

立体画像を用いた協調作業に関する一検討

藤原 正貴[†] 山口 徳郎[†] 櫻井 智史[†]
北村 喜文[†] アナトール レクイエール[‡] 岸野 文郎[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

[‡] INRIA - Projet BUNRAKU Campus Universitaire de Beaulieu F-35042 Rennes Cedex

E-mail: [†] {fujihara.masaki, yamaguchi.tokuo, sakurai.satoshi, kitamura, kishino}@ist.osaka-u.ac.jp,

[‡] anatole.lecuyer@irisa.fr

あらまし 我々が開発を進めている IllusionHole では、複数の利用者で直接指示可能な立体像を共有することができる。対面型の環境であるため、利用者はお互いの顔やジェスチャなどを見て話し合いながら作業をすることが可能である。そのため、同一の物理的空間で協調作業を効率的に行うことができるという特徴を有している。本稿では、IllusionHole を用いた対面型の協調作業環境と、2 台の IllusionHole をネットワークで結合した分散型の協調作業環境の 2 種類の環境を用意し、2 人で協調しながら仮想物体を操作する比較実験を行った結果について報告する。その結果から、相手の視覚的な情報の有無はタスクパフォーマンスには影響を与えないが、意図を伝える振る舞いに影響を与えることが分かった。

キーワード CSCW, 協調作業, 立体画像表示装置, テーブル型ディスプレイ, ネットワーク, 対面型, 分散型

A Study of Collaborative Work Using Stereoscopic Images

Masaki FUJIHARA[†] Tokuo YAMAGUCHI[†] Satoshi SAKURAI[†]
Anatole LECUYER[‡] Yoshifumi KITAMURA[†] and Fumio KISHINO[†]

[†] Human Interface Engineering Laboratory, Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

[‡] INRIA - Projet BUNRAKU Campus Universitaire de Beaulieu F-35042 Rennes Cedex

E-mail: [†] {fujihara.masaki, yamaguchi.tokuo, sakurai.satoshi, kitamura, kishino}@ist.osaka-u.ac.jp,

[‡] anatole.lecuyer@irisa.fr

Abstract We are developing a display system named IllusionHole which provide stereoscopic images for multiple users. It allows three or more collocated users to share a stereoscopic image. Users can work cooperatively in face to face situation around this system. We carried out an experiment to examine how users' collocation and conversation affect task performance and user's behavior in the collaborative work. Results show that the collocation and conversation do not affect task performance but affect behaviors of cooperative work.

Keyword CSCW, Collocated Collaboration, Distant Collaboration, Stereoscopic Displays, Tabletop Displays, Network

1. まえがき

複数人が一所に集まって会議やディスカッションを行う際には、テーブルを囲み、その上に情報を置いて利用することが多い。このような協調作業では、利用者はテーブル上の情報に加え、相手との会話やジェスチャなどのコミュニケーションにより、作業を円滑に行うことができる。そのため、電子ディスプレイを用いた会議の際にも、テーブル型のディスプレイが注目を集めており、多くのディスプレイが提案され、開発されている[14,18]。

一方、医療分野や工業デザインなどのさまざまな分野では、3次元立体画像を提示できるディスプレイを利用することも多くなってきており、利用者は対象の3次元形状を容易に把握し、操作することができる。加えて、複数人で同時に3次元画像を観察、操作することで、手術シミュレーションなどの協調作業を円滑に行うことができると考えられている。

同一場所にいる複数人で立体像を観察することができるディスプレイはいくつか提案されている。我々も、多人数共有型立体表示装置 IllusionHole を提案し

ている[8]。これは、テーブル型のディスプレイ上で複数の利用者が運動視差を持ちつつもゆがみの無い3次元立体画像を同時に共有でき、かつ、対象を直接指示して操作を行うことができる。しかしながら、このような3次元立体画像を用いた対面型の協調作業について、被験者実験を通じてその特徴を調査した事例はなく、また相手の表情やジェスチャなどのアウェアネス情報や会話の有無がこのような協調作業においてどの程度重要なのかを調査したものはなかった。

そこで本稿では、IllusionHoleを用いた対面型の協調作業環境と、2台のIllusionHoleをネットワークで結合した分散型の協調作業環境の2種類の環境を用意し、2人で協調しながら仮想物体を操作する比較実験を行い、対面型の環境における立体画像を用いた協調作業の特徴について調査した結果を報告する。また、相手の表情やジェスチャなどのアウェアネス情報や会話の有無の影響を調査することで、3次元立体画像を用いた協調作業を円滑にするための要素を検証し、利用者同士が遠隔地にいる場合でも、円滑に作業支援できるインタフェースの実現可能性を考察する。

