



視線とHMDを利用したウェアラブルデスクトップ遠隔コミュニケーションシステムの開発と評価

長松, 隆
海江田, 洋平
北川, 雄樹
嶋田, 博行
吉川, 榮一

(Citation)

人間工学, 43(2):53-63

(Issue Date)

2007-04-15

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001366>



視線とHMDを利用したウェアラブル-デスクトップ遠隔コミュニケーションシステムの開発と評価*

長松隆**, 海江田洋平**, 北川雄樹**, 大辻友雄**, 嶋田博行**, 吉川榮和***

A method that uses the eye gaze information and the AR (Augmented Reality) technology has been proposed to communicate more smoothly than a conventional method in the research area of a remote support system using a wearable computer. A prototype system based on the method was developed. The effectiveness of the two functions that allows a remote expert to see a worker's point of regard and to display a pointer on a worker's HMD (Head Mounted Display) was confirmed in the laboratory experiments. The result showed that these functions were effective in reducing the time to transmit information. Furthermore the information could be transmitted by using the pointers of two functions without speaking. The system can be useful for the communication under urgent and/or noisy situations.

ウェアラブルコンピュータを装着した作業員を遠隔地から熟練者が支援する研究分野において、従来の方法より円滑なコミュニケーションを行うために、視線情報とAR(Augmented Reality)技術を利用する手法を提案した。その手法に基づきプロトタイプシステムを開発した。作業員がどこを見ているかという情報を遠隔地の監督者が見ることができる機能(視線情報機能)、及び、監督者が作業員のHMD(Head Mounted Display)にポインタを表示することができる機能(HMD指示機能)の効果を実験により確認した。実験結果から、両機能を利用することによって情報伝達時間が短くなることが分かった。また、2つの機能によるポインタを用いることにより、言葉を用いずに情報を伝達することもできた。本システムは、緊急または騒音下でのコミュニケーションに役に立つと思われる。

(キーワード：視線、遠隔支援、協調作業、拡張現実感、HMD)

1. はじめに

保守、修理、点検、製造等の作業を支援するために、ウェアラブルコンピュータによる作業支援手法や、拡張現実感(AR: Augmented Reality)技術¹⁾を利用した作業支援手法が盛んに研究されている。ウェアラブルコンピュータを利用すれば、膨大な量のマニュアル等を携帯して現場に持って行くことが可能となる。また、AR技術を利用すれば、例えば、機器や装置を直接指し示したり、様々な情報を付加したりするなど、現実環境にコンピュータで生成された画像を重ね合わせることにより、直感的な理解が期待できる。

しかし、これらの支援技術を利用したとしても、プラン

トでの事故対応等のように非定常の作業が発生したときは、現場の作業員のみでの解決は困難であり、遠隔地にいる熟練者からの支援が必要となる場合がある。このような場合は、時間的に余裕がない場合や、複雑な作業を行わなければならない場合であり、その際の現場の作業員と遠隔地の熟練者とのコミュニケーションにおいては、迅速かつ明確に意図を伝えられることが重要である。遠隔地から現場の作業員に指示を出す研究はいくつか行われている²⁻⁴⁾が、それらの多くは、テキスト、ビデオ、音声、カーソル等を共有するのみであり、緊急時のコミュニケーションとしては不十分であると考えられる。

人間は、物の詳細を見る場合、眼球の解像度の高い部分で対象を捉えるために眼球を動かす。そして、多くの場合その場所に注意が払われる。それ故、視線を計測すれば、その人の注意がどこにあるかをおおよそ判断できると考えられる⁵⁾。

現場の作業員と熟練者では目の付けどころが異なり、作

*受付：2006年5月18日 受理：2006年12月21日

**神戸大学

Kobe University

***京都大学

Kyoto University

業員は本来注意を払わなければならない場所と関係ないところに注目することがある。作業員がどこに注目しているのかを、頭の方向だけから詳細に推測するのは難しい。そこで、作業員の視線を客観的に見えるようにするシステムが必要ではないかと考えた。遠隔地の熟練者が、現場の作業員の視線をリアルタイムに観察できるようになれば、タイムリーに質問・指摘ができるようになる。

本研究では、現場の作業員の作業を遠隔地の熟練者が支援するシステムに、現場の作業員の視線を利用したコミュニケーション手法を導入することを提案する。このようなシステムを開発すれば、現場の作業員の視線を遠隔地の熟練者が観察することにより、作業員が誤った場所に注目している場合などに熟練者がすぐに気づくことができ、的確な指示をすることが可能になる。また、作業員が両手を利用する作業を行っている時も視線によるポインティングによりコミュニケーションを円滑化することが可能である。

具体的に開発するシステムは、現場の作業員が視線計測機能の付いたウェアラブルコンピュータシステムを利用し、遠隔地の熟練者はデスクトップコンピュータによるユーザインタフェースを利用するものである。

本論文では、上記に述べた視線を活用した遠隔コミュニケーションの概念を実現するプロトタイプシステムの構築方法を示し、そのシステムを使用した被験者実験によりコミュニケーションシステムとしての機能を検証すること、特に視線活用効果を明らかにすることを目的とする。

2. 関連研究との比較

本研究は、ウェアラブルコンピュータを使うユーザとデスクトップコンピュータを使うユーザとの間のコミュニケーションに、視線を利用したシステムに関するものである。以下に関連研究と比較する。

Kortuem ら²⁾ は、現場を巡回するコンピュータ技術者と、オフィスにいる熟練技術者とが協調して作業することを支援するウェアラブルコンピュータシステムを開発している。また、Siegal, Kraut らも、ウェアラブルコンピュータによる協調作業システムを開発し、飛行機や自動車の修理作業を支援する研究を行っている^{3,4)}。しかし、これらの研究では、テキスト、ビデオ、音声、カーソル等を共有するのみであり、時間的に緊急を要する場面での利用を特に想定していない。本研究では、このような場面でのコミュニケーションに役立つものとして、視線の利用を提案している。

