

実空間上の遠隔作業指示を支援するシステムの開発

小山 慎哉^{†1} 葛岡 英明^{†2} 山崎 敬一^{†3}
 山崎 晶子^{†3} 加藤 浩^{†4}
 鈴木 栄幸^{†4} 三樹 弘之^{†5}

実空間における作業を遠隔から柔軟に支援するシステムは、次の要件を満たすことが望ましい。それは、(1) 参加者たちが適切な位置をとることができる（身体配置の要件）、(2) 参加者が他者のジェスチャー表現（身振り・手振りなど）を見ることができ、それをお互いに理解することができる（ジェスチャー表現の要件）、(3) 複数の作業者へ同時に指示することができる（複数作業者の要件）、の3つである。筆者らは、これらの要件を満たすため、GestureLaser と GestureLaser Car を開発した。GestureLaser は、遠隔操作型のレーザーポインタで、指示者はマウス操作によって作業空間内にあるレーザー光を動かし、ジェスチャー表現をすることができる。また、GestureLaser Car は遠隔操作ができる四輪車で、GestureLaser を搭載することができる。これらのシステムを用いていくつかの利用実験を行ったところ、前述した3つの要件を満足する可能性が示唆され、指示を有効に伝えている場面が多く観察された。その結果とともに、システムの限界や今後の展望についても述べる。

Development of the System to Support Remote Instruction on Embodied Space

SHINYA OYAMA,^{†1} HIDEAKI KUZUOKA,^{†2} KEIICHI YAMAZAKI,^{†3}
 AKIKO YAMAZAKI,^{†3} HIROSHI KATO,^{†4} HIDEYUKI SUZUKI^{†4}
 and HIROYUKI MIKI^{†5}

If a system is to support remote instruction on physical tasks in the real world, it must meet the following requirements: (1) participants must be able to take appropriate positions, (2) they must be able to see and show gestures, (3) more than one operator must be able to receive instruction at the same time. "GestureLaser" and "GestureLaser Car" are systems that we have developed to satisfy these requirements. GestureLaser is a remote controlled laser pointer that allows an instructor to show gestural expressions referring to real world objects from a distance. GestureLaser Car is a remote controlled vehicle on which the GestureLaser can be mounted. Experiment with a combination of these systems indicates that they satisfy three requirements reasonably and can be used effectively to give remote instruction. Also limitations of the system and future works are described.

1. はじめに

筆者らは、機械装置の修理や保守、学校における実習や医療の処置などのような実世界内の実物体に対する作業の遠隔指示を、複数の作業者に対して容易に行うことができるような共同作業支援システムの開発を目指し、現在、そのようなシステムを設計するうえで考慮すべき要件や問題を明らかにしようとしている。本論文では、筆者らが開発した「GestureLaser システム」の設計指針と、評価実験の結果について述べる。

次章では、まず実世界上の実物体に対する作業指示を支援するために必要な基本的要件を、対面での共同作業に関する過去の研究から得られた知見に基づいて

†1 筑波大学大学院博士課程工学研究科
 Doctoral Program of Engineering, University of Tsukuba

†2 筑波大学機能工学系
 Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

†3 埼玉大学教養学部
 Department of Liberal Arts, Saitama University

†4 日本電気株式会社 C & C システム市場開発推進本部
 C & C Systems Market Development Division, NEC Corporation

†5 沖電気工業株式会社マルチメディア研究所
 Multimedia Laboratories, Oki Electric Ind. Co., Ltd.

