

# コミュニケーションにおけるフィードバックを支援した 実画像通信システムの開発

山下 淳<sup>†1</sup> 葛岡 英明<sup>†2</sup>  
井上 直人<sup>†3</sup> 山崎 敬一<sup>†4</sup>

人間同士のコミュニケーションはフィードバックによって支援されている。たとえば、問いかけに対する応答がそうである。遠隔地間コミュニケーションを実画像通信を用いて支援する場合でも、このフィードバックを適切に支援することが重要となる。また、適切なフィードバックを得るためには、応答だけではなく、問いかけといった行為も、その意図どおりに伝えることができるよう、システムが支援することも重要である。本論文では、身振りなどに表現される作業者の注目方向、すなわち志向の伝達支援と、遠隔地と共有した作業領域における直接的な指示支援の2点に着目し、指示を行う作業者の意図や、指示を受けた作業者の身体表現を、実画像通信メディアを通じたあとでもその意図どおりに再現することを試みた。

## Development of a Remote Collaboration System that Supports Communicational Feedbacks

JUN YAMASHITA,<sup>†1</sup> HIDEAKI KUZUOKA,<sup>†2</sup> NAOTO INOUE<sup>†3</sup>  
and KEIICHI YAMAZAKI<sup>†4</sup>

Interpersonal communication is comprised by feedback such as reply to the speaker. To support this kind of feedback is the system requirements for developing remote collaboration system based on video channel. In this paper, the authors focus on these two points; 1) to support communication of conducts such as gestures, and 2) to support communication of intuitive pointing between remote and local work spaces. Remote collaboration system called AgoraG is the system which complies with two points of the requirements. The authors demonstrate how the system complies with those two requirements through some experiments.

### 1. はじめに

本論文では、遠隔共同作業のための空間を、いままであまり論じられてくることがなかった空間設計<sup>1)</sup>という立場から設計することにより、コミュニケーションにおけるフィードバックを、実画像通信を介して支援することを試みる。

まず、コミュニケーションはフィードバックによって支援されていることに着目し、遠隔共同作業支援シ

ステムがコミュニケーション的なフィードバックを支援するための要件を整理する。特に本論文では、指さしを用いて行われる指示位置を特定する行為の伝達と、指示を受けた作業者による確認行為、すなわちフィードバックの支援に重点を置くことで、手振りや体勢によって表現される指示者や作業者による注目方向の伝達という、大域的な志向の提示だけでなく、指さしによる局所的な志向の提示までを支援することができるよう、空間の設計を行うことを試みる。

本論文の後半では、指さしを用いた指示とそのフィードバックを支援するシステムとして、遠隔地と仮想的に共有した作業領域に対する直接的な指示を支援するシステム AgoraG (図1)を紹介する。また、このシステムが遠隔地とのコミュニケーション、とりわけ指示の伝達とその応答という形のフィードバックを支援していることを、実験の解析から示す。

<sup>†1</sup> 東京大学先端科学技術研究センター

Research Center for Advanced Science and Technology, the University of Tokyo

<sup>†2</sup> 筑波大学機能工学系

Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

<sup>†3</sup> 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科

Graduate School, Doctoral Program, Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

<sup>†4</sup> 埼玉大学教養学部

Faculty of Liberal Arts, Saitama University



図1 遠隔共同作業支援システム AgoraG  
Fig.1 Remote collaboration system: AgoragG.

## 2. コミュニケーションとフィードバック

### 2.1 身体化された空間

実画像通信を用いて遠隔地との共同作業を支援する研究は、XeroxのMedia Space<sup>2)</sup>をはじめとして、現在までに様々な研究が行われてきた。その中でHeathらは、無秩序に配置されたビデオ機材を通したコミュニケーションでは、自分の理解を示す身体動作が十分に効果を発揮できないことを指摘した<sup>3)</sup>。またIsaacsらは、実空間での対面会話と比較し、ビデオ機材を通した会話は発言権の調整などが困難であることを指摘した<sup>4)</sup>。

その一方、山崎らは身体メタファという概念を提唱することで、この問題の解決を行った<sup>5)</sup>。山崎らは、ビデオ機材の配置を身体メタファ、すなわち実空間における身体配置に則したものにすることで、ビデオ映像を通した身体動作が有意味になることを示した。筆者らは、これらの研究で得られた知見より、システムの設計指針として身体メタファを採用したビデオ会議システムAgora<sup>6),7)</sup>を開発した。

従来のビデオ会議システムの多くが、遠隔地にいる作業者の顔画像や共同作業に用いる領域を、単一のスクリーンに投影している。一方、Agoraでは身体メタファに従い、これらの領域を空間的に離散して配置した。そのため、作業者はビデオ機材を通して提示された資料を見渡したり、あるいは机を囲んで着座している作業者らを見渡したりするために、頭部だけでなく身体そのものを大きく動かす必要がある。しかし、この大きな動作は、スクリーン越しでも明確に理解することが可能なため、作業者の志向、すなわち作業者が関心を怠いている作業対象を、身体の動作を通じて知ることができる。

身体化された空間を構成するうえで重要なことは、



図2 コミュニケーションの基本的な構成要素  
Fig.2 Basic components of communication.

作業者の相互行為における発話、およびノンバーバルメッセージと呼ばれる視線、身振り、手振り、および身体移動などをビデオ機材で単純に代理させるだけでは不十分であるということである。特にノンバーバルメッセージは、作業者と作業対象との空間的な配置と密接な関係がある<sup>8)</sup>。遠隔地との共同作業を支援するシステムの設計においては、これらの再現が重要な課題となる。

### 2.2 単純化されたコミュニケーション

図2は深田による単純化されたコミュニケーションの例である<sup>9)</sup>。

この図によれば、送り手は頭の中にある伝達したい情報を言語的表現、あるいは非言語的表現へと変換し、メッセージという形で受け手に伝えている。また、送り手から受け手へメッセージを伝えるためには、チャネルを経由する必要がある。これは人間の五感に相当し、多くのコミュニケーションにおいては、複数のチャネルが同時に用いられている。そして、受け手はメッセージに影響されることで、効果と呼ばれている表現を出力する。観察可能な効果の例として、送り手の呼びかけに対応した、受け手による「はい」という呼応がある。

