

平成23年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目 拡張現実感を用いた協調作業支援システム

主専攻 ソフトウェアサイエンス主専攻

著者 金子 将大

指導教員 田中二郎 志築文太郎 高橋伸 三末和男

要 旨

クラウドコンピューティングの浸透により、データやソフトウェアなどをネットワーク上に置いておき、必要な時にアクセスするという利用形態が一般的になってきている。また、オンラインストレージサービスの普及により、個人レベルでも容易にこのような利用形態をとることが可能になった。ネットワーク上にデータ等を置いておく利点として、インターネット環境さえあればどこにいても利用可能であることと、複数ユーザ間での共有が容易になることが挙げられる。

これらの利点から、会議などの協調作業を行う際に資料となるデータをネットワーク上に置いておくことで、モバイル端末を持っていれば、場所を選ばずに協調作業を行うことができる。しかし、そのような環境で協調作業を行う場合、データを閲覧するためのモバイル端末のディスプレイの小ささなどが原因となって、協調作業の効率が悪くなってしまう問題がある。

そこで本研究では、それらの問題を解消し、どこでも協調作業を行えるようにするための拡張現実感による協調作業支援システムを開発する。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	クラウドコンピューティング	1
1.2	協調作業への利用	2
1.2.1	特徴	2
1.2.2	問題点	3
1.3	本研究の目的	3
1.4	本論文の構成	3
第2章	要件定義とアプローチ	4
2.1	本研究が満たすべき要件	4
2.2	本研究のアプローチ	4
2.3	仮想ディスプレイ	5
2.4	想定する未来環境	6
第3章	拡張現実感を用いた協調作業支援システム	7
3.1	システムの概要	7
3.2	ハンドジェスチャによる操作	8
3.2.1	移動操作	8
3.2.2	サイズ変更操作	9
3.2.3	書き込み操作	9
3.2.4	ページ送り操作	10
3.3	利用シーンの例	10
第4章	プロトタイプの実装	12
4.1	システム構成	12
4.2	ハードウェア	13
4.3	クライアント	13
4.3.1	実空間の座標認識	14
4.3.2	ハンドジェスチャの認識と対応する操作の処理	15
	指先と仮想ディスプレイの交差判定	17
	移動操作	18
	サイズ変更操作	19

	書き込み操作	19
	ページ送り操作	21
4.3.3	仮想ディスプレイの描画	23
4.4	サーバ	23
4.4.1	仮想ディスプレイの情報	23
4.4.2	書き込みの情報	24
4.4.3	情報の取得・更新	24
	get.php による情報の取得	24
	move.php による移動操作の情報の更新	25
	draw.php による書き込み操作の情報の更新	25
第 5 章	関連研究	26
5.1	ウェアラブルコンピューティング	26
5.2	ハンドジェスチャ	26
5.3	協調作業支援	27
第 6 章	議論と今後の発展	28
6.1	拡張現実感	28
6.2	ハンドジェスチャによるインタラクション	29
6.3	協調作業支援のための機能	29
第 7 章	結論	31
	謝辞	32
	参考文献	33

図目次

2.1	仮想ディスプレイの表示例。正面から見た様子 (左) と右側から見た様子 (右)	5
3.1	システムの利用イメージ	7
3.2	移動操作の様子。操作前 (左) と操作後 (右)	8
3.3	サイズ変更操作の様子。操作前 (左) と操作後 (右)	9
3.4	書き込み操作の様子。操作前 (左) と操作後 (右)	9
3.5	ページ送り操作の様子。操作前 (左) と操作後 (右)	10
4.1	システム構成図	12
4.2	Kinect 付きヘッドマウントディスプレイ	13
4.3	メインループ処理の流れ	14
4.4	操作の開始処理までのフローチャート	16
4.5	書き込み操作を行う際の手と仮想ディスプレイの位置関係	17
4.6	移動操作の処理のフローチャート	18
4.7	サイズ変更操作の処理のフローチャート	19
4.8	書き込み操作の処理のフローチャート	20
4.9	ページ送り操作の処理のフローチャート	22

表 目 次

4.1	Displays テーブル	23
4.2	Drawing_X テーブル	24

第1章 はじめに

1.1 クラウドコンピューティング

近年、クラウドコンピューティングの浸透により、データやソフトウェアなどをネットワーク上に置き、必要な時にそれらにアクセスする利用環境が一般的なものになっている。また、Evernote¹をはじめとするオンラインストレージサービスの普及により、個人レベルでの利用も容易になっている。

データをネットワーク上に置いておく利点として以下の点が挙げられる。

どこからでも利用可能

データはネットワーク上に存在するため、インターネット環境さえあれば、それらを利用することが可能である。例えば、普段研究室や仕事場の計算機で使用するデータをネットワーク上に置いておくことで、自宅の計算機を用いて作業する場合や、移動中にモバイル端末でデータの閲覧を行う場合などに、あらかじめデータの移動などの準備を行う必要がない。

データの共有

ネットワーク上に置かれたデータを複数人で共有する場合、データへのアクセス権を変更することで、共有するユーザの追加や削除を行うことができる。また、共有しているユーザ全員がネットワーク上の1つのデータに対して操作を行うので、あるユーザが行った変更内容が他のユーザに即座に伝わるなどの利点がある。

端末の小型化

インターネットへ接続さえできれば利用可能なため、ユーザが操作する端末にハードディスクのような物理的なストレージを搭載する必要がなくなる。そのため、端末のさらなる小型化、軽量化を行うことができる。

¹Evernote, <http://www.evernote.com/>

1.2 協調作業への利用

ネットワーク上のデータはどこにいても利用可能なため、休憩室や部屋の一角のような一般的に協調作業には向いていない環境でも会議や協調作業を行うことができる。このような、データをネットワーク上に置き、設備が十分でない環境で行う協調作業について、その特徴と問題点をまとめた。

1.2.1 特徴

ネットワーク上のデータを使用する

協調作業に使用するデータは全てネットワーク上に存在する。参加者はモバイル端末などを用いて、そのデータにアクセスし、そのデータについての会議や、データの加工などを行う。紙に印刷した資料や模型などの物理的な資料は、基本的に使用しない。

設備等が十分でない

会議室のような広くてプロジェクタやホワイトボードなどを使うことができる協調作業向きの空間ではなく、休憩室のような椅子とテーブル程度しかない比較的狭い空間で行われる。

重要度が低く、作業内容が単純

一般的に重要な会議やあらかじめ予定されていた協調作業には、会議室などの大きな部屋を確保する。対して、突発的であったり重要度が低い作業は、設備が十分でない場所で行われる可能性がある。このような作業の内容は、簡単な相談やミーティングであったり、データ整理やテキスト編集のような単純なものであると考えられる。

参加人数は2人から6人程度

同様に、十分な設備のある部屋を確保しない、または確保できないような作業は、規模が小さいと想定される。よって、参加人数は2人から6人程度であると考えられる。

1.2.2 問題点

作業領域が狭い

一般的にスマートフォンのディスプレイは狭く、作業を行うには不向きである。ノートパソコンやタブレット型コンピュータならば、ディスプレイは広くなるが、複数のデータを扱う際には画面が分割されてしまう。そのため、データあたりの表示領域は狭くなってしまい、作業効率が落ちてしまう。

意図が伝わりにくい

協調作業用の環境でも各自が端末を用いて作業することはあるが、これらは補助的なものがある。一般的には、プロジェクションスクリーンなどの大画面や、資料を広げておくことができるテーブルなどが別に存在し、参加者たちはそれを見たり、操作したりすることで意識の共有を行うことができる。しかし、大画面などが存在しない環境下では、各自が自分の端末を見ながら作業を行うことになる。このとき、他の参加者が何をしているのか、何について話しているのかが伝わりにくくなり、協調作業の効果が薄くなってしまう。

1.3 本研究の目的

本研究では、ネットワーク上の共有データを利用した協調作業を行う際の作業領域の狭さと意図の伝わりにくさという問題を解決することで、どこにいても効果的な協調作業を行うことができるようにすることを目的とする。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。本章では、クラウドコンピューティングの浸透による場所を選ばない協調作業の可能性と問題を挙げ、その問題点を解決するという本研究の目的について述べた。第2章では、本研究の目的を達成するための要件とアプローチについて述べる。第3章では、開発したプロトタイプシステムの機能や操作方法などについて、第4章では、その実装について述べる。第5章では、関連研究を挙げる。第6章では、試用から得た知見について議論し、問題点と今後の発展について述べる。最後に第7章で、結論を述べる。

第2章 要件定義とアプローチ

2.1 本研究が満たすべき要件

本研究は、ネットワーク上のデータを用いて、設備が十分でない場所で行われる協調作業の支援を行う。その際に本研究が目的を達成するための満たすべき要件を以下のように考える。

