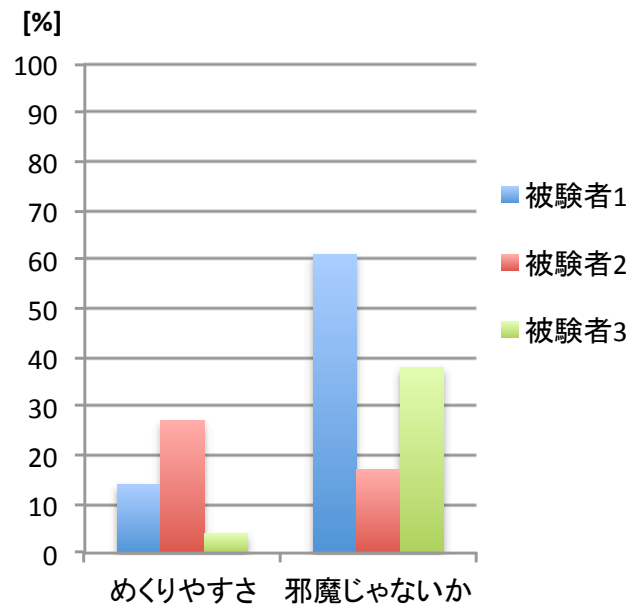


図 5.2.8: 料理支援時の操作感についての評価

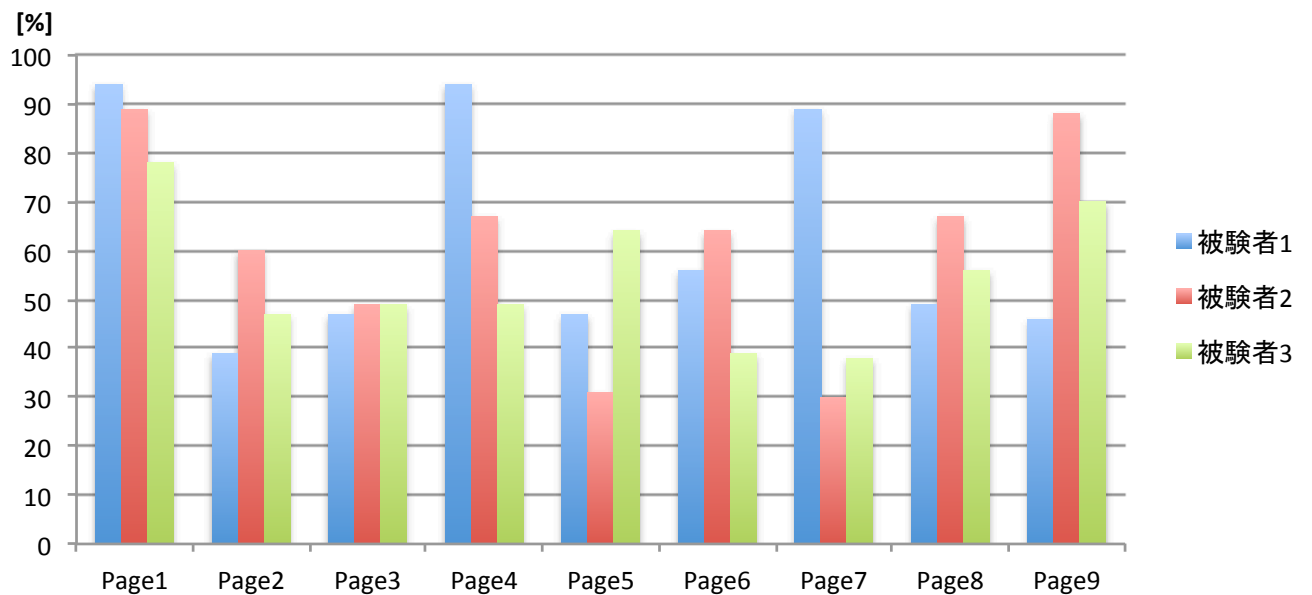


図 5.2.9: 料理支援のページごとの評価



図 5.3.1: 使用した作業台



図 5.3.2: 従来の手順書での工業製品組立の様子



図 5.3.3: ハンズフリーマニュアルでの工業製品組立の様子

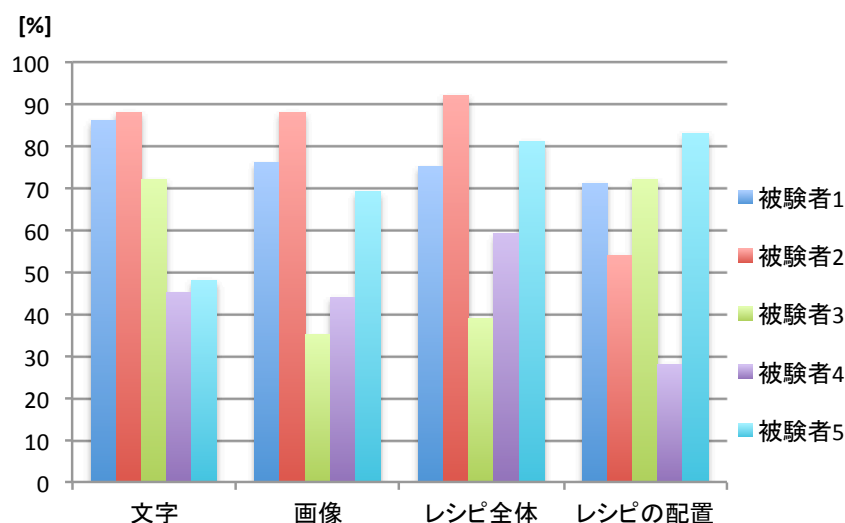


図 5.3.4: 組立支援時の画面表示についての評価

5.3.2 工業製品の組立支援の評価結果

表 5.4 に製品の組立時間と製品の合否と理由，製品の組立について慣れているかをアンケートによって答えてもらった時の結果を示す。

表 5.4: 工業製品の組立実験結果

被験者	作業に 慣れているか (VAS 法%)	紙媒体の手順書		ハンズフリーマニュアル	
		作業時間 MM:SS.	正しく組み立て られたか	作業時間 MM:SS.	正しく組み立て られたか
1	5	05:04.0		03:27.5	
2	2	02:30.5		01:46.8	
3	0	03:33.6	カバーの 取付方向ミス	01:28.8	
4	10	04:52.6	パッキンの 取付位置ミス	02:49.8	パッキンの 取付位置ミス
5	50	00:57.2	カバーの 取付方向ミス	00:50.3	

以上から，ハンズフリーマニュアルで組み立てた場合の方が紙媒体の手順書で組み立てた場合より高い割合で正しく組み立てられている．そのため，マニュアルの自動選択が正しく行っていたと言える．

組立支援時の画面表示についての評価結果を図 5.3.4 に示す．以上から，被験者 1 と被験者 2 と被験者 4 は自身の文字・画像・レシピ全体のサイズは，レシピの配置より見やすくなっている，しかしまた一方で被験者 5 は自身の画像サイズ・レシピ全体サイズ・レシピの配置は，文字サイ