2. 関連研究

本章では、まず複数の利用者に立体像を提示する立体画像表示装置、協調作業を支援するシステム、そして3次元仮想空間における協調作業に関する先行研究について述べる。

2.1. 複数人用立体画像表示装置

複数の利用者に立体像を提示する表示装置としては、Bimberらが提案したVirtualShowcase[3]がある。これはスクリーン上に錐体状のミラーを置き、立体像が錐体内に見えるようにしたものである。また、Favaloraらが考案したPerspectra[5]のように、高速回転するスクリーン面に連続的に物体の断面を表示することによって立体像を表示するものがある。これらの表示装置は、利用者が360度どの方向からでも立体像を見ることができるとい特徴があるが、立体像の結像位置が鏡やガラスによって覆われているため、立体像を直接指示できないという欠点がある。また、テーブル上に利用者数分の左眼用画像と右眼用画像を時分割で表示することによって、複数の利用者に同時に立体像を提示する表示装置responsive workbenchがAgrawalaらによって提案されている[1]。しかし、利用者の数が増えると一人当たりの表示周波数が減少し、フリッカが生じる欠点がある。

これらの欠点を克服した立体画像表示装置として、IllusionHoleがある[8]。これはテーブル型のディスプレイ上に穴(マスクホール)の空いたマスクを重ねて設置する。各利用者は、マスクホールを通してディス

プレイを観察するため、自分の領域は見えても、他人の領域は見えない。そして、各利用者から見える領域に左眼用画像と右眼用画像を時分割表示し、立体像がマスクホール内に結像するようにする。利用者は360度どの方向からでも運動視差を持った立体像を観察することができる。また利用者毎に表示領域を分割しているため、利用者が増えても一人当たりの表示周波数を下げる必要がなく、フリッカが生じないという特徴がある。さらに、立体像を覆う遮蔽物がないので、立体像の結像位置を直接指などで指示することができ、同時に別の視点位置にいる人から見てもその点を同一の点と認識することができるという特徴がある。このように、複数の利用者として立体画像を共有しながら、同時に立体画像への直接指示を可能とするような表示装置はIllusionHoleだけである。

2.2. 協調作業支援システム

利用者の対面した状況における効率的な協調作業のためには、ディスプレイに表示された情報だけでなく、相手の表情やジェスチャなどのアウェアネス情報や、会話などのコミュニケーションなどが重要である。利用者間でこのようなコミュニケーションを自然に共有できる協調作業支援システムとして、テーブル型ディスプレイの開発が盛んである。DiamondTouch[4]は複数人で同時に操作できるタッチセンサ付きのディスプレイであり、情報オブジェクトを指による直接指示によって操作できるため、利用者のジェスチャを他の利用者が容易に得ることができるという特徴がある。また、テーブル上での協調作業における被験者の行動分析や評価が行われている。Krugerらは紙ベースでの協調作業を観察することによって、テキストや画像といった情報オブジェクトの方向が、内容の理解を容易にするだけでなく、協調作業を仲介し、コミュニケーションチャンネルを確立する際の手掛かりとなるという知見を得ている[11]。その他にも、表示情報の方向に着目して開発されたテーブル型ディスプレイとして、松下らのLumisight Table[13]が挙げられる。これは、テーブル周辺の複数の利用者それぞれに正対する情報を提示する表示システムである。松田らは、複数の参加者が迷路の中で目標を捕まえるタスクを実施し、個人使用の液晶ディスプレイを用いる場合とLumisight Tableを用いる場合を比較した[12]。その結果、Lumisight Tableを用いる場合にタスクの成績が良くなることを確かめた。その他のテーブル型の協調作業支援システムについては文献[14,18]が詳しい。

一方、ネットワークで接続された複数のコンピュータをそれぞれ端末として用いる分散型の環境においては、相手の表情、ジェスチャなどのアウェアネス情報や会話音声などを補うことにより、対面型と同様の作

業環境を提供することで協調作業を支援するシステムが提案されている。Ishii らが提案している Clearboard[7]はカメラで撮影した利用者の姿を他方の作業領域に映すシステムであり、対面して作業をしているかのように相手のアウェアネス情報を得る事ができる。また、Pauchet らは DiamondTouch を基に DIGITABLE を提案し、それを用いた協調作業を評価している[16,17]。これは、利用者正面のスクリーンに遠隔地にいる相手の姿を投影することに加え、相手の腕によるジェスチャをテーブル上に重畳表示するものである。彼らは、対面型と分散型環境の比較実験によって、DIGITABLE が提供する分散環境で対面環境と同等のタスクパフォーマンスが得られることを確認した。

