

没入型共有 VR 空間での遠隔協調作業における 手書き注釈付与を用いた思考支援に関する実験的検証

久木元 伸如^{†1} 江原 康 生^{†2}
古川 雅 人^{†3} 小山田 耕二^{†4}

没入型共有 VR 空間で三次元可視化結果を共有した遠隔協調作業では、情報を正確に伝達するために文字や図などの注釈を用いたコミュニケーションが重要と考える。本論文では、没入型共有 VR 空間での遠隔協調作業において、音声通話に加えて、手書きの注釈付与を用いることによる思考支援への効果について検証を行った。検証方法として、長距離ネットワークを介した 2 拠点で構成される没入型共有 VR 空間で、流体可視化結果を用いた遠隔コミュニケーション実験を行った。本実験における意図伝達の主観評価を行い、注釈付与ありの方が高い評価値が得られることが分かった。さらに、実験における説明時間と注釈の個数の間に高い相関があり、注釈を多く用いることで説明時間が短くなり、効率的な意図の伝達が行われていることも示した。ゆえに、没入型共有 VR 空間における注釈付与の思考支援における有効性を実証した。

Experimental Study on Thinking Support Using Handwritten Annotation at Collaborative Works in the Tele-immersive Shared Environments

NOBUYUKI KUKIMOTO,^{†1} YASUO EBARA,^{†2} MASATO FURUKAWA^{†3}
and KOJI KOYAMADA^{†4}

Tele-immersive collaboration shared with three dimensional scientific visualization image requires communication using annotation such as figures or characters in order to transmit one's idea correctly. In this paper, we conduct communication experiment in order to verify the availability of thinking support by effective communication which used handwritten annotations by PDA application in the tele-immersive environment which applied fluid visualization via WAN. From these results by subjective evaluations, the case of use annotations is highly evaluated. In addition, we showed to realize effective communication of intention because the explanation time correlate with the number of annotations in the experiment, and it became short by using many annotations. Therefore, we have proved the effectiveness in the understanding of remote user's intentions by making clear the important point under discussion using annotation in the tele-immersive shared environment.

1. はじめに

計算機の処理能力の向上にともない、高度かつ大規模なシミュレーションが可能となり、様々な研究開発の場では膨大なサイズの数値データを三次元可視化する

ケースが数多い。また近年は、地理的・組織的に分散したコンピュータやストレージを高速ネットワークで統合・接続したインフラ環境の整備が進んでいる。このような遠隔共有環境を場所などの物理的制約を超えて各研究機関の異分野の専門家が利用することにより、相互に経験や知識を共有した遠隔協調を実現させることが学際的な問題解決に大きく貢献できると考える。

遠隔協調作業を行う一般的な手段として、E-mail や WWW ブラウザを用いたアプリケーション、TV 会議システムなどを使用した CSCW (Computer Supported Cooperative Work) の活用が考えられる。またこのような協調作業の場においても、実験結果の全体像をすべての協調作業の参加者が直感的に把握できるように、三次元による可視化画像の提示が有効であ

†1 東和大学情報学科

Departments of Infomatics, Tohwa University

†2 京都大学学術情報メディアセンター

Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

†3 九州大学大学院工学研究院機械科学部門

Departments of Mechanical Engineering, Kyusyu University

†4 京都大学高等教育研究開発推進センター

Center for the Promotion of Excellence in Higher Education, Kyoto University

る．しかし既存の CSCW では、CRT やスクリーンなどの二次元平面のディスプレイに可視化結果を提示しているため、立体視による三次元表示の際に奥行き情報の欠如などの制約が生じる．

立体視可能な三次元可視化画像を用いた遠隔協調作業を効果的に行うためには、遠隔の共同研究者がネットワークを介して、可視化結果が三次元表示された Virtual Reality (以下、VR) 空間を共有しながら協調作業を行う環境として Collaborative Virtual Environments (以下、CVE)¹⁾ の構築が考えられる．CVE における遠隔協調作業では、三次元空間の共有に加えて様々な視点から対象物を直感的に観察しながら問題解決や知的発見を共有できることが望ましい．そのためには、遠隔地間で効果的な意図の伝達による知識の共有が要求される²⁾．

たとえば複雑な流体、磁場などのシミュレーション結果や医療画像などを可視化表示する場合、観察する方向によって結果のとらえ方が変わり、重大な発見を見落す可能性がある．そのような場合では同時に複数の研究者が同じデータを異なる視点から観察し、様々な意見交換や討議を進めることが新たな知的発見につながると思われる．

しかし、VR 空間における情報は視覚情報に依存する 경우가多く、省略語や照応表現を多く含む傾向が高い．ゆえに、対話者の保有している知識や論点の整合をとるために、画像情報や音声通話に加えて文字や図などの注釈を用いたコミュニケーションが重要である．注釈は実世界における協調作業でも、全員が情報や資料を共有しながら状況を容易に把握するためにデータや資料に補足的な説明を加えて、現在の論点を整理する有益な手段として用いられている．CVE において注釈付与を用いることができれば、他の協調者との論点の明確化や意思の疎通に対する貢献が大きいと考える．

本論文では、没入型ディスプレイを用いた三次元可視化結果で構成された VR 空間を長距離ネットワークを介して遠隔地間で共有した環境 (以下、没入型共有 VR 空間) を構築し、没入型共有 VR 空間に手書きの注釈付与を用いることによる思考支援への効果について実験的検証を行う．検証方法として、没入型共有 VR 空間での有効な三次元可視化の事例とされる複雑な流れ場の把握に着目し、平板翼上の流体可視化結果を取り扱った双方向による遠隔コミュニケーション実験を行い、注釈付与を用いる有効性に着目した評価を行う．

2. 没入型共有 VR 空間における遠隔協調作業での注釈付与による思考の支援

CVE の構築に関する研究は AVOCADO³⁾、it3d⁴⁾ などの事例があるが、ツールキットやフレームワークの提案でとどまっている．CVE を活用した可視化環境の事例では、複数の共同研究者が同じ可視化画像で構成された空間を共有および参照する研究が行われている^{5),6)}．これらの研究では、遠隔地間で同じ三次元の可視化画像を参照しつつ、音声通話によるコミュニケーションを確立している．また、可視化の協調作業では提示処理手法の切替えやパラメータ変更を行って作業を行うことから、イベント同期に関する研究も行われている^{7),8)}．

