

平成20年度

筑波大学第三学群情報学類

卒業研究論文

題目
SyncSurface:対面に近いコミュニケーション・
協調作業を実現する同期平面

主専攻 知能情報メディア主専攻

著者 村田 雄一

指導教員 志築文太郎 高橋伸 三末和男 田中二郎

要 旨

ビデオ映像を用いたコミュニケーション手法(以下,映像コミュニケーション)は,相手の表情や様子を窺うといった高度なコミュニケーションをもたらすが,それでもなお,実際に対面している状況に比べコミュニケーションの手段が制約されたものになってしまっている.本論文では,遠隔地に置かれた複数の平面上にある実世界の物体,協調作業者を,平面に投影されるコンピュータアプリケーションの表示と合わせて同期表示することにより,あたかも同じ平面を共有しているかのような感覚の下で,対面に近いコミュニケーションをとる,協調作業を行うことのできる映像コミュニケーション手法として SyncSurface を提案する.本論文では,テーブル型の SyncSurface Table,ホワイトボード型の SyncSurface Board の2形態の SyncSurface を実装し,その利用実験を行った.

目次

第1章	序論	1
1.1	映像コミュニケーションの背景と重要性	1
1.2	映像コミュニケーションの多様性	1
1.3	現状の映像コミュニケーションにおける限界	3
1.4	本研究のアプローチ	3
1.5	本研究の貢献	4
1.6	本論文の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	遠隔協調作業におけるアウェアネスの提供	5
2.2	仮想共有空間を用いる試み	6
2.3	SyncSurface の位置づけ	7
第3章	SyncSurface を用いたコミュニケーション・協調作業	9
3.1	SyncSurface のコンセプト	9
3.2	SyncSurface の多様性	9
3.3	SyncSurface の特徴	10
3.4	想定されるアプリケーション	11
第4章	実装	13
4.1	画面上の物体領域抽出	13
4.1.1	各物体領域抽出手法の検討	13
4.1.2	IR キー合成を用いた画像抽出	14
4.1.3	IR キー合成の画像処理	15
4.2	ハードウェア構成	17
4.2.1	SyncSurface Table の構成	17
4.2.2	SyncSurface Board の構成	18
4.2.3	平面撮像系	19
4.3	平面の同期処理	19
4.3.1	対象平面の切り出し	20
4.3.2	平面画像の通信	21
4.3.3	平面画像の合成	21

第 5 章	実験と議論	22
5.1	SyncSurface Table の利用実験	22
5.1.1	実験内容	22
5.1.2	実験結果	22
5.1.3	考察	23
5.2	SyncSurface Board の利用実験	24
5.2.1	実験内容	24
5.2.2	実験結果	24
5.2.3	議論	25
5.3	IR キー合成の精度	26
5.3.1	実験内容	26
5.3.2	実験結果	26
5.3.3	考察	26
第 6 章	まとめ	29
6.1	まとめ	29
6.2	今後の課題	29
	謝辞	30
	参考文献	31

目次

1.1	多様な映像コミュニケーション手法	2
1.2	現状の映像コミュニケーションにおいて交わすことの難しい行為	4
2.1	関連研究と SyncSurface の位置づけ	8
3.1	SyncSurface の概念	9
3.2	テーブル型とホワイトボード型の SyncSurface	10
3.3	オフィスにおける SyncSurface	12
4.1	画面上の物体を切り出す画像処理	15
4.2	アルファマップの生成関数	16
4.3	SyncSurface Table の構成	17
4.4	SyncSurface Table 用赤外線投光器	18
4.5	投光器の回路図	18
4.6	SyncSurface Board の構成	18
4.7	可視光と不可視光を光学的に同じ位置から撮影する撮像系	19
4.8	Homography 変換における対応点の指定	20
5.1	SyncSurface 利用実験の様子	23
5.2	写りこみが生じてしまった例	24
5.3	SyncSurface Board 利用実験における可視光画像と合成画像	25
5.4	各照明条件 (左) における物体領域抽出結果 (右) の比較	28

第1章 序論

1.1 映像コミュニケーションの背景と重要性

ビデオカメラの小型化と廉価化，そしてネットワーク帯域幅の増加に伴い，ビデオ映像を用いたコミュニケーション手法（以下，映像コミュニケーション）が使われるようになった．これまで，音声情報を伝える方法として電話や音声チャットが，意味情報を伝える方法として電子メールやチャットがそれぞれ発展を遂げ，用いられてきた．映像コミュニケーションはこれらに視覚情報を加えることにより，相手の様子や表情を窺うといった，より高度なコミュニケーションをもたらす．

相手の様子や表情を窺うといったやりとりは，意思を伝達するという意味においては本質的なものではない．しかし，「重要な話や意思決定は実際に顔を合わせて行うべきである」という事が一般的な暗黙の了解になっている点からもうかがえる通り，我々はあらゆるコミュニケーションにおいてこうした視覚的な情報を重視していると言える．

映像コミュニケーションは，グローバル化とネットワークの普及に伴って，ますますその重要性を増している．我々は，距離的な制約や国家の境界を飛び越えて，より遠くの人間とかわるようになり，仕事を共にするようになった．しかし，遠く離れた相手と実際に顔を合わせるためには，移動の時間的・金銭的なコストがかかる．こうした背景にあって，公私を問わず，遠く離れた人物と疑似的に顔をあわせてコミュニケーションをとることのできる手段が求められることは，必然であると考えられる．

1.2 映像コミュニケーションの多様性

映像コミュニケーションとして，テレビ電話，ビデオチャット，ビデオ会議が挙げられる．これらを図 1.1 に示す．

テレビ電話 通常の電話に，映像コミュニケーションを加えたものである．インターネットやコンピュータが市民権を得る以前から存在したが，それほど普及しなかった．当時は，大容量の情報をやり取りすることができる回線が整備されておらず実用的でなかった点や，機器が高価であった点等が理由として考えられる．

ビデオチャット コンピュータの文字チャットや音声チャットに，映像コミュニケーションを加えたものである．コンピュータが市民権を得，ブロードバンド回線が普及しインターネットを通じて大容量通信が行えるようになると，コンピュータで映像コミュニケーションをとることのできるビデオチャットが活用されるようになった．

ビデオ会議 遠隔地会議を行うことを目的とした映像コミュニケーション手段である。画面上には会議参加者が複数人表示され、身振り手振りや発話を交えながら会議を行うことができる。



(a) テレビ電話



(b) ビデオチャット



(c) ビデオ会議

図 1.1: 多様な映像コミュニケーション手法¹

上にあげた映像コミュニケーションはいずれも、自分の端末に相手を表示し、相手の端末に自分を表示するという点で、本質的に同じものとなっている。それにもかかわらず、アプリケーションに応じて映像コミュニケーションが多様化していることは、映像コミュニケーションが公私を問わず、幅広い分野において求められていることの裏付けともとれる。

¹ 図 1.1(a,c) は Wikipedia(<http://ja.wikipedia.org>) より転載。

1.3 現状の映像コミュニケーションにおける限界

映像コミュニケーションは、遠隔地の相手と疑似的に顔を合わせて対話することができるが、それでもなお、実際の対面コミュニケーションに比べ制約を受けた物になってしまっている。対面のコミュニケーションに用いられる行為として、図 1.2 に示す情報の共有、直示的ジェスチャの利用が挙げられる。しかし、これらを現状の映像コミュニケーションを用いて実現することは難しい。

情報の共有 対面でコミュニケーションを行う場合、話題に上がっている資料や物等を相手に見せるといった、情報の共有を行うことがあるが、映像コミュニケーションで同様の情報共有を行うことは難しい。これは一見、可能であるかのように思えるが、従来の映像コミュニケーションにおいて情報の共有を行おうとする場合、共有したい情報をカメラに向かって突き付ける形になる。対面時において情報を共有する場合、共有したい情報を自分と相手の間に置く、相手に手にとってもらおうというのが一般的である。この点を考慮すると、突き付ける形での提示は不自然である。また、突き付ける形の提示においては、それぞれが別々の方向から対象を見ることになるため、相手と自分が同時に同じ情報を見ることはできない。これは、共有情報を交えた議論を行う場合、議論を妨げる要因となりうる。

直示的ジェスチャの利用 対面のコミュニケーションにおいては、指差しやそれに準ずる身振り手振りがしばしば用いられる。喜多らは空間を使って表すジェスチャを表象的ジェスチャ、とりわけ、指差しをはじめとした時空間的隣接性を用いて指示を行うジェスチャを直示的ジェスチャと分類している [喜多 02][斎藤 02]。

直示的ジェスチャは、言葉を交えず、正確に空間的な指示ができる点において有用である。例えば、1 台のコンピュータを用いて協調作業をする場合や、初心者への操作指南の際に、コンピュータの画面上の一部を指差し指示を行うことがある。デスクトップ共有アプリケーション等においてこうした行為を用いることができれば有益と考えられるが、現状の映像コミュニケーションにおいては、作業者同士で共有する画面と撮影される映像が空間的に一致しないため、直示的ジェスチャを活用することは難しい。

これらのやり取りを引き出すことのできる新しい形態の映像コミュニケーションを確立することができれば、より対面に近いコミュニケーションを遠隔地の相手と取ることができるようになると考えられる。

1.4 本研究のアプローチ

本論文においては、以上の点を鑑みた上で、より対面に近いコミュニケーションを実現するシステムとして、複数の遠隔地に置かれた平面の見た目を同期させる SyncSurface について述べる。互いの平面上におかれた物体、そして、平面上にかざされた手や人物像を、お互い



(a) 情報の共有



(b) 直示的ジェスチャ

図 1.2: 現状の映像コミュニケーションにおいて交わすことの難しい行為

の平面上に映し出すことにより，情報の共有を行う，直示的ジェスチャを利用するといった，普段対面で用いられる手段を用いてコミュニケーションをとることができるようになる．また，ソフトウェアの表示を同時に映し，これを共有することにより，遠隔地の作業者と対面に近いコミュニケーションを交えながら協調作業を行うこともできるようになる．