作業領域を狭さを解消する

モバイル端末の小ささの影響で、作業領域が狭くなってしまう問題を解消する。これにより、モバイル端末の大きさにとらわれない、自由な作業を行うことを可能にする。

作業の意図が他の参加者に伝わるようにする

参加者がそれぞれの端末画面に集中してしまい、互いの意図が伝わりにくいという問題を解消する。これにより、協調作業を円滑に行えるようにする。

2.2 本研究のアプローチ

要件を満たすためのアプローチとして、拡張現実感による仮想物体を用いて協調作業を支援するシステムを開発した。拡張現実感による仮想的なディスプレイを用いてデータを表示し、ユーザ間で共有することで、作業領域の狭さや、意図の伝わりにくさを解消する。また、ヘッドマウントディスプレイなどのウェアラブルデバイスを用いることで、場所の制約を受けずに利用可能なものにする。そして、ハンドジェスチャによる実世界指向インタフェースを提供することで、より効果的な協調作業を行えるようにする。

拡張現実感

拡張現実感とは、現実環境から得た知覚情報に電子情報を付加することで、補足的な情報を提示する技術である。

特に、現実空間に仮想物体を重畳表示することで行う視覚情報の拡張現実感の研究は盛んに行われており、拡張現実感によって行動支援を行う研究として、実物体のペイントを試す

Bandyopadhyay らの Dynamic shader lamps [1] や、ホワイトボードの機能拡張を行う塚田らの AR 白板 [2] などがある。

また、重畳表示を行うための実空間座標の認識手法については、代表的である加藤の AR-ToolKit [3] のマーカーを用いる手法の他に、セカイカメラ¹のように GPS からの地理情報や加速度センサからの傾きを用いる手法や、Klein らの PTAM [4] の映像の特徴点を追跡する手法など、様々な研究が行われている。

2.3 仮想ディスプレイ

加茂らによる先行研究では、拡張現実感による仮想的なタッチパネルインタフェースである AiR surface を開発した [5]。本研究では、先行研究と同様の仮想的な平面インタフェースである仮想ディスプレイを使用する。作業に用いる情報などを表示した仮想ディスプレイを実空間上の任意の場所に重畳表示し、さらにその内容を加工可能にすることで、協調作業の支援を行う。仮想ディスプレイは、壁面や机上、空中など、実空間上の自由な位置に配置可能であり、ユーザとの位置関係に対応した見え方で表示される。仮想ディスプレイの情報はユーザ間で共有されるため、全ユーザが実空間上の同じ位置に仮想ディスプレイの存在を認識することが可能である。先行研究では仮想インタフェースの作成に焦点を当てていたが、本研究では作成後の仮想インタフェースの操作に焦点を当てる。また、複数人での操作を容易にするために、タッチによる操作の他に、離れた場所から操作を行えるようにする。図 2.1 に仮想ディスプレイの表示例を示す。

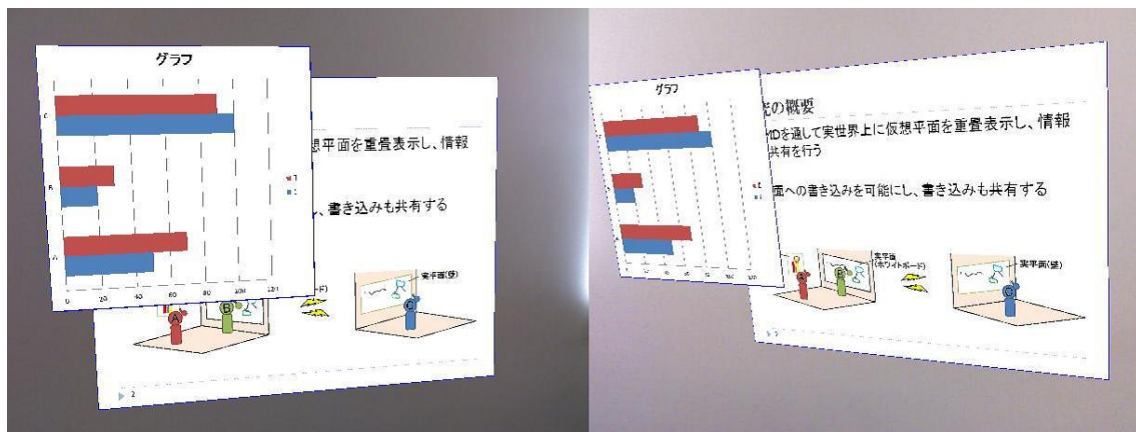


図 2.1: 仮想ディスプレイの表示例。正面から見た様子 (左) と右側から見た様子 (右)

¹セカイカメラ, <http://sekaicamera.com/>

2.4 想定する未来環境

本研究は、現在よりウェアラブルコンピューティング技術が向上し、一般に普及した未来環境を想定している。

既存のヘッドマウントディスプレイは、性能や大きさ、デザイン、価格などに様々な問題があり、一般には普及していなかった。しかし、近年は性能の高いソニーの HMZ-T1²や、シースルーになっている EPSON の MOVERIO³など、低価格なヘッドマウントディスプレイが登場してきている。今後はより技術が向上し従来の問題が解消され、日常生活でヘッドマウントディスプレイをつけていることが一般的になると筆者は考えている。

さらに想定する未来では、Kinect⁴や Harrison らの OmniTouch [6] のような、空間やジェスチャを認識するセンサが小型化され、日常的な携帯や身体への装着が可能になる。これにより、場所を選ばず屋外などでも、実世界指向のナチュラルユーザインタフェースを利用可能になると考えられる。

²HMZ-T1, <http://www.sony.jp/hmd/products/HMZ-T1/>

³MOVERIO, <http://www.epson.jp/products/moverio/>

⁴Kinect, <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>

第3章 拡張現実感を用いた協調作業支援システム

3.1 システムの概要

本システムでは、ユーザは計算機に接続されたセンサ付きヘッドマウントディスプレイを着用する。ユーザは実世界に重畳表示された仮想ディスプレイに対してハンドジェスチャを行うことでインタラクションを行う。仮想ディスプレイに対して移動操作や書き込み操作が可能であり、仮想ディスプレイの状態を共有することで複数人での会議や協調作業を支援する。図 3.1 にシステムの利用イメージを示す。



図 3.1: システムの利用イメージ

3.2 ハンドジェスチャによる操作

ユーザは視界内の仮想ディスプレイに対してハンドジェスチャを行うことで、その仮想ディスプレイを操作することができる。端末を通さずに操作を行うため、操作を行ったことやその意図が他のユーザに伝わりやすくなり、円滑なコミュニケーションを行うことができる。

各操作は仮想ディスプレイに触れずに距離を無視して行うことも可能である。これにより、手の届かない場所にある仮想ディスプレイの操作を行えるため、多人数での使用が容易になると考えられる。

3.2.1 移動操作

仮想ディスプレイに対して、指を二本出した状態で手を動かすことで、仮想ディスプレイの移動を行うことができる。これにより、ユーザが仮想ディスプレイを使いやすい状態に再配置することが可能になり、大量のデータを扱う場合などに行う情報の整理が容易になると考えられる。図 3.2 に移動操作の様子を示す。

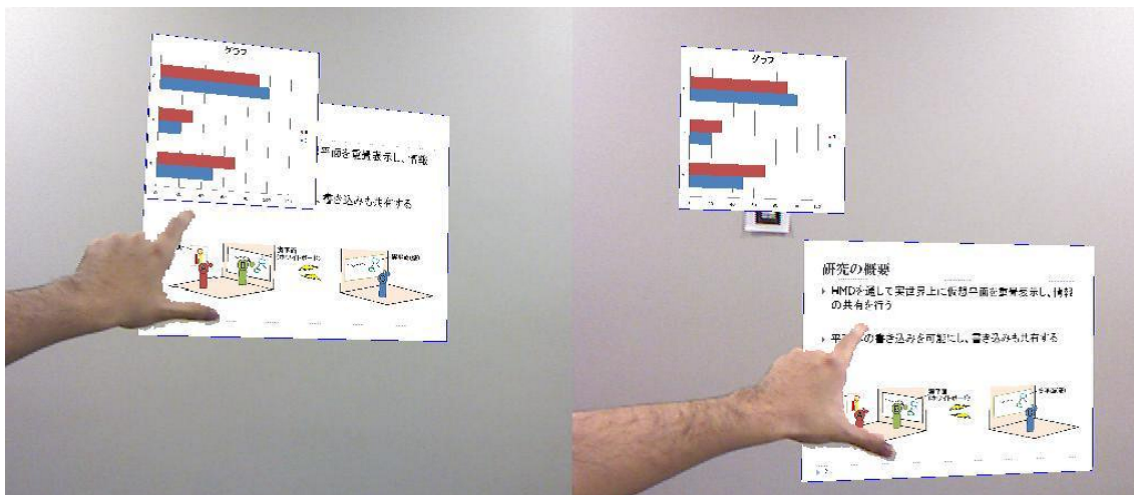


図 3.2: 移動操作の様子。操作前(左)と操作後(右)

3.2.2 サイズ変更操作

仮想ディスプレイの端をつまむジェスチャを行い、その後手を動かすことで、仮想ディスプレイのサイズ変更を行うことができる。仮想ディスプレイを適切なサイズにすることで、情報を理解しやすくなると考えられる。例えば、小さな仮想ディスプレイに表示して1人で見ていた情報を他のユーザに見せたい場合、仮想ディスプレイを大きくすることで複数人で見やすくすることができる。図 3.3 にサイズ変更操作の様子を示す。