### 2.3 ビデオ機材を介した対人コミュニケーション

前節のコミュニケーションモデルをビデオ機材を介した対人コミュニケーションモデルに発展させるうえで、注意すべき点がある。それらは

- コミュニケーションは双方向であること、
  - チャネルはメディアによる影響を受けること、
- の2点である。

#### 2.3.1 コミュニケーションの双方向性

1点目は、コミュニケーションは一方通行ではないということである。たとえば、ある作業者が指さしを用いて別の作業者に指示する場面では、その指示を正しく伝えることだけが重要ではない。指示を受けた作業者が表現する音声や顔つき、あるいは確認のための指さしなどによる応答を、指示を与えた作業者が確認することも重要である。この「応答」という形のフィードバックが指示を行った作業者へ戻されることによって、はじめて指示を行った作業者はその内容が正しく伝わったことを理解することが可能となり、次の指示を行うことが可能となる。

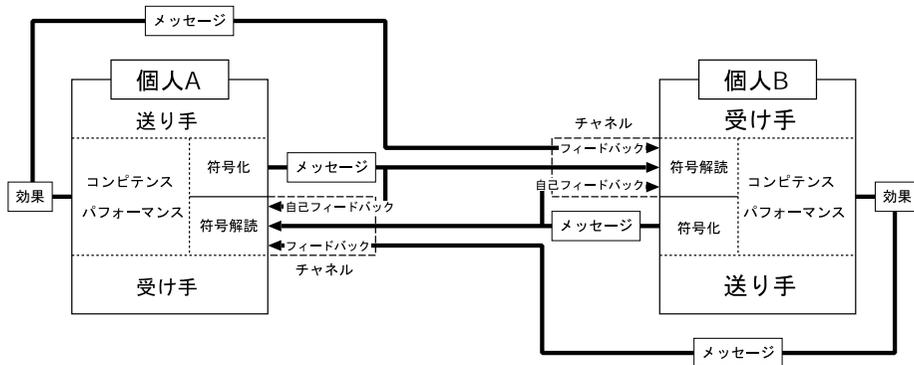


図3 対人コミュニケーション・プロセス・モデル  
Fig. 3 Interpersonal communication process model.

このようにフィードバックが含まれたコミュニケーションモデルとして、DeVitoは図3に表現されているような、対人コミュニケーションにおけるコミュニケーション過程の普遍的なモデルを提案している<sup>10)</sup>。

対人コミュニケーションの場合、受け手が送り手のメッセージに対して表現した観察可能な効果は、送り手にフィードバックとして戻される点に注意しなければならない。また、このフィードバックは、送り手に対しては正のフィードバックにも、負のフィードバックにもなりうる点も同様である。

Heathらの研究<sup>3)</sup>が示したことは、身体性やコミュニケーションにおけるフィードバックを考慮していないシステムは、負のフィードバックが働くため、コミュニケーションが破綻する、ということであった。つまり、声が必要以上に大きくなったり、ジェスチャが誇張されたりすることで、通常のコミュニケーションとはかけ離れてしまうということである。

### 2.3.2 コミュニケーションのメディアによる影響

2点目は、コミュニケーションのためのチャンネルは、メディアを通すことによって歪められてしまうという点である。これは、送り手から受け手に送られるメッセージだけでなく、受け手から送り手に戻される効果、すなわちフィードバックも同様である。

実画像通信では、送り手が発したメッセージは、ビデオ機材などのメディアが媒体となり、受け手へと届けられる。作業者の発話や身振りなどは、マイクやビデオカメラによって取り込まれ、スピーカやテレビなどの映像機器が代理物体となることで再現される。しかし、これら実画像通信メディアは、画角や解像度、あるいは音質などに限界があるため、実画像通信メディアを媒体として再現された遠隔地の作業者の様子は、本来あるべき姿とは違った、歪められた姿となる。

この歪みは、遠隔地にいる作業者が発するメッセー

ジを、その意図と違う形でディスプレイに再現する。対面では十分に判別可能な視線の変化などが、ディスプレイを通すと十分に効果を発揮することができないのである。また、歪められたメッセージを受け取った作業者は、指示者の意図とは異なった理解を行う。そして、この理解も遠隔地の作業者に対するフィードバックの過程で歪められるため、指示者は自分のメッセージに対する理解が十分に行われているのかどうか、判断することが困難となる。

また、メディアが原因となって引き起こすメッセージの歪みは、別の種類の問題を発生させる要因となる。たとえば、DoubleDigitalDesk<sup>11)</sup>をはじめとする、実世界指向型の共同描画を例にする。実空間で行われる描画の場合、送り手が書いた文字の大きさと鮮明さは、受け手にとっても同じ情報として共有することが可能である。しかし、メディアを通した場合、その情報は必ずしも等しくなるとは限らない。文字を書いた者が読める大きさの文字も、それを撮影するカメラを通してしまうと、必ずしも読めるとは限らない。システムが持つこの限界を、作業者は通常知ることがないために、遠隔地と共有するしたい情報が共有できない問題、つまり、情報の非共有性という問題が生じる。

## 3. システムの要件

前章までの議論で、遠隔共同作業を支援するシステムは、作業者が指示者の理解を正しく理解できるだけでなく、その理解を正しく指示者に戻すことが重要であることを指摘した。

この章では、実画像通信を用いたコミュニケーションを、指さしを用いた指示によるコミュニケーションに設定し、システム構築の要件を提示する。

### 3.1 指示の二段階

指さしによる指示は、図4に示すように2段階の

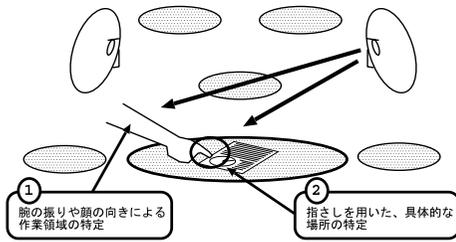


図 4 指示の 2 段階

Fig. 4 Two steps of the instruction.