2.3. 3次元仮想空間における協調作業

2次元的な情報を用いた協調作業の支援だけでなく、3次元仮想空間での協調作業を支援するシステムも提案されており、その環境での利用者の行動の分析・評価も行われている。拡張現実感（AR）の分野では、現実空間に仮想物体を重畳表示させることによって、対面型の協調作業空間を生成する研究が行われている。清川らは3種類の異なるARディスプレイを用いた2人1組の都市デザインタスクにおいて、タスクパフォーマンスと発話過程、主観評価を比較し、ARディスプレイの視野角の違いがノンバーバルな対話の知覚に影響を与えることを示した[10]。

また、分散型の環境においても3次元仮想空間を用いた協調作業支援が行われている。Basdoganらは力覚提示装置が付属したスタイラスを用いたタスクにおいて、力覚フィードバックの有無がタスクパフォーマンスに与える影響を比較した。その結果、力覚フィードバックを与えることにより分散型環境のタスクパフォーマンスが向上するという知見を得た[2]。また、Takemuraらは、直接指示可能な3次元作業空間を2人で共有する分散環境を提案している[19]。しかしながら、直接指示可能な立体像を対面環境で共有する協調作業の分析・評価はこれまで行われてこなかった。

3. 実験

本研究では、複数の利用者が3次元立体画像を共有して行う協調作業において、相手の表情やジェスチャなどのアウェアネス情報や会話の有無などが与える影響を調査する。そのため、IllusionHoleを用いた対面型の協調作業環境と、2台のIllusionHoleをネットワークで結合した分散型の協調作業環境の2種類の環境を用意し、2人で協力して仮想物体を操作するタスクによる比較実験を行う。

3.1. 実験環境

図1に2つの実験環境のイメージ図を示す。1台の

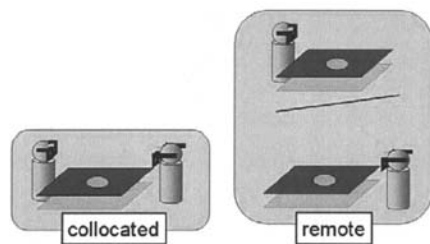


図1 実験環境のイメージ図

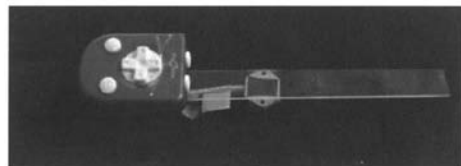


図2 StickDeviceの構成

IllusionHoleを用いた対面型の環境(collocated)と、2台のIllusionHoleをネットワークで結合し、サーバクライアント方式で管理する分散型の環境(remote)である。ネットワークの遅延は無視できる程度である。被験者の立ち位置についてはさまざまな位置関係が考えられるが、本実験では被験者同士が最も容易に相手の表情やジェスチャなどの情報を得ることができるように、IllusionHoleを挟んで向かい合った立ち位置とする。分散型の環境においても、仮想的に2人が向かい合う立ち位置とする。ただし、利用者の身体的負担が大きくなるように、上半身は自由に動かせるものとする。

本実験における分散型の環境では、システム構成の都合上、異なる方式のIllusionHoleを2台用いる。一方はDLPプロジェクトを用いたIllusionHole(IH-Aと呼ぶことにする)[15]であり、他方は偏光フィルタを用いたIllusionHole(IH-Pと呼ぶことにする)[9]である。IH-Aは時分割式の立体視によって立体像を提示し、画面のリフレッシュレートは85Hzである。IH-Pは円偏光フィルタによって右眼と左眼に画像を提示して立体視を実現しており、表示部分のリフレッシュレートは60Hzである。IH-PとIH-Aのマスクホールの半径は異なるものの、表示される仮想物体の大きさは等しい。対面型の環境では常にIH-Aのみを使用する。

被験者がIllusionHole上に表示された立体映像を直接指示する入力デバイスとして、StickDevice(図2)を使用する。これは30cm×2cmの透明なアクリル板にスポンジの取手とボタン入力可能なコントローラ、および6自由度位置姿勢測定装置であるPolhemus社のFastrakのレシーバを取り付けたものである。透明なアクリル板を用いることで、IllusionHole上に表示される