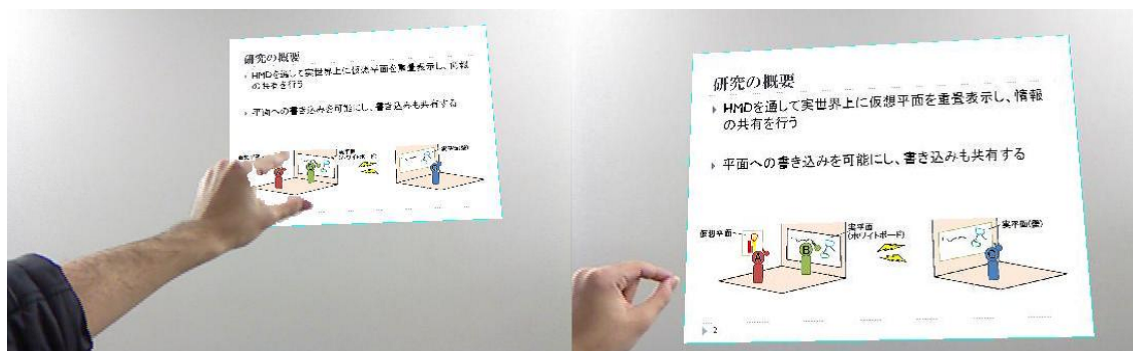


図 3.3: サイズ変更操作の様子。操作前(左)と操作後(右)

3.2.3 書き込み操作

仮想ディスプレイに対して、指を一本出した状態で手を動かすことで、書き込みを行うことができる。書き込みの対象とする仮想ディスプレイに指先が重なった状態で手を動かすと、指先の軌跡が書き込まれていく。この操作により、他のユーザに意見を示すことが容易になり、円滑な意思の伝達を行うことが可能になると考えられる。書き込み操作の様子を図 3.4 に示す。



図 3.4: 書き込み操作の様子。操作前(左)と操作後(右)

3.2.4 ページ送り操作

仮想ディスプレイがスライド資料のような複数のページから構成される情報を表示している場合、ページ送りを行うことができる。指を5本出した状態で手を一定距離以上右に動かすことで次のページに進み、左に動かすことで前のページに戻る。この操作により、ユーザは直感的な操作で資料を読み進めることができ、作業の効率が向上すると考えられる。ページ送り操作の様子を図3.5に示す。

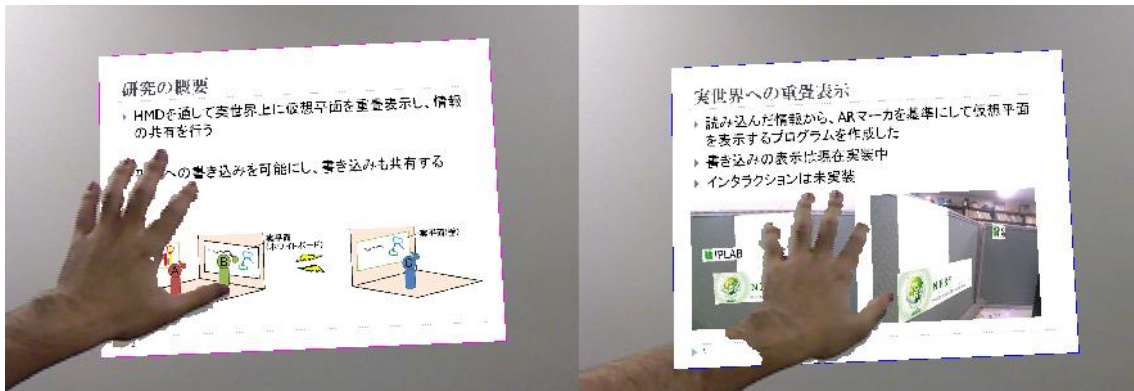


図 3.5: ページ送り操作の様子。操作前(左)と操作後(右)

3.3 利用シーンの例

発表練習

研究発表を控えたAさんは、発表用スライドの作成をようやく終えた。発表に不安が残っており、時間もあまり残されていないため、すぐにその場にいた研究室の仲間呼びかけて発表練習を行うことにした。しかし、運悪く会議室は全て予約で埋まっており使用できず、空いているのは発表用設備のない休憩室だけだった。そこでAさんは、休憩室に大型の仮想ディスプレイを設置し、それを用いて発表練習を行った。発表資料は用意していなかったため、誤字の指摘やアドバイスは書き込み操作を利用して、直接スライドに書き込んでもらった。練習後、書き込まれた内容を確認して、スライドの訂正を行い、アドバイスを心に刻んだAさんは、発表本番を高評価で終えることができた。

写真整理

Bさんたちは、食堂にて昼食を食べながら先日の旅行の話題で盛り上がっていた。話しているうちに、旅先にてデジカメで撮った写真をそのまま放置していたのを思い出し、その場で複数の仮想ディスプレイに写真を表示し写真の整理を行うことにした。撮り貯めた写真は膨大な量であり、似たような写真も多く含んでいたが、仮想ディスプレイを移動操作により並べて比較しどちらがいいか相談することができた。また、旅の思い出話をしながらそのときの出来事について書き込んだり、落書きをしたりしながら写真の加工も行った。結果、Bさんたちは楽しみながら旅の写真をまとめることができ、より一層友情を深め合った。

第4章 プロトタイプの実装

4.1 システム構成

本システムは、各ユーザの計算機上で動作するクライアントと、クライアントがアクセスするサーバに分かれる。クライアントでは、描画やジェスチャの認識など、システムの中心となる処理を行う。サーバでは、仮想ディスプレイの情報や書き込みの情報などの、ユーザ間で共有する必要があるデータの管理を行う。

図 4.1 にシステム構成図を示す。

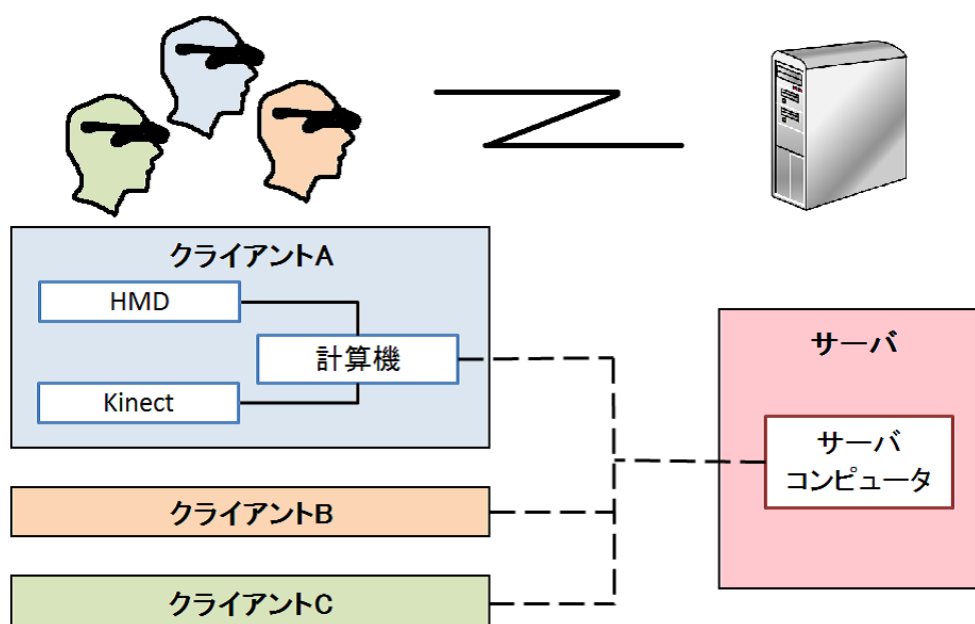


図 4.1: システム構成図

4.2 ハードウェア

ハードウェアには、計算機に接続されたヘッドマウントディスプレイと Kinect を使用した。ヘッドマウントディスプレイには、eMagin 社¹の Z800 3DVISOR を使用した。ヘッドマウントディスプレイに Kinect を取り付け、ユーザはこの Kinect 付きヘッドマウントディスプレイを着用する。Kinect が取得したユーザの視界の RGB 値とデプス値からジェスチャの認識などの処理を行う。図 4.2 に使用した Kinect 付きヘッドマウントディスプレイを示す。



図 4.2: Kinect 付きヘッドマウントディスプレイ

4.3 クライアント

クライアントの開発では、開発言語に C#、開発環境に Microsoft Visual C# 2010²を使用した。Kinect の SDK には OpenNI³を使用し、描画には DirectX⁴を使用した。

クライアントで行う処理は、実空間の座標認識、ハンドジェスチャの認識と対応する操作の処理、仮想ディスプレイの描画に分けることができる。システムは、これらの処理を繰り返すことで動作する。図 4.3 にクライアントで行うメインループ処理の流れを示す。