動作に分けられる。腕の振りを用いたおおまかな作業領域の特定と、指先による具体的な指示対象の特定という 2 つの動作である。

コミュニケーションにおけるメッセージの歪みは、この 2 つの動作が、メディアを通じたコミュニケーションでは欠落、あるいは不十分な情報のまま提供されてしまうために発生する。すなわち、

- 指さしによる指示が、共同で作業するための空間の、どの領域に対して行われたのか認識できない問題（大域的な志向の欠落）と、
- 指さしによる指示が、共同で作業するための領域の、どの地点に対して行われたのか認識できない問題（局所的な志向の欠落）

の 2 つと考えることができる。実画像通信ではメディアの限界によってこれらの情報が欠落してしまうことがあるため、作業者は指示者の指示を正しく受け取ることができない。正しく受け取ることができないために、指示者が指示したとおりの作業をフィードバックとして戻すことができないのである。つまり、意図したフィードバックを得るためには、まず指示者の指示を、作業者に対して正しく伝えることが重要となる。

以上の議論より、意図したフィードバックを得るためにシステムが考慮すべき点は、

- 作業に参加するすべての作業員で、同じ情報を共有できる作業領域が存在すること、
- 指示者の指示を正しく伝えるためには
  - － 作業空間の、どの領域に対して指示を行おうとしているのが正しく示せること、
  - － そして、作業領域内のどこに対して指示をしているのか具体的に示せること、
- 作業員の反応を正しく得るためには
  - － 指示者の指示した領域に対して、作業員が志向していることを正しく確認できること、
  - － そして、具体的に指示された場所で作業を行えること、

と整理できる。

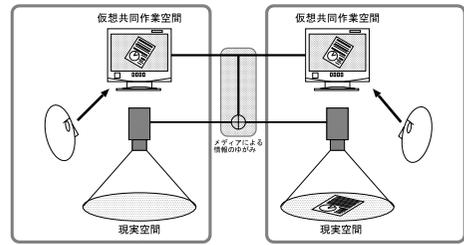


図 5 共通認識の提供

Fig. 5 Offering common recognition.

これを、遠隔共同作業を支援するシステムが備えるべき要件として整理すると、

- (1) 仮想共有空間内で共有する情報の同一性を保証すること、
- (2) 仮想共有空間に対する直接的な指示を支援すること、
- (3) 仮想共有空間と現実空間との関連付けを支援すること、
- (4) おおまかな作業領域の特定を行う身体表現を支援すること

の 4 つにまとめられる。

以下の項ではこれら 4 つの要件について、より詳しく定義する。

### 3.1.1 仮想共有空間内で共有する情報の同一性保証

仮想共有作業空間で行われる作業は、作業に参加する作業員全員の一致した認識が必要である。

仮想共有空間の構築手法として、次の 3 つの手法があげられる。

- 背面投影方式<sup>12)~15)</sup>
- 直接投影方式<sup>11),16)</sup>
- 画像合成方式<sup>17)~19)</sup>

これらの手法のうち、背面投影方式と直接投影方式は、カメラによって撮影された遠隔地の共有作業領域の映像を、手もとの領域にプロジェクタなどを用いて直接投影する方式である。ただし、これらの手法では、本論文で主張する、仮想共有領域における共通認識の提供はできない。

これらの手法では、手もとにある遠隔地と共有したい資料は、自分の目を利用して直接見ることができる。しかし、この資料を遠隔地に提供する段階で、カメラやプロジェクタによる歪みを受ける。手もとの資料では明瞭に見える文字も、遠隔地で提示するときにはメディアの性質、すなわち画質や解像度の問題のために不明瞭になる。つまり、自分が見ている資料と、遠隔地の作業員が見ている資料の映像には同一性が無いのである。同一性を持たせるためには、図 5 に示す

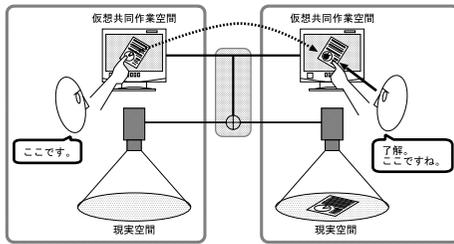


図 6 仮想共有空間に対する直接的な指示の支援

Fig. 6 Supporting direct instruction to the shared virtual workspace.

ように、遠隔地と共有した作業領域、つまり仮想共同作業空間から得られる情報を、すべての参加者が同じように共有する必要がある。このような環境を構築するには、画像合成方式であげられた手法が最適である。

メディアによる歪みを受けた映像を、遠隔地とローカルの作業双方が共有できることには次のような利点がある。それは、遠隔地の作業者が視認可能な情報を共有できる点である。自分が提示する資料が、遠隔地ではどのように見えているのか、あらかじめ確認できる利点は、自己フィードバックという形で作業を支援することが可能となる。

### 3.1.2 仮想共有空間に対する直接的な指示の支援

2番目にあげた要件、すなわち仮想共有空間に対する直接的な指示の支援という要件を満たすことによつてはじめて、仮想共有空間に対する指さし位置の支援を行うことが可能となる。この要件が満たされることで、図6に示すような、仮想共有空間に対する指さしを用いた具体的な位置を、遠隔地の作業者と共有することが可能となる。

この要件を満たすためには、双方の作業者が、仮想共有空間に対して行った指さしの位置を、仮想共有空間を提示するディスプレイ上で直接確認できるような機構を開発する必要がある。また、遠隔地と共有することを目的とした領域すべてが、この要件を満たすようにする必要がある。

### 3.1.3 仮想共有空間と現実空間との関連付け

前項の要件は、指さし位置を仮想共有空間の中で共有するための必要条件であった。しかし実際の作業では、仮想共有空間で行われた指さし位置に従い、現実空間の資料に対する作業、たとえば同じ場所を示したり、あるいはペンを用いて印を付けたりするための作業が行われる。

もし、仮想共有空間で示された指さし位置が現実空間に反映されない場合、指示を受けた人間は、仮想共有空間と現実空間とを何度も比較しながら、指示場所の特定を行う必要がある。このような作業は、共有に

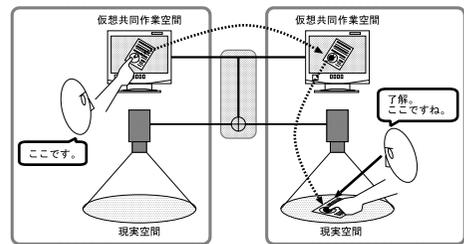


図 7 指さし位置の関連付け

Fig. 7 Associating point of direction.