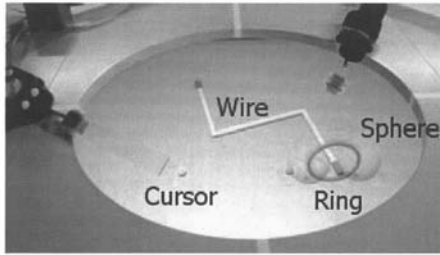


図3 入力デバイスと3次元仮想空間

立体映像を遮断することなく直接操作を行うことができる。本実験では、Fastrak のレシーバによって StickDevice の位置と姿勢を取得し、取得した位置と姿勢を基にアクリル板の先端部の位置を算出する。そして、算出したアクリル板の先端位置に一致するように IllusionHole 上にカーソルを表示する(図3)。対面型の環境では1台の Fastrak に2つのレシーバを接続して使用するため、データ取得頻度は60Hz、分散型の環境では2台の Fastrak を使用し、各 Fastrak に1つのレシーバを接続して使用するため、データ取得頻度は120Hzとなる。コントローラは十字キーと4つのボタンがあるが、本実験においては4つのボタンを等価に使用し、十字キーは使用しないものとする。対面型の環境で StickDevice が使用されている様子を図4に示す。

また、被験者の視点位置取得のために、2種類の超音波式3次元位置センサ(古河機械金属株式会社製 ZPS-VK と Intersense 社製 IS-600 Mark2 SoniDisc)を使用する。これらの実用上の位置計測精度はほぼ等しい。実験中、被験者は視点に応じた立体映像を見るため、これらセンサを取り付けた眼鏡を身につける。対面型の環境では、ZPS-VK のタグを2つ使用して2人の被験者の視点位置を計測する。この際のサンプリング周波数は10Hzとなる。分散型の環境では、ZPS-VK のタグを1つ使用して、一方の被験者の視点位置を計測する。この際のタグあたりのサンプリング周波数は20Hzとなる。他方の被験者の視点位置の計測には、IS-600 Mark2 SoniDisc を使用する。計測時のサンプリング周波数は150Hzとなる。

視点位置と StickDevice の位置と姿勢の計測を考慮した表示部分のリフレッシュレートは、対面型の環境では約10Hz、分散型の環境では、IH-A が約20Hz、IH-P が約60Hzとなる。被験者は自らの頭を動かすことによって異なった角度から対象を観察することができるが、次節に示すように本実験で設定したタスクではそれほど高周波数の頭部運動をする必要がない。また、操作部である StickDevice の計測には分散型の環境でも同一の装置を用いており、操作感に違いはない。ネ

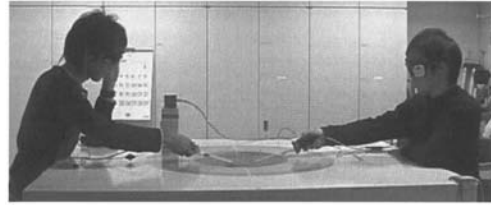


図4 対面型の実験風景

ットワークによる遅延もほぼ一定で約11msと全体としては無視できる量である。これらのことから対面型と分散型の2つの環境は、実用上ほぼ等価であると考えられる。

3.2. タスク

3次元仮想空間上に配置された仮想物体のリングを、2人で同時に把持し、軌道(Wire)に沿って移動させるというタスクを設定する(図3)。これは Basdogan らの実験[2]を参考にしたものである。

被験者は、まずお互い向き合って立っている状態で、タスク開始音が鳴ると自分の正面に置かれた StickDevice を手に取る。被験者は StickDevice によって、リングの両端に表示された球形の把持領域(Sphere)を直接指示することでリングを操作する。把持領域は2色で区別されており、被験者はそれぞれに割り当てられた色の把持領域を把持するものとする。StickDevice の先端部が把持領域の内部に入った状態で、コントローラのボタンを押すことでリングは把持された状態となる。それぞれの被験者がリングを把持すると、リングが移動可能な状態とすることができ、被験者はワイヤ状の軌道に沿って、リングがワイヤに衝突しないように注意しながら、できるだけ早く正確にワイヤの一端から他端まで移動させる。その際、リングはその中心点を2つの StickDevice の先端点の中心に保つように移動する。また、2つの StickDevice の先端をリングの中心に対して対称に移動させることで、リングを鉛直軸に対して回転させることができる。なお、リングは常に水平面に対して直立しているものとする。また、被験者がリングを軌道から逸脱する方向に移動させる場合、リングとワイヤが触れた時点でリングが停止し、それ以上同じ方向には移動できない。

視覚フィードバックとしては、StickDevice の先端部が把持領域の内部に入った際には、把持領域の色が濃くなり、把持した際に青く変わる。また、リングが操作可能となった際には、リングの色が緑から青へ変わる。リングが軌道と衝突した場合はリングの色が赤く変わる。