¹eMagin 社, <http://www.emagin.com/>

²Microsoft Visual C# 2010, <http://www.microsoft.com/japan/visualstudio>

³OpenNI, <http://75.98.78.94/default.aspx>

⁴DirectX, <http://www.microsoft.com/japan/directx/default.msp>

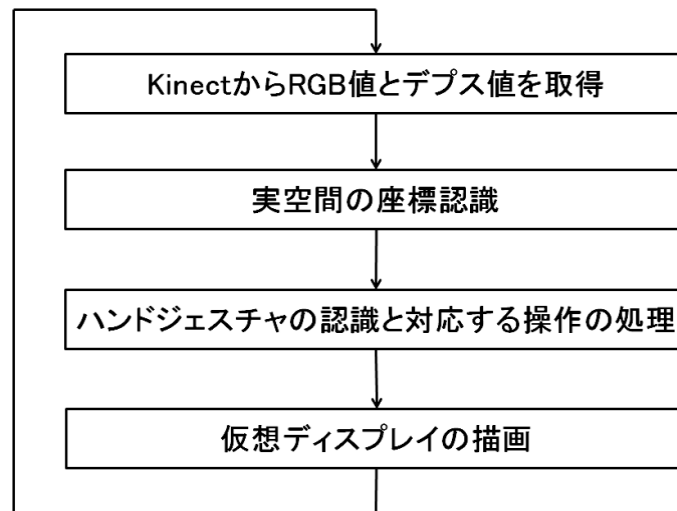


図 4.3: メインループ処理の流れ

4.3.1 実空間の座標認識

本システムでは、実空間の座標認識に ARToolKit を基とした NyARToolKit⁵を使用した。

ARToolKit は黒枠で囲まれた矩形 (以下、マーカと呼ぶ) を設置し、それをカメラで認識した際の見え方から、カメラを基準とした座標系 (以下、カメラ座標系と呼ぶ) におけるマーカの位置や傾きを特定し、カメラ座標系からマーカを原点とした座標系 (以下、マーカ座標系と呼ぶ) への座標変換を行う行列を得る。マーカが固定されている場合、マーカ座標系はカメラの位置により変化するため、マーカ座標系のオブジェクトは、カメラが動くときそれに応じた見え方に描画される。カメラから得られた実空間の画像にマーカ座標系のオブジェクトを重畳表示することで、提示されたユーザに拡張現実感を与える。

本システムでは、マーカ座標系に対して仮想ディスプレイを描画する際と、マーカ座標系における指先の座標を求める際に、変換行列を用いる。

⁵NyARToolKit, <http://nyatla.jp/nyartoolkit/wp/>

4.3.2 ハンドジェスチャの認識と対応する操作の処理

手の認識には、CandescentNUI⁶を使用した。

CandescentNUI は、Kinect から得られたデプス値をクラスタリングすることで、物体の認識と追跡を行うライブラリである。また、クラスタの特徴から手を判別し、手や指の情報を取得することが可能である。

本システムでは、取得した指の本数と指先の情報を用いてハンドジェスチャの識別を行った。前フレームと新しいフレームでの指の本数や座標を比較し、その変化を基に各処理を行う。システムは現在何の操作を行っているのかを状態として保持しており、各操作を行っている間はそれぞれの処理をフレームごとに実行する。何の操作も行っていない場合は、ハンドジェスチャを判別し、条件を満たしていれば各操作の開始処理を行う。図 4.4 に操作の開始処理までのフローチャートを示す。

⁶Candescent NUI, <http://candescentnui.codeplex.com/>

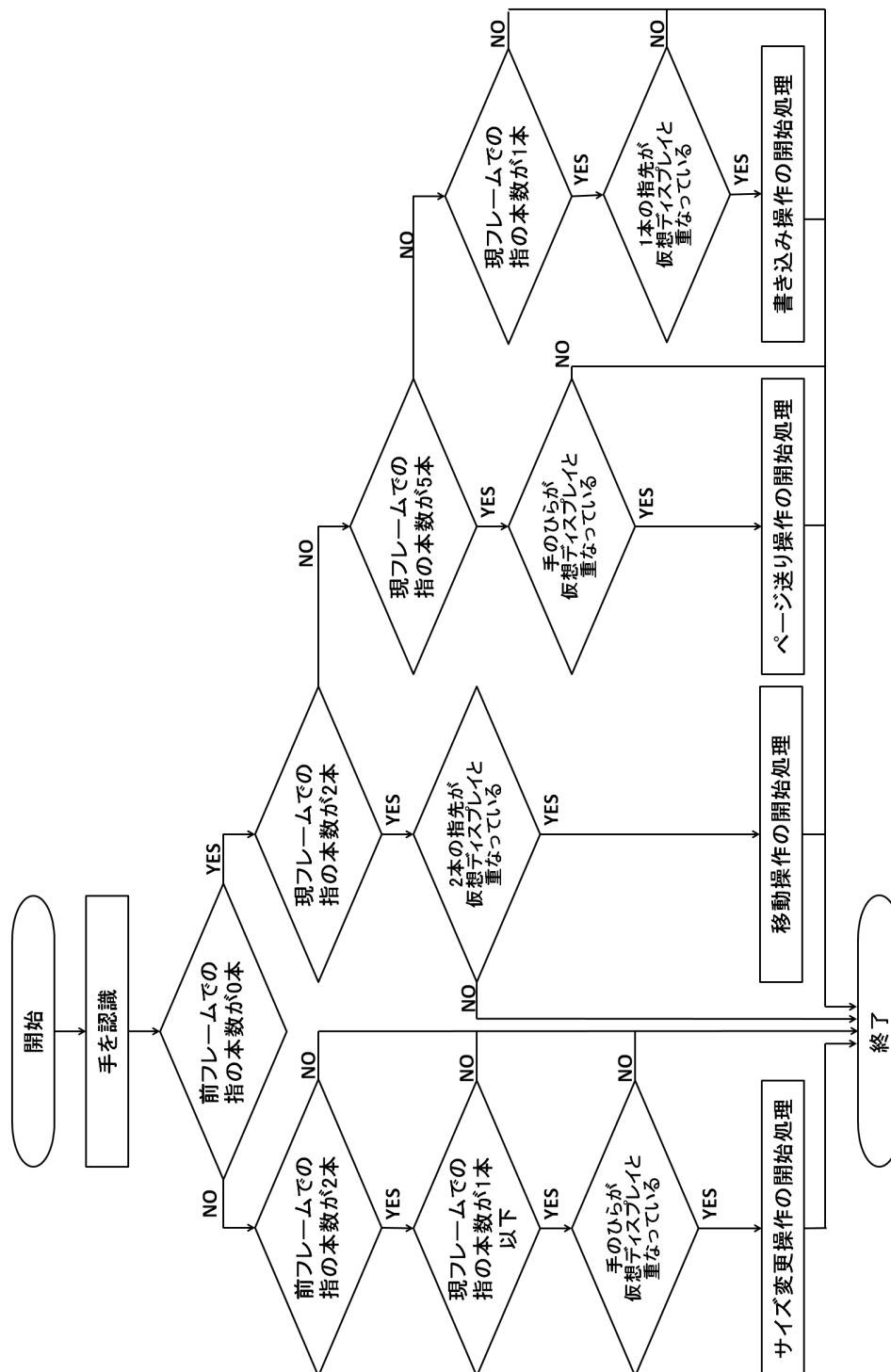


図 4.4: 操作の開始処理までのフローチャート

指先と仮想ディスプレイの交差判定

本システムのハンドジェスチャによる仮想ディスプレイの操作は、カメラ画像における指先と仮想ディスプレイの位置関係を基にして処理される。これによりユーザは仮想ディスプレイに直接触れて行う操作と、距離を気にせずに行う操作を使用することができる。例えば、ユーザは書き込みを行いたい場所に指先が重なって見えるように手を動かすことで、指先と仮想ディスプレイの重なった点の軌跡に線を引くことができる。このとき距離を気にしない操作の場合は、実際の手と仮想ディスプレイの奥行き方向の距離は離れていても問題ない。図 4.5 に書き込み操作を行う際の手と仮想ディスプレイの位置関係を示す。

CandescentNUI により取得される指先の情報は、カメラ画像における XY 座標 (以下、スクリーン座標と呼ぶ) とデプス値からなる。カメラ座標系の奥行き方向を z 軸方向とすると、スクリーン座標はカメラ座標系において $z = 0$ の平面上の座標である。スクリーン座標を (x, y) とすると、カメラ座標系において $(x, y, 0)$ を通り、カメラの方向を方向ベクトルとする、つまり z 軸方向と平行な直線と仮想ディスプレイの交差を判定することで、カメラ画像内で指先と仮想ディスプレイが重なっているかどうか判断することができる。直線と仮想ディスプレイの交差判定は DirectX の関数で行った。