用いる資料が細密になればなるほど、困難がともなう。

この問題を克服するためには、図7のように、指さし位置を仮想空間内で共有するだけでなく、その位置を現実空間に対しても反映させるような機構を実装する必要がある。

前項の要件と本項の要件の双方を満たすことで、遠隔地間コミュニケーションにおけるフィードバックを支援するための前提、すなわち伝えたい場所を確実に伝える環境、またその場所を即時に確認し、応答という形のフィードバックを戻すための環境を構築することができる。

### 3.1.4 志向の提示

志向とは、作業者が関心を払っている方向を示す、身体的な表示である。たとえば、顔の向きは一番関心を払っている方向を示し、腕の向きは指さしを行いたい方向などを示す。たとえば、誰かと会話を行っているとき、聞き手は話を聞いているにもかかわらず、視線はPCのディスプレイへ向けているような状況を考える。このような状況では、話し手は、聞き手が本当に話を聞いているかどうか確信を持つことができない。話を聞いているにもかかわらず、聞き手の志向、つまり顔の向きはディスプレイに向いているからである。

山崎らは、指示における話し手と聞き手の役割を、メディアを通したコミュニケーションにおいても明確にするための要件として、身体メタファを提唱している<sup>5)</sup>。山崎らは作業者のまわりに存在する作業空間、すなわち遠隔地に存在する作業者の顔画像、共有作業空間、現実空間、そして個人領域のどれに対して、作業者がどのような志向を提示しているか、明確に分かるように提示することが大切であると結論付けた。また、鈴木ら<sup>20)</sup>はAlgoBlockという実物体を用いたプログラミング言語の開発を通し、身体表現、すなわち志向を明確にすることの重要性を見いだしている。

作業者の様子が顔カメラで撮影され、遠隔地のディスプレイに投影される間には、メディアによる様々な歪みが生じる。この影響を最小限におさえ、志向が明



図 8 システム概観

Fig. 8 System overview.

確になるようにするための具体的な方法として、

- 個人で行う作業のための領域と、共同で行う作業のための領域は分離する<sup>14)</sup>、
- 作業のための領域、および作業相手を映し出すスクリーンの配置は、それに対する志向が明確に区別できるように配置する<sup>5),6)</sup>、

というデザイン案を提案する。

#### 4. 遠隔共同作業支援システム AgoraG

このシステムは、遠隔地にいる作業者を等身大で投影するスクリーンに加え、作業者が実物体や文書を映像として共有しつつ相互に指さしが可能な仮想共有作業領域を備えている。これらの領域は、3章であげた要件に従い、正面のスクリーンに投影された遠隔地の作業者の画像との身体的な配置関係を考慮しつつ、分散するように配置している。

図 8 にシステムの概観を示す。本章では、システムを次の 4 つの要素の分けて解説を行う。

- 作業領域およびスクリーン
- 仮想共有作業領域
- 遠隔操作型レーザーポインタユニット
- 実画像通信ネットワークシステム

##### 4.1 作業領域およびスクリーン

作業を行うための机は、幅、奥行とも 90 cm となっている。したがって作業者は遠隔地の作業者の画像を、90 cm 先に設置されたスクリーンを通して観察することができる。90 cm という距離はミーティングデスクの標準的な奥行であり、Hall<sup>21)</sup> の分類によれば個人距離に相当する。

作業者の様子は 60 インチの背面投影型スクリーンに投影される。作業者の様子はスクリーンに取り付けられた小型カラーカメラによって撮影される。

完全な視線の一致を図るには、投影された相手画像で目にあたる部分にカメラを置く必要がある。特殊ス

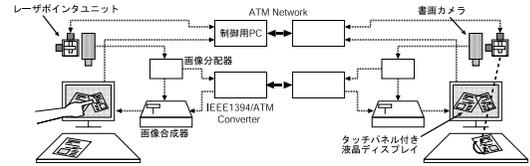


図 9 仮想共有作業領域、および遠隔操作型レーザーポインタユニット構成図

Fig. 9 Schematics of shared virtual workspace and remote controlled laserpointer.

クリーン<sup>22)</sup> やハーフミラー<sup>13)</sup> を使うことで視線一致を支援するシステムも存在するが、いずれも顔画像を撮影するカメラのレンズ中心から顔が移動してしまうと、視線の方向を正確に再現することは困難となる。

ここでは、視線の不一致を感じないための視差角の許容度は、相手との距離に関係なく上下 8 センチという報告<sup>23)</sup> を参考に、カメラが投影された相手画像の顎のあたりになるようにカメラを設置した。

スクリーンの大きさに比べ、このカメラの大きさは十分に小さいので、このカメラが原因によって作業が妨げられることはない。カメラの撮像範囲は、作業者の手もとを含めた上半身全体が撮影されるように調整されている。

##### 4.2 仮想共有作業領域

仮想共有作業領域は、遠隔地の作業者と資料などを仮想的に共有することを目的とした領域である(図 9)。システムの基本構成は TeamWorkStation<sup>18)</sup> と同じであるが、後述する遠隔操作型レーザーポインタユニットと併用することで、直接的な指示が行える点が異なる。

書画カメラ領域に置かれた資料は、書画台の上に設置された書画カメラによって撮影され、その画像が遠隔地のシステムに転送される。転送されてきた遠隔地の書画カメラの画像は、ローカルな書画カメラの画像と 50% の混合比で合成され、書画カメラ領域提示用液晶ディスプレイに表示される。

書画カメラの撮像範囲は A3 サイズの用紙とほぼ同等の大きさ(幅 42 cm × 高さ 29.5 cm)である。書画カメラには民生用 DV カメラを用いており、最低でも MS ゴシックで 18 pt 程度の文字であれば十分に認識可能な解像度を得ている。

