

肩載せアクティブカメラ・レーザによる遠隔協調作業

酒田 信親¹ 蔵田 武志²³ 興梠 正克² 葛岡 英明¹ マーク・ビリングハースト³⁴

¹筑波大学, ²産業技術総合研究所知能システム研究部門, ³HITLAB, Washington 大学,

⁴HITLAB NZ, Canterbury 大学

Remote Collaboration using a Shoulder-Worn Active Camera/Laser

Nobuchika Sakata¹, Takeshi Kurata²³, Masakatsu Kourogai², Hideki Kuzuoka¹, Mark Billingham³⁴

¹University of Tsukuba, ²AIST, ³HITLAB, University of Washington, ⁴ HITLAB NZ, University of

Canterbury, Christchurch

1. はじめに

近年、コンピューティング技術やコミュニケーション技術の対象は、デスクトップから、携帯電話に代表されるように身に付けるものへ拡大している。さらに現在、ウェアラブルコンピュータ[1]や無線ネットワーク技術が、ポータブルカンファレンスや協調作業システムの発展を促している(e.g.[2])。実世界の作業環境の中で使われるウェアラブルシステムでは、実物体に対して作業をすることが多い。ウェアラブルシステムのインタフェースが複雑だと、装着者がインタフェースを操作するだけで、長い間作業が中断してしまう。よって、できるだけ簡単な操作で扱える協調作業インタフェースが必要とされる。

従来、遠隔作業支援のための典型的なウェアラブルシステムとして、着用型コンピュータに接続されたヘッドマウントディスプレイ(HMD)、カメラ、及び協調作業仲間無線ネットワークからなるものがあげられる[2]。音と映像は装着者の実作業空間の状況を知らせるために遠隔の協調作業者に送られる。また、HMDを通して装着者は、遠隔の協調作業者が提供するアノテーションやその他の視覚的なアシストを得ることができる。

本稿で我々は、そのような頭部装着インタフェースを用いない遠隔協調作業のための、新しいウェアラブルインタフェースを使ったシステムを提案し、頭部着用型インタフェースを用いたシステムとの比較に関するユーザテストについて述べる。このインタフェースでは、先に我々が開発したウェアラブルアクティブカメラ・レーザ(WACL[6])を用い、遠隔の指示者が、実作業空間の物体に直接レーザを投影し、ユーザの視線方向とは独立に作業環境を観察することができる。

2. 関連研究

ウェアラブルインタフェースを遠隔協調作業に用いた最初の例の一つとしてHMDとHMC(ヘッドマウントカメラ)を用いた葛岡[7]による研究がある。HMCにより得られた作業空間の映像は遠隔地の熟練作業者に送られ、遠隔作業者は手振りをその映像に重畳してHMDに表示することで直感的な指示を実現している。また、British Telecom[8]は、手振りの代わりにマウスを用いたポインタをHMD上の映像に重畳することで遠隔医療支援を行うシステムを提案した。

頭部装着型インタフェースのユーザスタディの研究例としては、HMDとHMCを装着し、遠隔の熟達した共同作業者が居る場合、居ない場合、実作業空間のビデオ映像がない場合

やある場合を比較したKrautら[3]の研究があげられる。また、HMCを使った場合と作業場所に固定したカメラを使った場合を比較したFussellら[4]の研究などがある。

HMDのような頭部装着型デバイスの代わりに仮想的な情報を実物体に投影するようなインタフェースの研究として、葛岡のGestureCam interface[9]、MannのTelepointer[12]、プロジェクターを実物体に投影する研究[10][11]などが挙げられる。