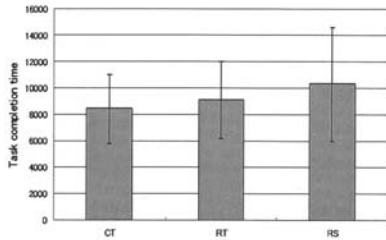


図 5. 実験条件に対するタスク完了時間

3.3. 実験計画

本実験では、相手の表情やジェスチャなどのアウェアネス情報と会話の有無が3次元立体画像を用いた協調作業に与える影響を調査するため、次の3つの環境条件を用いる。まず、対面型の環境である条件 CT と分散型の環境である条件 RS,そして分散型の環境ではあるがお互いに会話することができる条件 RT である。21歳から25歳までの男女を含めた大学院生12人を被験者とし、6つの組に分ける。各環境条件に対して、それぞれ2組4人で実験を行ってもらう。会話やジェスチャが自然に行われるよう、それぞれの被験者の組はお互いに顔見知りとした。

タスクの難易度は、リングの半径と把持領域の半径を変化させることで設定する。リングの半径が小さいほどワイヤと衝突しやすくなり、難易度が上がる。また、把持領域が小さければリングが把持状態から外れやすくなるため、難易度が上がる。リングの半径を24 mm, 32 mm, 40 mm の3段階に変化させ、把持領域の半径は12 mm, 16 mm, 20 mm の3段階に変化させる。また、1つの条件での反復回数は3回とする。順序による学習効果を相殺するため、条件を提示する順番はランダムとし、タスク開始音が鳴ってからリングがワイヤ軌道の他端に達するまでの時間をタスク完了時間として測定し、リングがワイヤ軌道に衝突した回数および被験者がリングを把持し直した回数をエラー回数として測定する。リングを把持している状態では、リングはその中心を2人の被験者のカーソルの3次元座標値の平均位置に移動する。2人の被験者のいずれかのカーソル位置が把持領域から外れた場合は、把持状態が解除され、リングが動かせなくなる。再びリングを操作するためには、被験者はカーソルを把持領域の内部に戻してコントローラのボタンを再度押さなければならぬ。そこで、カーソルを把持し直した回数をエラー回数として用いる。被験者はエラーが起こった際にもタスクを中断せず、完了するまで続行する。実験中は、被験者の様子をビデオで撮影し、実験終了後には被験者に簡単なアンケートを実施する。

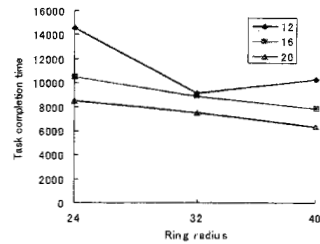


図 6. リング半径および把持領域半径に対するタスク完了時間

4. 結果

タスク完了時間とエラー回数の計測、およびビデオの解析により、3つの実験環境における被験者の行動を比較する。

4.1. タスク完了時間

実験条件とリング半径、および把持領域半径を要因とした3要因分散分析を行った。

図5は実験条件とタスク完了時間の関係を表すグラフであり、実験条件に主効果が見られた($F(2,135)=7.17$, $p<0.01$)。また、多重比較の結果、条件 CT と条件 RS、条件 RT と条件 RS の間には有意差が見られたが、条件 CT と条件 RT の間には有意差は見られなかった。平均のタスク完了時間は、条件 CT では 8422 ms、条件 RT と条件 RS では 9092 ms と 10321 ms であった。

リング半径 ($F(2,135)=21.31$, $p<0.01$) と把持領域半径 ($F(2,135)=21.31$, $p<0.01$)、そしてリング半径と把持領域半径の交互作用 ($F(4,135)=3.64$, $p<0.01$) に主効果が見られた。図6にリング半径と把持領域半径に対するタスク完了時間を表すグラフを示す。平均タスク完了時間はリング半径が24 mm のときに 11183 ms、32 mm のときに 8515 ms、40 mm のときに 8136 ms であり、把持領域半径に対する平均タスク完了時間は、把持領域半径が12 mm のときに 11330 ms、16 mm のときに 9059 ms、20 mm のときに 7446 ms であった。リング半径と把持領域半径に交互作用が見られたのは、リング半径と把持領域半径の双方が最小の場合に多く見られた異常値が影響していると考えられる。本実験では、環境条件を比較するのが主要な目的であり、リング半径と把持領域半径は補助的な要因であるため、本実験ではリング半径と把持領域半径の双方が最小である場合の測定値を解析の対象とした。

4.2. エラー回数

リングとワイヤの衝突回数：実験条件とリング半径と把持領域半径を要因とした3要因分散分析を行った結果、リング半径に主効果が見られた($F(2,135)=7.04$,

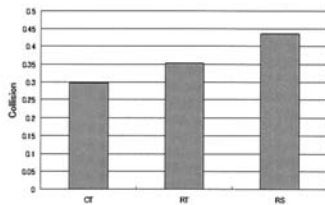


図 7. 実験条件に対する衝突回数

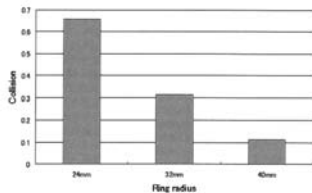


図 8. リング半径に対する衝突回数

$p < 0.01$). 実験条件に主効果は見られなかった. 実験条件と衝突回数の関係を図 7 に示す. 1 試行あたりの平均衝突回数は, 条件 CT では 0.30, 条件 RT では 0.35, 条件 RS では 0.44 となった.