視線の計測技術の利用は、人間の視覚や注意の分析及び、インタラクティブなシステムのインタフェースの大きく2つのカテゴリーに分類される⁵⁾。前者については、視覚探索、絵画・映画の鑑賞、web ページの評価、航空機・自動車運転などに関して様々な研究が行われている。後者については、障害者のための視線によるタイピング・ポインティングデバイスを除けば、実際に利用されている物は少ないが、近年様々な研究が行われている⁶⁻¹¹⁾。視線を利用したポインティングは、指差しなどのジェスチャを利用してポインティングする手法¹²⁾と違い、両手を使って作業している時にでもポインティングができるため、現場での作業に向いていると考えている。

視線を、前者のように分析に利用する場合は、精度良く計測する必要があり、そのための市販品も多く発売されている。本研究においては、視線をユーザインタフェースとして利用するものであり、試行錯誤しながら容易にインタフェースが変更ができるように、市販品を利用するのではなく新たに視線計測装置も含めて開発することとした。その際にシステムが満たす要件は、現場で動き回る作業員の視線を計測するため、頭部に装着する形態であること、動きやすく小型軽量であることである。また、視線の計測精度については、コミュニケーションに役に立つことが示せば良いものとした。

作業支援情報を作業員に提示する方法としては、頭部搭載型ディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) を利用した AR 技術による方法¹⁾、レーザーポインタの形状・動きにより指示をする方法¹³⁾などが考えられる。レーザー光による指示は、複数作業員への指示が容易に可能である長所があるが、AR 技術と比較すると表現力に乏しい。一方、AR 技術は、直感的な理解が可能で、様々な画像を表示することが可能である。本研究においては、作業員への情報提示内容を豊富にできる AR 技術を利用することとした。

本論文の扱う範囲では、開発したシステムに導入された AR 技術は、かなり限定されたものとなっている。遠隔地にいる熟練者が、現場の作業員の視界に重ねて「○」の形状のポインタを表示し直接的な指示ができる機能だけを実装している。そのため、一度指示した内容が、その物体に貼り付いて見えるのではなく、作業員の動きに応じて熟練者も指し示す場所を手動で調節しなければならない。しかし、緊急時などの速さが要求される場面でのコミュニケーションに利用する場合には、リアルタイムで手動で調節できる機能が重要であると考えている。

3. 遠隔コミュニケーションシステムの開発

3-1. システムの概要

遠隔コミュニケーションシステムは、遠隔地にいる熟練した監督者が現場の作業員の作業を遠隔から支援する際のコミュニケーションに利用されることを想定した。ここで、現場の作業員のようにウェアラブルコンピュータを装着したユーザのことを「ウェアラブルユーザ」、遠隔地の熟練者のようにデスクトップコンピュータを利用するユーザのことを「デスクトップユーザ」と呼ぶこととする。

コミュニケーションのための基本的な機能として、マイクとヘッドフォンを用いた音声による対話機能を作成した。これには、フリーの音声通信用ソフトウェアを利用した。それに加えて、(1) ウェアラブルユーザがどこを見ているかという情報をデスクトップユーザが見ることができる機能(視線情報機能)、及び、(2) デスクトップユーザが、ウェアラブルユーザの視界に、HMDを利用してポインタを重ね合わせることができる機能(HMD指示機能)を開発した。

(1) は、ウェアラブルユーザの視線を計測し、デスクトップユーザが利用しているコンピュータのディスプレイ上に、ウェアラブルユーザの前方の映像(視野映像)を表示し、視線の指し示す場所に「+」の形状のポインタを重ね表示するものである。(2) は、デスクトップユーザの利用しているコンピュータ上にウェアラブルユーザの視野映像が表示され、その視野映像上でマウスの左ボタンを押すと、押している間ウェアラブルユーザが身につけている光学シースルー型のHMD上の対応する場所に「○」の形状のポインタが表示されるものである。

図1に、システム概要を示す。ウェアラブルユーザはHMD等の装備を身につけ、デスクトップユーザはデスクトップコンピュータを利用する。このHMDには、後述するように視線を計測するためのカメラ等が付いている。

図2は、デスクトップユーザ用インタフェースの画面を示している。ウィンドウ中にはウェアラブルユーザが装着している視野カメラの映像が表示されている。この映像の解像度は、 320×240 ドットである。四角い枠はウェアラブルユーザの視界のうちHMDを利用して画像の提示が可能な範囲を示している。これはHMDの視野角と同じで、ウェアラブルユーザの水平視野角約 24° 、垂直視野角約 18° に相当する。「+」の形状のポインタはウェアラブルユーザが見ている場所(視線)を示している。大

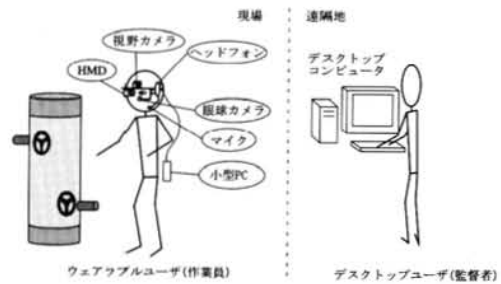


図1 システム概要

Fig.1 System Overview.