3. WACLを用いたの協調作業システム

まず、ユーザテストで使用するWACLを用いた遠隔作業支援システムについて述べる。作業者は、図1の左に示すように、WACL、モーションセンサ、マイク、ヘッドホン、およびサブノートPC(Pentium-M 1GHz)入りのバックパックを着用する(重さ約2kg)。WACLからの映像(JPEG, 320x240, 15Hz)とマイクからの音声(16bit, 48000Hz)はサブノートPCでキャプチャされ、WACLのパン・チルト角情報と共に、無線ネットワーク(IEEE802.11b)を介して遠隔地のPCに送られる。カメラの視野角は約49度、WACLのパン・チルト角は、それぞれ84度、82度に設定した。遠隔地のPCには図1の右に示すようなGUIが実装されている。GUIの左上にはライブ映像が表示されており、その映像中を左クリックすると、クリックした位置が映像の中心になるようにWACLが制御される。中クリックによりスタビライズ機能が起動する。その際に、GUIの右上にクリックした時点の静止画が表示され、どの目標に対してスタビライズしているのかを確認することができる。なお、画像を用いたスタビライズは対象の見た目が大きく変化する状況では正常に機能しない場合があるため、本ユーザテストではセンサデータのみに基づいてスタビライズを行った。また、レーザのオン・オフは右クリックによりトグルで切り替えをすることができる。これらWACLの制御データ(パン・チルト角、レーザのオン・オフ)と指示者の音声は、やはり無線ネットワークにより作業者のサブノートPCへ送信される。

これらの機能によって、遠隔地の協調作業者は装着者の動作や視点移動の影響を受けずに、実作業環境を観察し、音声とレーザポインタで的確に指示を送ることができる。

しかしながら、WACLのレーザスポットの視覚的表現能力はHMDの持つビデオ映像を表示できる機能には及ばない。また、WACLを小型・軽量化するために小型のDCギアモーターや小型ギアを用いているため、ポインティングの精度や解像度は十分ではない。

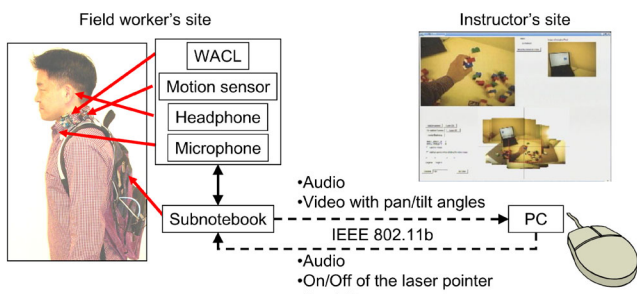


図1. WACLベースの遠隔協調作業システム

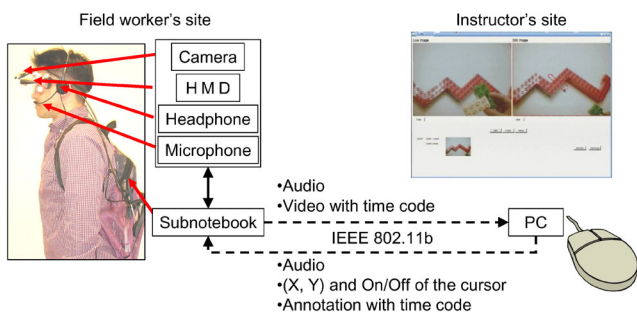


図2. ヘッドセットを用いた遠隔強調作業システム

4. HMD ベースのヘッドセットシステム

本節では、次節で述べるWACLとの比較実験に用いた従来型のシステムを紹介する。作業者の外観は、図2の左に示す通りであり、作業者はHMD、カメラを備えたヘッドセットと、マイク、ヘッドホン、およびサブノートPC(Pentium・M1GHz)入りのバックパックを着用する(重さはWACLシステムと同じく約2kg)。なお、カメラはWACLに装備されているものと同じ型のものである。カメラ映像とマイクからの音声はサブノートPCでキャプチャされ、無線ネットワークを介して遠隔地のPCに送られる。図2の右に示す指示者側のGUIの左上にはライブ映像が表示されており、ライブ映像中を中クリックすると、その時点の静止画が右上に表示される。左クリックによりライブ映像と静止画に線画を描くことができ、右クリックによりカーソルの表示をオン・オフすることができる。また、作業者のHMDにはマウスカーソルが上に載っている方の画像が表示されるようになっている。つまり、カーソルを動かすだけでどちらの画像を作業者に見せるかを選択することができる。このような操作により、作業者はライブ映像もしくは静止画、カーソルの動く様子、線画をHMDで見ながら、指示者の音声を聞くことができる。