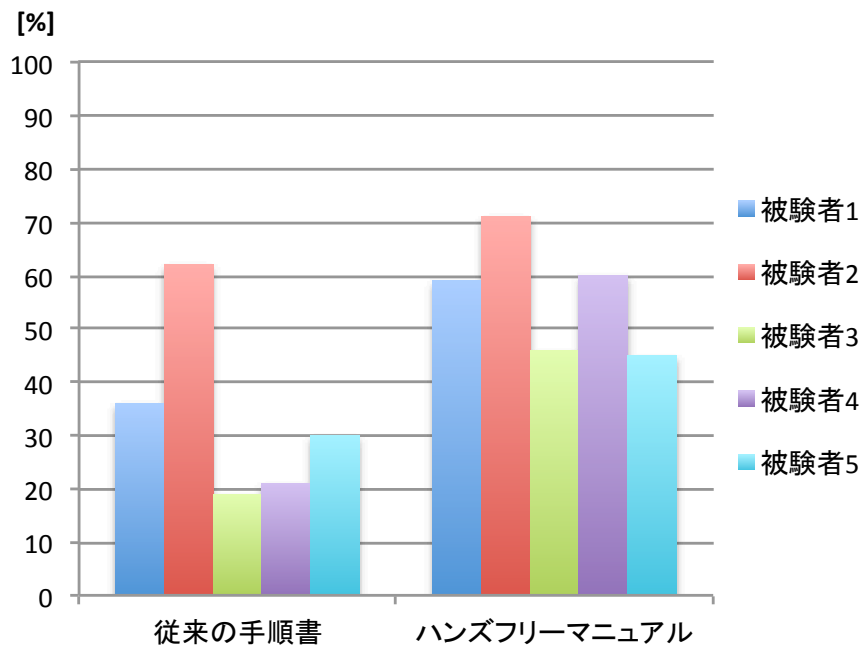


図 5.3.5: 組立時に勘違いが発生しなかったかの評価

ズより見やすいとなる。そして被験者3は、文字サイズとレシピの配置は見やすいが、画像サイズとレシピ全体のサイズは低い値と上位2つより低い値となっている。このことから表示に関する見やすさは全員にとって同じような見やすさではなく各人にとっての見やすさがあり、文字や画像、レシピの位置など可変にするべきであることが分かった。

次に組立支援を従来の紙媒体で行った時とハンズフリーマニュアルを利用した時それぞれに、組立時に勘違いが発生しなかったかどうかを評価した結果を図 5.3.5 に示す。この図に示すように、どの被験者においても、従来の手順書よりもハンズフリーマニュアルで作業を行う方が勘違いが発生しにくい。このことから、ハンズフリーマニュアルは勘違いを防ぐことにおいて従来のマニュアルに対して優位である。

次に組立支援時の操作感についての評価結果を図 5.3.6 に示す。この図に示すように、どの被験者も図 5.2.8 と比較してめくりやすさの値が大きい。このことから、フィードバックから得た改良が正しく反映されていることがいえる。

ハンズフリーマニュアルで組立支援を行ったときのページ毎の評価結果を図 5.3.7 に示す。この図に示すように、被験者2はどのページにおいても役に立ったという値が60%である。被験者1,3,4,5においては、3ページが自身で一番高い値を示している。この3ページは製品の組み立てる向きを示すページである。