リング半径に対するエラー回数を図 8 に示す. 多重比較の結果, リング半径が 24 mm のときと 32 mm のときの間には有意差が見られたが, リング半径が 32 mm のときと 40 mm のときの間には有意差はみられなかった. リング半径が大きくなるにつれて衝突回数が増加する傾向があるが, リング半径を 32 mm 以上にしても, 衝突回数には影響がないことが分かった. リング半径ごとの 1 タスクあたりの平均エラー回数は, リング半径が 24 mm では 0.66, 32 mm では 0.31, 40 mm では 0.11 であった.

リングを把持し直した回数: 把持領域とエラー回数の関係を要因とした 3 要因分散分析を行ったところ, 把持領域の半径に主効果が見られた ($F(2,135) = 26.86$, $p < 0.01$). 実験条件に主効果はみられなかった. 実験条件と把持回数の関係を図 9 に示す. 1 試行あたりの平均把持回数は, 条件 CT では 1.48, 条件 RT では 2.00, 条件 RS では 2.69 となった.

把持領域半径と把持回数の関係を図 10 に示す. 多重比較の結果, 把持領域半径が 12 mm と 16 mm の間と 16 mm と 20 mm の間に有意差が見られた. 把持領域が大きくなると把持回数が増加する傾向が見られた. 把持領域半径ごとの 1 タスクあたりの平均エラー回数は, 把持領域半径が 12 mm のときは 4.91, 16 mm のときは 3.26, 20 mm のときは 1.60 であった.

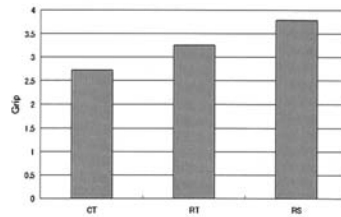


図 9. 実験条件に対する把持回数

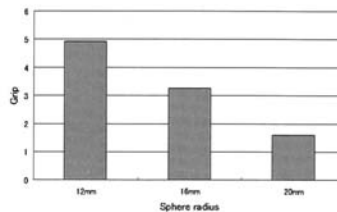


図 10. 把持領域半径に対する把持回数

4.3. 行動分析

ビデオ映像を用いて会話と行動を分析した結果, 条件 CT と条件 RT の間で発話内容に差は見られなかった. また, 会話が可能な状況では, いずれの実験条件においても指示語を用いてリングの動きを指示していたが, その際の行動に違いが見られた. 例えば, 条件 CT では, 被験者の 1 人が「もうちょっとこっちへ来て」と発話した際, 2 人の被験者はリングを把持したまま, リングの動きを修正した. 一方, 条件 RT では, リングが軌道に衝突したときに, 被験者の 1 人が「もうちょっとこっちへ」と発話した際には, 発話した被験者がカーソルを把持領域から出し, リングを移動させようとする方向をカーソルの位置で相手に指示した.

また, 条件 CT と条件 RT の双方で, 実験の後半になるにつれて, 発話をしなくなる傾向が見られた. 被験者がタスクに慣れ, 会話をしなくても, リングを適切に操作できるようになったためとみられる.

被験者が実験中に頭部位置を動かすことは少なかった. そのため, 視点位置計測を考慮した表示部分のリフレッシュレートが環境条件によって異なることが実験結果に与えた影響は, 無視できる程度であると考えられる.

4.4. アンケート

タスク終了後に, 被験者が感じた負荷に関する質問と実験中の会話に関する質問, そして自由記述欄を設けたアンケートを実施した.

被験者が感じた負荷に関する質問は, Hart らが開発した NASA-TLX[6]に基づき, 精神的な要求, 身体的な要求,

忙しさ、努力、達成度および不満度の6項目に関して尋ねるもので、被験者に7段階で回答させた。実験条件ごとの6項目の平均値を図11に示す。各項目と6項目の平均値について、実験条件を要因とした分散分析を行ったところ、実験条件間の有意差は見られなかった。

また、条件CTと条件RTで、どのような状況で協調作業の相手と会話を行ったかを尋ねたところ、8名中6名が、リングの位置を調節する際に会話を行ったと答え、2名が会話を行わなかったと答えた。

アンケートの自由記述欄では、以下のような意見を得た。

[タスクに関する意見]