1.5 本研究の貢献

本論文の貢献は，遠隔地に置かれた複数の平面上を疑似的に同期する方法の実現，同期する平面を用いたコミュニケーション・協調作業環境の評価である．また，赤外線発光面を用いることによりカメラ画像から画面上に置かれた物体のみの画像を切り出す方法も本論文の貢献である．

1.6 本論文の構成

本論文は以下の通りに構成される．2章では関連研究と本論文の位置づけについて述べ，3章では SyncSurface のコンセプトとそれを用いたコミュニケーションや協調作業について述べる．4章では IR キーを用いた画像抽出とそれを用いた平面上を疑似的に同期させる方法について述べる．5章では試作したシステムの利用実験とその考察について述べる．6章で本論文をまとめる．

第2章 関連研究

遠隔地の相手とのより対面に近いコミュニケーションや協調作業を実現する試みは、以前から盛んに研究されてきた。これらは、遠隔協調作業アプリケーション使用時におけるアウェアネスを提供するもの、仮想の共有空間を構築するものに大別される。

2.1 遠隔協調作業におけるアウェアネスの提供

Paulらは、「周囲」に誰がいるか、どのようなアクティビティが起こっているか、誰が誰に話しかけているかを知ることを含む一般的な気づき(アウェアネス)に着目し、これらを遠隔地間で伝えることにより、グループ作業を支援する方法について述べている [DB92]。以来、アウェアネスに着目した研究がさかに行われてきた。

遠隔地に設置されたそれぞれのディスプレイに同一のアプリケーションを表示して互いに操作し合うような遠隔 CSCW(Computer Supported Cooperative Work: コンピュータを用いた協調作業支援)におけるアウェアネスに着目した研究がいくつか挙げられる。これらは、カメラ等から得られた情報を画面に統合することにより、協調作業者が何をしているか、画面のどこに対して作業を行おうとしているかといったアウェアネスを実現するものであるが、直示的ジェスチャの利用ができる点において、対面に近いコミュニケーションや協調作業を実現する試みでもあると言える。

VideoDraw[TM90]、VideoArms[TNG07]は、スクリーンにかざしたユーザの手の映像を遠方のスクリーンに表示することにより、遠隔協調作業におけるアウェアネスを提供している。VideoDrawは撮影した手元の画像上に作業エリアを重ねたものを遠隔地の画面に表示している。一方、VideoArmsは肌色抽出を用いて人物の手の領域を切り出し、これをアプリケーションの表示に合成している。

人物領域の作る影を用いることにより、遠隔協調作業におけるアウェアネスを提供する研究が挙げられる。VideoWhiteBoard [TM91]、LIDS[AMM⁺03]は、スクリーンの前に立つ人物の影を遠方のスクリーンに表示している。Distributed Tabletops[TR07]は、スクリーンにかざしたユーザの手の影を遠方のスクリーンに表示している。これらは、遠隔地の作業者の様子が影としてやり取りされる。それゆえ、顔の表情や指の形など、それらが持つ表層情報は失われてしまうが、何をしているか、どこに対して作業をおこなおうとしているかといったアウェアネスを提供することができる。

ClearBoard[IK92]は、透明な作業エリアの向こう側に、作業エリアから見た相手の様子を表示することにより、あたかもガラス窓をはさんで向き合っているような感覚で協調作業を

することを可能とする．作業平面の向こう側に相手の顔が見えるため，アイコンタクトを交わすだけにとどまらず，相手の視線を追うことで，相手が今何を見ているのか知るといったアウェアネスを実現する．

2.2 仮想共有空間を用いる試み

仮想空間に物体，背景，遠隔地の相手の映像などを配置し，これをユーザ間で共有することにより，あたかも同室にいるかのような状況を作り出し，相手の表情を窺う，身振り手振りや指差しを交えるといったやりとりを自然に交えることのできる環境を実現する試みが挙げられる．

仮想共有空間を用いる試みには，人工現実感 (VR:Virtual Reality) を用いるものと，非没入型のディスプレイを用いるものとに大別される．

VR を用いた仮想共有空間

VR の技術を利用し，没入空間上に仮想共有空間を構築する試みが挙げられる．

河野らは，共有没入空間中に配置したユーザの分身の関節の動きを，ユーザに取り付けた磁気センサから得られた値に対応付けることにより，身振り手振りを交えたコミュニケーションを遠隔の相手ととることができるシステムについて述べている [河野 00]．小木らは，ユーザをカメラで撮像し，共有没入空間上に重畳表示することにより，身振り手振りだけにとどまらず，相手の様子や表情を窺うといった高度なコミュニケーションを可能とするシステムについて述べている [小木 99]．

これらの研究は，VR の技術を取り入れることにより，高い臨場感の下での遠隔地とのコミュニケーションを実現している．ユーザは，ジェスチャなどの行為を自然に行うことができるため，現実に即したコミュニケーションの手段を用いることができる．その反面，没入環境を実現する機器は一般に高価であることが多く，利用の敷居が高い．さらに，ユーザは利用の度に偏光メガネ，HMD をはじめとする特殊な機器を装着しなければならない．

非没入型ディスプレイを用いた仮想共有空間

非没入型の画面に仮想共有空間を表示する試みが挙げられる．

HyperMirror[MM97] は，画面の前に立つと鏡の様に自己像が映る表示に，遠隔地の相手の人物像を合成することにより，自分と相手があたかも同室にいるかのような提示を行うシステムである．身振り手振り，背景に対しての指差し等の行為を交えながらコミュニケーションをとることができる．

AgoraG [山下 01] は，書画カメラで撮像した映像を，遠隔地の書画カメラで撮像した映像と合成してディスプレイに表示することにより，本や資料等の情報を共有した協同作業を行うことができるシステムである．ユーザの前方には相手の様子とその手元を映すディスプレ

イが設置されており，これによって相手の持つ資料を指差し，書画カメラエリアへの移動を促すといったやり取りができる．

こうした試みは，VR を用いたシステムのような高い臨場感を伴わないものの，前述の没入環境を用いるものに比べ，導入コストが低い．さらに，利用の際に特殊な機器の装着を必要としない．その反面，情報の提示，指差し等は，仮想共有空間の表示される画面ではなく，入力エリアであるカメラに対して行うことになる．すなわち，仮想空間に対するアクセスは間接的となる．このため，コミュニケーションの手段がシステム独自の人工的なものとなっている．

2.3 SyncSurface の位置づけ

関連研究と比較した本研究の位置づけを図 2.1 に示す．

本研究は，アウェアネスの提供にとどまらず情報の共有をも行うことができる．2.2 節で挙げた仮想共有空間を実現する試みのうち，現実感を伴うものと現実感を伴わないものの中間的な位置づけを持つ．本研究は，仮想共有空間を平面に表示することにより，VR 機器を必要としない共有空間を実現する．この点において，本研究は，現実感の実現よりも利用の簡便さに重点を置いていると言える．その一方，仮想共有空間に物を提示する，仮想共有空間に対して直示的ジェスチャを行う等の動作は平面上に直接行えば良く，間接的なアクセスにはならない．この点において，本研究におけるコミュニケーション環境は，非没入型ディスプレイを用いた共有空間の従来研究に比べ，より現実に即したものであると言える．

本研究は，共有空間の実現と遠隔アウェアネスの概念を統合したものである．平面上にかざされた人の手，体，顔，その人が持つ物等を同期することにより，遠隔地の相手が何をしようとしているのか分かるといったアウェアネスを誘発する情報を伝えるが，このとき，その表層情報を共有することにより，高度なアウェアネスを実現していると言える．例えば，遠隔地の相手がどのようなメモ帳にどのような情報を書き込んでいるのか，どのようなボールペンを使っているのか，パソコンを使って何を調べようとしているのかといった具体的な情報をアウェアネスとして伝えることができる．