この実験から、ハンズフリーマニュアルは従来の紙媒体での手順書に比べて、勘違いや間違いを防ぐことにおいて優位なものであることが分かった。

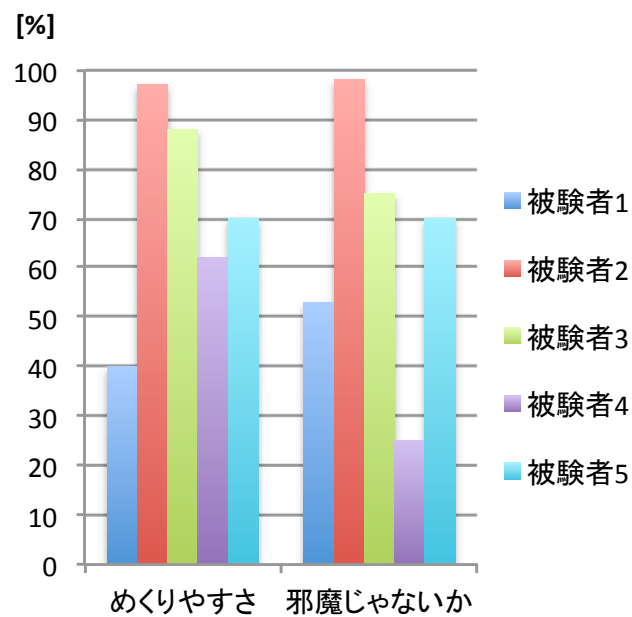


図 5.3.6: 組立支援時の操作感についての評価

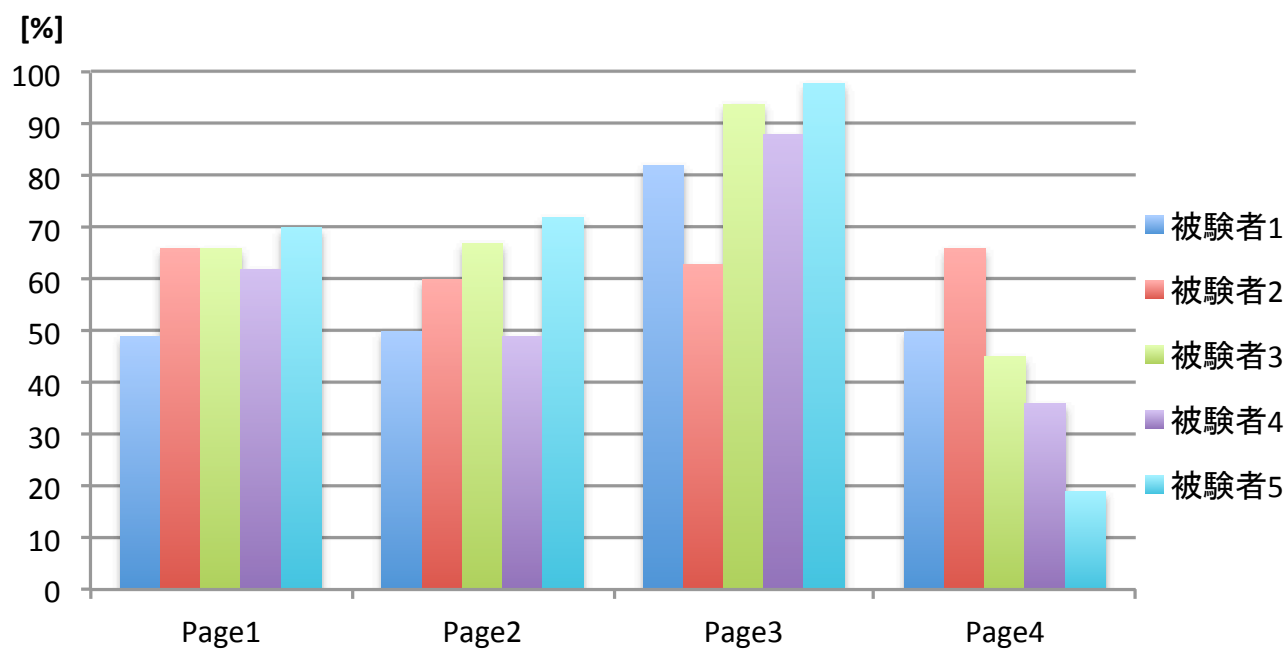


図 5.3.7: ハンズフリーマニュアルの組立支援のページ毎の評価

第6章 議論

6.1 工場における使用試験及び実務者評価

実際にハンズフリーマニュアルを工場での製品組み立てに利用し、その時に使用感について作業者にヒアリングを行った。今回テストに参加した作業者は1人で、テスト作業である製品組み立ての工程について十分に熟練している。実際にハンズフリーマニュアルを工場で利用している様子を図 6.1.1 に示す。

テストとして実際に製品の組み立てをハンズフリーマニュアルを利用して A の工程及び B の工程を作業者に組み立ててもらった。その結果、A の工程で製品を 3 個中すべて正しく組み立てられ、B の工程で製品を 3 個中すべて正しく組み立てることができた。

利用したハンズフリーマニュアルの内容に関して、A の工程は 6 ページ、B の工程は 25 ページになった。マニュアルの内容製作に事前に工場で利用している組み立て手順書の A の工程 9 ページ、B の工程 15 ページを引用しながら製作した。

作業者にヒアリングを行った際、

- 熟練度によるマニュアルの内容への要求の変化
- ハンズフリーマニュアル用の表示方法や操作への要望

についての有用なフィードバックを得られた。

熟練度によって表示するマニュアルの内容への要求事項が変わるため、作業者の熟練度に応じてマニュアルを差し替えることが有効であることが分かった。熟練者から、作業のカンやコツはわかっているので、作業で勘違いしやすいポイントを確認できる内容を要求していた。今回用意したマニュアルの内容は工程を細かく区切ったものであり、もし何も知らない作業の工程ならばハンズフリーマニュアルを有効に利用できるとの意見を得た。

ハンズフリーマニュアルのシステムは、画像ファイルと CSV テキスト、それに対応する二次元バーコードの変更でマニュアルの内容変更ができるため、内容を容易に更新できる。そのため、マニュアルの表示内容に関しては、支援したい作業の専門家に直接表示内容について製作を行ってもらいと、より良いシステムになると考えられる。

次に、フィードバックを元に、ハンズフリーマニュアルの Body-stabilized な表示部分の改良が考えられた。作業者から、任意の空間にマニュアルを Body-stabilized で表示させることは作業の邪魔にならずにとっても良い、しかし、手元の作業をしてからもう一度マニュアルに顔を向けると、マニュアルの正面が少し動いているような感じがするとの意見を得た。これは、作業のとき無意識に向いている方向が変わってしまい、マニュアルに視線を戻すときに、Body-stabilized な表示が正しく行われているため、マニュアルの正面が変更されてしまうものである。