しかし、これらの研究は空間共有技術の開発に主眼が置かれており、意図の伝達や知識の共有といった思考を支援する環境としては十分に考慮されていない．

本論文では、遠隔の共同研究者と的確な意図の伝達による知識の共有を可能とした協調作業を行うために、音声通話によるコミュニケーションにとどまらず、没入型共有 VR 空間での注釈付与による思考支援の有効性について検討する．

2.1 注釈付与による思考の支援

一般的な思考作業では、頭の中だけでは複雑に絡み合ったアイデアを整理して筋の通った 1 つの考えにまとめることは困難なので、図 1 に示すようにノートや紙に考えていることや重要な点を書くことが多い．このような思考作業は「図形思考」⁹⁾ と呼ばれ、着想やアイデアを表出化・視覚化し、それらを組み合わせることによって発展するといわれる．

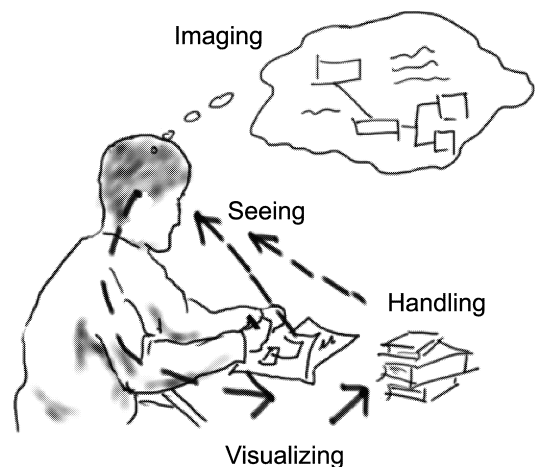


図 1 図形思考

Fig. 1 Graphic thinking.

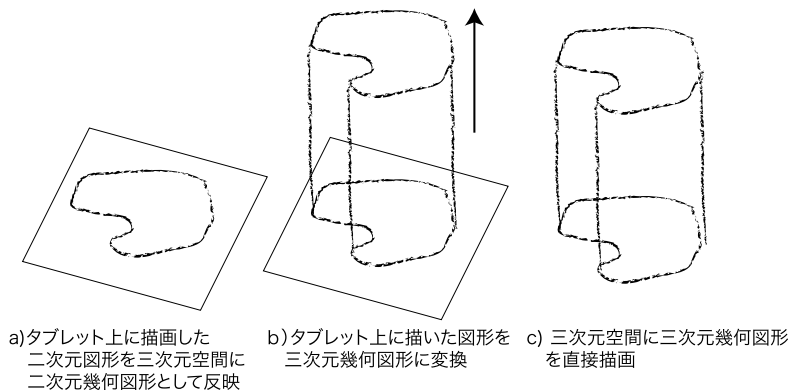


図 2 三次元空間への描画手法
Fig. 2 Drawing methods into the 3D space.

没入型共有 VR 空間における遠隔協調作業においても、空間に提示されているオブジェクトを単に眺めているばかりでなく、重要な注目点や追加情報など関連情報を表出し、視覚的に確認することで思考の支援につながると考えられる。さらに、表出された情報を没入型共有 VR 空間に直接書き込むことによって、遠隔地の参加者間の確然とした意図の伝達が可能となる。

ゆえに、文字や数式、図形などの注釈を書き加えて知識を表出し、その情報を協調作業者と遠隔地間で共有し、表出化したお互いの考えを相互に参照することで、知的な遠隔協調作業が可能と考える。

2.2 没入型共有 VR 空間への手書きによる注釈付与

没入型ディスプレイを活用した作業では、実際のノートを手にとってメモを記述する際にコントロールデバイスや立体視用メガネをはずして、ノートと筆記用具に持ち替える動作が必要となる。そのため、没入型共有 VR 空間での作業の中断を余儀なくされ、知的発見のタイミングを逸することにつながり、作業に多大な支障を与える。ゆえに、没入型共有 VR 空間に直接注釈付与することで、思考を止めずに作業を継続できる環境が求められる。

没入型共有 VR 空間に注釈付与を行う際、自然でかつ簡単に発想を素早く入力できることが重要であり、そのためには空間に直接書き込める手書きによる注釈付与が有効と考える。手書きは思い浮かんだ曖昧な発想について、素早く自由に書き留めることができ、効率的な知識の表出化を実現する。さらに、表現文字や数式図形などを適宜自由な順序で書くことが可能である¹⁰⁾。

三次元空間に文字や手書き図を描画する方法として、図 2 に示すように、タブレットやディスプレイなど

の二次元平面上に描いた形状をそのまま二次元形状として三次元空間に描画する方法¹¹⁾、二次元形状を引き出しや回転などの処理を行って三次元に変換する方法^{12),13)}がある。さらに直接三次元空間に描画する方法^{14),15)}もあり、空間に直接描画する方法として、空気ペン¹⁶⁾のようにペン型デバイスの利用が考えられる。ペン型デバイスは人間が「書く」という動作を連想するので、使用目的が明確にユーザに理解されやすい。

しかし、VR システムで用いるユーザインタフェースは VR 空間へ文字や図形の描画に限らず、物体把持や空間の移動などを行う必要があるため、複数のインタラクションへの考慮が求められる。我々は、様々な方面でユーザインタフェースとして研究されている PDA^{17)~20)}を用いて、可視化パラメータ変更や没入型共有 VR 空間に注釈付与が可能な PDA アプリケーションを提案し、スタンドアロン環境での実装および評価を行った²¹⁾。本論文では、ネットワークを介した没入型共有 VR 空間での遠隔協調作業において注釈付与や可視化パラメータの変更を行うユーザインタフェースとして、この PDA アプリケーションを適用する。

2.3 注釈付与による意図の伝達

遠隔協調作業では音声や身振りによるコミュニケーションが行われることが多い。しかし、可視化結果を用いた協調作業で確実な意思疎通を行う際には、文字や図形を用いたコミュニケーションが重要である。