5. ユーザテスト

5.1. 実験概要

本ユーザテストでは、ウェアラブルインタフェース装置が重要な役割を果たすと考えられる遠隔協調作業として、移動を伴う作業を実施する作業者と、遠隔地からその作業者に指示を送る熟練指示者との協調作業を想定したタスクを設定した。そのタスクを実施する作業者側の実験環境は、図3のよ

うに、A,B,C,HOMEの4セクションにより構成した。A,B,C各セクションには数個のブロックを組み合わせて作ったブロッククラスタを散らばらせて置き、HOMEセクションには全長約67cmのベースブロックを配置した。遠隔地の熟練指示者は隣の部屋に隔離され、指示者と作業者(被験者)はネットワーク越しでしかコミュニケーションが取れない状態とした。被験者は、各セクションで以下のような作業を行う必要があった。

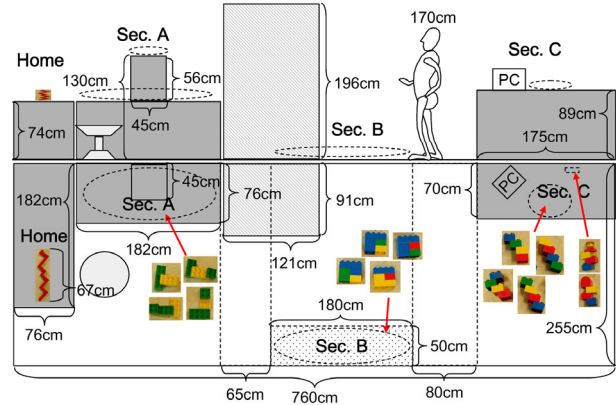


図3. ユーザーテストにおける作業者側の実験環境

セクションA: 12個のブロッククラスタの中から2個を取る(どのブロックを取るかは指示者の指示による。各ブロッククラスタは緑と黄色のブロックからなり、形状が異なっている)。

セクションB: 12個のブロッククラスタから2個を取る(どのブロックを取るかは指示者の指示による。各ブロッククラスタは同じ形をしているが、いくつかの色の組み合わせでできている)。

セクションC: 単純なブロック組み立て作業を繰り返し、PCモニターを指示者に見せ、11組のブロッククラスタの中から1組を取る(どのブロックを取るかは指示者も最初はわかっておらず、PCモニターをしばらく観察することで判明する仕組みになっている。各ブロッククラスタはいくつかの色の組み合わせでできおり形状も異なる)。

HOMEセクション: 各セクションから運んできた計5個のブロッククラスタのうち、指示者から要求される2個をベースブロックの要求される位置に取り付ける。

セクションCのPCモニターには”0”、”1”を示す単純なアニメーションが繰り返し提示されており、約12~15秒観察すると”000”から”111”までの組み合わせが判明し、指示者はどのブロッククラスタを取るべきかを知ることができる。一方、作業者は、そのブロッククラスタを取る前に、単純なブロック組み立て作業をする必要があり、その作業をしながらPCモニターを指示者に安定して見せることは困難である。例えば、実際の作業においても、キーボードを打ちながらモニターを見たり、配線などの操作をしながらインジケータや機械の挙動を確認する場合のように、指示者が見たい場所と作業者が見たい場所が異なることがあり得るため、本実験ではこのようなセクションを設定した。HOMEセクションは、各セクションから取ってきたブロッククラスタを、ベースブ

ロックの要求された場所・方向で取り付けるため、細かい場所や向きの指示が必要となった。

各タスクは必ずHOMEセクションの椅子に座っている状態から始まり、HOMEセクションの椅子に座った状態でのブロッククラスタ取り付け作業で終了した。セクションA,B,Cは各1回ずつ立ち寄る必要があり、また、途中必ず1度HOMEセクションに戻り、その時点で保持しているブロッククラスタをHOMEに置く指示があった。各セクションに立ち寄る順番、取ってくるブロッククラスタ、PCモニタに表示されるコード、HOMEセクションのベースブロックのどの部分にどのブロッククラスタを取り付けるかは、タスクごとにランダムに設定された。また、各セクションでは、すべてのブロックを十分な解像度で1画像中に捉えることができないように、空間的に分散させて配置した。