きさは、縦線、横線共に9ドットである。

デスクトップユーザは、ウェアラブルユーザのHMD上に「○」の形状のポインタを表示させることができ、これを用いて現実環境を直接指し示すことができる。ウェアラブルユーザのHMDの解像度は、 800×600 ドットであり、「○」は、半径40ドットである。それ故、「○」一つが、視野角で 2.4° に相当する。

開発したシステムによって、可能になったことを以下にまとめる。デスクトップユーザはウェアラブルユーザの視野の映像、視線(何を見ているか)をリアルタイムで見ることができる。この際、頭と一緒に視野カメラが動くので、ウェアラブルユーザが動き回っても視線の計測は可能である。デスクトップユーザは、ウェアラブルユーザに対して、現実環境に重ねて「○」の形状のポインタを表示することができるが、ウェアラブルユーザの動きに伴う視野カメラの動きにあわせて、ポインタの位置を調節する必要がある。誤った位置に固定されて表示されないように、ポインタは、マウスをクリックしている間だけ表示されるようになっている。また、図2は、「+」のところにあるウェアラブルユーザの視線を見て、デスクトップユーザが「○」で操作すべき弁を示しているところである。

3-2. システム構成の詳細

開発したプロトタイプシステムでは、前に述べた「動きやすく小型軽量」という条件を満たすように、ウェアラブルユーザ用装備とデスクトップユーザ用端末間の無線化と、ウェアラブルユーザ用装備を小型PCにより動作させることを目標とした。

図3に、システム構成を示す。ウェアラブルユーザ用装備は、視野カメラ、眼球カメラ、ヘッドフォン、HMD、マイク、ビデオトランスミッタ、瞳孔中心計算用及びHMD表示画像生成用の2台の小型PCである。デスクトップユーザ端末は、ビデオ受信機、ヘッドフォン、マイクを接続したデスクトップPCである。これらのPCを無線LAN

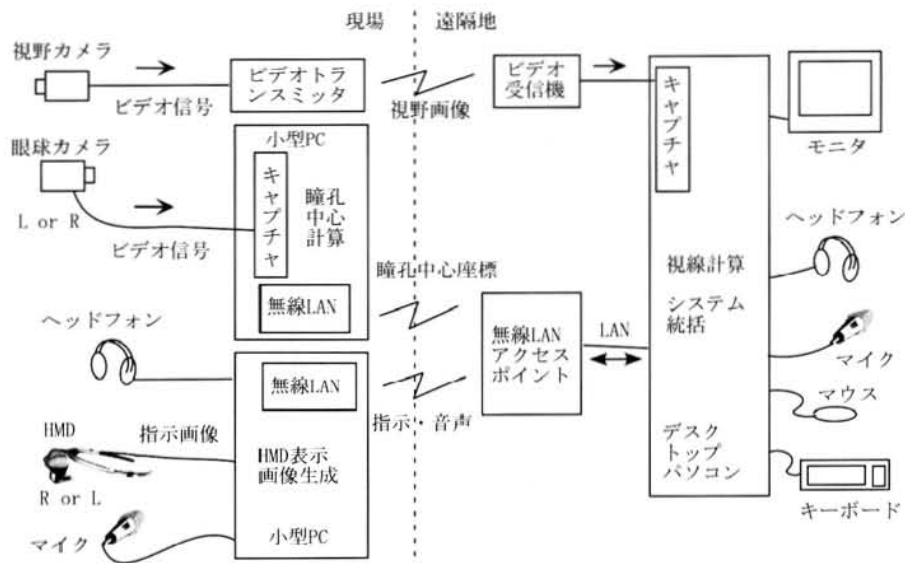


図 3 システム構成
Fig. 3 System Configuration.



図 2 デスクトップユーザ用インターフェース
Fig. 2 Interface for Desktop User.

で接続した。

ウェアラブルユーザの視野映像は、速度を考慮してLANで送らずにビデオトランスミッタを利用することとした。このようにしたのは、提案したコミュニケーションシス

テムの概念では、リアルタイムの情報のやりとりが重要であるため、動画の遅れ・コマ落ちを極力避けたかったからである。デスクトップユーザ端末では、ビデオ受信機で受信した後、USBキャプチャデバイスを利用して映像を取り込んでいるが、処理速度の観点から解像度は320×240ドットとした。

ビデオトランスミッタで映像を送信する場合の長所は、ほぼリアルタイムで映像を送信できること、利用するPCに映像を送信するための負荷をかけずに済むため処理能力の低い小型のPCが利用できることである。短所は、ビデオトランスミッタの性能により通信距離が制限されることである。一方、LANで映像を送信する場合の長所は、通信回線をLANに統一できるため、LANが利用できればどこでも利用できることである。短所は、リアルタイムで映像を送信するためには、処理能力の高いPCが必要なことである。現時点では、小型化のためにはビデオトランスミッタが良いが、利用できる場所を広げるためにはLANにした方が良く、一長一短があると考えている。

3-3. 片眼型眼球撮影機能付きHMD

HMDを利用したAR技術には、ビデオシースルー方式と光学シースルー方式の2方式がある。ビデオシースルー方式では、現実環境をカメラで撮影して撮影した画像上にコンピュータ画像を重ね合わせるため重ね合わせが容易であるが、現実環境はビデオ画像を介して見ることになる。一方、光学シースルー方式では、ユーザは直接現実環境を見ることができるが、コンピュータ画像はハーフミラー等を利用して重ね合わせるため、個人毎にキャ

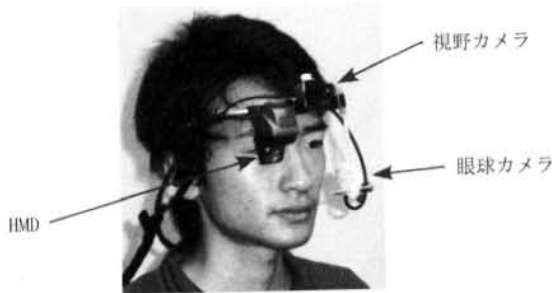


図 4 片眼型眼球撮影機能付き HMD
Fig. 4 Eye-sensing Monocular HMD.