図形や文字による意図の伝達の事例として、Ishii らによる ClearBoard がある²²⁾。ClearBoard は画面上に図や文字を描画し、描いた図や文字は相手にも転送され、同じ情報を共有する。さらに画面にはハーフミラーを用いて相手を画面に表示し、指差し動作や相手の表情や身振りを確認できる。また、Verlinden らは VR 空間にマークを配置し、そのマークを三次元ポイ

ンタで触れることによって音声を再生する注釈付与に関する研究を行っている²³⁾。Olbrich らは、キーボード、マウス、ペン型の触覚デバイスを用いて、三次元の可視化画像によって構成された空間への注釈付与を可能とする遠隔協調作業の環境を構築した²⁴⁾。建築分野への応用として、Jung らは手書き入力による注釈付与を可能とした遠隔協調作業に関する研究を行った²⁵⁾。しかし、これらの注釈付与の事例は二次元のボード上への描画や WWW ブラウザ上で用いられているため、立体視可能な没入型共有 VR 空間での利用を想定していない。没入型共有 VR 空間における注釈付与は、遠隔協調作業において双方の考えや意見を明確に伝達することができ、空間に提示された対象物に対する直感的な理解を促進すると考える。

本論文では没入型共有 VR 空間での遠隔協調作業において、手書きの注釈付与を用いた意図の伝達による思考支援への効果について実験的検証を行う。

3. 注釈付与が可能な没入型共有 VR 空間

3.1 没入型共有 VR 空間への注釈付与

注釈の描画には、2 種類の方法を実装した。1 つは PDA 本体のボタンを押しながら PDA を動かして描画する方法（以下、ImmediateDraw とする）と PDA のタッチスクリーンに描画した後に没入型共有 VR 空間に転送する方法（以下、TouchScreenDraw）である。これらの方法は、文字をテキスト入力するのではなく、文字を幾何形状として描画するので、多言語文字に対応している。

図 3 に注釈を付与した没入型共有 VR 空間を示す。ImmediateDraw では PDA 本体のボタンを押しながら PDA を動かすことによって、空間内に表示されている 3D カーソルで直接描画する。この描画方法で描いた注釈データは、三次元形状になって没入型共有 VR 空間に表示される。

付与した注釈は、ネットワークを介して遠隔地の協調作業者がいる没入型共有 VR 空間に転送され、同じ注釈を共有することができる。注釈の消去は付与した者のみが行うことができる。またセッションの途中から入ってきた協調者には、すでに付与されているすべての注釈を転送することで、共有空間における情報同期が可能である。

3.2 没入型共有 VR 空間における音声通話

協調作業中のコミュニケーションでは、一般的に会話の占める割合が大きい。そのため、没入型共有 VR 空間で円滑な遠隔協調作業を行ううえでも、音声通話を利用した会話によるコミュニケーションが不可欠と

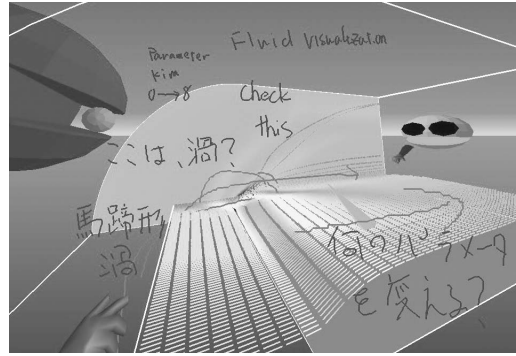


図 3 没入型共有 VR 空間に付与された注釈
Fig. 3 Annotations in an immersive virtual environment.

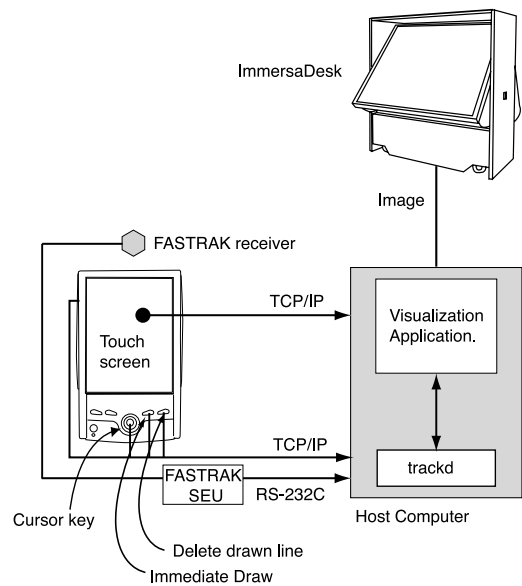


図 4 システム構成図

Fig. 4 System configuration.

される^{26),27)}。また、円滑なコミュニケーションを実現するためには明瞭な音声による通話が要求される。我々は、音声仕様として 32 KHz sampling, 16 bit, ステレオとした音声通話ライブラリを開発し、本環境に実装した²⁸⁾。音声の入出力はクロスプラットフォームのオーディオ I/O ライブラリである PortAudio²⁹⁾を利用した。音声転送用プロトコルには UDP を使用し、協調者の各アバタの位置座標は変化があるたびに UDP で送信される。この座標データを用いて、発話者アバタとの位置関係を計算して PAN と音量を動的に調整する。これによって、VR 空間における音による位置関係や距離感も呈示可能となる。