本ユーザテストでは、16名の被験者(24歳から38歳、男性9名女性7名)を作業者とした。2名の熟練指示者(24歳と33歳の男性)は、おのおの8名ずつとペアを組んで指示を担当した。ヘッドセット、WACLを用いたシステムそれぞれで、トレーニングタスクを1回、実タスクを1回実施した。持ち越し効果を分散させるために、8組は、ヘッドセット、WACLの順にタスクを行い、残りの8組はWACL、ヘッドセットの順とした。また、各組は最後に、WACLとヘッドマウントカメラの両方(HMDはつけない)を装着し、作業者視点映像とWACL視点映像の両方を収集するためのタスクを1回実施したため、1被験者あたりのタスク試行回数は5回となった。各被験者に、最も早く正確に作業を完了した被験者には粗品を進呈することを事前に説明した。指示者に関しては、実験の途中で指示者の学習効果が表れないように、パイロットテストを含め何度もこのタスクをこなした。

5.2. 作業完了時間

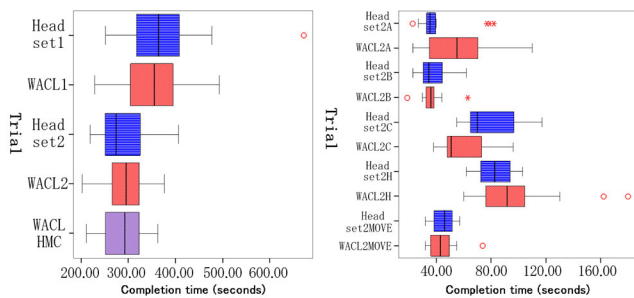


図4. 作業完了時間(左:合計、右:各セクション)

作業完了時間は、実験時に撮影したビデオログデータを用いて、各セクションでの作業完了時間と移動時間を含めた合計作業時間を計測した。まず、図4の左に合計作業完了時間の箱ヒゲ図を示す。縦軸のHeadset1、Headset2、WACL1、WACL2、WACLHMCは、それぞれ、ヘッドセットのトレーニングタスク、実タスク、WACLのトレーニングタスク、実タスク、作業者視点及びWACL視点映像収集タスクを示す。ヘッドセットの実タスク(Headset2)とWACLの実タスク(WACL2)の作業完了時間に関してウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、2つの作業完了時間の間に有意な差は見られなかった($p=0.5$)。また、これは、性別、指示者、コンピュータの使用頻度の違いによらず、また、身長との相関も特に見られなかった。

図4の右は、ヘッドセット、WACLの実タスクにおけるセクションごとの作業完了時間の箱ヒゲ図である。縦軸のHeadset2、WACL2はヘッドセットの実タスクかWACLの実タスクかを示し、A,B,C,HOME,MOVEは、それぞれ、セクションA,B,C,HOME,およびセクション間の移動時間を示している。ヘッドセットとWACLの各セクションでの作業完了時間に関してウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、セクションCで有意な差が見られた(セクションA： $p=0.21$ 、セクションB： $p=0.48$ 、セクションC： $p=0.007$ 、HOMEセクション： $p=0.12$ 、移動時間： $p=0.38$)。セクションCでは、ヘッドセットを着用したユーザがブロック組立作業をしながらPCモニタを同時に見続けるといのは非常に困難であった。一方、WACLの場合、指示者は作業者の視点とは関係なく、PCモニタにWACLを向けることができるため、作業者が組立作業をしている間にPCモニタを見ることができた。ほとんどの作業者は組立作業によって上体を揺らしたり肩を左右にひねったりしたが、スタビライズ機能を有効にすることで比較的安定してPCモニタを観察し続けることができた。さらに、いくつかのケースでは、作業者が組立作業をしている間に、指示者はPCモニタの表示を見終わりブロックを探し始めることができた。