提示する。次に、筆者らが開発した「GestureLaser」ならびに「GestureLaser Car」を紹介し、それらを利用した遠隔作業場面を、相互行為分析の手法を用いて詳細に分析し、GestureLaser および GestureLaser Car の実世界上の実物体に対する作業の遠隔指示を支援する能力について分析する。最後に、既存の遠隔共同作業支援システムと GestureLaser システムを比較し、実世界における複数の作業員による作業の遠隔指示を支援するシステムを設計するときに考慮すべき点を考察する。

2. 実世界内の作業に対する遠隔指示

共同作業には様々な形態があるが、なかでも本研究では、遠隔地で実物体への作業を行う複数の作業員に対し、指示者が作業指示を行うという状況を想定し、その状況でも円滑に作業指示を行うことができるシステムを開発することとした。

実画像通信を利用した既存のグループウェアのほとんどは、固定式のコンピュータやカメラ、モニタを用いた情報伝達を目的としている。この場合、作業をする空間は固定カメラによって撮影される範囲に限られ、作業の参加者はモニタを通じて実存の物体を共有することになる。他の共有物があつたとしても、図やテキストのような平面的情報であることがほとんどである。

しかし、実世界に目を向けると、学校の授業や機械の組み立て、家具の修理など、作業の参加者が実在の物体を共有したり、自らの身体配置を相互行為的に決定したりする。そのため、本研究のように、実物体への物理的作業に対する指示を支援するシステムを開発することは、人間の生活上有益であると考えられる。

このシステムの設計において重要なことは、作業の参加者が作業中に行う相互行為において、文脈・身振り・発話などの資源がどのように使われ、彼らの身体がどのように組織化されるかを解明することである^{1),5),6),18)}。エスノメソドロギー^{*}から影響を受けた、会話分析や相互行為分析を行う研究者らは、こうした指示や共同作業の問題に強い関心を寄せている^{2),8)}。なかでも、作業の参加者が人間の行動を相互的に、継起的に組織化しているという事実に着目している。

たとえば、A が B に「これをとって」と発言するとき、同時に対象物（たとえば机の上の本）を指し示す。A の指し示しは、A の発言「これをとって」に関係する。そして、本に向いている A の指し示しを見た B は、本

のほうに体を向け「OK」と発言する。B は、この身体動作と発言によって、A の指し示しと発言に対する彼なりの理解を表現しているのである。その後、A は本に向けられていた A の手を引く。手を引くことによって、A は B を含む参加者に対して、B の理解を A が理解していることを表現している^{2),3)}。こうした理解の順序構造により、会話が相互的に、そして継起的に組織化されるのである。

また、エスノメソドロギー的な相互行為分析を行った Goodwin によれば、こうした場面では身体配置が重要である²⁾。対面の場合、指示が与えられると、作業員は共有する対象物を見ることができる位置に体を動かす。指示者は、共有する物体が作業員の陰にならないような位置に動き、作業員が指示を与えられている間に、作業員が指示者の身振りを見ることができるようにする。そして、作業員は作業をしながら、発話や身体表現を用いて理解したことを表現する。

このような、身体配置・発話・身体言語などの資源は、参加者が対面で会話しているときには、各人がお互いに自然に認識することができる。しかし、ビデオを介した情報伝達システムで遠隔共同作業をしなければならないときは、互いの認識が困難になり、自然なコミュニケーションができなくなる⁴⁾。

この問題を解決するためには、たとえ遠隔の共同作業であっても、対面で作業が行われているかのように、参加者の身体表現や身体配置を具体的に提示することができるシステムを構築するというアプローチがある¹¹⁾。

なかでも、身体配置については、以下に示すような「指示が成り立つための要件」を満たすように設計することが提案されている¹¹⁾。

- (1) 指示されている対象物が作業員に見えている。
- (2) 指示に用いる道具（指示デバイス）が作業員に見えている。
- (3) 作業員が指示デバイスと指示されている対象物を見ているところが、指示員に見えている。

図 1 は、指示が成り立つための要件を満たしている身体配置の例を表している。この要件を満たすように、作業対象やカメラ、システムなどを配置することになる。

また、複数の作業員に指示を与える場面も多くある。たとえば、大きな機械の製作や外科手術は、数人の作業員による協同作業である。よって、より実用的なシステムにするためには、複数の作業員を支援する場合を考慮することが大事である。

以上の考察により、筆者らは実世界における遠隔指

^{*} 会話や動作を含んだ参加者たちの相互行為を、具体的に扱う学問分野。

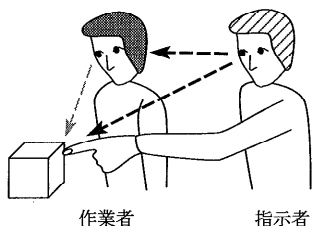


図 1 指示が成り立つための要件を満たす身体配置
Fig. 1 The body arrangement which satisfies the requirements to accomplish the instruction.