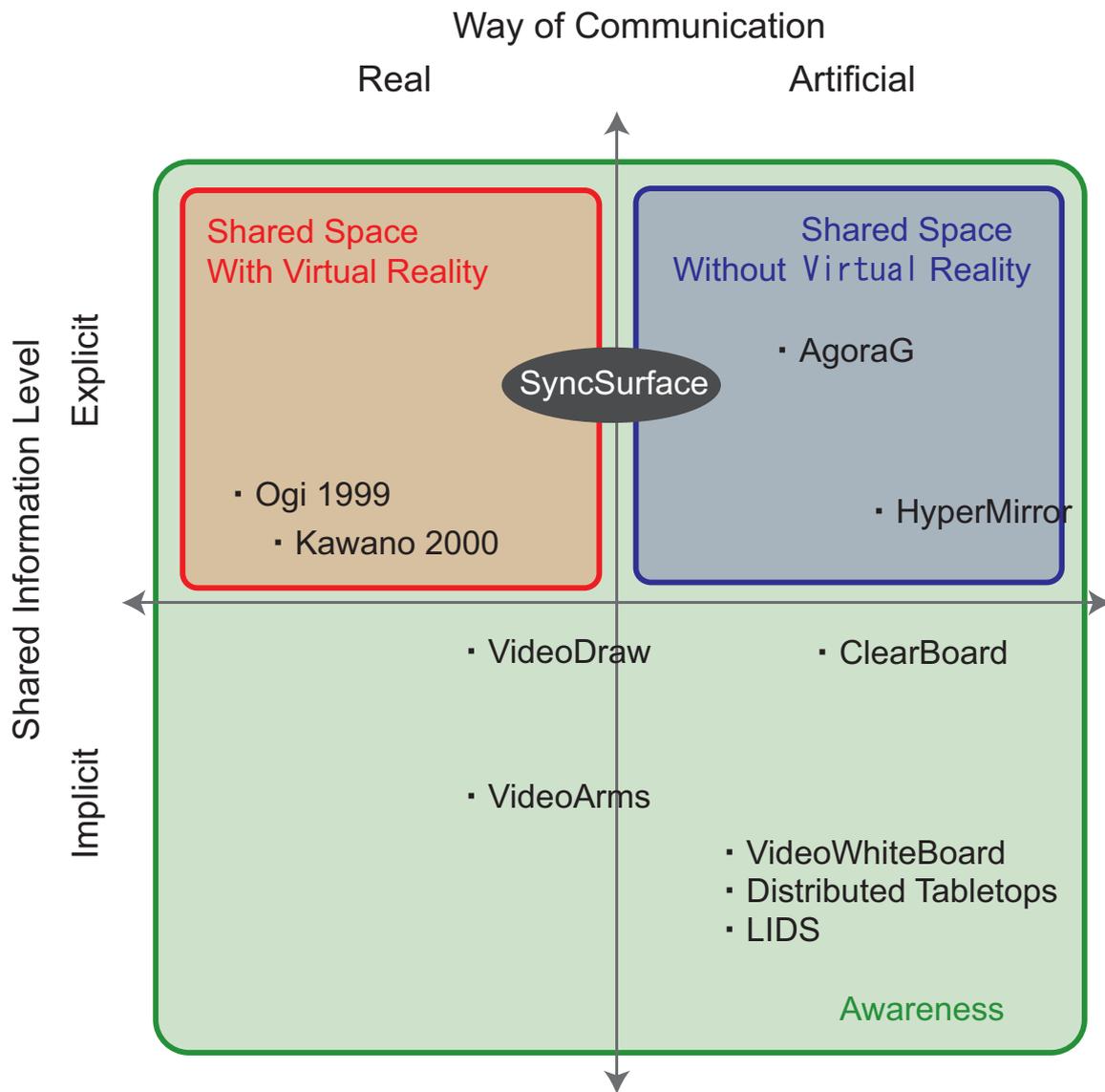


図 2.1: 関連研究と SyncSurface の位置づけ

第3章 SyncSurface を用いたコミュニケーション・協調作業

3.1 SyncSurface のコンセプト

SyncSurface は遠隔地に配置された複数の平面の見た目を同期する．図 3.1 に SyncSurface の概念を示す．

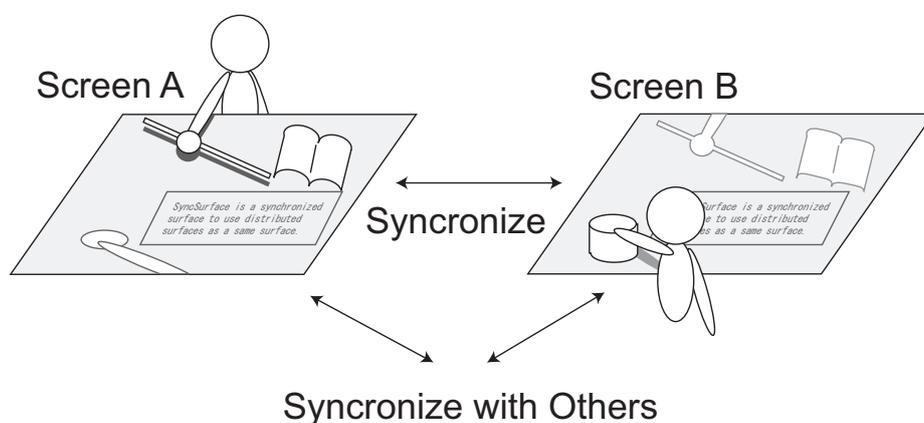


図 3.1: SyncSurface の概念

画面 A の前に人物や物が入ると画面 B にその様子が映し出される．また，画面 B の前に人物や物が入ると画面 A にその様子が映し出される．これにより，画面 A と画面 B はあたかも同一平面であるかのように見える．そのため，資料や物を並べて見せるといった情報の共有や，指差し等の指示的ボディーランゲージ等を用いて，コミュニケーションをとる，協調作業を行うといったことができる．

SyncSurface は，画面上の物体に加え，画面に表示するデジタルコンテンツの同期表示も行う．互いの平面にアプリケーションを同期表示することにより，上にあげたやり取りを交えながらの CSCW を実現する．

3.2 SyncSurface の多様性

SyncSurface は，同期対象の平面により，多様な形態が考えられる．例えば，協調作業を行うためにテーブルやホワイトボードを同期する，調理支援を行うために調理台を同期する，同

じ内容を複数の場所に掲示するために掲示板を同期するといった応用例が考えられる。

本論文では、これらのうちテーブル型とホワイトボード型に着目し、これらの実装を行った。図 3.2 にテーブル型とホワイトボード型の SyncSurface の概念図を示す。

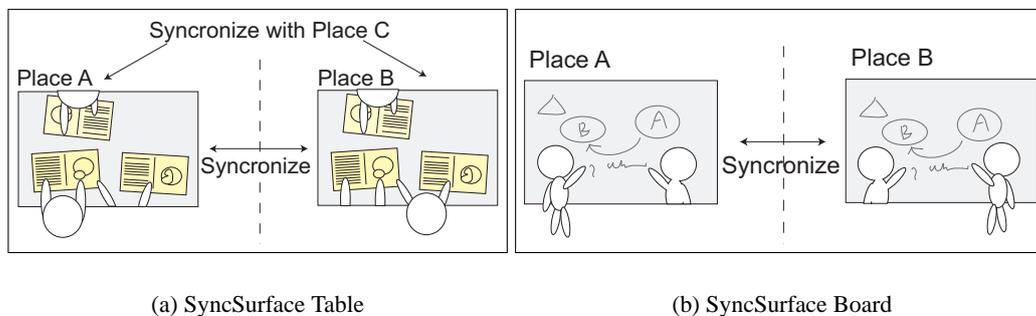


図 3.2: テーブル型とホワイトボード型の SyncSurface

SyncSurface Table 遠隔地に置かれた複数のテーブル上を同期する。資料や物を並べて相手に見せる、指差し等の身振り手振りを交えながら協調作業を行うといったことができる。相手の顔が平面に映ることはないため、相手の表情や姿勢を窺うことができない欠点がある。

SyncSurface Board 複数の地点に置かれたホワイトボード上を同期する。ホワイトボードを交えながら議論するといったコミュニケーションを、遠隔地の相手ととることができる。SyncSurface Table と異なり、相手の表情や姿勢を窺うことができる。一方、SyncSurface Table のように資料や物を並べるといった、情報の共有は難しい。

3.3 SyncSurface の特徴

SyncSurface は以下の特徴を持つと考えられる。

実空間とシームレスな情報共有空間の実現 SyncSurface の平面上は、実空間でありながら同時に情報共有空間である。すなわち、実空間と情報共有空間がシームレスである。そのため、資料や物を並べて見せる、それらを指差しながら話し合うといった行為を、情報共有空間に自然に持ち込むことができる。また、情報共有空間上における作業を行うために、ユーザは、ヘッドマウントディスプレイや特殊なセンサ等を装着する必要がない。

高度な遠隔アウェアネス 指差し等の身振り手振りをデジタルコンテンツ上に重畳表示することにより、遠隔アウェアネスを提供する。これに加えて、平面上の物体も同期表示することにより高度なアウェアネスを提示することができる。例えば、ノートを取っている、キーボードをひっきりなしに叩いている、コーヒーを飲んでリラックスしているといっ

た様子を協調作業者に伝えることができる。また、これらアウェアネスは作業平面に統合されて提示されるため、作業を中断することなくお互いの様子を窺うことができる。

コンピュータに制限されない応用力 SyncSurface は、ユーザの工夫次第で様々な応用が考えられ、それらがコンピュータの制約を受けにくい。例えば、地図アプリケーションの閲覧時に、一時的にある場所にマークを付けたいといった状況を考える。このとき、ソフトウェアにマークを付ける機能が実装されていなくても、消しゴム等の物体を平面上に置くことで、この機能を代替することができる。また、SyncSurface は専用のソフトウェアを必要とすることなく、調理支援を行う、学習支援を行う等の用途に応用することもできる。このようにユーザの工夫がコンピュータに制限されにくい。

プライバシー制御 ビデオチャットやビデオ会議の場合、カメラに映るものすべてが相手に見えてしまうが、SyncSurface においては、平面に置かれた物体は相手から見る事ができ、平面の外にあるものを相手が見ることはできない。このように、共有空間と非共有空間の境界が明白である。プライバシーを守りつつ、必要な情報だけ共有することができるため、これはプライバシーの制御に役立つ。例えば SyncSurface Table には、日常生活環境に配置して常に他の平面と同期するといったようなアプリケーションも考えられる。このような場合にも、意図せぬプライバシー情報の漏えいを防ぐことができる。

3.4 想定されるアプリケーション

オフィスにおける SyncSurface

SyncSurface の想定されるアプリケーションに、図 3.3 に示すようなオフィスでの利用が挙げられる。

拠点間通信を用いた遠隔地会議において、SyncSurface Table および SyncSurface Board を用いることにより、対面に近いやり取りを交えることができる。SyncSurface Table 上には地図アプリケーションが表示され、参加者はこれを交えて会議を行う。平面上に同期表示された会議参加者の映像から、指差しや身振り手振りといった指示的ボディーランゲージを交えることができる。また、自分の持ってきた資料を SyncSurface Table 上に置くことにより、参加者全員で情報を共有することができる(1)。SyncSurface Table と共に設置されたビデオチャットから、相手の様子を窺うこともできる(2)。SyncSurface Board にはプレゼンテーションスライドが表示され、両会議室のメンバーが入れ替わりプレゼンテーションを行うことができる(3)。質疑応答の際には、スライドを指差す等のやり取りを交えて議論を行うことができる。