5.3. 主観評価

各被験者(作業者)には、アンケートやメールや口頭での追加インタビューにより、ヘッドセット及びWACLの印象、疲労度、使いやすさを絶対評価、相対評価してもらった。まず、ウィルコクソンの符号順位検定により両デバイスの絶対評価の結果(図5左)を比較した。各デバイスを着用した指示者がわかりやすかったかどうか(図中のQ1とQ7、 $p=0.43$)、各デバイスを着用して指示者になにか確認をしたりといったコミュニケーションは簡単だったかどうか(Q6とQ12、 $p=1.0$)については違いはなかった。次に、各デバイスによる視覚的なアシスト(ヘッドセット：画像や画像上のカーソルおよび線画、WACL：レーザースポット)は見やすかったかどうか(Q3とQ9、 $p=0.13$)、各デバイスの視覚的なアシストで指示されたブロックや場所と実作業空間のそのブロックや場所とを対応付けることは簡単だったかどうか(Q4とQ10、 $p=0.11$)については、統計的には有意な差は見られなかったが、図からもわかるようにWACLの方がよい評価を得た。また、各デバイスを身に付けて違和感はなかったかどうか(Q2とQ8、 $p=0.002$)、各デバイスを使っているときに実作業空間は見やすかったかどうか(Q5とQ11、 $p=0.003$)については、有意な差が見られ、WACLの方が統計的に良い評価を得た。ヘッドセットとWACLとの各相対評価(図5右)について、1サンプルのT検定(検定値=4)を行ったところ、作業をして疲れたのはどちらですか(Q14)という設問のみ有意な偏りが見られた($p=0.016$)。つまり、ヘッドセットの方がより疲れたという評価であった。トレーニングによって、いち早く慣れることができたと感じるのはどちら?(Q13、 $p=0.173$)、どちらが作業をしやすかったですか?(Q15、0.787)、指示者を身近に感じたのはどちらですか?(Q16、 $p=0.304$)、どちらのほうが早く作業を終えたとおもいますか?(Q17、 $p=1.0$)の各設問では、特に有意な偏りは見られなかった。

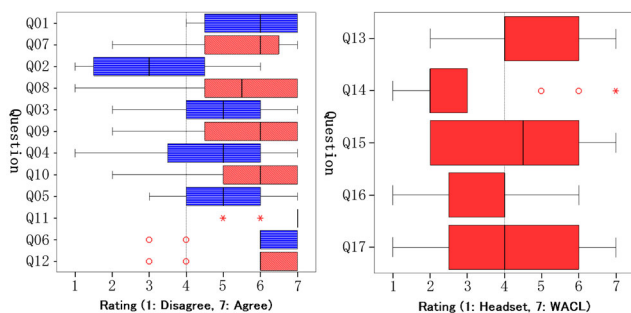


図5. 7段階の絶対評価(Q1-6:ヘッドセットについて、Q7-12:WACLについて)。Q13-17は相対評価(1:ヘッドセット、7:WACL)

6. 考察とまとめ

今回のユーザテストでは、ヘッドセットとWACLとの間で合計作業完了時間に有意な差はないにも関わらず、着用時の違和感、視覚的な見易さ、疲労感の面、WACLの方が使用者に優れた印象を与えるという結果が得られた。これは、WACLの持つ遠隔協調作業支援における有用性を示していると言える。ヘッドセットに対する被験者のコメントとしては、画像と実世界のどちらを見ればよいか混乱した、眼や頭が疲れた、作業中に少しずつ装着位置がずれてしまうのが気になった、装着して違和感があったなどがあった。最初の2つについては網膜投影型のHMDなどによってある程度解決できるが、後者の2つは頭部着用型デバイスに必ず伴う問題点である。