そのために、ジャイロセンサを利用してマニュアルを見ている時の角度と作業をしているときの角度を区別し、マニュアルを見ているときは通常の Body-stabilized な表示を行う。そして、マニュアルを見していないときには Body-stabilized な表示を停止させる。しかしもう一度マニュアル



図 6.1.1: 工場でのハンズフリーマニュアルの作業者テスト

を見るときにはマニュアルの正面を再設定し、Body-stabilized な表示を行う方法である。作業中に無意識に見ている向きが変わってしまう現象は工場の作業だけではなく、料理中などの作業中に対しても言えるため、このハンズフリーマニュアル表示方法の改良は、作業中の支援をより効率良くできると考えられる。

第7章 結論

近年，ウェアラブル端末が私たちの生活に身近になってきている．ウェアラブル端末である HMD は，眼前に仮想画面を表示でき，エンターテインメントにとどまらず，外部コンピュータとの連携，リアルタイムな情報提供，ユーザの作業支援等，様々な用途への発展が期待されている．その中でも光学シースルー HMD は，現実と仮想画面で協調して情報を提供できるという利点がある．したがって，部品組立や料理といった煩雑な分かりにくい作業でも，作業をしながら支援を受けられるツールとして期待できる．

本論文では，ジェスチャUI と光学シースルー HMD によるハンズフリーマニュアルを提案した．提案システムでは，作業中に作業の妨げにならないようにマニュアルを参照でき，マニュアルと作業中の手元との最小限の視線移動で作業を効率よく進められる．また，ユーザは作業対象を見るだけで必要なマニュアルの表示を得ることができ，作業をスムーズに開始できる．そしてロバストなハンドジェスチャによるマニュアル操作により，手が汚れて認識しなくなって手を洗う必要がある場合でも，作業の中断をせずに，マニュアルの操作をシームレスに行える．また，作業中の写真撮影をスムーズに行えるので，作業記録や品質管理が容易になる．

このシステムを使用して料理を行い使用感をアンケート調査し，評価を行った．評価の結果，経験者と未経験者で提案システムの表示方法に対する要求が異なることが分かり，ユーザの経験の差に応じてマニュアルを差し替えることが有効である可能性を見いだした．また，工業製品の組み立てを，従来の手順書と提案システムを利用して比較を行い，作業の正確さと使用感をアンケート調査し評価を行った．結果，提案システムを利用することで製品の誤りが $1/3$ に減少することが確認された．

また，使用試験及び実務者評価を行ったところ，マニュアルの表示は作業の邪魔にならず，工場作業の初心者への支援についても利用できることが確認された．今後は，システムを長時間使用したときのフィードバックを得て改良し，実用性の向上を目指す．

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導，ご助言をいただきました，入江英嗣准教授に感謝の意を表します．ゼミでの議論や論文について多くの示唆をいただきました．また，同講座吉永努教授，吉見真聡助教にも研究を進めるにあたり多くの助言をいただき，研究がより良いものとなりました．ありがとうございました．そして，料理実験の被験者の皆様，チキンマカロニグラタンを美味しく作っていただき，研究がより良いものになりました．ありがとうございました．日常の議論を通し，多くの指摘を下さいました吉永研究室・入江研究室の先輩方，同期の皆様，後輩の皆様に，また，色の先生の岩崎 央氏，日本語の先生の稲場 朋大氏，図・表の先生の力 翠湖氏に感謝いたします．

本研究は，電気通信大学民間等共同研究（セイコーエプソン株式会社）「光学透過ヘッドマウントディスプレイにおけるジェスチャ入力の研究」（株式会社中山鉄工所）「光学ベルトコンベアスケールに関する研究」，また横河マニユファクチャリング株式会社の皆様に多大な支援を賜りました．