3.3 システム構成

本研究で構築したシステムの構成を図 4 に示す。

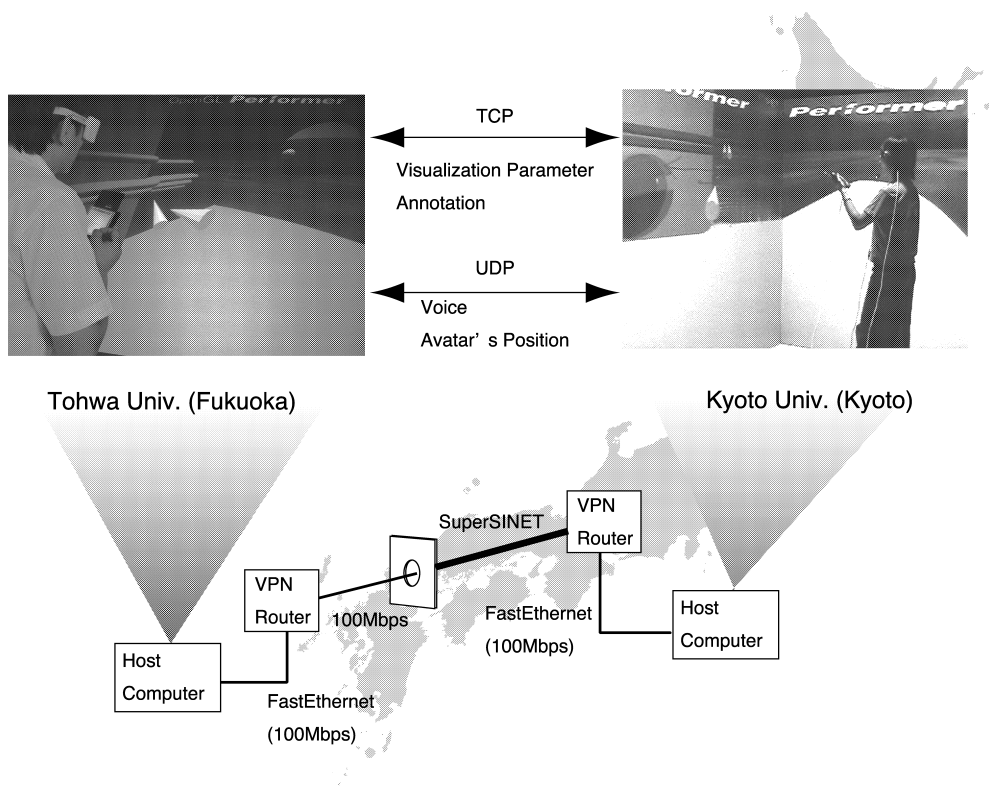


図 5 没入型共有 VR 空間
Fig. 5 Tele-immersive shared environments.

ホストコンピュータは一面式没入型ディスプレイに三次元可視化結果を提示する。PDA に無線 LAN (IEEE802.11b) アダプタを装着し、ホストコンピュータと TCP/IP で通信する。PDA の位置や傾きを 3D カーソルの挙動と連動させて ImmediateDraw による注釈の描画や指差し動作などの様々なインタラクションを行うために、PDA に空間センサを取り付けている。空間位置センサは PDA 本体による磁気の影響を与えないようにするため PDA ケースを約 10cm 長くし、空間位置センサをケースの裏側にマジックテープで装着できるようにした。

本論文では福岡市の東和大学と京都市の京都大学の 2 拠点から構成される没入型共有 VR 空間を構築した (図 5)。両拠点で PDA を用いて没入型共有 VR 空間に対してインタラクションや注釈付与を行う。協調作業者は、互いの没入型共有 VR 空間にアバターとして表現される。ユーザの装着する立体視用メガネと PDA には空間センサが取り付けられている。空間センサの位置データは相手にも送信され、アバターや 3D カーソルの位置や向きが変化する。これによって相手の視線方向や見ている箇所の確認や、指示動作に 3D カーソ

ルを用いることが可能となる。

4. 実験

没入型共有 VR 空間において、三次元可視化結果を用いた遠隔協調作業を行う際、空間を介して注目すべき点や可視化結果から得られる情報について、正確な意図の伝達が要求される。意図の伝達を行う場合に音声通話は容易な手法であるが、協調作業者が可視化結果について話す内容は省略語や照応表現を多く含む傾向が高く、十分な意図伝達ができないことが多い。的確な意図の伝達による知識の共有を可能とするためには、文字情報や図形などを注釈として空間に出し、相互に参照することで、知的な遠隔協調作業が可能になると考える。本実験では、没入型共有 VR 空間における遠隔協調作業で注釈付与を用いた場合の意図の伝達に対する有効性について評価実験を行う。

4.1 実験設定

複雑な流れ場の把握を直感的に理解するためには、没入型共有 VR 空間による可視化が有効である。本実験ではそこに着目して、平板翼上の流体データの可視化を取り扱う。流体可視化の様子を図 6 に示す。この

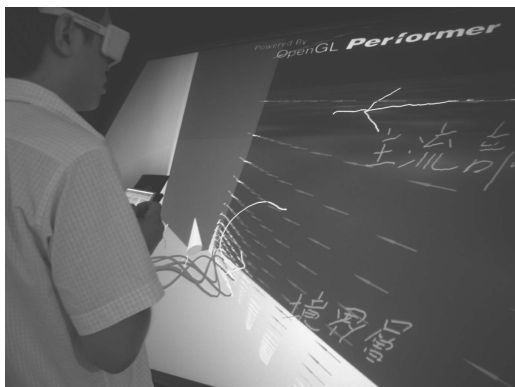


図 6 平板翼上の流体可視化と注釈

Fig.6 Annotations on fluid visualization in immersive virtual environment.

可視化の目的は、平板上の流れが平板に対して垂直に配置している翼の前縁に衝突するとき、速度の遅い境界層側に流れが巻き込まれ馬蹄形渦が発生する原理の理解である。

実験環境として東和大学を教示側とし、京都大学を被教示側とした。本実験では馬蹄形渦の構造について教示側が説明を行う。それに対して被教示者は注釈付与の操作方法に練熟していないので、教示者への意図の伝達の際には、3D カーソルを用いた指差し動作と音声による質問や返答を用いてインタラクションを行う。被教示側は流体工学を専門としない14名の学生で、注釈付与ありの場合と注釈付与なしの2通りの実験を行う。7名の被験者は最初に注釈付与ありを評価し、後に注釈付与なしの評価を行う。残り7名は最初に注釈付与なしの評価を行う。被験者の順番は無作為とした。各実験の間には十分な時間をあけた。教示者はPDAを用いた注釈付与に慣れている被験者1名で、各被教示者に対して1対1で馬蹄形渦の発生原理を説明する。

教示者は次の項目の順序で説明する。

- 1) 物体形状と流体の大まかな流れについて
- 2) 流体の特性である粘性と主流部・境界層について
- 3) 翼の前縁に衝突した流れが境界層側へ巻き込まれる現象について
- 4) 渦の回転が反時計回りであることについて

速度スカラー値や渦度のコンター図など可視化手法の切替えやパラメータの変更はPDAアプリケーションを用いて操作し、これらの操作による変更は、遠隔の協調作業者の環境にも送信され、同じVR空間を参照する。

本実験では、注釈付与を用いることによる意図伝達の有効性に着目し、実験後に被教示者に対して5段階

表 1 被験者による主観評価の結果
Table 1 Results of subjective evaluations.