リブレーションを行う必要などがあり、重ね合わせが難しい。

両方式には一長一短あるが、現場で動き回るときの安全性を考慮し、現実環境を直接見ることができる光学シースルー方式を採用することとした。視野の確保も考え片眼型とし、シースルー機能があり、現実環境への重畳表示のため眼球全面被うという条件を満たした島津製作所製の HMD(Data Glass2¹⁴⁾)を採用することとした。視野角は、水平視野角 $24^{\circ} \pm 1.6^{\circ}$ 、垂直視野角 $18^{\circ} \pm 1.2^{\circ}$ であり、この範囲内に「○」を表示することになる。また、解像度は、 800×600 ドットである。

この HMD に前方を撮影する視野カメラと視線検出のために眼球を撮影する眼球カメラを取り付けた。開発した片眼型眼球撮影機能付き HMD を、図 4 に示す。眼球カメラは赤外線カメラを用い、赤外線 LED を取り付けることにより、眼球の虹彩を明るく照らし、瞳孔中心抽出の画像処理を安定的に行えるようにした。視野カメラ、眼球カメラ、ディスプレイは取り外しが可能であり、フレームを裏返して、固定し直すことにより、左右を交換できるように設計した。

3-4. 現実環境と HMD に表示する情報との位置合わせの方法

光学シースルー方式の AR 技術を用いたシステムでは、現実環境と HMD に表示する情報との位置合わせのために、ユーザ毎のキャリブレーションが不可欠である。これは、基準となる長方形を描いた板(キャリブレーション板)を眺めて行うこととした。具体的には以下の通りである。

キャリブレーション時には、キャリブレーション板をウェアラブルユーザの前方、頭の高さに設置する。ウェアラブルユーザは HMD を装着する。HMD の映像表示部の外周に沿って長方形が表示されるので、ウェアラブルユーザは、これとキャリブレーション板上の長方形が重なるように頭の位置を調整する。この時、デスクトップユー

ザ端末では、ウェアラブルユーザ装備の視野カメラで捉えたキャリブレーション板上の基準長方形が見える。この長方形の範囲がウェアラブルユーザに情報を提示できる範囲である。マウスでクリックすることにより、デスクトップユーザは長方形の角の位置を記録する。この作業により、視野カメラ座標系の中で、HMD 座標系と対応する範囲(HMD に情報を表示できる範囲)を設定することができる。ここで、視野カメラ座標系とは視野カメラが取得した画像の座標系を、HMD 座標系とは HMD の表示部の座標系のことである。

3-5. 視線の計測方法

眼球カメラが取得した画像の座標系を眼球カメラ座標系と呼ぶこととする。視線の計測は、眼球カメラ座標系の瞳孔中心位置から、それに対応する視野カメラ座標系の点を推定することである。そのために、以下の処理を行う。

(1) 眼球カメラ座標系における瞳孔中心座標の算出

米田らの方法¹⁵⁾を利用した。眼球カメラで撮影された画像から瞳孔の輪郭形状を抽出し、さらにノイズを除去する。そして、瞳孔形状データから無作為に抽出した 3 点から決定される円の中心を何回か繰り返して求め、これらの円の中心の集合の重心を瞳孔中心座標と推定する。

(2) 眼球カメラ座標系における瞳孔中心座標から HMD 座標系における視線座標への変換

HMD の表示部の中心および 4 隅(計 5 点)にキャリブレーションのための基準点を表示し、基準点を見ているときの眼球カメラ座標系における瞳孔中心座標を記録する。これらをもとに、基準点以外を見ているときに、眼球カメラ座標系における瞳孔中心座標から、HMD 座標系におけるそれに対応する座標(視線)を推定する。

(3) HMD 座標系における視線座標の視野カメラ座標系への変換

3-4. に述べた方法で、HMD 座標系と視野カメラ座標系の変換ができる。

以上より、眼球カメラで撮影された瞳孔中心から、視野カメラ座標系での視線を推定できる。

4. 評価実験

開発したシステムの有用性を検証するためには、最終的には、実際の作業場面で利用して評価をする必要があるが、本論文では、特に視線情報機能と HMD 指示機能に焦点を絞り、それらの機能を用いた場合の情報伝達における効果を詳細に評価することを目的として実験を行った。そのため、視線による効果と、頭部の動きに伴う視野

カメラの撮影方向の変化による効果を分離するために、頭部の位置を固定して実験を行うこととした。

実験は、二人の被験者による、一方の被験者が知っている情報（ターゲットの位置）をもう一方の被験者に伝達するものであった。情報の受け手側の被験者には視覚探索課題を与え、送り手側にはその課題のターゲットの位置の情報を与えた。送り手側は受け手側にその情報を伝達するものとした。情報が伝達されれば視覚探索課題の遂行時間が短縮されるはずである。2つの機能の利用の有無を変化させて、受け手側の被験者がターゲットを発見するまでの時間（反応時間）、送り手側の被験者の音声による指示の回数（指示回数）を計測した。反応時間が短縮されればそれらの機能が有用であると言える。一方、指示回数は、一概に少なければ良い、多ければ悪いというものではなく、コミュニケーションの質を示すものである。言葉で表現しづらい場合、表現する必要がない場合に少なくなり、議論が必要な場合、確認が必要な場合などは多くなると思われる。

Billingshurst¹⁶⁾らが指摘しているように、ウェアラブルコンピュータとデスクトップコンピュータを利用するユーザ間の協調には非対称性があるので、コミュニケーションシステムとして評価するためには、両方向の情報伝達実験を行って評価する必要がある。そこで、以下の2種類の実験に分けて行うこととした。

- 実験1:ウェアラブルユーザがターゲット位置を指示して、デスクトップユーザがターゲットを探索する実験
- 実験2:デスクトップユーザがターゲット位置を指示して、ウェアラブルユーザがターゲットを探索する実験

開発したシステムにおいて、作業員の視線の利用の仕方には、作業員が視線をポインタとして情報伝達に利用する場合と、熟練者が作業員の視線の動きを観察するために利用する場合の二通りがある。実験1は、前者の場合の情報伝達方向に関する実験である。また、後者の場合は、作業員の視線の動きを観察して、それに対して指示を出すことになる。実験2はその指示を出す方向に関する実験である。