セクションごとの作業完了時間において、セクションCでは、WACLの方が早いという有意な結果が得られた。これは、指示者が装着者の動作や視点移動をあまり受けずに視点を選べるWACLの利点によるものと考えられる。また、他のセクションでは統計的に有意な差はなかったが、HOMEセクションとセクションAでは、ヘッドセットの方が早いという傾向があった。HOMEセクションでは、ベースブロックにブロッククラスタを取り付ける際に、指示者は場所や向きについての細かい説明をする必要があったが、ヘッドセットの場合、静止画像上へ線画の描画が可能であったため、言葉での詳細な説明はあまり必要ではなかった。一方、WACLでは、パンチルト機構の位置決め精度の不足や、作業者の体の動きによるレーザーの位置ずれのため、ポインティングの操作を繰り返すことが多かった。また、ブロックをどのように回転させるかといった指示をレーザーだけで行うのは難しく、言葉での詳細な説明を伴う指示となった。これらの要因により、ヘッドセットの方の作業完了時間が早いという傾向が出たものと思われる。被験者からは、HMDの線画による指示は非常にわかりやすかったという多くの意見を得た。

対象物体の画像上の解像度の高さは、色(セクションB)を見分けるよりも、形状(セクションA)を見分けるのにより必要となる。ヘッドセットでは、HMDで対象がどのように写っているかを確認しながら能動的に作業者に見せることが容易であったが、WACLでは、画像にどのように対象が写っているかを確認する手段がなかったため、指示者がブロック形状を判断しづらい場面があった。このような要因がセクションAでの完了時間の差になって表れたものと思われる。

今回のユーザテストの結果から、WACLシステムに作業の

詳細な情報やWACLの撮影映像を装着者に提示するデバイスを付ければ、WACLの弱点を補える可能性がある。WACLの特徴を失う事無く、頭部に付けることもなく、また作業中も両手が自由に使えるものとしてSWD(Shoulder Worn Display)[5]が適していると考えられる。今後は、SWDを加えたシステムを構築しユーザーテストを行いたい。

謝辞: 本研究の一部は、文科省の科学技術振興調整費およびJSPS 海外特別研究員の支援による。

参考文献

- [1] A brief history of wearable computing: <http://www.media.mit.edu/wearables/lizzy/timeline.html>
- [2] Hestnes, B., Heiestad, S., Brooks, P., Drageset, L., "Real situations of wearable computers used for video conferencing - and implications for terminal and network design", In Proc. of ISWC 2001, pp.85-93, 2001.
- [3] Kraut, R. E., Miller, M. D., Siegal, J., "Collaboration in Performance of Physical Tasks: Effects on Outcomes and Communication", In Proc. of CSCW 96, pp. 57-66, 1996
- [4] Fusell, S. R., Setlock, L. D., Kraut, R. E., "Effects of Head-Mounted and Scene-Oriented Video Systems on Remote Collaboration on Physical Tasks", In Proc. of CHI 2003, pp. 513-520, 2003.
- [5] Sakata, N., Kurata, T., Kato, T., Kouroggi, M., Kuzuoka, H., "WACL: Supporting Telecommunications Using Wearable Active Camera with Laser Pointer", In Proc. of ISWC 2003, pp.53-56, 2003.
- [6] Clark, H. H., Brennan, S. E., "Grounding in communication", In L. B. Resnick, R. M. Levine, S. D. Teasley (Eds.), Perspectives on socially shared cognition, pp. 127-149, Washington, DC: APA Books, 1991.
- [7] Kuzuoka, H., "Spatial Workspace Collaboration: A Sharedview Video Support System for Remote Collaboration Capability", In Proc. of CHI 92, pp. 533-540, 1992.
- [8] BT Development, Camnet videotape. Suffolk, Great Britain, 1993.
- [9] Kuzuoka, H., Kosuge, T., Tanaka, M., "GestureCam: A Video Communication System for Sympathetic Remote Collaboration", In Proc. of CSCW 94, pp. 35-43, 1994.
- [10] Inami, M., Kawakami, N., Sekiguchi, D., Yanagida, Y., Maeda, T., Tachi, S., "Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector", In Proc. of IEEE VR 2000, pp. 233-240, 2000.
- [11] Karitsuka, T., Sato, K., "A Wearable Mixed Reality with an On-board Projector", In Proc. of ISMAR 2003, pp. 321-322, 2003.
- [12] Mann, S., "Telepointer: Hands-free completely self contained wearable visual augmented reality without headwear and without any infrastructure reliance", In Proc. of ISWC00, pp. 177-178, 2000.