上述したように、あたかも参加者全員が同室にいるかのような会議を執り行うことができる。

家庭における SyncSurface

SyncSurface は家庭等の日常生活環境においても応用が期待される。

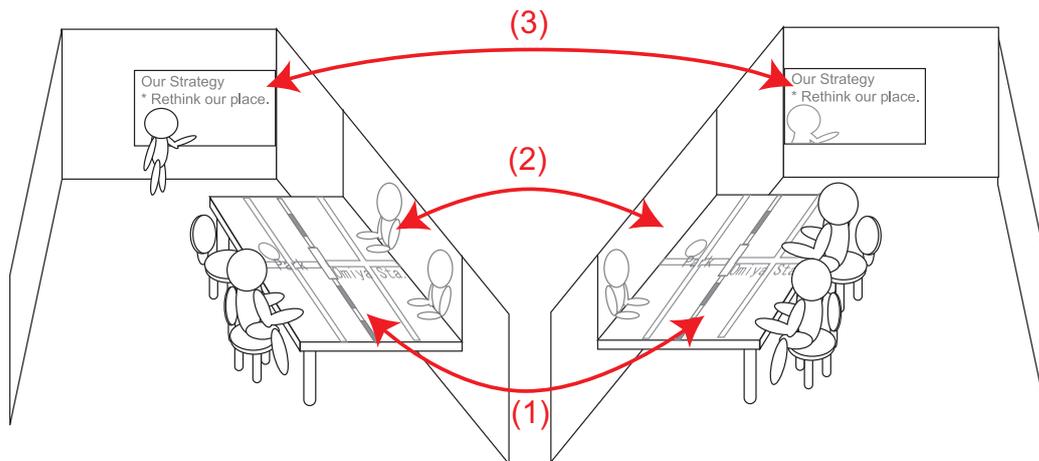


図 3.3: オフィスにおける SyncSurface

単身赴任の家庭と赴任先，核家族の家庭と実家等の遠隔地間に，それぞれ SyncSurface Table を配置する．SyncSurface Table には，食事をしている，仕事をしている等の様子が映し出され，遠隔地の家族や親戚が今何をしているかというアウェアネスを実現することができる．また，SyncSurface Table に同席し，音声チャットを交えることにより，疑似的に一緒に食事しながらコミュニケーションをとる，子供の宿題を見るといった協調作業を行うといったこともできる．このように，多くの情報を遠隔地に伝えることができる一方で，知られたくない情報や作業は平面に持ち込まなければ相手に見られることはない．日常的に，同期を行う場合においても，必要以上のプライバシー情報の漏えいを防ぎつつ，上にあげた協調作業やコミュニケーション，アウェアネスを実現することができる．

第4章 実装

SyncSurface の実装について述べる．この章では，IR キー合成を用いて平面上の物体領域を抽出する手法と，平面の同期を行う処理，そしてハードウェアについて述べる．

4.1 画面上の物体領域抽出

SyncSurface は平面上方に設置されたカメラで平面を撮像し，これを遠隔地の平面に投影することで同期表示を実現する．2 地点の同期を行う場合においては，VideoDraw[TM90] のようにカメラで撮像した画像を互いに投影し合えば良いが，この方法では複数の平面を同期することはできない．また，SyncSurface では，協調作業アプリケーション等のデジタルコンテンツを同時に投影するが，これを実現するためにはカメラ画像から物体領域のみを切り出して，デジタルコンテンツに合成する必要がある．

カメラ画像から特定の物体のみを切り出し他の画像に合成する手法は，用いる物体領域抽出手法によって，切り出しできる物体に対する制約や，切り出し結果の品質が異なる．本節では，まず，各物体領域抽出手法の比較を行い，赤外線発光面による物体領域抽出を用いた合成手法である IR キー合成について述べる．

4.1.1 各物体領域抽出手法の検討

カメラ画像から任意の物体領域を抽出する方法として，以下のものが挙げられる．特に，画面上の物体領域抽出を行う場合においての特徴に着目し，各手法を比較する．

ブルーバックを用いた方法 単色の背景(肌色の補色である青や緑等がよく用いられる)を用意し，色相情報を基に物体と背景を判別する手法である．HyperMirror[MM97]はこの手法を用いている．この手法は高品質な切り出しを実現するが，その一方，背景は特定の単色でなければならない，背景と同色の物体を前景に用いることはできないという制約がある．そのため，画面上の物体領域抽出に用いる場合，背景には単色を表示しなければならない．

背景差分法 撮像した画像の画素とあらかじめ撮影しておいた背景画像を比較することにより物体と背景を判別する．小木らの[小木 99]研究では，この手法を用いて画面前方の人物領域を抽出する手法を用いている．この手法においては，背景画像が変化してはならないという制約がある．また，背景と同色をした物体が背景として誤認識されてしまう

点，背景に乗ったノイズが前景として認識されてしまう点において，ロバスト性に欠ける．

肌色抽出を用いた方法 この手法は人間の肌色に着目し，色相情報を基に人間の肌とそれ以外を判別する．[TNG07][TR07]等に用いられている．この方法は，人間の肌のみしか抽出することができない点において，前景に対する制約が厳しいと言える．また，カメラ画像から人間の肌色を判別することが難しく，認識誤りが生じてしまう点においてロバスト性に欠ける．

偏光を用いた方法 西川らは，液晶ディスプレイの偏光特性を利用した画面上のオブジェクト領域の抽出手法 [西川 07] について述べている．この手法は，前景に対する制約が少ない点，抽出品質が照明条件の影響を受けにくいというロバスト性の点で長ける．一方で，背景映像は比較的輝度が高くなければいけないという制約がある．

熱画像を用いた方法 人体は熱を持つことを利用し，熱カメラの画像を用いて人物領域を抽出する手法である．ThermoKey[YNH04]，EnhancedDesk[KK01]等に見られる．この手法は，人間の体温に近い熱源を背景に持たない限り動作するため，背景に対する制約は少ない．一方，熱を持つ物体以外を切り出すことはできないという点で，前景に対する制約があると言える．

赤外線発光面を用いた方法 画面から赤外線を発光，あるいは画面に赤外線を投光し，これを前景が遮る様子を赤外線カメラで撮像することにより物体領域を抽出する方法である．Desneyらの研究[TP02]に用いられている．Desneyらの研究における赤外線投光はスクリーン正面から行っているが，本論文の実装においては，半透明スクリーンの裏側から赤外線を投光することにより，赤外線輝度を高め，多少の外光が差し込む照明条件においても正常な物体領域の抽出を実現している．また，可視光情報を用いずに領域の推定を行うため，前景および背景の視覚的特性に抽出品質が左右されず，これらに対する制約が少ない．

各物体切り出し手法の特徴を表 4.1 に示す．

4.1.2 IR キー合成を用いた画像抽出

SyncSurface では赤外線発光面を用いた方法を利用する．ここでは赤外線輝度を用いて画像合成を行う手法を IR キー合成と呼ぶ．赤外線発光面としてプロジェクタ投影の画面を用いる場合には画像と同時に赤外線を照射する．液晶ディスプレイを用いる場合，液晶のバックライトが赤外線を含むことを利用することで，IR キー合成を行う．

表 4.1: 画面上の物体領域抽出における各手法の比較

	背景に対する制約	前景に対する制約	ロバスト性
ブルーバックを用いた方法	×	×	
背景差分法			×
肌色抽出を用いた方法		×	×
偏光を用いた方法	×		
熱画像を用いた方法		×	
赤外線発光を用いた方法			

4.1.3 IR キー合成の画像処理

図 4.1 に IR キー合成の画像処理を示す。赤外線を投光した平面を赤外線透過フィルターを介してカメラで撮像すると、物体が画面を遮っている領域が輝度の低い画素として映る。これを用いて可視光カメラの画像を切り出すことにより、背景から物体領域のみを抽出した画像を生成できる。

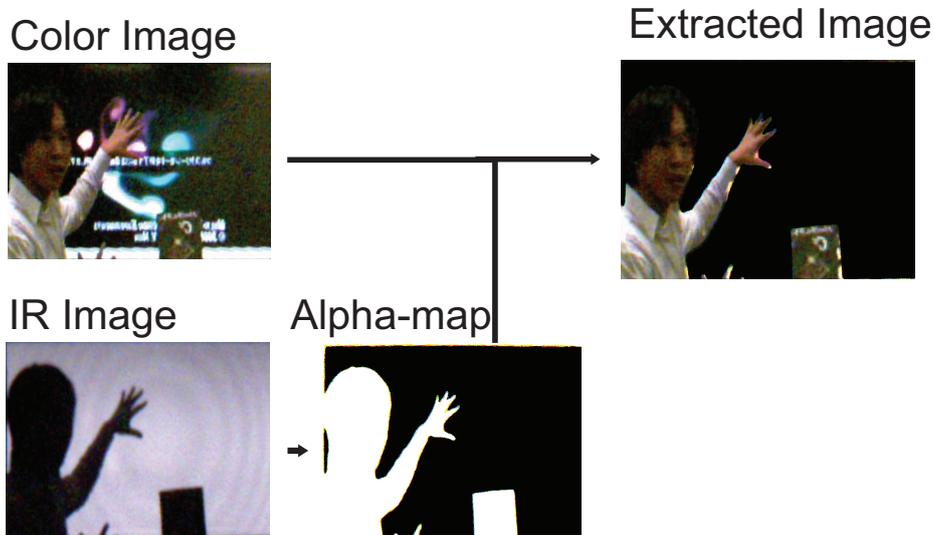


図 4.1: 画面上の物体を切り出す画像処理

クロマキー合成においては、ある一定の閾値を基準に前景と背景を分別し合成を行うハードキー方式と、その画素の前景らしさ(前景尤度)に応じて透過度を変化させた半透明合成を

行うソフトキー方式が挙げられる．本実装では，赤外線輝度に応じて透明度を変化させるソフトキー方式を用いた．IR キー合成においては，前景に赤外線透過質の物体が置かれたときに赤外線を遮断しきれない場合や，赤外線の投光や発色にムラが生じ，背景の一部の赤外線輝度が十分にならない場合があるが，このような場合においても，視覚的な品質劣化を抑えた画像合成を実現している．