なお、実験においては、視野カメラの映像はノイズの混入を防ぐために有線で送信することとした。また、LANによる通信に伴う音声の遅れ、不鮮明さによる影響を排除するため、同室で2人の被験者が直接会話できるようにした。

4-1. 実験1

4-1-1. 実験方法

目的

開発したシステムを利用して、ウェアラブルユーザからデスクトップユーザへ情報を伝達する際の各機能の効果を検討する。

要因計画

視線情報機能(2) × HMD 指示機能(2)の2要因被験者内計画、視線情報機能は、あり条件とコントロール条件、HMD 指示機能は、あり条件とコントロール条件の各2条件であった。

被験者

20代の大学生または卒業生の計8名(被験者A~H)であった。HMDを利用する物理的な制約のため、ウェアラブルユーザを裸眼もしくはコンタクトレンズ装着者に限定した。

被験者AとB,...,被験者GとHを、それぞれAB組,...,GH組とし、AB組~GH組の4組に対して、実験を行った。組になった被験者は、互いに面識のない者であった。

材料

用いられた刺激(図5)は実験者によって作成されたものであり、2種類の特徴の違う図形(右上向きの緑の長方形と左上向きの赤の長方形)の中に1つだけ特徴の違う図形(ターゲット:左上向きの緑の長方形または右上向きの赤の長方形)を配置したものであった。背景色は黒であった。

このような刺激を使う理由は、ターゲット以外の図形の数に比例して、探索時間を増やすことが可能であり、課題の難易度を調整することができるからである。予備実験から刺激中の図形の大きさと数を決定し、実験に用いた刺激は探索に数秒程度かかるものとした。図形の1つ分の視野角はおよそ2.4°であった。ターゲットを発見したことを確認するため、ターゲットを発見して初めて分かる情報として、各図形の下にはグレーでアルファベット2文字を描いた。刺激中の四角形はウェアラブルユーザがHMDを通して見ることができる範囲である。

刺激は、ウェアラブルユーザに対しては、プロジェクタによってスクリーンに投影されて提示された。解像度は800×600ドットであった。ウェアラブルユーザがHMDを装着する際、HMDを見やすい位置に調節すると、水平視野角約24°、垂直視野角約18°で、ウェアラブルユーザはHMDのディスプレイの表示領域を見ることができる。この表示領域は半透明になっており、前方を見ることが可能である。各ウェアラブルユーザは、スクリーンに投影されている刺激中の四角形に、ディスプレイの表示領域をあわせるように頭の位置を調節することにより、全員がほぼ同じ位置でスクリーン上の刺激を見ることがで

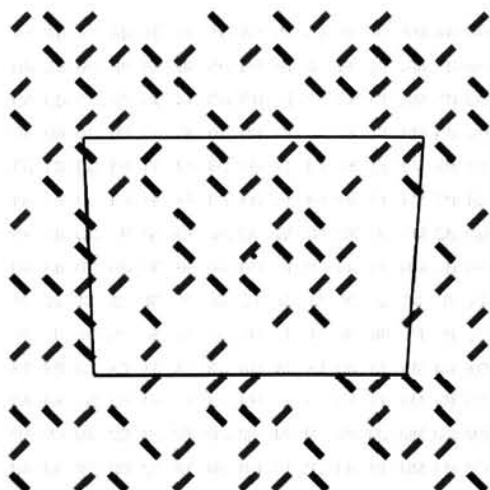


図 5 刺激
Fig. 5 Stimuli.

きる。

一方、デスクトップユーザに対しては、刺激は以下のような方法で提示された。スクリーンに投影された刺激を、ウェアラブルユーザの頭部に取り付けてある視野カメラによって撮影し、その後デスクトップPCに取り込み、取り込んだ映像をデスクトップユーザ用インタフェースの 320×240 ドットの領域に表示した。

刺激は、各条件毎に 25 種類用意した。刺激中の図形の数ほぼ同じであるので、25 種類の刺激の視覚探索課題としての難しさはほぼ同じである。図 5 中の四角 (HMD の表示領域に相当) を対角線で 4 分割し、その 4 つの範囲に均等にターゲットが出現するように配置することにより、25 種類の刺激でターゲットがランダムな位置に出現するように作成した。

手続き

各被験者の組で 2 要因 2 水準の全ての条件で実験を実施し、4 組の実験を行うことにより、実施順序について被験者組間でカウンターバランスをとった。

ウェアラブルユーザは、暗室内で、HMD を装着し、顎のせ台に顎をのせ頭部を固定し、前方のスクリーンにプロジェクタにより投影された刺激を見ることとした。実験での学習効果をなくすために、条件を変更するごとに例題を使って練習を行った。また、条件を変更するごとにキャリブレーションを行い、例題を使った練習中にキャリブレーションが正しくできているか、つまり、隣の図形と区別できる精度 (ウェアラブルユーザの視野角で、指し示したい位置から $\pm 1.2^\circ$ 以内) で各機能が利用可能であるかどうかを確認した。

アルファベット二文字を書いた小さなカードを見せる

ことによって、ウェアラブルユーザにターゲットの位置の情報を与えた。実験者による開始の合図と同時に、ウェアラブルユーザはその位置をデスクトップユーザに伝えた。位置を伝える方法として利用可能なのは、音声に加えてその条件で使える機能であった。

両ユーザに対して、音声で位置を伝える場合に、右から何番目、上から何番目という指示、アルファベットを使つての指示は禁止であると教示した。ウェアラブルユーザには、視線情報機能ありの条件の場合は、あるものを見ているだけでおおよその位置をデスクトップユーザに示すことができることを教示した。デスクトップユーザには、HMD 指示機能ありの条件の場合は、マウスを押すことによって、ウェアラブルユーザに場所を示すことができることを教示した。そして、デスクトップユーザには、ターゲットを発見したら「見つけました」と発言し、ターゲットの下に書かれてある確認用のアルファベットを読み上げるように教示した。