##### 4.3 遠隔操作型レーザーポインタユニット

書画カメラの隣には遠隔操作可能なレーザーポインタユニットが設置されている。書画カメラ領域提示用ディスプレイにはタッチパネルが組み込まれており、指でなぞるとその軌跡に対応して遠隔地のレーザーポインタユニットが動作し、書画台に置かれた資料に対し、直

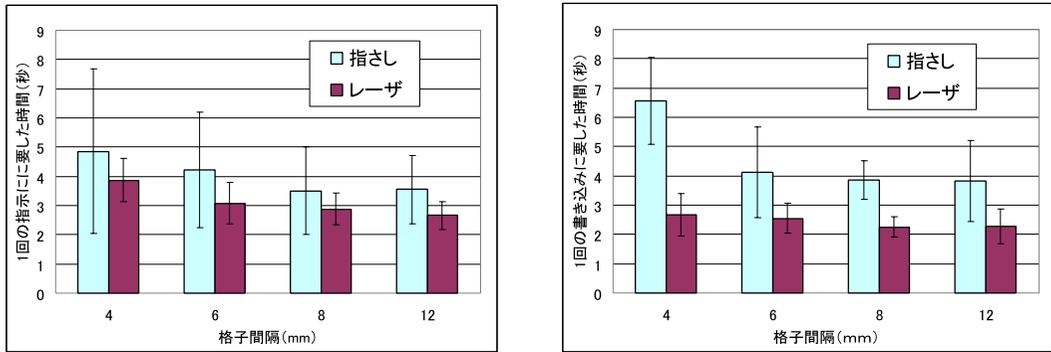


図 10 1 回の指示, および書き込みに要した時間  
Fig. 10 Duration of direction and writing.

接レーザーの軌跡を表示できるようになっている．このユニットを用いることにより，遠隔地の資料に対して直接的な指示を行える．

#### 4.3.1 レーザポインタユニット構成

レーザーポインタユニットとして GestureLaser<sup>24)</sup> を搭載している．レーザー発光部に置かれた直交する 2 枚の鏡を，ステッピングモータ（オリエンタルモータ社 PMM33）を用いて駆動することにより，レーザー光線を任意の方向に出力している．レーザーポインタユニットは，書画台の上 1.2 m のところに設置し，モータの分解能は 0.288 度に設定してあるため，実際にレーザースポットが書画カメラ領域に照射されるとき移動量は約 1.2 mm となる．レーザースポットの可動範囲は書画台内に限定している．

タッチパネルを押した場所に対応して，遠隔地の書画カメラ領域にレーザーを照射するためのキャリブレーションを行っている．本来は GestureLaser 固有の座標軸，レーザーが照射される平面の座標軸，そしてカメラ系の座標軸と 3 つの座標軸が存在するが，ここでは GestureLaser の座標軸とレーザーが照射される平面の座標軸は同一のものと仮定する．タッチパネル上の座標  $(X, Y)$  と平面に照射されたレーザーのスポットの座標  $(x, y, 0)$  を対応させるには，タッチパネル上での座標系に対し，ある並進・回転運動による透視変換を行う必要がある．レーザースポットの座標系は三次元座標系であるが，書画カメラ領域に提示されるものは紙であると仮定すれば，その高さは無視してよいのでつねに  $z = 0$  の平面に投影されるものと見なせる．この条件に対して歴本の示した方程式<sup>25)</sup>を用いることで，キャリブレーションのための行列を求めた．

#### 4.3.2 レーザポインタの性能評価

この項では，システムの基本的な性能に関する評価実験について述べる．実験として，遠隔地の書画台に

置かれた様々な間隔の格子模様に対する指さしと，その指さしを認識するために要した時間を測定し検討した<sup>26)</sup>．

実験は 2 人 1 組で行い，一方を指示者，他方を作業者とする．実験で用いた課題は，4, 6, 8, 12 mm 間隔の格子が印刷された紙を作業者側の書画台に置き，指示者は指示書で指定された交点を，1 つの間隔に対して 5 点ずつ，書画台の上で行う間接ポインティングによる指さしと，仮想共有作業空間であるディスプレイに対して指さしを行い，レーザーポインタを操作する直接的なポインティングの 2 つの条件で指示を行った．作業者は指示者によって指示された点に印を書き込む．被験者として大学生 5 組 10 人が参加した．

評価にあたり，エラーによる影響を減らすために 5 回の測定値の中央値を各被験者の代表値として議論する．図 10 に 1 回の指示に要した時間と 1 回の書き込みに要した時間の平均値および標準偏差を示す．

このシステムを用いた指示，および書き込みの作業には運動能力などの個人差が考えられる．これらの影響を排除するために同一被験者に両方の条件で指示を行わせ，両条件で得られた対のデータを Wilcoxon の符号順位和検定を用いて比較した．

検定の結果，すべての間隔において指示に要した時間，および書き込みに要した時間の両方とも 2 条件間で母集団の分布に差が認められた（1 回の指示に要した時間のうち，4, 6, 12 mm の条件と，書き込みに要した時間のうち 6 mm の条件に関しては  $p < .05$ ，その他の条件に関しては  $p < .01$ ）．

標準偏差の値はレーザースポットを用いた方が 1 回の指示に要する時間，書き込みに要する時間ともに小さいことから，空間認知などの能力に関係なく指示を行うことができるといえる．

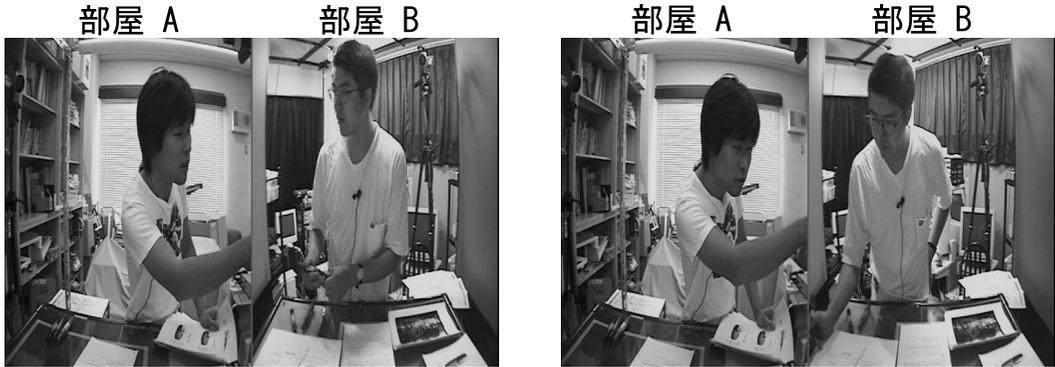


図 11 共有作業領域を介した呼応した作業

Fig. 11 Work which consists with remote participant through the shared workspace.