画像処理では，まず，赤外線画像から計算された前景尤度を画像化したアルファマップを生成する．アルファマップとは，画像合成時の透明度を表す画像である．白が不透明，黒が透明を表し，その中間色は白色濃度が透明度を表す．0.0 から 1.0 の範囲の値をとる関数 $I_{IR}(x, y)$, $\alpha(x, y)$ をそれぞれ赤外線カメラ画像，アルファマップとすると，アルファマップは式 4.1，図 4.2 に示す関数によって生成される．

$$\alpha(x, y) = \begin{cases} 1.0 & (I_{IR}(x, y) < B_L) \\ 1.0 - \frac{I_{IR}(x, y) - B_L}{B_H - B_L} & (B_L < I_{IR}(x, y) < B_H) \\ 0.0 & (B_H < I_{IR}(x, y)) \end{cases} \quad (4.1)$$

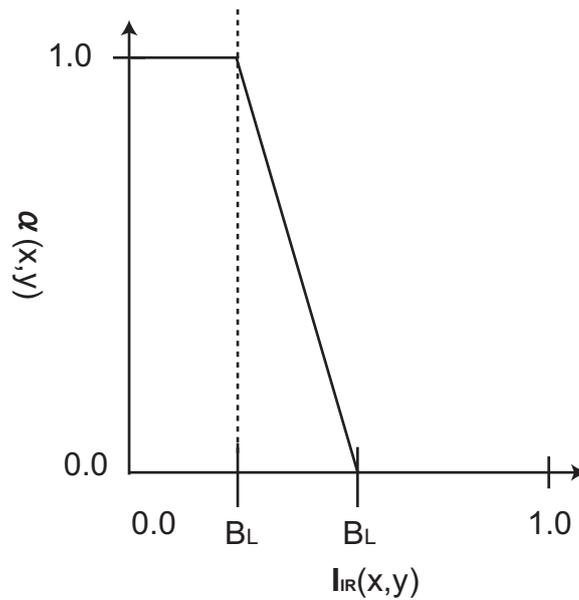


図 4.2: アルファマップの生成関数

次に，このアルファマップを用いて背景画像との合成を行う．RGB 3 チャンネルの輝度情報を 3 次元ベクトルで表した関数， $I_{res}(x, y)$, $I_{BG}(x, y)$, $I_v(x, y)$ をそれぞれ合成結果画像，合成背景画像，可視光画像とすると，合成結果画像は式 4.2 のようになる．

$$I_{res}(x, y) = \alpha(x, y)I_v(x, y) + (1 - \alpha(x, y))I_{BG}(x, y) \quad (4.2)$$

4.2 ハードウェア構成

本研究では、Table 型と Board 型の実装を行った。4.1.2 節で述べた通り、IR キー合成には赤外線を外から照射する構成と、液晶ディスプレイのバックライトを利用する構成が考えられる。ここでは、Table 型の実装に赤外線を照射する構成を、Board 型に液晶のバックライトを利用する構成を用い、それぞれの構成における SyncSurface の実装を試みた。

4.2.1 SyncSurface Table の構成

SyncSurface Table のハードウェア構成を図 4.3 に示す。Table 型の実装には、プロジェクタ投影を用いた。平面上方に設置されたプロジェクタによって、遠隔地に配置された物体、遠隔地間で共有しているアプリケーションの表示が、半透明スクリーンである平面上に投影される。赤外線投光器が平面下方に配置され、平面に赤外線を投光する。これを、平面上方の赤外線カメラが撮影し、同じ位置に設置された可視光カメラの画像と照らし合わせることで、平面上の物体を撮影する。

試作したテーブルの天板サイズは 60 cm × 180cm、投影面のスクリーンサイズはおよそ 40inch である。

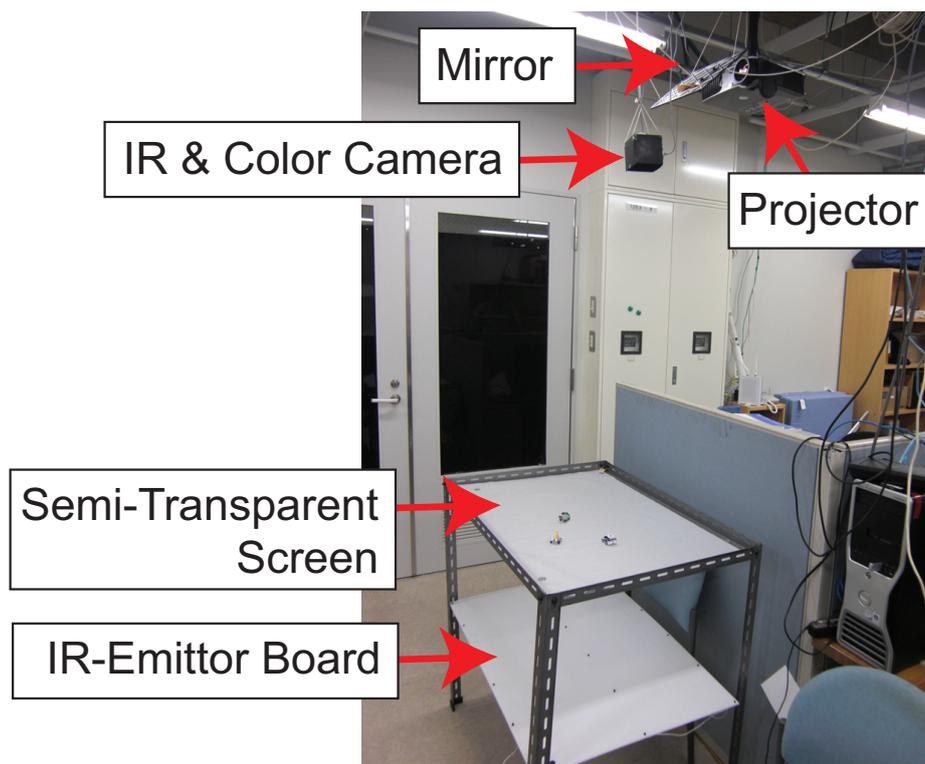


図 4.3: SyncSurface Table の構成

本実装に用いた赤外線投光器の外観を図 4.4 に，回路図を図 4.5 に示す．投光器のサイズはテーブルの天板サイズと同じく 60 cm × 180 cm となっている．3 行 6 列に高輝度赤外線 LED が，平面をなるべく均一に照らすよう均等に配置される．

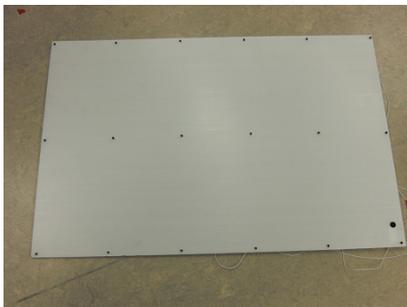


図 4.4: SyncSurface Table 用赤外線投光器

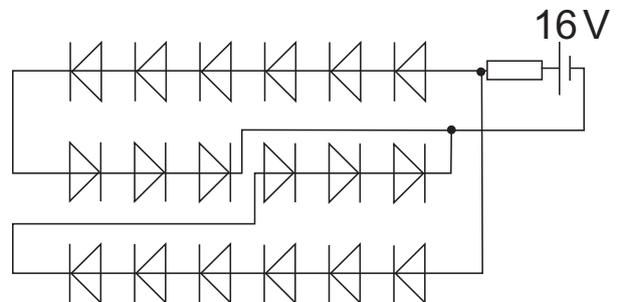


図 4.5: 投光器の回路図

4.2.2 SyncSurface Board の構成

図 4.6 に Board 型の構成をそれぞれ示す．

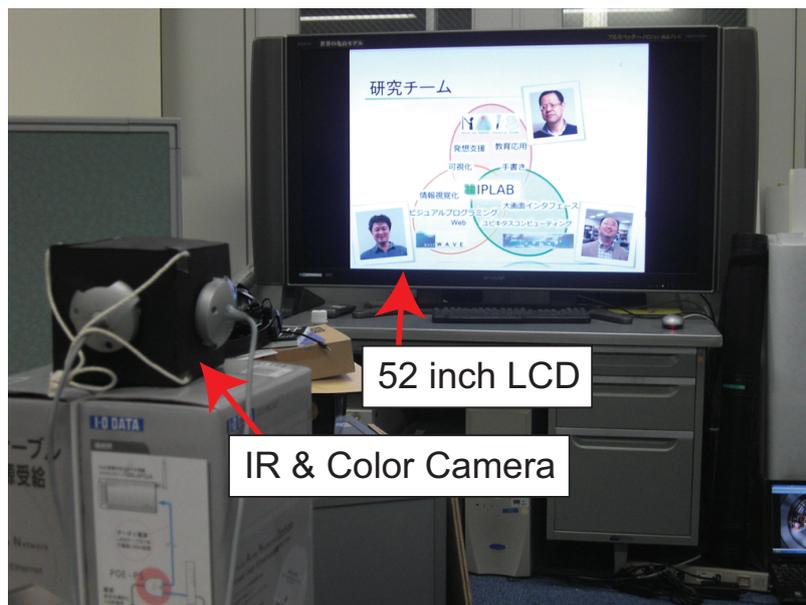


図 4.6: SyncSurface Board の構成

Board 型の実装には，52 インチワイド液晶ディスプレイを用いた．液晶画面上に，遠隔地に配置された物体，遠隔地間で共有しているアプリケーションが表示される．液晶画面のバス

クライトから発せられる赤外線を，画面手前の赤外線カメラで撮像し，可視光カメラの画像と照らし合わせることで，平面上の物体を撮影する．

4.2.3 平面撮像系

IR キー合成においては，可視光と不可視光の画像を同じ位置から撮影し，2つの画像を対応させる必要がある．可視光カメラと不可視光カメラを左右に並べた場合にも，ある程度の対応を図ることができるが，撮影対象がカメラに近づくと，2つのカメラの位置の差による視差が影響を与えてしまう．Thermokey[YNH04]では，可視光を透過し，赤外線を反射する特殊なミラーを用いることにより，光学的に同じ位置からの可視光画像と熱画像の撮影を実現している．本実装では，図 4.7 のようにハーフミラーを用いることにより，Thermokeyと同様，可視光画像と不可視光画像を光学的に同じ位置から撮影する．