開始の合図からデスクトップユーザがターゲットを発見するまでの時間 (反応時間) 及び、ウェアラブルユーザが音声により指示をした回数 (指示回数) を、条件を変えて計測した。

実験中の典型的なやりとりの例は、以下のようなものである。

情報の送り手: 「右の方です」

情報の受け手: 「はい」

情報の送り手: 「もうちょっと下」

情報の受け手: 「この辺ですか？」

情報の送り手: 「もうちょっと右」

情報の受け手: 「見つけました」

4-1-2. 結果

実験結果について、2 要因 2 水準、繰返し数 25×4 回の分散分析を行った。次の 3 つの場合 (受け手の答えが間違っていた場合、送り手側が誤ったターゲットの位置を伝達した場合、システムの動作不良 (視線検出ができなかった等) があった場合) は検定から除外した。実験結果を (図 6～図 7) に示す。図中で、「視線なし」と「視線あり」とは、視線情報機能の「あり条件」と「コントロール条件」を、「HMD なし」と「HMD あり」とは、HMD 指示機能の「あり条件」と「コントロール条件」を意味する。

反応時間について、分散分析の結果、視線情報機能の有無の主効果が有意であった [$F(1, 382) = 32.394, p < .01$] が、HMD 指示機能の有無の主効果は有意でなかった [$F(1, 382) = 0.004, p = .947$]。また、交互作用も有意ではなかった [$F(1, 382) = 0.503, p = .478$]。

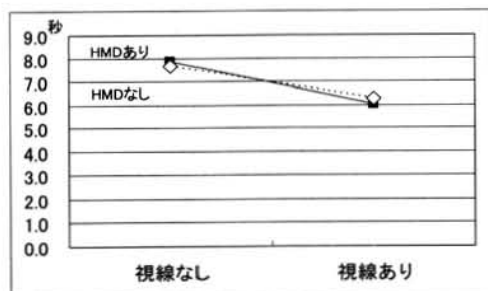


図 6 反応時間 (実験 1)

Fig. 6 Reaction Time (Experiment 1)

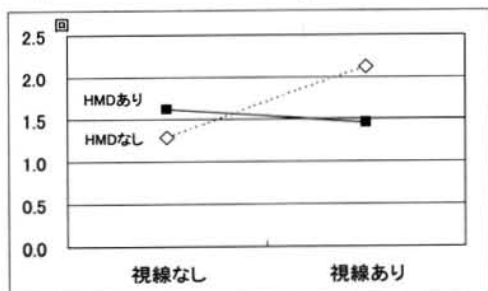


図 7 指示回数 (実験 1)

Fig. 7 Number of Indications (Experiment 1)

視線情報機能を使用した場合、反応時間が短くなったので、視線情報はウェアラブルユーザからデスクトップユーザに物の位置を伝える時間を短縮する効果があると考えられる。視線情報機能を利用して実際にデスクトップユーザに提示されたポイントは、指示する位置が安定しないで若干振動したものであったが、このような効果があった。

指示回数については、視線情報機能の有無の主効果が有意でなく [$F(1, 382) = 1.813, p = .179$], HMD 指示機能の有無の主効果は有意であった [$F(1, 382) = 24.398, p < .01$] が、交互作用が有意であった [$F(1, 382) = 18.268, p < .01$].

交互作用があることより、HMD 指示機能があるかどうかにより、視線情報機能の有無の指示回数に対する効果が異なることが分かった。

以下、実験者の観察によるが、二つの機能を使用しない条件では、送り手側が言葉で指示したい場所を表現できたかどうか問題であったと思われる。実験中は、音声で位置を伝える場合、右から何番目、上から何番目という指示、アルファベットを使つての指示は禁止していた。このため、「○」、「+」のポイントが表示されない場合、これらを基準にした相対的な位置を指示することができなかった。「右上」、「左上」のように大体の場所しか指示することができないため、1 回程度と指示回数が少なかった。

と思われる。また、視線情報機能のみ使用した条件では、視線によりターゲットを指し示すことができるが、受け手からフィードバックは音声のみであり、受け手が指示を理解しているのか分かりにくかった。このため、送り手であるウェアラブルユーザが音声による指示を繰り返し、指示回数が多くなったと思われる。

それに対して、HMD 指示機能を使用した条件では、送り手にとっては HMD 指示機能による受け手からのフィードバックがあるため、受け手が指示を理解しているかが分かりやすく、送り手の指示回数が「視線あり・HMD なし」の場合より、少なくなったと思われる。

4-2. 実験 2

4-2-1. 実験方法

目的

開発したシステムを利用して、デスクトップユーザからウェアラブルユーザへ情報を伝達する際の各機能の効果を検討する。

要因計画

視線情報機能 (2) × HMD 指示機能 (2) の 2 要因被験者内計画、視線情報機能は、あり条件とコントロール条件、HMD 指示機能は、あり条件とコントロール条件の各 2 条件であった。

被験者

20 代の大学生または卒業生の計 8 名 (被験者 I~P) であった。HMD を利用する物理的な制約のため、ウェアラブルユーザを裸眼もしくはコンタクトレンズ装着者に限定した。

被験者 I と J, ..., 被験者 O と P を、それぞれ IJ 組, ..., OP 組とし、IJ 組~OP 組の 4 組に対して、実験を行った。組になった被験者は、互いに面識のない者であった。

材料

実験 1 と同じ刺激を用いた。

手続き

実験 1 の手続きと異なるのは、送り手側がデスクトップユーザであり、受け手側がウェアラブルユーザとなる場所であった。以下に異なる手続きのみを示す。

アルファベット二文字を書いた小さなカードを見せることによって、デスクトップユーザにターゲットの位置の情報を与えた。実験者による開始の合図と同時に、デスクトップユーザはその位置をウェアラブルユーザに伝えた。