(a) 相手の意図を理解できましたか		
	平均値	標準偏差
注釈付与あり	4.43	0.516
注釈付与なし	3.35	1.183
有意確率 p=0.0001		
(b) 自分の意図を相手に伝えられましたか		
	平均値	標準偏差
注釈付与あり	4.00	0.800
注釈付与なし	3.37	0.976
有意確率 p=0.0224		

表 2 評価後の代表的なコメント
Table 2 Typical comments after the evaluations.

(a) 教示側	
注釈付与あり	・説明している箇所を明確化することが出来た ・説明に対する被教示者の反応が良いと感じた
注釈付与なし	・同じ説明を何度も繰り返すことが多かった ・理解してもらうためには説明に多くの工夫が必要とされる
(b) 被教示側	
注釈付与あり	・流れの方向も含めて解りやすい ・事象が明確につかめた ・話している内容が目の前で見えるのがよい
注釈付与なし	・どこからの視点で説明しているのか解りにくい ・視点の移動と聞く行為の両立が難しい ・互いに見ているものにギャップがある気がする

による主観評価を行う。評価項目は「相手の意図を理解できたか」と「自分の意図を相手に伝えられたか」の2点で、注釈付与あり・なしそれぞれの場合に分けて回答する。同時に自由な記述形式でコメントを書いてもらう。さらに、実験時に撮影したビデオ映像から、教示者が説明の際に使用した注釈の個数と、上記の1)~4)の項目について各々の説明に要した時間を計測する。

4.2 実験結果

4.2.1 注釈付与の有無による意図伝達に関する評価

注釈付与あり・なしの場合の回答結果を表1にそれぞれ示す。なお、被験者の注釈付与あり・なしの実験順序ごとの評価結果を有意水準5%でt検定した結果、有意差は得られなかったため、実験順序に関する影響はなかったものと見られる。表1の結果より、設問に対して注釈付与ありの方が高い評価値を得られていることが分かる。またこれらの結果については、有意水準5%でt検定した結果、平均値の間に有意な差があることが認められている。さらに、表2に実験後における教示者と被教示者の代表的なコメントを示す。

実験中、渦の中心や回転方向など論点の中心となる

表 3 各項目の説明に要した平均時間
Table 3 Average explanation time for each item.

項目	注釈あり		注釈なし		有意確率
	平均時間	標準偏差	平均時間	標準偏差	
1) 流体の大まかな流れについて	3.93 秒	1.21 秒	10.00 秒	11.5 秒	p=0.0554
2) 境界層と主流部について	13.36 秒	6.82 秒	25.07 秒	15.22 秒	p=0.0235
3) 境界層側への巻き込みについて	10.64 秒	6.21 秒	37.07 秒	36.85 秒	p=0.0224
4) 馬蹄形渦の形について	38.00 秒	16.4 秒	81.79 秒	50.62 秒	p=0.0057

流体の説明において言語による表現が困難な場合に、空間内に三次元で手書き描画による注釈を付与することで明示的に説明していた。たとえば、矢印による流れ方向の表現や、「馬蹄形」と音声で伝えても分からない場合には、TouchScreenDraw を用いて漢字で「馬蹄形」と空間に描画することで理解を促していた。

一方、注釈付与がない場合には、3D カーソルを用いた指示動作を教示側が行ったときに、指し示している箇所と被教示側の視点に差異が発生した場合や、照応表現を用いたときに意志の疎通がとれていなかった。注釈付与ありの場合は、被教示者から教示者に対して理解した旨を明確に返答していたが、注釈付与なしの場合は曖昧な返答が多く見受けられた。これは注釈付与なしの場合、教示者の意図を適確に理解できなかったために曖昧な返答を行っていたと考えられる。したがって、教示者は被教示者が理解していないと判断して何度も同じ説明を繰り返す傾向があり、教示側の一方的な説明に陥りやすくなったといえる。このように、円滑なコミュニケーションが行われない場合は遠隔協調作業に支障が生じて、作業に対する疲労感の増大につながると考えられる。これらは表 2 の注釈がない場合の教示者のコメントからも判断できる。

4.2.2 注釈の有無による説明時間との関連性

表 3 に注釈付与あり・なしの場合について、教示者が各項目の説明に要した平均時間を示す。有意水準 5% で t 検定した結果、項目 1) に関しては平均時間に顕著な有意差は見られないが、注釈ありの方が説明時間が短くなる傾向がある。他の項目は注釈の有無による説明時間の平均値に有意差があり、注釈ありの方が説明時間が短くなる。また、表 3 の「注釈なし」では平均時間が長くなっているが、標準偏差も大きくなっている。この理由として、今回の実験では工学を専門としない被験者も含まれているので、予備知識の有無が標準偏差の違いに影響を及ぼしたと考えられる。

項目 1) において、被教示者は没入型共有 VR 空間では自由に移動可能なので、教示者が言葉で「右から左へ流れている」と伝えても、見る方向によって左右が異なるため、説明に時間を要する。それに対して注

釈付与ありの場合は、「こっちからこっちへ」と PDA のボタンを押しながら三次元形状を描画する ImmediateDraw を用いて矢印を描き、説明することで時間を短くしていた。

可視化手法を切り替えてベクトル表示を行うと流れ方向を容易に認識できるが、境界層や巻き込みが起きている箇所は速度が遅く、ベクトル表示による矢印が小さくなるので認識が難しい。その場合はコンター図を用いた表現が効果的であるが、流れ方向を認識できない。項目 2) と項目 3) では馬蹄形渦の発生原理を理解するうえで、可視化画像に対して注目すべき境界層や巻き込みの箇所を円で囲んだり、流れ方向について注釈付与したりすることで説明していた。このことから教示者は空間に注釈を付与することで、現在の論点に対する共通の認識を得ようとしていることがいえる。