示を支援することを意図するシステムに対し、次の 3 つの要件を提示する。

- (1) 身体配置の要件：身体や道具は、指示者と作業者それぞれが他者の行為をモニタできるように、適切に配置されるべきである。
- (2) ジャスチャー表現の要件：指示者は言葉による表現のみならず、身体移動や身体表現（ジェスチャー）も自由に使えるようにすべきである。
- (3) 複数作業者の要件：以上のことが数人の作業者がいるときにも機能すべきである。ただし、本論文では、作業者が 2~3 人の場合を想定している。

これらの要件を満たす仮想的空間のことを、筆者らは「Embodied Spaces」と呼んでいる。

3. GestureLaser と GestureLaser Car

筆者らは、前章で述べたような Embodied Spaces を実現することを目標として、GestureLaser および GestureLaser Car と名づけた遠隔操作型レーザポインティングシステムを開発した。

レーザポインタは、現在、プレゼンテーションのためによく用いられる。話し手は、同時に多くの観衆に位置や空間を正確に示すことができるし、また、レーザ光を動かすことによって、方向を示すことができる。これらの表現は、実際の手振りに比べれば表現力が劣るが、言葉による簡単な説明を補うことによって、レーザ光は様々な意味を伝えることができる。よって、筆者らはポインティングデバイスとしてレーザ光を採用し、その照射位置を遠隔操作できるシステムを製作した。

3.1 GestureLaser

GestureLaser (図 2) は、筆者らが開発した遠隔操作型レーザポインティング装置である¹⁷⁾。GestureLaser は、2 つの直行した鏡で反射されたレーザ光線を作業空間に投影する。GestureLaser システムの主な特徴を簡潔に記述する。

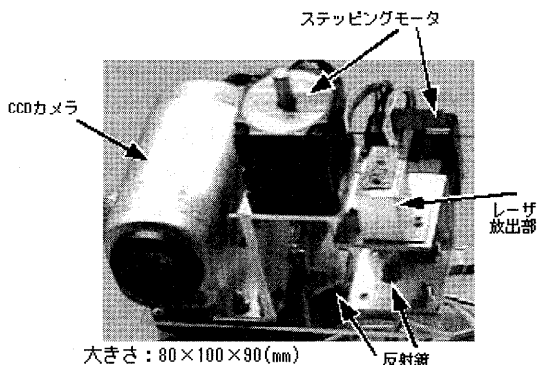


図 2 GestureLaser
Fig. 2 GestureLaser.

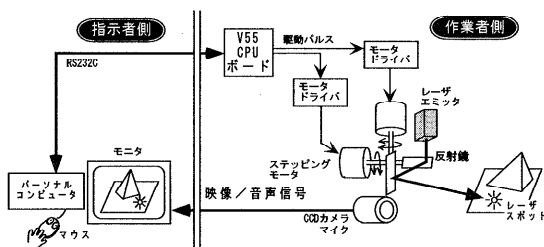


図 3 GestureLaser のシステム構成
Fig. 3 Structure of GestureLaser system.