#### 4.4 実画像通信ネットワークシステム

本システムは筑波大学内の 2 地点に分散して設置してあり、実画像・音声回線とレーザーポインタ操作のネットワーク回線は光ファイバによる 155 Mbps の ATM 回線を用いて構築した。画像の圧縮・伸長および転送にともなう時間遅れは、圧縮の方式や設定にもよるが、片道 100 msec 程度である。

#### 5. AgoraG を用いた遠隔討論実験

AgoraG を用いた遠隔共同作業実験を行った。作業の様子は様々な角度からビデオ録画し、その内容から相互行為分析を行った。本章では相互行為分析を通して、AgoraG を用いて行われた共同作業が、コミュニケーションにおけるフィードバックを支援できているかどうかを確認する。

##### 5.1 実験設定

討論の課題は「筑波大学キャンパス内交通ルールへの提案」と題した、自転車を中心とする学内交通問題の討論である。被験者は都市計画を専門とする大学院生である。1 回の実験は 2 人 1 組で行われ、合計で 5 組 10 人の被験者が参加した。資料として議論を補助するための写真、および学内の地図を準備し、ペンで自由に書き込ませた。1 回の実験に要した時間は約 40 分である。

以下の議論では、システムを設置した 2 つの部屋をそれぞれ部屋 A、および部屋 B と呼ぶことにする。

##### 5.2 相互行為分析による実験の検証

###### 5.2.1 仮想共有領域を介した呼応した作業

図 11 のシーンは、筑波大学の地図を書画カメラ領域に置くことで共有し、学内で交通問題が発生する場所を確認しているシーンである。大学の地図は、部屋 B 側の書画カメラ領域に置かれている。

図 11 左側の写真は、部屋 A の作業者が書画ディス

プレイを通して大学の地図を確認し、交通問題が発生する場所を指さすことで指摘するシーンである。このとき部屋 B の作業者は、まずレーザーポインタが照射されている位置を、書画ディスプレイを通して確認している。その後、部屋 B の作業者はその場所を地図に書き込むために、視線を書画カメラ領域へ移動する(図 11 右側の写真)。

この一連のシーンでは、部屋 B の作業者がペン先をレーザーポットの位置へ移動するまで、部屋 A の作業者はディスプレイに指を触れ続けることにより、レーザーポットの照射を続けている。そして、ペンで印を付ける行為に前後し、部屋 A の作業者は指さしをやめたため、レーザーポットは消灯する。次に部屋 A の作業者が問題箇所を指摘するのは、部屋 B の作業者が印を付け終わったときである。その瞬間まで、部屋 A の作業者は次の指示のタイミングを待っている。

書画カメラ領域を通じた、このような呼応した作業は、システムが作業者間のフィードバックを支援しているために可能となる。部屋 A の作業者が、仮想的な共有作業空間であるディスプレイに触れ、対応した場所へレーザーポットを照射することで、部屋 B の作業者に対し、指さし位置の伝達を行っているだけではなく、その位置がレーザーポットにより現実の地図へと関連付けられているため、部屋 B の作業者はその指さしが意図した位置へ、即時に印を付けることも可能となっている。また、部屋 B の作業者による即時的な作業は、書画ディスプレイを通して確認することができるため、部屋 A の作業者は、部屋 B の作業者による「印を付ける」というフィードバックを確認ことができ、またその作業の終了まで待つことができるのである。

このような、仮想共有領域を介した呼応した作業は、いずれのグループによっても観察された。

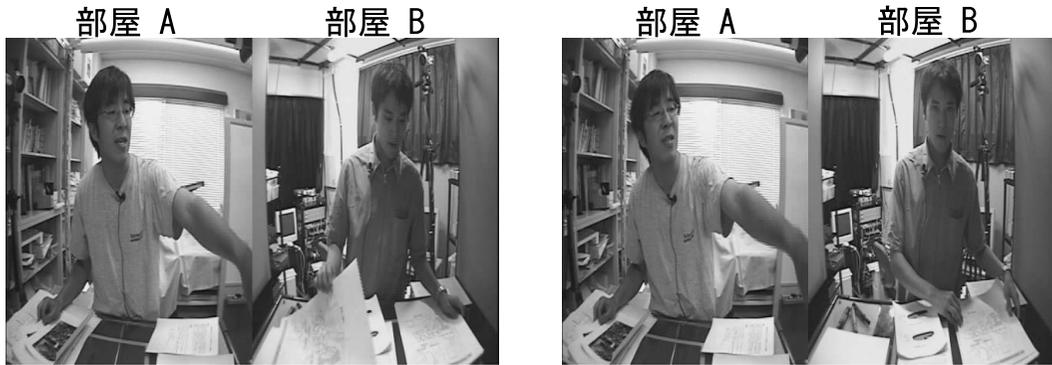


図 12 人物投影スクリーンを通した作業態勢の確認

Fig. 12 An example scene of looking remote participant's conduct.