項目 4) では、教示者はすでに渦の形がイメージできているが、注釈付与なしの場合には渦の形を言葉や可視化手法の切替えや 3D カーソルを用いた身振りによって説明していたため、時間が大幅にかかっている。注釈付与ありの場合では、VR 空間に渦を描いて説明することで時間を大幅に短縮している。つまり、手書きによる渦の描画はイメージを即座に VR 空間に提示できるので、教示者が言葉では表現が難しい三次元形状の渦を ImmediateDraw を用いて描くことで意図の伝達を行っていたと考えられる。

4.2.3 説明時間と注釈の個数の関係

各被験者ごとに前出の説明に要した時間の合計と説明の際に用いた注釈の個数について、説明時間が短い順に並べ替えた結果を図 7 に示す。横軸は各被験者を表す。図 8 に同じ実験結果に対する説明時間と注釈の個数の散布図を示す。図中の は各被験者を表す。図 7, 8 より、説明時間が短いほど注釈の個数が多い傾向にあることが読み取れる。さらに図 8 より、説明時間と注釈の個数の相関係数を算出した結果、 -0.802 と高い相関があることが分かった。これらの結果より、言葉で詳細に説明するよりも注釈を用いることによって、効率的な意図の伝達が行われていることが実証できたといえる。

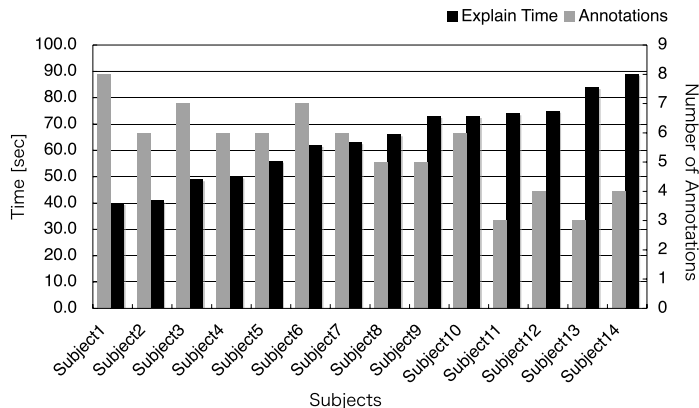


図 7 説明時間と注釈の数
Fig. 7 Explanation time and number of annotations.

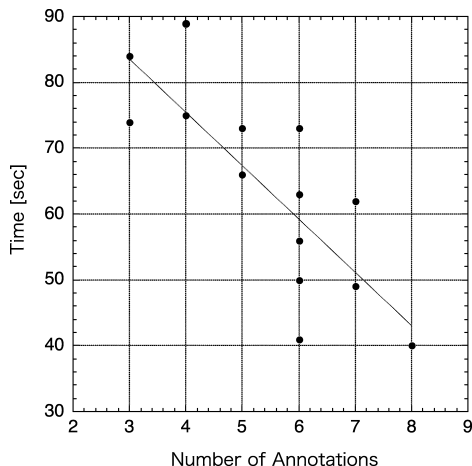


図 8 説明時間と注釈の個数の相関関係
Fig. 8 Correlation between explanation time and number of annotations.

4.3 考 察

人が物事の理解を進めるときには、現在の状況や情報と持ち合わせている知識の組合せから、自らの知識体系に変換するプロセスが必要となる³⁰⁾。さらに、新しい知識を理解する場合には、必要な情報を反芻しながら理解に取り組むものと考えられる。しかし、音声情報のみでは連続して伝達される場合が多いので、体系的な理解を行うためには何度も聞き直しや要点をノートなどへ書きとどめながら何度も参照することが必要となる。

没入型共有 VR 空間に付与された注釈を用いて遠隔協調作業を行う場合、言葉や身振りでは伝達が困難な情報を文字や図を用いたコミュニケーションで伝達が可能となる。したがって、被教示者は空間に付与された注釈を参照しつつ教示者の説明を聞くことができ、可視化結果に対する理解を促進したといえる。それに

対して注釈付与を用いない場合は、被教示者の思考に必要な情報を空間に表出されず教示者は繰り返し説明をする必要があるため、説明に時間を要する。結果として被教示者は自らの思考を体系化できず、可視化結果の具体的な把握に戸惑ったことが、表 2, 3 の結果から考えられる。

実空間において、注釈は主に紙などの二次元の媒体上に記述されるが、本研究では没入型共有 VR 空間に対して、三次元表現による注釈付与を行っている。三次元空間を考慮した注釈を手書きで随意に書き加えることによって、没入型共有 VR 空間を実空間のノートのような媒体として扱うことが可能となる。たとえば、翼の前縁部に当たった流体は、境界層側に流れ込みながら翼から剥離していく。しかし、この流れの状態を紙などの上に二次元表現することは難しい。本実験では教示者が ImmedietDraw で流線を描画することで、被教示者は馬蹄形渦の構造を立体的に把握することができた。

また、三次元の可視化結果を紙などに印刷したものを注釈付与した場合、奥行き情報がないために、三次元空間のどの箇所に注釈を付与したのか直感的な識別が困難になる。この問題を解決するためには 3 方向からの可視化結果をそれぞれ印刷して、各位置に対応する箇所に注釈を付与する方法も考えられるが、作業量が膨大に増えるといった問題が生じる。本論文で用いた TouchScreenDraw による文字の注釈は、三次元空間の任意の箇所に付与することができる。たとえば、渦の発生する箇所は翼の前縁部の限られた箇所なので、教示者は TouchScreenDraw による文字の注釈を用いて明確な場所を特定して説明することができた。

このように、教示者は必要に応じて ImmedietDraw と TouchScreenDraw を使い分けて注釈を付与してい

た。被教示者はこれらの付与された注釈を参照しながら教示者の説明を聞くことができ、可視化結果の全体像をイメージ化する契機になっていると考えられる。ゆえに、本実験における流線の描画や注目箇所を円で囲むといった没入型共有 VR 空間への三次元表現による注釈付与は、空間の対象物に対する直感的な理解を促進し、協調作業者の効率的な意図の理解と体系的な思考を支援しているといえる。