直線と仮想ディスプレイが交差している場合、交点と $(x, y, 0)$ の距離が得られる。求めた距離を使って交点の座標を求めることができ、それをさらに仮想ディスプレイの表面の 2 次元座標に直すことで、書き込みを行う座標が求まる。また、求めた距離と指先のデプス値から仮想ディスプレイと実際の手との距離を求めることができる。この距離が一定以内に収まる場合にのみ操作の処理が行われるようにすることで、直接触れなければ操作できないようにすることも可能である。

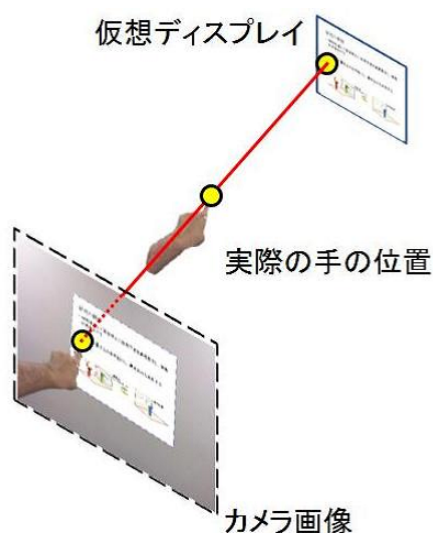


図 4.5: 書き込み操作を行う際の手と仮想ディスプレイの位置関係

移動操作

出した指の本数が0本から2本に変化したときに、その2本の指先に重なる仮想ディスプレイが存在すれば、重なった仮想ディスプレイに対する移動操作を開始する。出した指の本数は誤認識により不安定になることがあるため、1度移動操作が開始されれば、指の本数が1本や3本以上になっても移動操作の処理を続けるようにした。出した指の本数が0本になると移動操作を終了する。図4.6に移動操作の処理のフローチャートを示す。

移動操作を行っている間は、指先の座標の平均座標を次のフレームまで保持しておく。新たに取得した指先の座標の平均座標と前フレームでの平均座標の差のベクトルを、仮想ディスプレイの移動ベクトルとする。このとき求まる移動ベクトルはカメラ座標系のものであるのに対し、仮想ディスプレイの座標はマーカ座標系のものなので、移動ベクトルに変換行列をかけてマーカ座標系に変換してから、仮想ディスプレイの座標に加える。

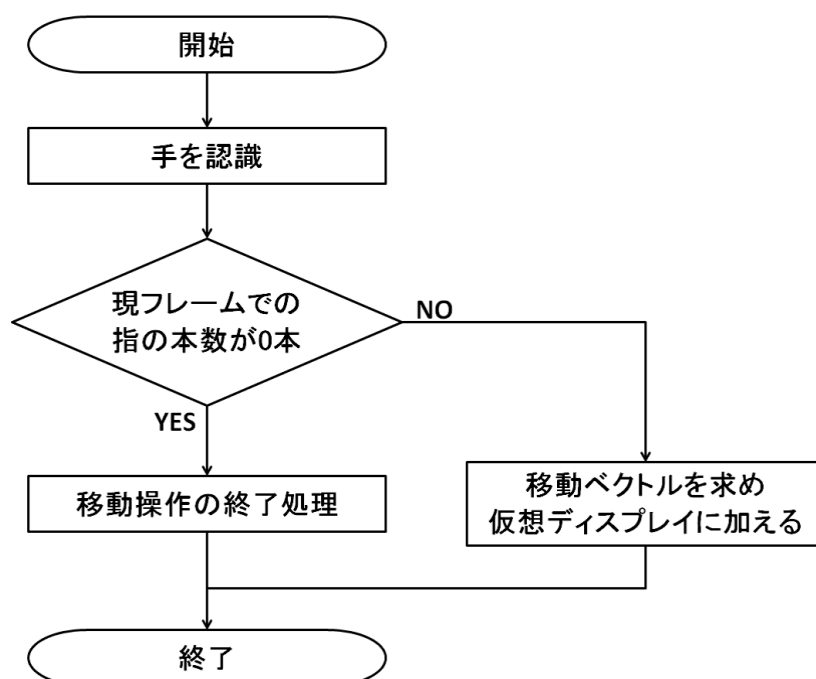


図 4.6: 移動操作の処理のフローチャート

サイズ変更操作

出した指の本数が2本から1本または0本に変化したときに、手のひらに重なる仮想ディスプレイが存在すれば、重なった仮想ディスプレイに対するサイズ変更操作を開始する。2本の指を接触させた状態は、指を1本出した状態か1本も出していない状態として認識されるため、仮想ディスプレイをつまむジェスチャによりサイズ変更操作を開始することができる。出した指の本数が5本になるとサイズ変更操作を終了する。図4.7にサイズ変更操作の処理のフローチャートを示す。

サイズ変更操作を行っている間は、操作を開始した際の手のひらのX座標を保持しておく。新たに取得した手のひらのX座標と開始時の手のひらのX座標の差を求め、それを仮想ディスプレイの幅に加え、縦横比を維持するように高さも変更する。

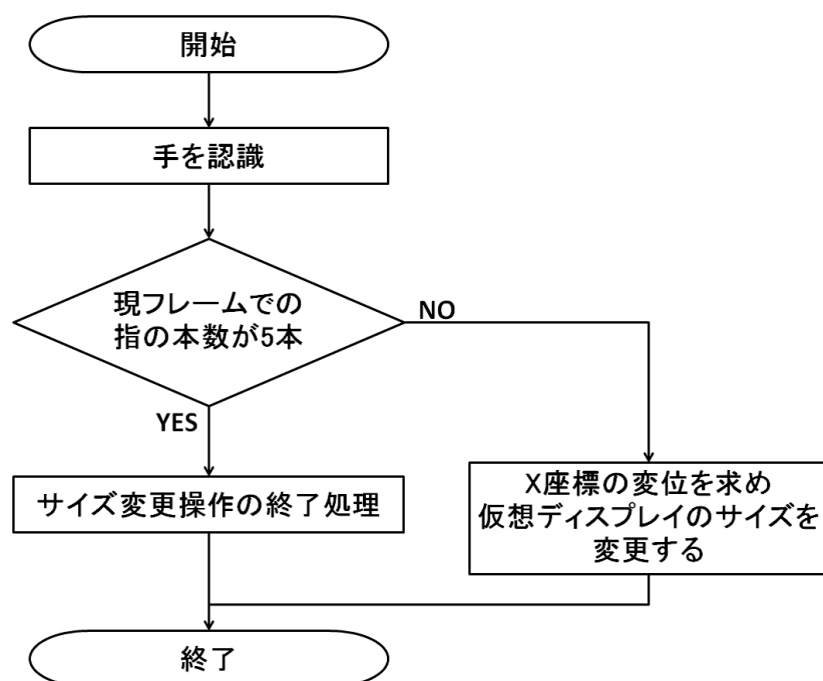


図 4.7: サイズ変更操作の処理のフローチャート

書き込み操作

出した指の本数が0本から1本に変化したときに、指先に重なる仮想ディスプレイが存在すれば、その仮想ディスプレイに対する書き込み操作を開始する。移動操作の場合に指の誤認識が起きても描画位置が一瞬ずれる程度でありあまり影響がないのに対し、書き込み操作の場合は意図しない書き込みが発生してしまい作業に影響が出る恐れがある。対策として、書き込み操作は出した指の本数が1本でなくなると終了するようにした。また、前フレームと比

べて指先の座標が大きく違う場合、誤認識とみなして書き込み操作を終了する。図 4.8 に書き込み操作の処理のフローチャートを示す。

書き込み操作を行っている間は、毎フレーム対象の仮想ディスプレイとの交差判定を行い、交点の座標を全て記録していく。求めた交点をつなぐ線を仮想ディスプレイの表面に追加し描画することで、ユーザは指で書き込みを行っているように感じる。