可視光カメラには，VGA 画像が秒間 30 フレーム撮像できる USB 接続のウェブカメラを用いた．不可視光カメラには，可視光カメラと同等の機種のカメラから，赤外線カットフィルターをはずし，可視光カットフィルターを新たに装着したものをを用いた．

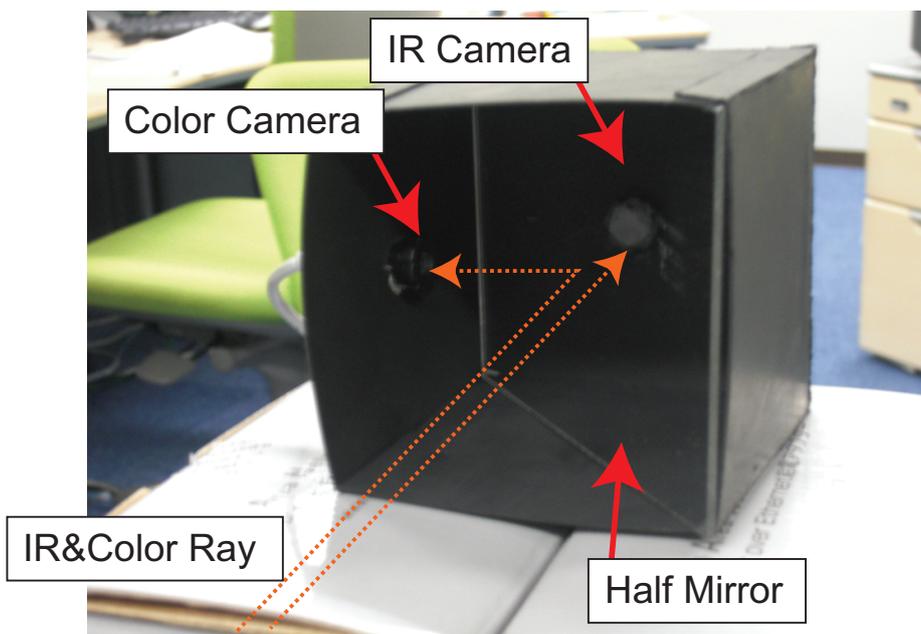


図 4.7: 可視光と不可視光を光学的に同じ位置から撮影する撮像系

4.3 平面の同期処理

平面の同期処理は，対象平面画像の切り出し，各平面で得られた画像の合成からなる．

4.3.1 対象平面の切り出し

まず，カメラ画像から対象平面の切り出しを行う．任意の平面をカメラで撮影した場合，透視投影変換された平面がカメラ画像に写る．Homography 変換を用いることにより，この透視投影変換された平面を切り出すことができる．対象平面の座標を (x, y) ，カメラ画像の座標を (u, v) とすると，式 4.3 に表す対応関係を持つ．

$$w \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ここでの $c_{11} \sim c_{33}$ は Homography 変換のパラメータであり，最低 4 つの座標点の対応を与えることで導出できる．ここでは，利用に先立ち，平面の 4 隅をマウスとキーボードを用いて指定することにより， $c_{11} \sim c_{33}$ のパラメータを導出する．図 4.8 は，対応点指定の様子である．パラメータの導出には OpenCV の `cvFindHomography` 関数を用いた．

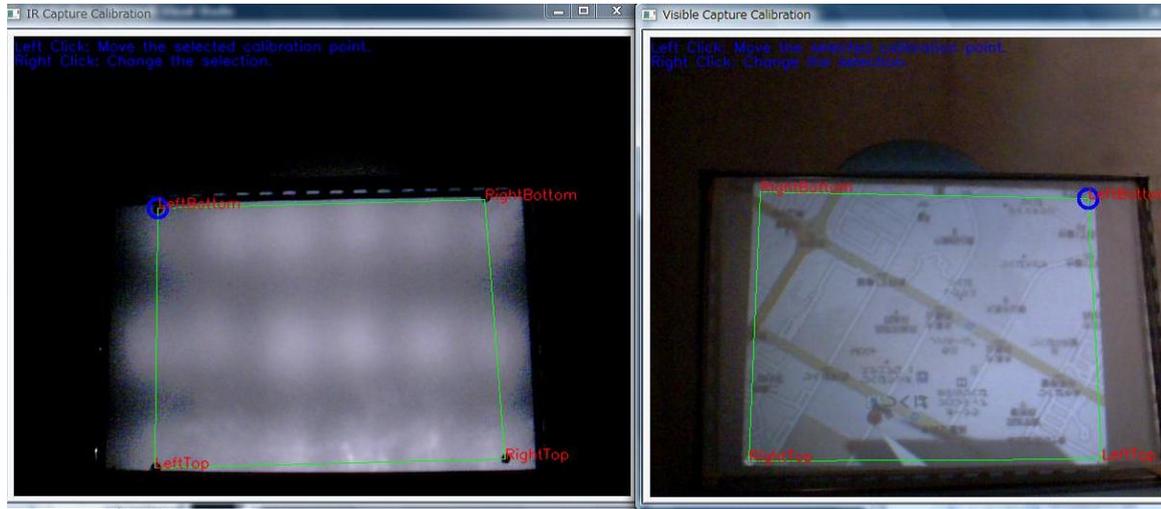


図 4.8: Homography 変換における対応点の指定

式 4.3 より

$$w = c_{31}x + c_{32}y + c_{33} \quad (4.4)$$

$$u = \frac{c_{11}x + c_{12}y + c_{13}}{w} \quad (4.5)$$

$$v = \frac{c_{21}x + c_{22}y + c_{23}}{w} \quad (4.5)$$

ここで，カメラ画像の座標系を (u, v) 切り出す平面の座標 (x, y) とし，RGB 3 チャンネルの輝度情報を 3 次元ベクトルで表した関数 $I_v(u, v)$ ， $I_s(x, y)$ をそれぞれ可視光カメラ画像，切

り出された対象平面画像とすると，対象平面の画像は式 4.6 で求めることができる．

$$I_s(x, y) = I_v\left(\frac{c_{11}x + c_{12}y + c_{13}}{w}, \frac{c_{21}x + c_{22}y + c_{23}}{w}\right) \quad (4.6)$$

また，4.1.3 節で得られたアルファマップについても同様の変形を行う．対象平面のアルファマップを $\alpha_s(x, y)$ とすると式 4.7 のようになる．

$$\alpha_s(x, y) = \alpha\left(\frac{c_{11}x + c_{12}y + c_{13}}{w}, \frac{c_{21}x + c_{22}y + c_{23}}{w}\right) \quad (4.7)$$

これによって，対象平面上の画像とアルファマップを得る．

4.3.2 平面画像の通信

各平面を同期させるため，各平面で得られた画像を UDP/IP 等を用いて互いに通信する．

本論文の実装では，同期平面を用いたコミュニケーションの評価を目的としたため，通信処理をひとまず省略した．平面 A の画像合成を行うコンピュータに平面 B を撮像するカメラを，平面 B の画像合成を行うコンピュータに平面 A を撮像するカメラを接続する．平面が 2 つの場合に限り，互い違いにカメラとコンピュータを接続することにより，平面の同期を行うことができる．

4.3.3 平面画像の合成

それぞれの平面から切り出された画像・アルファマップを用いて，それらを背景とともに合成する．同期を行う各平面を s_1, s_2, \dots, s_n としたとき， m 番目の平面 s_m に表示する合成画像を式 4.8 に示す．それぞれの平面から切り出された画像を $I_{s_m}(x, y)$ ，アルファマップを $\alpha_{s_m}(x, y)$ とすると以下の式を用いて合成を行う．

$$\begin{aligned} I_{s_1 \leftrightarrow BG}(x, y) &:= I_{s_1}(x, y)\alpha_{s_1}(x, y) + I_{BG}(x, y)(1 - \alpha_{s_1}(x, y)) \\ I_{s_2 \leftrightarrow s_1}(x, y) &:= I_{s_2}(x, y)\alpha_{s_2}(x, y) + I_{s_1 \leftrightarrow BG}(x, y)(1 - \alpha_{s_2}(x, y)) \\ &\vdots \\ I_{s_{m+1} \leftrightarrow s_{m-1}}(x, y) &:= I_{s_{m+1}}(x, y)\alpha_{s_{m+1}}(x, y) + I_{s_{m-1} \leftrightarrow s_{m-2}}(x, y)(1 - \alpha_{s_{m+1}}(x, y)) \\ &\vdots \\ I_{s_n \leftrightarrow s_{n-1}}(x, y) &:= I_{s_n}(x, y)\alpha_{s_n}(x, y) + I_{s_{n-1} \leftrightarrow s_{n-2}}(x, y)(1 - \alpha_{s_n}(x, y)) \\ I_{O_m} &= I_{s_n \leftrightarrow s_{n-1}}(x, y) \end{aligned} \quad (4.8)$$

第5章 実験と議論

SyncSurface を用いたコミュニケーションを評価するため，利用実験を行った．また IR キー合成のロバスト性，照明条件の変化に対する耐性について調べるため，各照明条件における抽出精度比較実験を行った．

5.1 SyncSurface Table の利用実験

5.1.1 実験内容

2つの SyncSurface Table を用いた利用実験を行った．テーブル上に，地図アプリケーションを表示する．また，それぞれの平面に車の模型を置き，これらを交えたやり取りを行う．この実験は以下の事項を確認することを目的とした．

- 情報の共有 (Table 上の車の模型とその配置) を交えたやり取りができるか．
- 直示的ジェスチャを交えたやり取りができるか．
- デジタルコンテンツの表示と上記のやり取りを交えることができるか．