### 5.2.2 人物投影スクリーンを通した作業態勢の確認

この項では、共同作業が失敗した状態から元の作業状態に戻ることに成功したシーンを例示することで、作業者の正面に設置された人物投影スクリーンが、作業者間のコミュニケーション的フィードバックをどのように支援しているかを示す。

図 12 左側に示されたシーンの直前まで、部屋 B の作業者は、部屋 B の書画カメラ領域に置かれた資料に対し、指さしなどを用いることで交通問題を指摘していた。また、部屋 A の作業者は、書画ディスプレイを見ながら、その説明を確認していた。

部屋 B の作業者がひととおり説明を終えたあと、部屋 A の作業者は書画ディスプレイに表示された地図をなぞりながら、別の意見を述べはじめた。しかし、部屋 B の作業者はその様子に気付くことなく、書画カメラ領域に置かれた地図を片づけた。図 12 左側の写真は、部屋 B の作業者がまさに地図を片付けようとした瞬間の様子である。

部屋 B の作業者は、片付けを行いながら部屋 A の作業者の説明を聞き、返事を行っている。一方、部屋 A の作業者は、地図が取り去られているにもかかわらず、書画ディスプレイをなぞりながら意見を述べている。この状態は、双方の作業者の意図が通じていない状態であり、共同作業に失敗している状態である。

その次の瞬間、部屋 B の作業者は正面スクリーンを通して、部屋 A にいる作業者の様子を確認した(図 12 右側の写真)。そして、作業者 A の腕が伸びていた方向、すなわち書画ディスプレイの方を向き、何も存在していないことを理解することで、話題は部屋 B の作業者が直前まで書画カメラ領域に置いていた地図を元に行っていることを理解し、再び地図を書画カメラ領域に戻した。地図を戻すことにより共同作業は元の状態に戻り、この様子を確認した部屋 A の作業者は話

を続けた。

このシーンからいえることは次のとおりである。部屋 B の作業者の視点からは、部屋 A の作業者による腕の振りとその方向を部屋 B の作業者は理解することができた点である。腕の振りとその方向が観察でき、その先にディスプレイがあること、そして新しい話題は直前の話題に続いていることを、部屋 B の作業者は理解できたため、部屋 B の作業者は地図を元の場所に戻し、共同作業を元の状態に戻すことに成功したのである。もう一つは、部屋 A の作業者は、地図を戻すというフィードバックを、その方向を含めて観察できたため、次の作業、すなわち話の続きへと移ることができた点である。

このシーンはやや特殊なシーンであるため、他のグループでは同様のシーンは確認されなかった。しかし、どのグループにおいても、つねに相手の様子を正面のスクリーンで確認し、その状態に応じて次の作業状態に移るといったシーンは確認されている。

### 5.2.3 自己フィードバックの支援

最後に、作業者が書画カメラ領域に置かれた写真を、書画ディスプレイを通して見ることによって自己フィードバックを行っているシーンを観察する。

部屋 B の作業者は、書画カメラ領域に置かれた写真を、書画ディスプレイを通して確認している(図 13 左側の写真)。その後、「こうした方がよく見えるかな」という発言をともなって、写真を書画カメラの方へ近付けた(図 13 右側の写真)。

また他のグループでは、書画カメラ領域に書類を置くと同時に書画ディスプレイでその内容を確認し、つねに適切な状態で表示されるよう微調整を行ったり、画像が暗い場合は見難くないか確認をとったりしている。

このような現象が発生する根本的な原因は、書画カメラの解像度や撮影範囲の狭さにある。しかし、同時

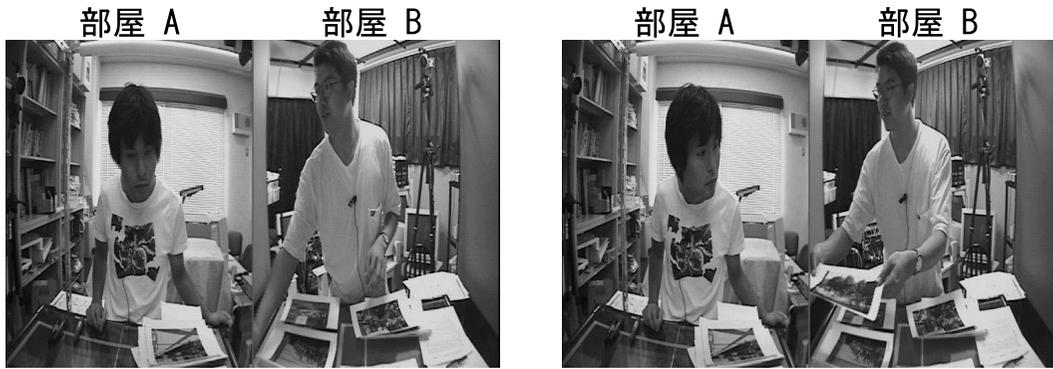


図 13 自己フィードバックの例

Fig. 13 An example scene of self-feedback.

に資料を置いた作業者は、自分が置いた資料がどのような状態で遠隔地の作業者に見えているのかを、自分の環境で直接確認することができている。そして、より見えやすくするため、写真をカメラに近付けたり、位置を調整するといった行為をとる。つまり、自分にとって見えやすくすることが同時に、相手にとっても見えやすい状態となるのである。これは、書画領域における情報が、遠隔地と同一性を保っていることを意味し、そのため双方の作業者が共通の認識を持てるよう、システムが支援していることを意味するのである。

## 6. 結 論

本論文ではコミュニケーションにおけるフィードバックに注目し、これを実画像通信におけるコミュニケーションで支援するための要件と、その具体的な実現方法について述べた。フィードバックの支援の要件とは

- (1) 仮想共有空間内で共有する情報の同一性を保証すること、
- (2) 仮想共有空間に対する直接的な指示を支援すること、
- (3) 仮想共有空間と現実空間との関連付けを支援すること、
- (4) おおまかな作業領域の特定を行う身体表現を支援すること

の4つである。これらの実装として、作業領域の空間的な配置と、指さしに追従するレーザーポインタの構築を行い、遠隔共同作業を通してその有効性を確認した。

謝辞 ATM 回線の利用にあたり、独立行政法人通信総合研究所、および通信・放送機構つくば情報通信研究開発支援センターにご協力いただいた。また、システムの評価実験では、筑波大学社会工学系都市交通研究室にご協力いただいた。ここに記して感謝する。本研究は科学研究費補助金(特別研究員補助金、若手