ウェアラブルユーザには、ターゲットを発見したら「見つけました」と発言し、ターゲットの下に書かれてある確認用のアルファベットを読み上げるように教示した。

開始の合図からウェアラブルユーザがターゲットを発

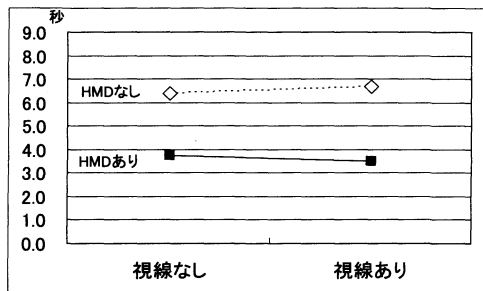


図 8 反応時間 (実験 2)

Fig. 8 Reaction Time (Experiment 2)

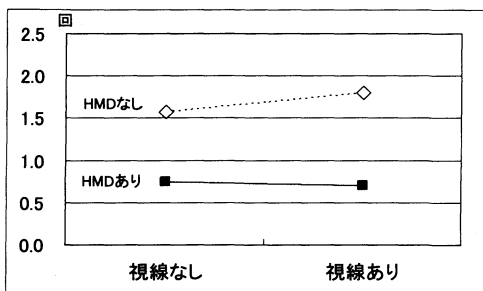


図 9 指示回数 (実験 2)

Fig. 9 Number of Indications (Experiment 2)

見するまでの時間 (反応時間) 及び、デスクトップユーザが音声により指示をした回数 (指示回数) を、条件を変えて計測した。

4-2-2. 結果

実験結果について、2 要因 2 水準、繰返し数 25×4 回の分散分析を行った。次の 3 つの場合 (受け手の答えが間違っていた場合、送り手側が誤ったターゲットの位置を伝達した場合、システムの動作不良 (視線検出ができなかった等) があった場合) は検定から除外した。実験結果を (図 8~図 9) に示す。図中で、「視線なし」と「視線あり」とは、視線情報機能の「あり条件」と「コントロール条件」を、「HMD なし」と「HMD あり」とは、HMD 指示機能の「あり条件」と「コントロール条件」を意味する。

反応時間について、分散分析の結果、視線情報機能の有無の主効果は有意でなかった [$F(1, 391) = 0.015, p = .904$] が、HMD 指示機能の有無の主効果が有意であった [$F(1, 391) = 91.093, p < .01$]。交互作用は有意ではなかった [$F(1, 391) = 0.796, p = .373$]。

これより、HMD 指示機能を使用した場合、反応時間が短くなったので、HMD 指示機能はデスクトップユーザからウェアラブルユーザに物の位置を伝える時間を短縮する効果があると考えられる。

また、指示回数については、視線情報機能の有無の主

効果は有意でなかった [$F(1, 391) = 0.387, p = .534$] が、HMD 指示機能の有無の主効果は有意であった [$F(1, 391) = 183.127, p < .01$]。交互作用は有意ではなかった [$F(1, 391) = 3.204, p = .074$]。

これより、HMD 指示機能を使用した場合、指示回数が少なくなったので、HMD 指示機能はデスクトップユーザからウェアラブルユーザに物の位置を伝える際の音声による指示回数を少なくする効果があると考えられる。

4-3. 考察

実験 1 からは、ウェアラブルユーザからデスクトップユーザへ情報を伝達する場合には、視線情報機能を使用することで、その時間が短くなることが分かった。実験 2 からは、デスクトップユーザからウェアラブルユーザへ情報を伝達する場合には、HMD 指示機能を使用することで、情報を伝達する時間が短くなること、音声による指示回数が少なくなることがわかった。

次に、実験 1 と実験 2 とを比較する。まず、反応時間について、刺激の解像度の観点から考察する。実験 2 では受け手側 (視覚探索を行う被験者) が 800×600 ドットのスクリーンを直接見ることができるが、実験 1 で受け手が見る画像は小型のカメラで撮影されたものでスクリーンを直接見るより不鮮明であり、また、解像度も 320×240 ドットに落ちている。解像度の低い画像が、ターゲットの探索とターゲットかどうかの判断に影響し、解像度の低い画面を見ているデスクトップユーザの方がターゲットの探索に時間が多くかかったと思われる。このことは、二つの機能を使用しない条件で、実験 1 の方が実験 2 よりも反応時間が長いことから推察される。また、被験者及び実験者も解像度が低い方が探索が困難であると感想を述べていた。

反応時間について、ポインタとしての役割を果たす視線情報機能と HMD 指示機能の違いの観点から考察する。両機能ともに利用すると反応時間が短くなるが、実験 1 で視線情報機能を利用した場合に約 8 秒から約 6 秒に短くなるのに対して、実験 2 で HMD 指示機能を利用した場合は約 6.5 秒から約 3.5 秒とかなり短くなっている。これは、ウェアラブルユーザが視線情報機能を利用した場合は、一カ所を微動だにせず注視することは困難であるので指示する位置が安定しないことが影響しているのではないかと推測している。一方で、デスクトップユーザが HMD 指示機能を利用した場合は、マウスで指示をするので、ある座標に固定して表示することが容易である。今後、頭部の動きを伴う場合についても実験を行う必要がある。

次に指示回数について考察する。実験1においては二つの機能を使用しない条件では、言葉で表現しづらいので指示回数が1回程度と少なくなっている。他の条件では、ポインタを基準として伝える情報を変化させることができることから、「視線なし・HMDなし」より回数が増えているのではないと思われる。例えば、ポインタを用いれば、「これ」、「こっち」、「その右」等のように様々な表現が可能である。一方、実験2では、HMD機能を利用すると音声による指示がなくてもターゲットが発見できる場合が多く、指示回数の平均は1回を下回っている。