本当にありがとうございました．

参考文献

- [1] Ivan E. Sutherland. The ultimate display. In *Information Processing Techniques Office, ARPA, OSD*, 1965.
- [2] Epson moverio bt-200. <http://www.epson.jp/products/moverio/bt200/>.
- [3] Oculus rift. <https://www.oculus.com/>.
- [4] Google glass. <https://www.google.com/glass/start/>.
- [5] Y. Kojima, Y. Yasumuro, H. Sasaki, Ichiroh Kanaya, O. Oshiro, T. Kuroda, Y. Manabe, and K. Chihara. Hand manipulation of virtual objects in wearable augmented reality. In *Virtual Systems and Multimedia, 2001. Proceedings. Seventh International Conference on*, pp. 463–469, 2001.
- [6] P. Mistry and P. Maes. Sixthsense: a wearable gestural interface. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Sketches*, pp. 11:1 – 11:1, 2009.
- [7] 蔵田武志, 大隈隆史, 興梠正克, 坂上勝彦. ハンドマウス: ビジュアルウェアラブルズが可能にする拡張現実環境に適したインターフェイス. 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 100, No. 565, pp. 69–76, jan 2001.
- [8] M. Störring, T.B. Moeslund, Y. Liu, and E. Granum. Computer vision-based gesture recognition for an augmented reality interface. In *Int. Conf. on VISUALIZATION, IMAGING, AND IMAGE PROCESSING*, pp. 766 – 771, 2004.
- [9] 加茂浩之, 田中二郎. ウェアラブル拡張現実感による情報端末の仮想化. マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集, 第 2011 巻, pp. 1223–1233, jun 2011.
- [10] 入江英嗣, 森田光貴, 岩崎央, 千竈航平, 放地宏佳, 小木真人, 檜原裕大, 芝星帆, 眞島一貴, 吉永努. Airtarget: 光学シースルー方式 hmd とマーカレス画像認識による高可搬性実世界志向インタフェース. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 4, pp. 1415–1427, apr 2014.
- [11] M. Billinghurst and H. Kato. Collaborative mixed reality. In *Int. Symp. on Mixed Reality*, pp. 261 – 284, 1999.
- [12] K. Yee. Peephole displays: pen interaction on spatially aware handheld computers. In *SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1 – 8, 2003.
- [13] Xiang Cao and Ravin Balakrishnan. Interacting with dynamically defined information spaces using a handheld projector and a pen. In *Proc. of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '06, pp. 225–234. ACM, 2006.

- [14] Taejin Ha and Woontack Woo. Arwand: Phone-based 3d object manipulation in augmented reality environment. In *ISUVR*, pp. 44–47. IEEE, 2011.
- [15] Epson moverio bt-200 基本スペック. https://tech.moverio.epson.biz/technical/BT200_TIW1405CJ.pdf.
- [16] Zebra crossing. <https://github.com/zxing/>.
- [17] オレンジページ net チキンマカロニグラタン. http://www.orangepage.net/recipes/detail_138863.

発表論文・特許

- [1] 千竈 航平, 岩崎 央, 森田 光貴, 吉見 真聡, 入江 英嗣, 吉永 努. “HMD 端末単体で動作する指先認識アルゴリズムの性能評価”, 信学技報, Vol. 113, No. 234, pp.35–40, Oct. 2013.
- [2] 岩崎 央, 千竈 航平, 森田 光貴, 吉見 真聡, 入江 英嗣, 吉永 努. “光学シースルー方式 HMD に適した直観的ジェスチャー UI”, 信学技報, Vol. 113, No. 234, pp.41–46, Oct. 2013.
- [3] 入江 英嗣, 森田 光貴, 岩崎 央, 千竈 航平, 放地 宏佳, 小木 真人, 櫻原 裕大, 芝 星帆, 眞島 一貴, 吉永 努. “Airtarget:光学シースルー方式 HMD とマーカレス画像認識による高可搬性実世界志向インタフェース”, 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 4, pp. 1415-1427, Apr 2014.
- [4] 中島 嵩文, 千竈 航平, 岩崎 央, 吉見 真聡, 入江 英嗣, 吉永 努. “AirTarget システムにおけるカーソルの予測描画による UI の改善”, 信学技報, Vol. 114, No. 242, pp.7–13, Oct. 2014.
- [5] 千竈 航平, 岩崎 央, 入江 英嗣. “ヘッドマウントディスプレイ、画像表示方法及びプログラム”, 特願 2014-212248, Oct, 2014.
- [6] 入江 英嗣, 稲場 朋大, 岩崎 央, 千竈 航平, 力 翠湖, 中山 弘志, ビソンボロ アベル. “粉粒体の流量計測方法とそのプログラム”, 特願 2014-212119, Oct, 2014.