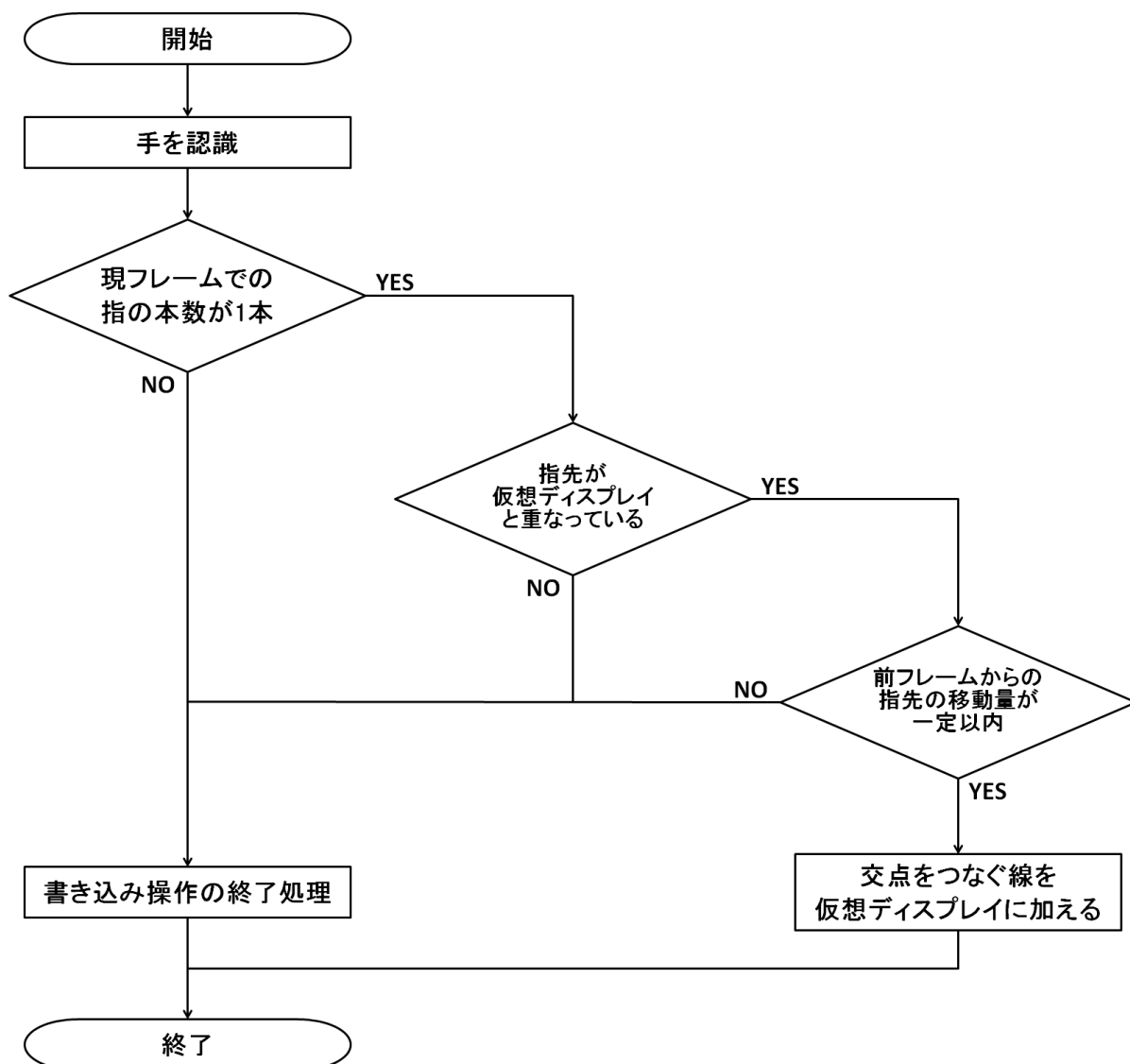


図 4.8: 書き込み操作の処理のフローチャート

ページ送り操作

出した指の本数が0本から5本に変化したときに、手のひらに重なる仮想ディスプレイが存在すれば、その仮想ディスプレイに対するページ送り操作を開始する。1度移動操作が開始されれば、0本になるまでページ送り操作の処理を続けるようにした。出した指の本数が0本になるとサイズ変更操作を終了する。図4.9にページ送り操作の処理のフローチャートを示す。

ページ送り操作を行っている間は、操作を開始した際の手のひらのスクリーン座標系でのX座標を保持しておく。新たに取得した手のひらのX座標と開始時の手のひらのX座標の差を求め、30ピクセル以上離れていれば、その移動方向に応じたページ送りの処理を行う。処理が連続で行われないように、一度元の場所に手に戻すまで、次の処理は行わない。

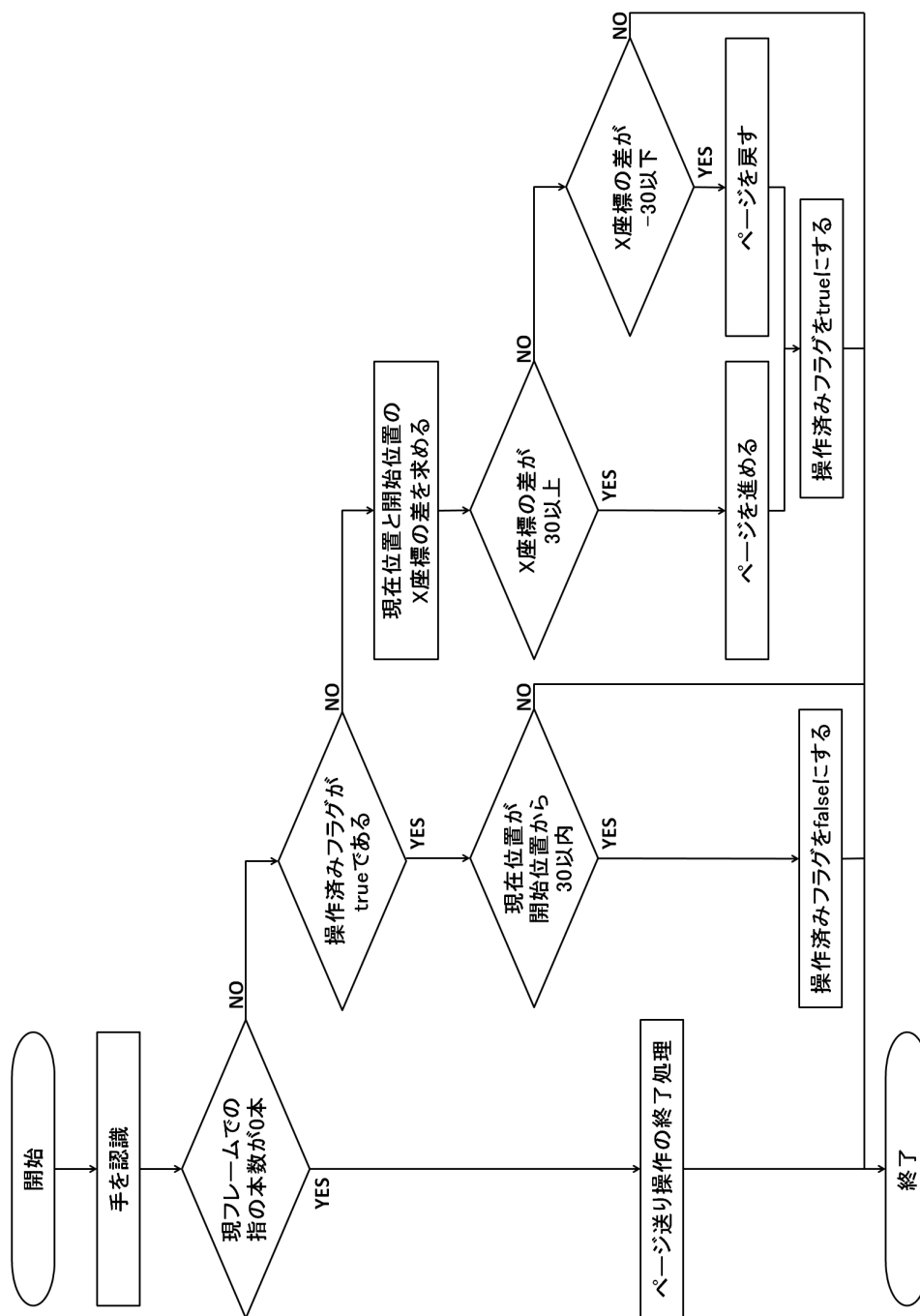


図 4.9: ページ送り操作の処理のフローチャート

4.3.3 仮想ディスプレイの描画

NyARToolKit により得られた変換行列と、ユーザ間で共有された仮想ディスプレイと書き込みの情報を用いて描画を行う。仮想ディスプレイはマーカ座標系に定義されており、マーカ座標系とカメラ座標系の変換行列はマーカとカメラの位置関係によって異なるため、ユーザによって仮想ディスプレイの描画が異なる。そのため、ユーザは仮想ディスプレイが本当に存在するように感じることができる。

また、ユーザの手が仮想ディスプレイより手前にある場合、仮想ディスプレイを描画した後、さらにその上に手の領域を描画することで、仮想ディスプレイと手の前後関係が分かるようにしている。

4.4 サーバ

サーバの開発では、開発言語に PHP、データベース管理に MySQL を使用した。

仮想ディスプレイや書き込みの情報はサーバ上のデータベースに保存し、管理を行う。クライアントでの描画や操作時に、サーバに用意した PHP ファイルにアクセスすることで、データベース上の情報の取得や更新を行い、ユーザ間で情報の共有を行う。

4.4.1 仮想ディスプレイの情報

各仮想ディスプレイには一意な ID を定義されており、Displays テーブルのレコードに情報が格納されている。表 4.1 に Displays テーブルの構造を示す。

表 4.1: Displays テーブル

カラム名	種別	説明
id	int unsigned primary key	仮想ディスプレイの ID。一意に定まる
oX	int	マーカ座標系における仮想ディスプレイの中心の X 座標
oY	int	マーカ座標系における仮想ディスプレイの中心の Y 座標
oZ	int	マーカ座標系における仮想ディスプレイの中心の Z 座標
width	int unsigned	仮想ディスプレイの幅
height	int unsigned	仮想ディスプレイの高さ
angleX	int	X 軸を中心とした仮想ディスプレイの回転角
angleY	int	Y 軸を中心とした仮想ディスプレイの回転角
angleZ	int	Z 軸を中心とした仮想ディスプレイの回転角
imgURL	text	仮想ディスプレイに表示する画像の URL
zoom	float	仮想ディスプレイを表示する際の倍率
lastUpdateTime	datetime	仮想ディスプレイが最後に更新された日時