次に、実用的な観点から考察する。提案したシステムの2つの機能を両方とも利用すれば、双方向とも情報伝達の時間が短くなることが分かったので、緊急時等の時間が限られた状況における情報伝達において有用であると考えられる。これらの機能を利用すると、言葉を発しなくても情報伝達ができる場合があり、このことは、騒音下での利用に適していることを示している。一方で、音声のみを利用した場合と比較して、2つの機能によるポインタを基準として言葉を発することができるので、これらの機能はコミュニケーションを円滑化する効果があると推測される。

5. まとめ

ウェアラブルコンピュータを装着した作業員を、遠隔地からデスクトップコンピュータを利用する熟練者が支援するシステムにおいて、従来のテキスト、ビデオ、音声、カーソル等を共有する方法以上に迅速かつ明確に意図を伝えるために、視線を利用することを提案した。そして、音声による対話機能に加えて、(1) ウェアラブルユーザがどこを見ているかという情報をデスクトップユーザが見ることができる機能(視線情報機能)、及び、(2) デスクトップユーザが、ウェアラブルユーザの視界に、AR技術を利用してポインタを重ね合わせることでできる機能(HMD指示機能)を持つ遠隔コミュニケーションシステムのプロトタイプを開発した。

評価実験より、ウェアラブルユーザからデスクトップユーザへ情報を伝達する場合には、視線情報機能を使用することで、その時間が短くなることが分かった(実験1)。また、デスクトップユーザからウェアラブルユーザへ情報を伝達する場合には、HMD指示機能を使用することで、情報を伝達する時間が短くなること、音声による指示回数が少なくなることがわかった(実験2)。

開発したシステムにおいて、作業員の視線の利用の仕

方には、作業員が視線をポインタとして情報伝達に利用する場合と、熟練者が作業員の視線の動きを観察するために利用する場合の二通りがある。実験1から、前者については時間を短縮する効果があることが分かった。また、後者については、視線情報機能を実装したことにより達成されている。そして、その観察結果に基づいて熟練者から作業員に指示を出す場合が実験2に相当し、実験2についても時間を短縮する効果があることが分かった。

提案したシステムの2つの機能を利用すれば、緊急時等の時間が限られた状況、騒音下における情報伝達において有用であると考えられる。

最後に、開発したシステムを現実場面に適用する際の課題について述べる。動画の送信はLANとビデオトランスミッタを組み合わせているため、それぞれの通信範囲で制限を受ける。例えば、通信をLANに統一すれば、利用可能な範囲を拡大することができるが、高速なコンピュータが必要になるなどウェアラブルユーザの装備の小型化とのトレードオフになると考えられる。また、ARの分野で盛んに研究されている物体をトラッキングして情報を重ね合わせる手法と組み合わせれば、一人で行う作業から遠隔地とのコミュニケーションを伴う作業まで行えるようになり適用範囲も広がる。さらに、視線によるポインタの振動を押さえるようにローパスフィルタを入れる等の工夫も必要であると思われる。また、視線検出については一般的な問題であるが、キャリブレーションが容易にできることや、照明環境の変化によらず安定して計測できることが必要である。

今後は、以上のような課題を解決し、実用的なシステムへと改善していく予定である。

謝 辞

実験にご協力頂きました皆様に感謝致します。また、本研究は、文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B))及び経済産業省革新的実用原子力技術開発費補助事業により支援を受け実施しました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier and B. MacIntyre: Recent Advances in Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.21, No.6, 34-47, 2001.
- 2) G.Kortuem, M.Bauer and Z.Segall: NETMAN: The design of a collaborate wearable computer system, Mobile Networks and Applications, Vol.4, 49-58, 1999.
- 3) J.Siegal, R. Kraut, B.John and K.Carley: An Em-

- pirical Study of Collaborative Wearable Computer Systems, in Proceedings of CHI 95 Conference Companion, 312-313, 1995.
- 4) R. Kraut, M. Miller and J. Siegal: Collaboration in Performance of Physical Tasks: Effects on Outcomes and Communication, in Proceedings of CSCW '96, 57-66, 1996.
 - 5) A. I. Duchowski: Eye tracking Methodology: Theory and Practice, Springer, 2003.
 - 6) R. A. Bolt: Eyes at the interface, in Proceedings of Human Factors in Computing Systems, 360-362, 1982.
 - 7) I. Starker and R. A. Bolt: A gaze-responsive self-disclosing display, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 3-9, 1990.
 - 8) R. J. K. Jacob: What you look at is what you get: eye movement-based interaction techniques, in Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 11-18, 1990.
 - 9) D. D. Salvucci: Inferring intent in eye-based interfaces: tracing eye movements with process models, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 254-261, 1999.
 - 10) 大野 健彦: 視線を用いたインタフェース, 情報処理, Vol.44, No.7, 726-732, 2003.
 - 11) D. Fono and R. Vertegaal: EyeWindows: evaluation of eye-controlled zooming windows for focus selection, in Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 151-160, 2005.
 - 12) R.A.Bolt: "Put-That-There": Voice and Gesture at the Graphics Interface: Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 262-270, 1980.
 - 13) 小山慎哉, 葛岡英明, 山崎敬一, 山崎晶子, 加藤浩, 鈴木栄幸, 三樹弘之: 実空間上の遠隔作業指示を支援するシステムの開発, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 11, 3812-3822, 1999.
 - 14) <http://www.shimadzu.co.jp/hmd/>
 - 15) 米田賀一, 小澤尚久, 青竹雄介, 下田宏, 福島省吾, 吉川榮和: Eye-Sensing HMD による視線入力インタフェースの構築法の検討, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2000 論文集, 239-242, 2000.
 - 16) M. Billinghurst, H. Kato, S. Bee, J. Bowskill: Asymmetric in Collaborative Wearable Interface, in Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers ISWC, 133-140, 1999.