- リング半径が最大のときは、まっすぐ移動させるだけでリングをゴールまで運ぶことができた。
- 慣れが大きく影響する(2名)
- カーソルが把持領域から外れるときの条件が分かりにくかった(2名)
- タスクが簡単だった

[実験環境全体に関する意見]

- カーソルを把持領域に入れる際、奥行き感覚が掴みにくかった。
- ちらつきが生じることがあった
- StickDevice が使いやすかった

[remote 環境に関する意見]

- 擬似的に相手が眼前にいるかのような感覚を味わった
- タイムラグを感じた

5. 考察

5.1. タスクパフォーマンス

図5の結果から、本実験において、会話による意思疎通がタスクパフォーマンスに影響を与えていることが分かる。一方、条件CTと条件RTの間に有意差が見られないため、遠隔地にいる相手と本実験のような協調作業をする際には、会話による通信チャネルを確立することが最も重要であると言える。ただし、本実験では、相手の行動をカーソルから知ることができるため、相手の視覚的な情報よりも、会話による音声情報が大きく影響していると考えられる。そのため、タスク内容に対して、視覚的情報と会話情報が寄与する割合を考慮したタスク設計が今後必要と考えられる。

5.2. 行動分析

ビデオ映像による行動分析から、視線やジェスチャ情報などの視覚情報はタスクパフォーマンスには影響を与えないものの、同じ内容の発話をした状況でも、行動に違いがあることが分かる。被験者が相手の視覚

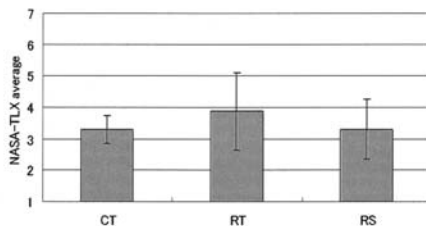


図11. NASA-TLX 平均値
(1=負荷が低い, 7=負荷が高い)

情報を得られない状況においては、相手に位置や方向を伝える際に、「こっち」などの指示語とカーソルの動きを組み合わせる必要があったと言える。また、条件RTでは条件CTと比較して、リングの把持を中断する行動が見られており、直接指示情報のみではより複雑な操作を行う際に、意図する位置を伝えることが困難となる可能性が考えられる。さらに、本実験では、遠隔環境においても、相手が対面する位置にいることを利用者が知っているため、「こっち」などの会話情報が表す方向を容易に理解できる。そのため、視覚情報の重要度が低くなった可能性もある。これらのことから、タスクの難易度や立ち位置なども考慮に入れた詳細な実験が必要であると考えられる。

5.3. アンケート

NASA-TLX の平均値に有意差がみられなかったことから、実験条件間にはタスクパフォーマンスや行動に違いが見られたものの、被験者が感じた負荷には差がなかったと考えられる。

自由記述欄の記述から、本実験で使用したStickDevice は好評であり、立体画像を直接指示によってインタラクティブに操作するツールとして有効であったと言える。

分散型の環境においても、カーソルによる直接指示情報を共有していることから、相手が目の前にいるかのような感覚を抱いた被験者がおり、対面型の環境に類似した状況が生じていたことが分かる。

タイムラグが気になったと回答した被験者がいたが、これはごくまれにネットワーク遅延が生じたことがあったからだと考えられる。

5.4. 分散環境における協調作業の支援

タスクパフォーマンスと行動の3条件間の違いから、直接指示可能な3次元環境を2人の利用者が共有する分散型の協調作業を効果的に支援するためのジェスチャ情報の伝達についての指針を述べる。

Pauchetらは、2次元の情報オブジェクトを2人の被験者が共有する分散型の環境において、腕の形状をテ

ーブルトップに重畳表示することによってジェスチャ情報の伝達を支援している[16,17]。一方、本研究では、3次元空間内で、直接指示している場所をカーソルで表示することによって、ジェスチャによる意図の伝達が行われている。本実験のタスクでは、リングを移動させたい位置をカーソルのジェスチャで伝達している。3次元環境を2人の利用者が共有する分散型の協調作業を支援するには、直接指示情報をスムーズに共有できることが重要である。

6. おわりに

本稿では、視覚情報と会話の有無が3次元立体画像を用いた対面型の協調作業に与える影響について調査した。そのため、2種類の環境において比較実験を行い、結果を分析することで、視覚情報の有無はタスクパフォーマンスには影響を与えないが、発話とともに意図を伝える振る舞いに影響を与えることが分かった。また、会話がタスクパフォーマンスに影響を与えることも分かった。さらに、直接指示可能な3次元環境を2人の利用者が共有する分散環境での協調作業を支援するための指針について述べた。