4.4.2 書き込みの情報

各仮想ディスプレイに対して1つずつ対応する Drawing_X(X:仮想ディスプレイの ID) テーブルが存在する。Drawing_X テーブルでは、ID が X の仮想ディスプレイに対する書き込みの情報を格納する表 4.2 に Drawing_X テーブルの構造を示す。

表 4.2: Drawing_X テーブル

カラム名	種別	説明
id	int unsigned primary key	書き込みの ID。一意に定まる
x	int	対象の仮想ディスプレイにおける書き込みの X 座標
y	int	対象の仮想ディスプレイにおける書き込みの Y 座標
xArray	text	書き込みが通る X 座標の配列をシリアライズしたもの
yArray	text	書き込みが通る Y 座標の配列をシリアライズしたもの
strokeStyle	mediumint unsigned	書き込みの色
strokeWidth	tinyint unsigned	書き込みの太さ
drawTime	datetime	描きこまれた日時

4.4.3 情報の取得・更新

PHP を使い、データベースの情報を取得、更新するための REST API を作成した。クライアントはこの API を通して、データベースにアクセスする。

get.php による情報の取得

クライアントは定期的に get.php にアクセスすることで、各情報の取得を行う。クライアントでは、前回 get.php にアクセスした日時を保持し、get.php に送信する。get.php は受け取った前回のアクセス日時と、Displays テーブルの lastUpdateTime を比較し、前回アクセス時から仮想ディスプレイの情報が更新されたか確認する。更新された仮想ディスプレイがあった場合はさらに、対応する Drawing_X テーブルの drawTime と、前回のアクセス日時を比較し、前回アクセス時から新たに追加された書き込みの情報があるか確認する。更新されていた仮想ディスプレイの情報と、それに追加された書き込みの情報は、クライアントに返される。このように、更新された情報のみを返すことで、通信量を減らしている。

move.php による移動操作の情報の更新

クライアントは移動操作が行われた際に move.php にアクセスすることで、移動操作により変化した情報の更新を行う。クライアントは、移動操作の対象となった仮想ディスプレイの ID と、移動による XYZ 座標の変化量を送信する。move.php は Displays テーブルの受け取った ID の仮想ディスプレイの oX,oY,oZ を、受け取った変化量を加えた値に更新する。また、lastUpdateTime の値を現在の日時に更新することで、他のユーザからも更新したことが分かるようにする。

draw.php による書き込み操作の情報の更新

クライアントは書き込み操作が行われた際に draw.php にアクセスすることで、書き込み操作により変化した情報の更新を行う。クライアントは、書き込み操作の対象となった仮想ディスプレイの ID と、書き込みの通る点の座標や色、太さなどの書き込みの情報を送信する。draw.php は受け取った ID の仮想ディスプレイに対応する Drawing_X テーブルに、受け取った書き込みの情報を追加する。追加した書き込みの情報の drawTime と、Displays テーブル内の対象となった仮想ディスプレイの lastUpdateTime を現在の日時に更新することで、他のユーザからも更新したことが分かるようにする。

第5章 関連研究

5.1 ウェアラブルコンピューティング

蔵田らは、手を使ってマウスのような操作を可能にするウェアラブル入力インタフェースであるハンドマウスについて述べた [7][8]。身体に装着したカメラから得られる画像の色情報から手や指の形状や背景を認識し、ポインティングやクリックなどの手の状態に対応する操作を行う。本研究も同様に、ウェアラブルデバイスによる手を用いたインタフェースを用いている。しかしながら、色情報による手の認識は環境光の影響を受けやすく、状況によって認識精度に大きな差があるため、本研究では、Kinect センサから得られるデプス情報を用いることで、環境光に影響を受けずに手の認識を行えるようにしている。

塚田らは、モバイル環境における手や指のジェスチャを認識するウェアラブルデバイス Ubi-Finger を開発した [9]。従来の多様性を重視した全ての指にセンサを取り付ける方法ではなく、人差し指にのみセンサを取り付ける方法を採用している。これにより装着時の負荷を軽減し、モバイル環境での使用に適したものにしている。本研究では、手にデバイスをつけてしまうと作業が行いにくくなるという懸念から、頭部の Kinect センサを用いてハンドジェスチャの認識を行う。

山本らは、ウェアラブルデバイスを用いたジェスチャにより、日常における不意な選択を行うためのインタフェースを提案した [10]。日常における選択操作の条件として、状況に応じた自然で効率的な手法であることと、動きはなるべく小さく他人に意識されないようにした社会的に受け入れられる手法であることを挙げている。本研究でも自然で効率的な操作を割り当てることは重要であるが、協調作業の支援を目的としているため、操作は他人から見て分かりやすいものであるほうが良い。

5.2 ハンドジェスチャ

平賀らは、ハンドジェスチャによりマウスの基本操作を実現する仮想タッチパッドシステムを開発した [11]。マウスの基本操作であるカーソル移動、クリック、ドラッグ、クラッチを可能としており、それを用いて離れた位置から大型モニタの操作を行う。手の認識は2台のカメラとブルーバックを使用して行い、指先の3次元軌道を解析した結果からジェスチャの判別を行う。対象から離れた位置での操作を扱っている点や、3次元座標の解析によりジェスチャを判別する点で本研究と類似している。一方、平賀らがジェスチャの認識に固定された装置を用いているのに対し、本研究は場所を選ばずに使えるようにウェアラブルデバイスを

用いている。

5.3 協調作業支援

藤原らは、複数の利用者が直接指示可能な仮想物体を共有することができる対面型環境 IllusionHole を開発し、協調作業への利用についての実験を行った [12]。その中で、仮想物体の操作を視覚情報として他者に示すことで、操作の意図を伝えやすくなると述べている。本研究は対面型環境ではなく、空間全体を用いるが、仮想物体の操作がユーザ間で視覚情報として共有される点は同様であるため、操作の意図が伝えやすくなっていると考えられる。

森島らは、作業環境の 3 次元モデルを使用した遠隔協調作業支援システムを開発した [13]。まず、ヘッドマウントディスプレイとカメラ、3 次元センサを着用した作業者の周囲の環境を 3 次元モデル化し、遠隔地の熟練者が見ている VR 環境に揭示する。そして、熟練者がドラッグやポインティングの操作により出した指示を、作業者のヘッドマウントディスプレイを通して作業環境に重畳表示することで、作業支援を行う。本研究は、書き込み操作により他者に意図を伝える点で同様だが、仮想物体を用いて作業支援を行う点や、同じ空間にいる対等な作業者を対象としている点で異なる。また、その後の研究でヘッドマウントディスプレイは作業者に負担を与えたとし、プロジェクタを用いたシステムに変更している [14]。本研究では、プロジェクタが投影する壁面がないような環境でも支援可能にするため、ヘッドマウントディスプレイを使用している。

第6章 議論と今後の発展

本研究で作成したプロトタイプシステムの試用を行った。その中で得られた知見や問題点および問題を解決するための今後の発展について議論を行う。

6.1 拡張現実感

拡張現実感による仮想ディスプレイを用いた情報の提示は有効であると感じた。拡張現実感の性質は、実際には存在しないが、存在するかのように見えるというものである。実際には存在しないため、持ち運んだりする必要がなく、狭い空間でも用いることができ、本研究で設定した協調作業に不向きな環境での利用に適している。また、仮想ディスプレイがある場所に存在するかのような視覚を他のユーザと共有できるため、意識の共有が必要である協調作業の支援にも適している。

問題点もいくつかあった。まず、本研究では実空間上に設置されたマーカを使用して実空間の座標認識を行っているため、システムを使用できるのはカメラでマーカを認識できるような環境に限定されてしまった。これは、どこでも利用可能であるという本システムの前提に反する。今後の発展では、Newcombe らの KinectFusion [15] や DTAM [16] のような、実空間の認識を行う技術を使用したいと思っている。これにより、マーカを用いずに実空間の座標認識を行うことが可能になり、環境が限定されることがなくなる。また、実物体の認識や3次元復元も可能になるため、実物体の使用を取り入れた新たな作業支援を行えると考えられる。

次に、現実感が完全でないという点が挙げられる。本研究では、仮想ディスプレイの位置と実空間の対応付けは行っているが、照明の影響やそれによってできる影については考えておらず、現実感が欠けている。また、仮想ディスプレイ同士の前後関係については正しく描画しているが、仮想ディスプレイと実物体の前後関係は正しく描画されないため、これも現実感の薄さの原因になっている。今後の発展では、KinectFusion や DTAM によって実物体を認識することで、仮想ディスプレイにより現実感を持たせることが可能になると考えられる。