図 5.1 は利用実験の様子である．

5.1.2 実験結果

一方の SyncSurface Table に置かれた車の模型の配置とその色，形を他方の SyncSurface Table 上で確認することができた．これによって，ある場所に車の模型を配置して場所を指定する，車を動かしながら移動ルートを説明するといったやり取りを行うことができた．直示的ジェスチャの利用は自然に行うことができ，その様子を他方から確認することができた．上にあげたやり取りは，デジタルコンテンツである地図上の意図した場所に対して，自然に行うことができた．

一方，いくつかの問題もみられた．立体感が損なわれてしまうことに起因した問題として，作業者がつかんだ手に車の模型が隠れてしまい，もう一方の作業者からその模型が見ることができない状況が生じた．また，図 5.2 に示すように，プロジェクタの表示が前景に不要な写りこみを生じてしまうことがあった．左側の作業者の持つノートに背景が投影されている．また，相手の車を見ることはできるが，それを触ったり移動したりすることができない点で，コミュニケーションに不具合が生じることがあった．

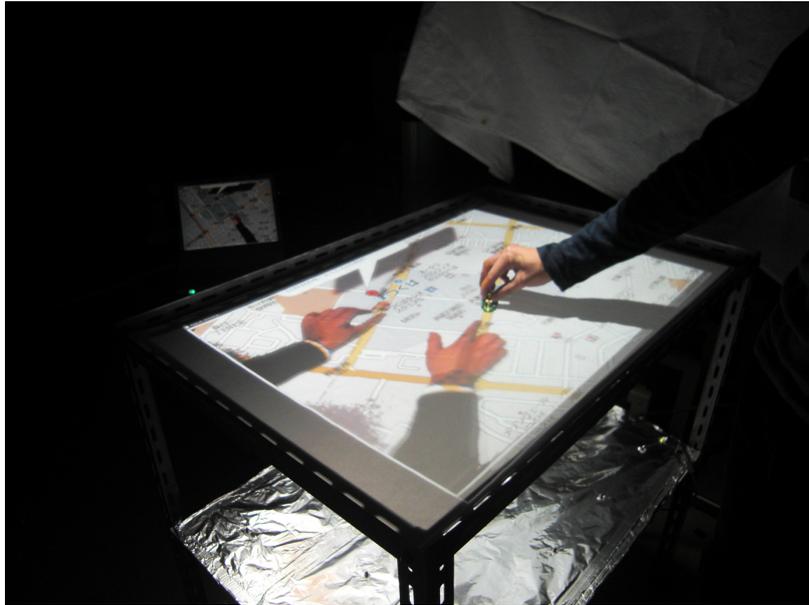


図 5.1: SyncSurface 利用実験の様子

5.1.3 考察

実験の結果から，SyncSurface Table を用いることにより，情報の共有，直示的ジェスチャを用いたコミュニケーションをとることができ，これらをデジタルコンテンツと組み合わせることができる事を確認できた．SyncSurface Table を遠隔地にそれぞれ配置することにより，対面に近いコミュニケーションをとる，協調作業を行うことができるようになると考えられる．ただし，今回は2平面間でのみ同期をとる，同じ場所に平面があることを前提として通信処理を省略したため，通信による遅延が生じていない．通信の遅延がコミュニケーションに影響を与える可能性もあるため，これについては慎重に検討する必要がある．

プロジェクタの表示が前景に不要な写りこみを生じてしまう問題については，IR キーから得られた情報を基に，物体領域にはプロジェクションを行わない処理を行うことにより，回避できるものと考えられる．また，物体の写りこみを回避する一方，これを有効活用することも考えられる．前述の処理によって背景は投影せず，他の平面で得られた前景画像のみを投影する．これによって，不要な映り込みを回避しつつも，自分の持つノートや資料等に対して，遠隔地の相手が直示的ジェスチャを行うことができるようになると考えられる．

また，遠隔地に置かれた物体に対して触る，動かす等の行為をとれない点は SyncSurface の限界であると考えられる．SyncSurface を用いて共有できるのはあくまで情報であって，物体そのものではない．物体がそこに実在していない以上，これは遠隔コミュニケーションの本質的な限界であると考えられる．



図 5.2: 写りこみが生じてしまった例

5.2 SyncSurface Board の利用実験

5.2.1 実験内容

SyncSurface Board は 1 台分のハードウェアしか実装することができなかつたため、得られた合成画像を同程度のサイズのプラズマディスプレイに表示し、これを観察した。遠隔プレゼンテーションを行うというアプリケーションを想定し、デジタルコンテンツにはプレゼンテーションスライドの表示を行い、これに対して直示的ジェスチャを行った。

5.2.2 実験結果

図 5.3 は、利用実験で得られた可視光カメラ画像と合成画像である。

SyncSurface Board 側で行った直示的ジェスチャは、プラズマディスプレイ側で観察することができた。また、プレゼンタの表情、動作も自然に観察することができた。今回の実験で用いた液晶ディスプレイは比較的輝度の高いものであった。そのため、図 5.3(a) のように可視光カメラで撮像すると、画面の白とびが発生してしまうが、(b) のように IR キー合成後には、デジタルコンテンツを劣化なく合成した結果を得ることができた。

問題点として、合成画像の前景の品質に劣化が見受けられた。可視光画像、合成画像共に、プレゼンタの画像にノイズが生じてしまっている。



(a) 可視光カメラ画像

(b) IR キー合成後

図 5.3: SyncSurface Board 利用実験における可視光画像と合成画像

5.2.3 議論

SyncSurface Board を用いることにより、直示的ジェスチャを交えながらのコミュニケーションを遠隔地ととることができるようになると思われる。ただし、今回の実験は、合成画像の観察にとどまったものであった。実際にこれを用いてコミュニケーションを行う場合においては、いくつかの問題が考えられる。例えば、複数の作業者が SyncSurface Board 上に現れるとその下のデジタルコンテンツが見えなくなる等の問題が考えられる。これについては、複数の SyncSurface Board を作成し、評価を行う必要がある。

また、本利用実験によって SyncSurface 以外にも、配信プレゼンテーションへの IR キー合成の応用を示すことができた。プレゼンテーションを行っている画像を撮影する場合、画面を最適に撮影することのできる露出とプレゼンタを最適に撮影することのできる露出は異なる。IR キー合成を用いることにより、プレゼンタを最適に撮影しつつ、かつ、画面に劣化のない画像を配信することができるようになる。

問題点として発見された、前景の品質劣化は、カメラの感度を上げたことに伴うノイズの発生が影響しているものと考えられる。本論文の実装においては、ハーフミラーにアクリル板を用いたが、反射率の低さから、可視光カメラの感度を高くしなければ映像を撮ることができなかった。より反射率の高いハーフミラーを作成することにより、カメラの感度を下げることができ、前景のノイズ発生を防ぐことができると考えられる。

5.3 IR キー合成の精度

5.3.1 実験内容

IR キー合成の精度を検証するため、様々な照明条件における物体領域抽出を行い、比較した。ブラインドの開閉、平面の直上に位置する蛍光灯、その他の蛍光灯の ON/OFF をそれぞれ切り替え、各照明条件における物体領域抽出の精度を比較した。また、照明条件切り替えの際には、カメラのパラメータ変更等は行わず、照明条件の変化に対する耐性についても調べた。

5.3.2 実験結果

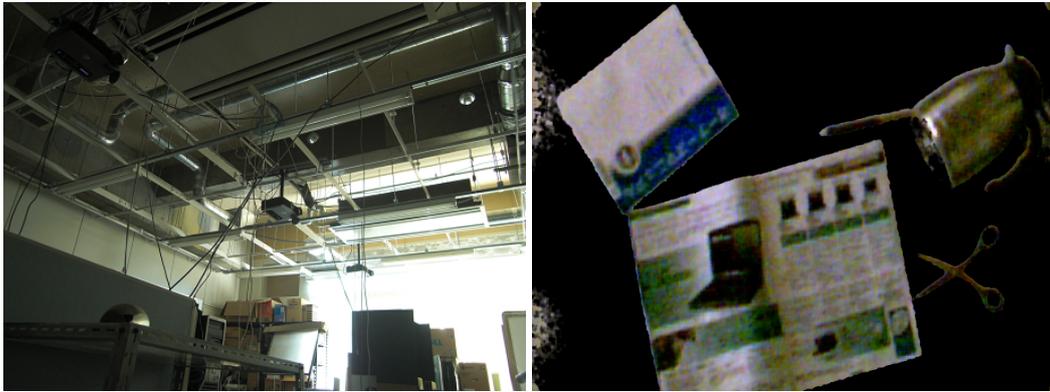
図 5.4 に各照明条件における、物体領域抽出の結果を示す。

5.3.3 考察

極端に外光・人工灯を取り込まない場合においては、比較的良好な結果が得られた。(a)(b)においては、前景の誤認識が生じていない。プロジェクタ投影の映像が良好に観察できる程度の照明条件においては、問題のない合成品質が得られると考えられる。

抽出品質に特に問題の生じた(c)(d)は、いずれも直上に設置された蛍光灯が影響を及ぼしていたものと考えられる。外光と人工灯を多く取り込んだ(e)においても、多少の劣化が見られた。本論文の実装では、赤外線発光面の発色にムラが見られたため、発色の弱い画面領域においても切り出しの品質を保てるよう、カメラの露出は絞らなかつた。これによって、自然に発生する赤外線と、投光器から発せられる赤外線の判別が難しくなったことから、品質を保つことができなかつたものと考えられる。よりまんべんなく照らすことのできる投光方法や投光器を用いることで、カメラの露光を絞ることができ、こうした照明条件においても、正常な切り出しができるようになるものと考えられる。