今後は、異なる形態のタスクや分散型の環境において、直接指示情報の表示の有無による比較実験を行うことを検討している。

謝辞： 本研究室の高嶋和毅氏には実験データの解析について有益な助言をいただいた。本研究の一部は、文部科学省グローバルCOEプログラム(研究拠点形成費)の補助によるものである。

参考文献

- [1] Agrawala, M., Beers, A. C., McDowall, I., Fröhlich, B., and Hanrahan, P. The two-user responsive workbench: Support for collaboration through individual views of a shared space. In *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 327-332 (1997).
- [2] Basdogan, C., Ho, C., and Srinivasan M A. An experimental study on the role of touch in shared virtual environment. *ACM, Transactions on Computer-Human Interaction*, 7, 4, pp. 443-460 (2000)
- [3] Bimber, O., Dieter, F., Schmalstieg, D., and Encarnacao, L. M. The VirtualShowcase. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21, 6, pp. 48-55 (2001)
- [4] Dietz, P. and Leigh, D. DiamondTouch: A multi-user touch technology. In *Proceedings of User Interface Software and Technology*. ACM Press, NY, pp. 219-226 (2001).
- [5] Favalora, G., Dorval, R. K., Hall, D., M., Giovinco, M., and Napoli, J. Volumetric three-dimensional display system with rasterization hardware. In *Proceedings of SPIE, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems*, 4297, pp. 227-235 (2001)
- [6] Hart, S.G. and Staveland L.E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results and theoretical research, *Human Mental Workload*, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland, Amsterdam), pp. 139-183 (1988)
- [7] Ishii, H. and Kobayashi, M. Clearboard: A seamless medium for shared drawing and conversation with eye contact, In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 525-532 (1992).
- [8] 北村喜文, 小西孝重, 山本澄彦, 岸野文郎, 「多人数共有型ディスプレイ IllusionHole」, *映像情報メディア学会誌*, 57, 10, pp. 1320-1327 (2003)
- [9] 北村喜文, 中山智量, 中島孝司, 山本澄彦, 「偏光フィルタを用いた多人数共有型立体表示装置」, *電子情報通信学会論文誌*, J90-D, 10, pp. 2893-2902 (2007)
- [10] 清川清, マーク・ビリングハースト, ダニエル・ベルチャ, アルナブ・グプタ, 「拡張現実感インタフェースを用いた対面協調作業のコミュニケーション支援」, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 7, 2 (2002)
- [11] Kruger, R., Carpendale, S., Scott, S. D., and Greenberg, S. Roles of orientation in tabletop collaboration: comprehension, coordination and communication. *Journal of Computer Supported Cooperative Work*, 13, 5-6, pp. 501-537 (2004).
- [12] 松田昌史, 松下光範, 苗村健, 「分散認知環境における集団課題達成 Lumisight Table を用いた迷路ゲーム実験」, *信学技報 HCS2005-34* (2005)
- [13] Matsushita, M., Iida, M., Ohguro, T., Shirai, Y., Kakei, Y., and Naemura, T. Lumisight table: A face-to-face collaboration support system that optimizes direction of projected information to each stakeholder. In *Proceedings of Computer Supported Cooperative Work*. ACM Press, NY, pp. 274-283 (2004)
- [14] 松下光範, 土方嘉徳, 杉原敏昭(編), 技術展望(小特集)「テーブル型システムの現状」, *ヒューマンインタフェース学会誌*, 9, 1, pp. 35-58 (2007)
- [15] 岡島弘, 北村喜文, 上甲剛, 岸野文郎, 「医療用を想定した多人数共有型立体表示装置の試作」, *信学技報 MVE2004-77* (2005)
- [16] Pauchet, A., Coldefy, F., Picard, S., Bouguet, A., Perron, L., Guerin, J., Corvaisier, D. and Collobert, M. Mutual awareness in collocated and distant collaborative tasks using shared interfaces. In *Proceedings of INTERACT*, 1, pp. 59-73 (2007)
- [17] Pauchet, A., Coldefy, F., Picard, S., Bouguet, A., Perron, L., Guerin, J., Corvaisier, D. and Collobert, M. Tabletops: Worthwhile experiences of collocated and remote collaboration, *IEEE Horizontal Interactive Human-Computer System*, pp. 27-34 (2007)
- [18] Scott, S. D., Grant, K., D., and Mandryk, R. L. System guidelines for co-located, collaborative work on a tabletop displays. In *Proceedings of ECSCW*, pp. 159-178 (2005)
- [19] Takemura, H. and Kishino, F. Cooperative work environment using virtual workspace. In *Proceedings of Computer Supported Cooperative Work*, pp. 226-232 (1992)