反対に、仮想物体であることを生かせていないという問題もある。本研究はディスプレイやプロジェクタがない環境で、それらを用いた場合と同等の視覚情報の提示を行うというところに単を発している。そのため、扱う仮想物体もディスプレイを模した平面状であり、設置後の性質も実際のディスプレイを再現しようとしたものである。例えば、情報を見る場合には斜めから見るより正面から見た方が分かりやすいが、本システムでは実際のディスプレイを再現しようとした結果、仮想ディスプレイを斜め方向から見ると、そのまま斜めからの

見た目が提示される。単に情報を見やすくするならば、仮想ディスプレイの様子は常に正面から見た状態で提示される方が良い。しかし、これは現実感を薄めることになるため、認識の共有にどれだけの影響があるか確認する必要がある。また、一般的に仮想物体は3次元モデルであるが、仮想ディスプレイは平面状である。3次元モデルを用いて情報提示を行えば、より効果的な協調作業を行うことができると考えられる。今後の発展では、ディスプレイなど従来のものにとらわれない、仮想物体の性質を生かした情報提示方法を考えることで、より有益な支援を行うことが可能になると考えられる。

6.2 ハンドジェスチャによるインタラクション

ハンドジェスチャの認識は良好であった。本研究で用いたデプス情報によるハンドジェスチャの認識は、従来の色情報によるものと比べて精度が良く、照明の状態に左右されず暗所などでも使用でき、容易に奥行き方向への移動も認識することができた。

奥行き方向を使ったジェスチャや、両手を用いたジェスチャなど、より多様なインタラクションが考えられるが、本システムでは移動操作に奥行きを用いただけであった。また、それぞれの操作に割り当てたジェスチャの検討をほとんど行わなかったため、機能とジェスチャが自然に対応していなかったり、指の本数の遷移がうまくいかず、誤認識をすることが多かった。今後の発展では、多様なジェスチャを認識できることを生かし、それらのジェスチャと操作の対応付けをよく検討した上で適切な機能に割り当て、ユーザにとって使いやすいインタラクションを模索する。

6.3 協調作業支援のための機能

本システムでは、仮想ディスプレイに対する移動操作、サイズ変更操作、書き込み操作、ページ送り操作を提供した。

移動操作に関しては、特に仮想ディスプレイを多数出した際に、再配置を行って整理する必要があったため、その必要性を実感できた。ただし、移動操作によって行えるのは平行移動だけであり、傾きを変更することができない点が不十分であった。今後は傾きの変更も可能にし、より自由度の高い配置を可能とする。

サイズ変更操作は、情報を見やすくする際に重宝した。ただし、サイズの変更はスクリーン座標を用いて行ったため、意図したサイズ変更と実際に行われるサイズ変更に差があった。今後は実空間の座標系を用いることで、意図通りのサイズ変更が行われるようにしたい。

書き込み操作は、資料への指示などに用いることで、意思を伝えることに役立った。今後は、書き込む線の色や太さの変更を可能にすることで、より多様な表現を可能にする。また、割り当てたハンドジェスチャの関係上、画数の多いものを書き込む場合に手を閉じたり開いたり繰り返す必要があり、ユーザに負担をかける結果となった。ジェスチャを見直し、より使いやすいものにしたいと思う。

ページ送り操作は、主にプレゼン時の資料操作に役立った。作成した操作の中では一番自然な操作であると感じた。今回は左右に手を動かした場合にページ送りを行うようにしたが、上下や奥行き方向に動かした際には何の処理も行わなかった。今後は使用していない方向へ動かした場合も対応した処理を行うことで、より使いやすいシステムにしたい。

今後の発展では、協調作業に必要となる機能をよく検討し、それらをシステムに追加することで、より効果的な支援を行えるようにする。現在考えているものとして、複数の仮想ディスプレイがどんな関係かを設定できるようにすることを考えている。例えば、並べて見比べることが多い情報を表示する仮想ディスプレイ間に相対位置を維持する設定を行うことで、作業の効率が良くなると考えられる。

第7章 結論

本研究では、クラウドコンピューティングの普及に伴って行うことができるようになった、場所を選ばずに行われるネットワーク上のデータを用いた協調作業について、その特徴と問題点について述べた。そして、その問題点を解消し、より効率的な協調作業を行うことを目的として、拡張現実感を用いた協調作業支援システムの提案を行い、システムのプロトタイプを実装した。

システムは拡張現実感を用いた仮想的なディスプレイによりユーザに情報の提示を行い、仮想ディスプレイの見える位置や傾きについて複数ユーザ間で同じ認識を持つことで、円滑な協調作業を行えるようにした。また、仮想ディスプレイに対するハンドジェスチャによるインタラクションを可能にすることで、ユーザが自然な操作を行えるようにした。移動操作では、仮想ディスプレイを任意の場所へ再配置することを可能にし、情報の整理などを容易にした。サイズ変更操作では、仮想ディスプレイのサイズ変更を行えるようにし、大画面による情報共有などを行えるようにした。書き込み操作では、仮想ディスプレイに対してフリーハンドの線を引くことで、他のユーザに対して円滑に意思を伝えることを可能にした。ページ送り操作では、複数ページから構成される資料のどのページを表示するか変更可能にし、資料の操作を直感的にした。

今後は、試用を通して感じた利点を生かしつつ、問題点を解消して、より効果的な協調作業の支援を行うシステムを目指す。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、指導教員である田中二郎先生をはじめ、志築文太郎先生、高橋伸先生、三末和男先生には、ゼミなどを通して丁寧なご指導や貴重なご意見をいただきました。心より御礼申し上げます。

また、インタラクティブプログラミング研究室の皆様には、日頃の研究室での生活を通して多くのアドバイスをいただきました。特に NERF チームの皆様には、日頃のご指導に加え、研究テーマ決めのブレインストーミングや、本論文の推敲などに貴重なお時間を割いていただきました。深く感謝申し上げます。

最後に、ここまで私を支えてくださいました友人や家族など、お世話になった全ての方々に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Deepak Bandyopadhyay, Ramesh Raskar, Henry Fuchs, Dynamic shader lamps: Painting on movable objects, In Proc. of International Symposium on Augmented Reality, pp.207-216, 2001 年 10 月
- [2] 塚田 裕太, 牛田 啓太, 鶴見 智, AR 白板：実空間情報のコピー＆ペースト機能による拡張ホワイトボードの提案, インタラクシオン 2011, 2SCL-17, pp.443-446, 2011 年 3 月
- [3] 加藤 博一, 拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発, 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 101(652), pp.79-86, 2002 年 2 月
- [4] Georg Klein, David Murray, Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, In Proc. International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'07, Nara), pp.225-234, 2007 年 11 月
- [5] 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 (DICOMO2011) シンポジウム, pp.1223-1233, 2011 年 7 月
- [6] Chris Harrison, Hrvoje Benko, Andrew D. Wilson, OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere, UIST 2011, pp.441-450, 2011 年 10 月
- [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 100(565), pp.69-76, 2001 年 1 月
- [8] 蔵田 武志, 興梠 正克, 加藤 丈和, 大隈 隆史, 坂上 勝彦, ハンドマウスとその応用: 色情報と輪郭情報に基づく手の検出と追跡, 映像情報メディア学会技術報告 25(85), pp.47-52, 2001 年 12 月
- [9] 塚田 浩二, 安村 通晃, Ubi-Finger: モバイル指向ジェスチャ入力デバイスの研究, 情報処理学会論文誌 43(12), pp.3675-3684, 2002 年 12 月
- [10] 山本 哲也, 庄司 武, 寺田 努, 塚本 昌彦, ウェアラブルコンピューティングのための手足を使った状況依存コマンド入力手法, インタラクシオン 2011 論文集, pp.99-106, 2011 年 3 月
- [11] 平賀 高市, 若林 佳織, 松浦 宣彦, 仮想タッチパッド: タッチパッドの操作を模したジェスチャマウス, 映像情報メディア学会技術報告 34(25), pp.57-62, 2010 年 6 月

- [12] 藤原 正貴, 山口 徳郎, 櫻井 智史, 北村 喜文, レクイエール アナトール, 岸野 文郎, 立体画像を用いた協調作業に関する一検討, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告 2008(11), pp.45-52, 2008 年 1 月
- [13] 森島 茂貴, 間下 以大, 清川 清, 竹村 治雄, 作業者視点映像の全方位レンジデータへの投影による遠隔協調作業支援システム, 映像情報メディア学会技術報告 34(25), pp.131-136, 2010 年 6 月
- [14] 森島 茂貴, 間下 以大, 清川 清, 竹村 治雄, 遠隔協調作業支援のための装着型 ProCam システムを用いた三次元再構築, 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 110(381), pp.7-12, 2011 年 1 月
- [15] Richard A. Newcombe, Shahram Izadi, Otmar Hilliges, David Molyneaux, David Kim, Andrew J. Davison, Pushmeet Kohli, Jamie Shotton, Steve Hodges, Andrew Fitzgibbon, KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking, Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2011 10th IEEE International Symposium, pp.127-136, 2011 年 10 月
- [16] Richard A. Newcombe, Steven J. Lovegrove, Andrew J. Davison, DTAM: Dense tracking and mapping in real-time, Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference, pp.2320-2327, 2011 年 11 月