一方、実験後に行ったアンケートの中で注釈付与あり・なしにかかわらず「自分の状態が相手に伝わっている感覚がない」という意見もあった。協調作業者の存在・行動などを認識させることで、そこから生じるコミュニケーションを支援するアウェアネス³¹⁾を遠隔協調環境でいかに実現するかが今後の重要課題と考える。今回の実験では相手の姿はアバターで表現されているが、アバターでは VR 空間における相手の位置や簡単な動きしか表現していない。相手の顔やジェスチャ、視線を提示し、コミュニケーションの情報量を増やすことによって、さらに効果的な遠隔協調作業が行えると考えられる³²⁾。

その解決手段の 1 つとして、ビデオアバター³³⁾など人物像の転送に関する研究が行われている。本研究においても遠隔の協調作業者を身近に感じられるような工夫が必要と考える。さらに実験を通して、今後は没入型共有 VR 空間での移動操作などに慣れていないユーザへの対応方法や、空間を有効活用した解析手法の提案が必要と考える。

さらに、三次元空間への注釈付与はユーザが今までに体験したことがない場合が多いので、使いこなすためには若干の練習が必要となる。より効果的な注釈付与とするためには初心者にも使えるよう注釈付与のインタフェースの改良を進める必要がある。また、没入型共有 VR 空間に対する注釈は、正確な位置への付与を要求される場合があるので、空間におけるポイント精度の向上も今後の検討課題と考える。

5. おわりに

本論文では、手書きによる注釈付与が可能な没入型共有 VR 空間での遠隔協調作業において、注釈付与による思考支援への有効性について実験的検証を行った。本環境では、PDA アプリケーションを用いて VR 空間に手書きによる文字や図形の三次元の注釈付与と可視化パラメータの変更を可能とし、付与された注釈は遠隔の協調作業者の空間にも転送され、相互の注釈を参照することで意図の伝達や知識の共有を促す。

検証方法として、福岡市の東和大学と京都市の京都

大学の 2 拠点から構成される没入型共有 VR 空間で平板翼上の流体データの可視化を取り扱い、遠隔地間での双方向コミュニケーション実験を行った。実験において、教示者は注釈を付与することで被教示者は注釈を参照しながら教示者の説明を聞くことができたので、可視化結果の全体像をイメージ化する契機になったことが考えられる。その結果、図や文字の注釈で教示者の思考の枠組みを視覚化することで、被教示者の考えを体系的に組み立てるといった思考を支援することができたといえる。さらに、これらの注釈は重要とされる論点を明確にし、相手の意図を体系的に理解するうえで有用であり、没入型共有 VR 空間における思考支援に有効であることを示した。また注釈を多く用いることで説明時間を短くし、効率的な意図の伝達が行われることも実証した。

しかし本環境では、教示者が「これ」と 3D カーソルで指した際に音声と映像に若干の遅延が生じ、ユーザがこの遅延による動きのずれに気をとられるケースがわずかながら生じた。この問題を解決するためには、あらかじめネットワークの帯域を調べたうえで、音声とトラッキングデータの送信の遅延パラメータを動的に変化させて、音声と指示動作を正確に同期させる機構が必要と思われる。

今後は非同期作業時における注釈付与の有効性について、注釈の作業履歴などを時系列に沿って記録することによって、どのような経緯で変化が見られたかといったコンテキストを追うことの実現に向けて検討を行う予定である。

謝辞 本研究は独立行政法人情報通信研究機構「民間基盤技術研究促進制度」の委託業務「テレ・イマージング・カンファレンス・システムに関する研究」の一部として行った。

参考文献

- 1) Leigh, J., Johnson, A., Vasilakis, C. and DeFanti, T.: Multi-perspective Collaborative Design in Persistent Networked Virtual Environments, *Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium '96*, pp.253-260 (1996).
- 2) 西田豊明: 社会基盤を支える先進的コミュニケーション基盤としての会話型知識プロセス支援技術; 社会技術研究論文集, Vol.1, pp.48-58 (2003).
- 3) Tramberend, H.: Avocado: A Distributed Virtual Reality Framework, *IEEE Virtual Reality*, pp.14-21 (1999).
- 4) 大澤範高, 浅井紀久夫, 斎藤史彦: 人工現実感アプリケーションのためのツールキットライブラ