(1) レーザ光をマウスカーソルのように動かすことができる。図 2 のように、GestureLaser には CCD カメラが搭載されているが、図 3 に示すように、指示者は CCD カメラからの画像によって、レーザ光だけでなく作業対象物の位置や作業者を見ることができ、それを見ながら、指示者はマウス操作を行う。マウスからの入力、指示者側のコンピュータを通じて GestureLaser のコントローラに送られ、ここでパルスに変換し、鏡を動かすアクチュエータに送られる。このとき、精密なポインティングができるように、アクチュエータにはステッピングモータ（オリエンタルモーター社 PMC33BHV2）を使っている。このモータの最小ステップ角は 0.72° で、それを 250 分割 (0.00288°) まですることができ、今回の実験では 20 分割にしたので、最小ステップ角は 0.036° である。これは、2m 先でレーザ光が 1mm の動きをするので、動きはほぼ連続的である。そのようにして、指示者はレーザ光をマウスカーソルであるかのように扱うことが可能である。

なお、レーザ光の照射角は、上下方向に 40° 、左右方向に 70° で、2m 先の空間では、上下に 1.4m、左右に 2.8m の範囲に照射することができる。

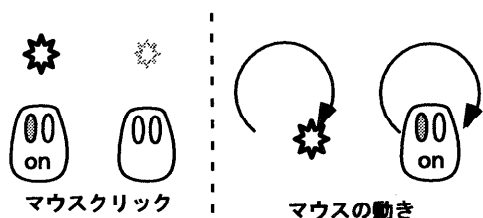


図4 レーザ光の制御

Fig. 4 Control of laser spot.

(2) カメラとレーザ光を独立に動かすことができる。筆者らが以前に開発した、遠隔共同作業支援システムの1つである GestureCam¹⁵⁾は、カメラとレーザポインタを3自由度を持つ遠隔操作型マニピュレータの上に搭載したシステムである。ただし、カメラとレーザポインタが同じマニピュレータ上に搭載されていたので、レーザ光の照射点をカメラと独立させて動かすことができなかった。よって、指示者がレーザ照射点を頻繁に動かそうとすると映像も動いてしまい、レーザポインタでは位置の指示しかすることができなかった。これと比較すると、GestureLaser のレーザポインタはカメラと独立しているので、カメラの動きが固定されていても、指示者はレーザ光を動かすことができる。

(3) レーザポインタを速い動作に追従させることができる。今までの実験で、指示者はマウスを非常に早く動かすことがあった。しかし、今回用いたステップモータは、高周波数入力に対応する^{*}ので、脱調の問題は特になかった。

(4) レーザ光の明るさを変えることができる。指示者がマウスの左ボタンを押すと、レーザ光は明るくなる。逆に左ボタンを押さないときは、明るさを低くすることができる。たとえば、マウスの左ボタンを繰り返し押すことによってレーザ光が点滅し、指示者の表現を強調することができる。この特徴は、レーザ光により多くの表現力を持たせている(図4)。

(5) 小型・軽量である。GestureLaser 本体は、10 cm 四方の立方体程度の大きさしかなく、重量は約 400 g と軽い。よって、動作機構への搭載が比較的容易である。

3.2 GestureLaser Car

筆者らは、GestureLaser を用いて多くの予備実験を行った。しかし、これらの実験では GestureLaser を固定して設置していたため、実世界上の作業に応用するには次のような問題を解決する必要があることに

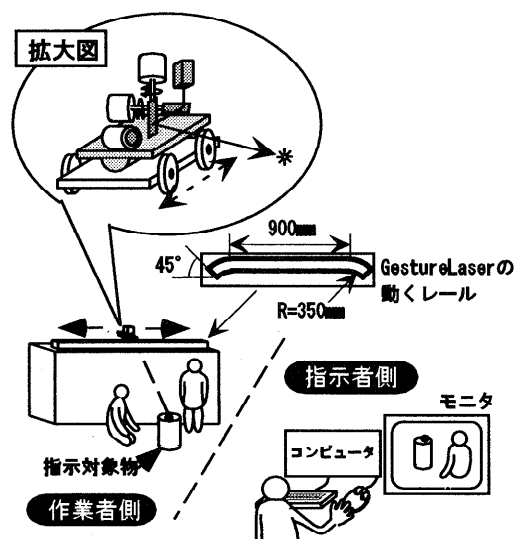


図5 GestureLaser Car を用いた参加者の配置の例

Fig. 5 Example of participants' arrangement with GestureLaser Car.