研究(A))を利用して行われた。

## 参 考 文 献

- 1) 井上智雄, 岡田謙一, 松下 温: 空間設計による対面会議と遠隔会議の融合: テレビ会議システム HERMES, 電子情報通信学会論文誌 D-II, JH80-D-II, No.9, pp.2482-2492 (1997).
- 2) Mantei, M., Baecker, R.M., Sellen, A.J., Buxton, W.A.S. and Milligan, T.: Experiences in the use of a media space, *CHI '91*, pp.203-208 (1991).
- 3) Heath, C. and Luff, P.: Disembodied Conduct: Communication through video in a multimedia environment, *CHI'91*, pp.99-103 (1991).
- 4) Isaacs, E.A. and Tang, J.C.: What Video can and can't do for Collaboration: a Case Study, *ACM Multimedia '93*, pp.199-206 (1993).
- 5) 山崎敬一, 三樹弘之, 山崎晶子, 鈴木栄幸, 加藤浩, 葛岡英明: 指示・道具・身体性—遠隔共同作業システムの設計とそのシステムを用いた人々の共同作業, *認知科学*, Vol.5, No.1, pp.51-63 (1998).
- 6) 山下 淳, 葛岡英明, 山崎敬一, 山崎晶子, 加藤浩, 鈴木栄幸, 三樹弘之: 相互モニタリングが可能な遠隔共同作業支援システムの開発, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.4, No.3, pp.495-504 (1999).
- 7) Kuzuoka, H., Yamashita, J., Yamazaki, K. and Yamazaki, A.: Agora: A Remote Collaboration System that Enables Mutual Monitoring, *Proc. CHI'99 Extended Abstract*, pp.190-191 (1999).
- 8) Heath, C., Luff, P., Kuzuoka, H., Yamazaki, K. and Oyama, S.: Creating Coherent Environments for Collaboration, *7th European Conference on Computer-Supported Cooperative Work*, Prinz, W., Jarke, M., Roges, Y., Schmidt, K. and Wolf, V. (Eds.), pp.119-138, Kluwer Academic Publishers (2001).

- 9) 深田博己: インターパーソナル・コミュニケーション, 北大路書房 (1998).
- 10) DeVito, J.A.: *The Interpersonal Communication Book*, Harper & Row Publisher (1983).
- 11) Newman, W. and Wellner, P.: A Desk Supporting Computer-based Interaction with Paper Documents, *CHI'92*, pp.587-592 (1992).
- 12) Ishii, H. and Kobayashi, M.: ClearBoard: A Seamless Medium for Shared Drawing and Conversation with Eye Contact, *CHI '92*, pp.525-532 (1992).
- 13) Ishii, H., Kobayashi, M. and Grudin, J.: Integration of Inter-Personal Space and Shared Workspace: ClearBoard Design and Experiments, *CSCW '92*, pp.33-42 (1992).
- 14) Tang, J.C.: Findings from observational studies of collaborative work, *Int. J. Man-Machine Studies*, Vol.34, pp.143-160, Academic Press Limited (1991).
- 15) Tang, J.C. and Minneman, S.L.: VideoWhiteboard: Video Shadows to Support Remote Collaborations, *CHI '91*, pp.315-322 (1991).
- 16) Rekimoto, J. and Saitoh, M.: Augmented Surfaces: A Spatially Continuous Work Space for Hybrid Computing Environments, *CHI '99*, pp.378-385 (1999).
- 17) Ishii, H. and Ohkubo, M.: Design of TeamWorkStation: A Realtime Shared Workspace fusing Desktop and Computer Screens, *Multi-User Interfaces and Applications*, Gibbs, S. and Verrijn-Stuart, A.A. (Eds.), IFIP WG 8.4, pp.131-142, Elsevier Science Publishers B.V. (1990).
- 18) Ishii, H. and Miyake, N.: Toward an open shared workspace: computer and video fusion approach of TeamWorkStation, *Comm. ACM*, Vol.34, No.12, pp.37-50 (1991).
- 19) Ishii, H.: TeamWorkStation: Towards a Seamless Shared Workspace, *CSCW '90*, pp.13-26 (1990).
- 20) 鈴木栄幸, 加藤 浩: 協同学習のための教育ツール「アルゴブロック」, 認知科学, Vol.2, No.1, pp.36-47 (1995).
- 21) ホール, E.T. (著), 日高敏隆, 佐藤信行 (訳): *かくれた次元, みすず書房* (1970).
- 22) Ichikawa, Y., Okada, K., Jeong, G., Tanaka, S. and Matsushita, Y.: MAJIC Videoconferencing System, Experiments, Evaluation and Improvement, *ECSCW '96* (1996).
- 23) 森井精啓, 岸野文郎, 鉄谷信司: 眼の CG アニメーションと視線の知覚に関する検討, 電子情報通信学会技術報告, IE93-32, pp.17-24 (1993).
- 24) Yamazaki, K., Yamazaki, A., Kuzuoka, H., et al.: GestureLaser and Gesturelaser Car: development of an Embodied Space to Support Remote Instruction, *ECSCW '99*, pp.239-258 (1999).
- 25) 歴本純一: 3次元マトリックスコードを利用した拡張現実感の構成手法, インタラクティブシステムとソフトウェア, 日本ソフトウェア科学会, pp.199-208 (1996).
- 26) 井上直人, 山下 淳, 葛岡英明, 山崎敬一: 直接的な指さしを支援する書画カメラシステムの構築, 情報処理学会研究報告, 2002-HI-98, Vol.38, pp.25-32 (2002).

(平成 15 年 5 月 28 日受付)

(平成 15 年 11 月 4 日採録)



山下 淳 (正会員)

平成 14 年筑波大学大学院博士課程工学研究科単位取得退学・博士 (工学)。平成 11 年日本学術振興会特別研究員, 平成 14 年東京大学先端科学技術研究センター特任助手, 現在に至る。主にグループウェア, 五感情報通信等ヒューマンインタフェースの研究に従事。



葛岡 英明 (正会員)

平成 4 年東京大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。同年, 筑波大学構造工学系 (現・機能工学系) 講師。現在同助教授。主にグループウェア, 人工現実感, その他ヒューマンインタフェースの研究に従事。



井上 直人

平成 14 年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。同年同大学院システム情報工学研究科に入学, 現在に至る。共同作業支援 (CSCW), グループウェアの研究に従事。



山崎 敬一

早稲田大学大学院文学研究科博士課程単位取得中退。現在, 埼玉大学教養学部教授。社会学, エスノメソドロジー, 会話分析, CSCW の研究に従事。著書『美貌の陥穽』(ハーベスト社), 共編著『語る身体・見る身体』(ハーベスト社) 等がある。