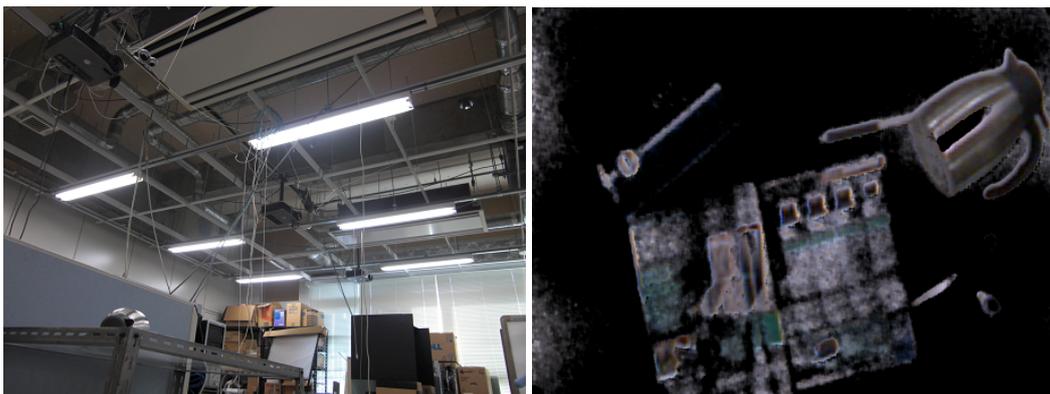
また、照明条件を切り替える際、カメラの設定は一切変更を行わなかつたが、(a)(b)間において、前景の合成に劣化は見られなかつた。照明の変化自体が物体領域の抽出精度に影響を与えていなかつたことが分かる。



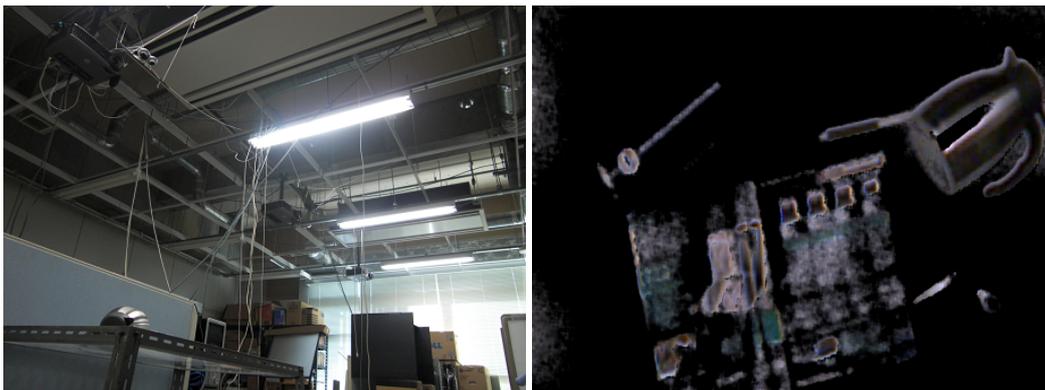
(a) ブラインド閉，直上蛍光灯 OFF，その他蛍光灯 OFF



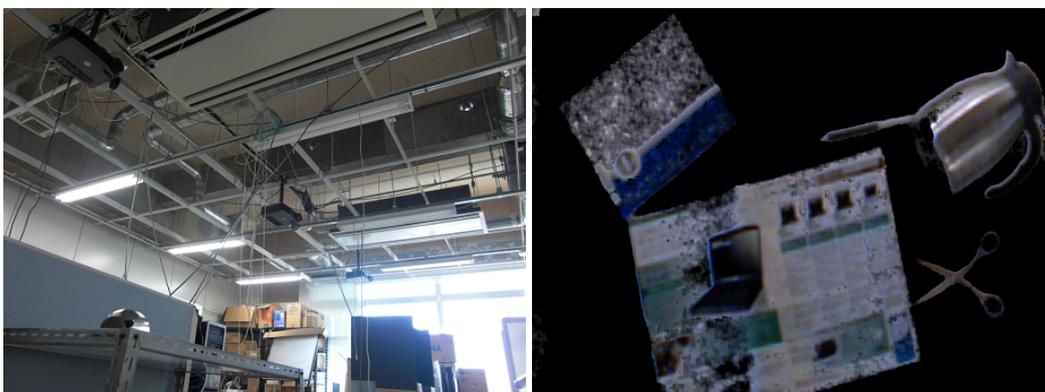
(b) ブラインド閉，直上蛍光灯 OFF，その他蛍光灯 ON



(c) ブラインド閉，直上蛍光灯 ON，その他蛍光灯 ON



(d) ブラインド閉，直上蛍光灯 ON，その他蛍光灯 OFF



(e) ブラインド開，直上蛍光灯 OFF，その他蛍光灯 ON

図 5.4: 各照明条件 (左) における物体領域抽出結果 (右) の比較

第6章 まとめ

6.1 まとめ

本稿では，対面に近いコミュニケーション・協調作業を実現する新しい映像コミュニケーション形態である同期する平面 SyncSurface について提案，実装を行った．本システムを用いることにより，遠隔地の相手と実世界の物体や資料を共有し，それらに直示的ジェスチャを行う等のやり取りを交えながらコミュニケーションをとり，協調作業を行うことができるようになる．実際にシステムを利用し，コミュニケーションを行ったところ，上にあげたやり取りを交えてコミュニケーションを行うことができることを確認するとともに，今後に向けた改良すべき点を発見した．

6.2 今後の課題

今後の課題として，本システムを交えたコミュニケーション・協調作業の有用性について詳細な実験を行い評価を行っていくことが挙げられる．

今回は平面を同期することにより，どのようにコミュニケーション・協調作業をとれるかという部分に置いて研究を行った．実際に遠隔地に平面を配置し，利用する場合には，通信を行う必要がある．SyncSurface を実現するために必要な通信の技術，また，通信によって生じるタイムラグや品質の劣化がコミュニケーション・協調作業を行っていく際にどのような影響を与えるか検討していく．

謝辞

本論文の執筆に際して、指導教員である田中二郎先生をはじめ、三末和男先生、志築文太郎先生、高橋伸先生には、有益なアドバイスをいただき、多方面に渡ってご助力をいただきました。特に、志築先生には、研究のいろはから具体的なアドバイスに至るまで、懇切丁寧な指導をいただきました。ここに深く感謝いたします。

また、田中研究室のメンバー、とりわけ WAVE グループの皆様には、有益なアドバイスにとどまらず、時に心身ともに多大な支援をいただきました。ここに深く感謝いたします。

最後に、ここまで私を支えてくださいました、家族・友人に心から感謝いたします。

参考文献

- [AMM⁺03] Mark Apperley, Laurie McLeod, Masood Masoodian, Lance Paine, Malcolm Phillips, Bill Rogers, and Kirsten Thomson. Use of video shadow for small group interaction awareness on a large interactive display surface. In *AUIC '03: Proceedings of the Fourth Australasian user interface conference on User interfaces 2003*, pp. 81–90, Darlinghurst, Australia, Australia, 2003. Australian Computer Society, Inc.
- [DB92] Paul Dourish and Sara Bly. Portholes: supporting awareness in a distributed work group. In *CHI '92: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 541–547. ACM, 1992.
- [IK92] Hiroshi Ishii and Minoru Kobayashi. Clearboard: a seamless medium for shared drawing and conversation with eye contact. In *CHI '92: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 525–532, New York, NY, USA, 1992. ACM.
- [KK01] Hideki Koike and Yoshinori Kobayashi. Integrating paper and digital information on enhanceddesk: a method for realtime finger tracking on an augmented desk system. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol. 8, No. 4, pp. 307–322, 2001.
- [MM97] Osamu Morikawa and Takanori Maesako. Hypermirror: a video-mediated communication system. In *CHI '97: CHI '97 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 317–318. ACM, 1997.
- [TM90] John C. Tang and Scott L. Minneman. Videodraw: a video interface for collaborative drawing. In *CHI '90: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 313–320, New York, NY, USA, 1990. ACM.
- [TM91] John C. Tang and Scott Minneman. Videowhiteboard: video shadows to support remote collaboration. In *CHI '91: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 315–322, New York, NY, USA, 1991. ACM.
- [TNG07] Anthony Tang, Carman Neustaedter, and Saul Greenberg. Videoarms: Embodiments for mixed presence groupware. *People and Computers XX Engage*, pp. 85–102, 2007.

- [TP02] Desney S. Tan and Randy Pausch. Pre-emptive shadows: eliminating the blinding light from projectors. In *CHI '02: CHI '02 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 682–683. ACM, 2002.
- [TR07] Philip Tuddenham and Peter Robinson. Distributed tabletops: Supporting remote and mixed-presence tabletop collaboration. In *Proceedings Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems TABLETOP '07*, pp. 19–26, 10–12 Oct. 2007.
- [YNH04] Kazutaka Yasuda, Takeshi Naemura, and Hiroshi Harashima. Thermo-key: Human region segmentation from video. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, No. 1, pp. 26–30, 2004.
- [河野 00] 河野隆志, 山本憲男, 本田新九郎, 鈴木由里子, 石橋聡. 没入型共有コミュニケーション環境. 情報処理学会研究報告. [グループウェア], Vol. 2000, No. 26, pp. 13–18, 2000.
- [喜多 02] 喜多壮太郎. ジェスチャー 考えるからだ. 金子書房, 2002.
- [斎藤 02] 斎藤洋典, 喜多壮太郎. ジェスチャー・行為・意味. 共立出版, 2002.
- [山下 01] 山下淳, 葛岡英明, Paul Luff, 山崎敬一, 山崎晶子. Agorag: 遠隔操作型レーザポインタと書画カメラを備えた遠隔共同作業支援システム. *Human Interface Symposium 2001 論文集*, 2001.
- [小木 99] 小木哲郎, 山田敏郎, 玉川慶, 広瀬通孝. 共有没入空間におけるビデオアバタを用いた位置関係表現. pp. 1826–1834, 1999.
- [西川 07] 西川渉, 佐藤一人, 福地健太郎, 小池英樹. 偏光を応用したテーブルトップシステムの提案. 第15回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2007) 論文集, 2007.