- リ, it3d, 日本ソフトウェア科学会第9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 '01), pp.101-106 (2001).
- 5) Goebels, G., Lalioti, V. and Göbel, M.: Design and Evaluation of Team Work in Distributed Collaborative Virtual Environments, *Proc. ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp.231-238 (2003).
 - 6) Jensen, N., Olbrich, S. Pralle, H. and Raasch, S.: An Efficient System for Collaboration in Tele-Immersive Environments, *4th Eurographics/ACM SIGGRAPH Workshop on Parallel Graphics and Visualization*, pp.123-131 (2002).
 - 7) Leigh, J., Johnson, A., Brown, M., Sandin, D. and DeFanti, T.A.: Visualization in Teleimmersive Environments, *IEEE Computer*, pp.66-73 (1999).
 - 8) Ki, B. and Klasky, S.: Collaborative scientific data visualization, *Concurrency: Practice and Experience*, Vol.9, No.11, pp.1249-1259 (1997).
 - 9) Mckim, R.H.: *Experiences in visual thinking*, brooks/cole publishing company (1972), (2nd ed. 1980).
 - 10) 三末和男: ペン, スケッチ, フリーハンド図—創造支援への手書きの利用, 第二回知識創造支援システムシンポジウム予稿集, pp.40-47 (2005).
 - 11) Poupyrev, I., Numada, T. and Weghorst, S.: Virtual Notepad: Handwriting in Immersive VR, *Proc. IEEE Virtual Reality Annual Symposium (VRAIS '98)*, pp.126-132 (1998).
 - 12) Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, H.: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, *SIGGRAPH 1999*, pp.409-416 (1999).
 - 13) 井上智之, 西住直樹, 鈴木伸明, 安福尚文, 佐賀聡人: 仮想空間中での手書きジェスチャ認識に基づいた3次元モデリングインタフェース BlueGrotto の提案, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-D-II, No.6, pp.1309-1318 (2006).
 - 14) 園田智也, 村岡洋一: 空中での手書き文字入力システム, 信学論, Vol.J86-D-II, No.7, pp.1015-1025 (2003).
 - 15) 吉田俊介, 星野俊仁, 宮崎慎也, 大関 徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹: 空間スケッチシステム—仮想空間における自動車のスタイルデザイン, Visual Computing グラフィクスとCAD 合同シンポジウム 2000, 画像電子学会/情報処理学会, pp.89-94 (2000).
 - 16) 山本吉伸, 椎尾一郎: 空気ペン—空間への描画による情報共有, 第59回情報処理学会全国大会講演論文集(4), pp.39-40 (1999).
 - 17) Ayatsuka, Y., Matsushita, N. and Rekimoto, J.: HyperPalette: A hybrid computing environment for small computing devices, *CHI 2000 Extended Abstracts*, pp.133-134 (2000).
 - 18) Myers, B.A.: Using Handhelds and PCs Together, *Comm. ACM*, Vol.44, pp.34-41 (2000).
 - 19) Rekimoto, J.: A multiple device approach for supporting whiteboard-based interactions, *Proc. CHI 1998*, pp.344-51 (1998).
 - 20) Hartling, P., Bierbaum, A. and Cruz-Neira, C.: Virtual Reality Interfaces Using Tweek, *ACM SIGGRAPH 2002* (2002).
 - 21) 久木元伸如, 江原康生, Nonaka, J., 小山田耕二, 金澤正憲: VR 環境における PDA を用いたパラメータ操作と注釈付与が可能な可視化システムの実装と評価, 電子情報通信学会和文論文誌, Vol.J88-D-II, No.3, pp.596-604 (2005).
 - 22) Ishii, H. and Kobayashi, M.: ClearBoard: A Seamless Medium for Shared Drawing and Conversation with Eye Contact, *Proc. SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp.525-535 (1992).
 - 23) Verlinden, J., Bolter, J. and van der Mast C.: Voice Annotation: Adding Verbal Information to Virtual Environments, *Proc. European Simulation Symp.*, pp.60-69 (1993).
 - 24) Olbrich, S. and Jensen, N.: Lessons Learned in Designing a 3D Interface for Collaborative Inquiry in Scientific Visualization, *HCI International 2003*, pp.1121-1125 (2003).
 - 25) Jung, T., Gross, M.D. and Yi-Luen Do, E.: Annotating and Sketching on 3D Web Models, *Proc. 7th international conference on Intelligent user interfaces*, pp.95-102 (2002).
 - 26) Hindmarsh, J., Fraser, M., Heath, C., Benford, S. and Greenhalgh, C.: Object-focused interaction in collaborative virtual environments, *ACM Trans. Computer-Human Interaction*, Vol.7, pp.477-509 (2000).
 - 27) Sallnäs, E., Rasmus-Gröhn, K. and Sjöström, C.: Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback, *ACM Trans. Computer-HumanInteraction*, Vol.7, pp.461-476 (2000).
 - 28) 久木元伸如, 江原康生, 小山田耕二: 協調 VR 環境のための音声通話ライブラリ, 情報処理学会研究報告, 2004-HI-109, pp.15-20 (2004).
 - 29) <http://www.portaudio.com>
 - 30) 杉山公造, 下嶋 篤, 永田晃也: ナレッジサイエンス 知を再編する 64 のキーワード, 紀伊國屋書店 (2002).
 - 31) 松浦宣彦, 日高哲雄, 岡田謙一, 松下 温: VENUS: Interest Awareness を支援したインフォーマルコミュニケーション環境, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.6, pp.1332-1341 (1995).
 - 32) 山下 淳, 葛岡英明, 山崎敬一: 遠隔共同作業環境における身体配置の再構成, 日本バーチャル

リアリティ学会第 5 回大会論文集, pp.319–322 (2000).

- 33) Ogi, T., Yamada, T., Tamagawa, K., Kano, M. and Hirose, M.: Immersive Telecommunication Using Stereo Video Avatar, *Proc. Virtual Reality 2001 Conference*, pp.45–51 (2001).

(平成 18 年 8 月 3 日受付)

(平成 19 年 3 月 1 日採録)



久木元伸如

平成 6 年長崎総合科学大学工学部船舶工学科卒業, 平成 8 年同大学院工学研究科修士課程修了. 同年東和大学電気工学科助手. 平成 11 年同講師, 平成 18 年京都大学大学院工学研究科博士課程退学. 博士(工学). パーチャルリアリティ, 遠隔協調作業の研究に従事. 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会各会員.



江原 康生 (正会員)

平成 6 年東北大学工学部通信工学科卒業. 平成 12 年同大学院情報科学研究科博士課程修了. 同年京都大学大型計算機センター助手, 平成 14 年同大学学術情報メディアセンター助手. 博士(情報科学). 遠隔コラボレーション, テレマージョン, ネットワークコンピューティングに関する研究に従事. IEEE, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会各会員.



古川 雅人

昭和 55 年九州大学工学部動力機械工学科卒業, 昭和 60 年同大学院工学研究科博士課程修了. 同年九州大学工学部講師, 昭和 62 年同助教授, 平成 17 年同大学院工学研究院教授. 圧縮性流れの数値解析とビジュアルデータマイニングに関する研究に従事. 日本機械学会, 可視化情報学会, 日本流体力学会, 日本航空宇宙学会, 日本ガスタービン学会, ターボ機械協会各会員.



小山田耕二 (正会員)

昭和 58 年京都大学工学部電気工学科卒業. 昭和 60 年同大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了. 同年日本 IBM 入社. 平成 10 年岩手県立大学助教授, 平成 13 年京都大学助教授, 平成 15 年同大学教授. 博士(工学). 情報可視化, 設計最適化の研究に従事. IEEE CS 日本シミュレーション学会可視化情報学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員.