気づいた。

(1) ある対象物や領域が、他の対象物に隠れたり、カメラの視野の外にあって、指示者が見ることができない。

(2) 対象物または作業者にレーザ光が遮られて、要求する位置に指示できなくなることがある。

よって、GestureLaser の軽量性と可搬性を生かし、遠隔操作が可能な四輪の動作機構の上に、GestureLaser を搭載できるシステムを開発した。これを、GestureLaser Car と呼んでいる。この車は、レール上を水平に動くことができ、指示者のキーボードで操作することができる。図5は GestureLaser Car 使用の一例で、直線部と両端のコーナーを持つ 140 cm の長さのレールが、150 cm の高さに設置されている。このレール上で、GestureLaser の位置を動かすことにより、カメラの視点やレーザ光源の位置を変更させることが可能になる。作業者は、レールの前で指示を受けながら作業を行い、その間指示者はモニタで作業者を監視し、指示を与える。

4. 実験

GestureLaser Car の上に搭載された GestureLaser で、実世界における作業の遠隔指示をする場合、「身体と道具の配置」、「ジェスチャー表現」、「複数作業員」の各要件を満たしているかどうかを確認するために、実験を行った。

^{*} 最大入力周波数 = $4 \text{ kHz} \times (\text{ステップ角の分割数})$ で計算される。今回の実験では、ステップ角を 20 分割したので、80 kHz までの信号を入力することができる。

4.1 実験の設定

作業の参与者および GestureLaser Car の配置は、図5のとおりである。指示者には、システムの基本的な使い方がある程度練習した2人の学生を用いた。また、作業者には、作業に必要とされる知識をまったく持っていない7人の学生を用いた。作業は、パーソナルコンピュータへのPCIボードの取付け、および家具の組み立てである。家具として、食器棚（タテ 35 cm ×ヨコ 70 cm ×高さ 40 cm）と、カップボード（タテ 30 cm ×ヨコ 60 cm ×高さ 110 cm）の2つを用いた。PCIボードの取付けは、指示者と作業者が1人ずつ（1対1）のセッションを2回実行した。また、家具の組み立ては、1対1のセッションを1回と、作業者が2人のセッション（1対2）を2回行った。なお、それぞれのセッションでは、指示者と作業者の組は変えてある。指示者と作業者はそれぞれ別の部屋にいが、音響設備を通して自由に会話することができるので、指示者は会話による相互行為に、レーザによるポインティングをとまなわせることができる。

4.2 実験の解析

今回の実験で観察された結果について、以下の(1)～(3)の点から解析を行った。

分析方法には、エスノメソドロジ的な相互行為分析を用いた。具体的には、まず5つのセッション（各セッションの所要時間は約30～40分）の録画画像を観察し、特に重要と思われる相互行為の場面についてはトランスクリプトにして表現し（図12参照）、各人の身体動作や発言が他者の行動にどのように影響して、相互行為が組織化されているかを記述した。

ところで、本システムは作業を支援するシステムなので、システムを遠隔指示に応用することで作業のしやすさがどう変化しているかを評価することも重要である。よって、作業時間、言語数、マウスの操作回数やアンケートなどの定量的な解析をすることも考えられる。しかし、本論文では、共同作業における人間同士の相互行為をミクロに観察し、GestureLaser システムがその中でどのような役割を果たしているかを観察することに主眼をおいた。定量的分析を今後の課題としたその理由は、システム開発の初期段階として、まずは相互行為の中における GestureLaser システムの役割に注目しているからである。

4.2.1 解析(1)―参与者の身体配置

図6は、指示が行われているときの作業者と指示者の基本的な配置である。GestureLaser のカメラは作業者の背後にあり、指示者は作業者と対象物とレーザポインタを同時に視野に入れている。このようにし



図6 指示者（右上）と作業者（左下）の基本的身体配置
Fig. 6 The basic body arrangement of instructor (upper-right) and operator (lower-left).



図7 GestureLaser Car 動作時の指示者モニタ
（左）動作前 （右）動作後

Fig. 7 Instructor's monitor when GestureLaser Car moved
(left) before of movement (right) after.

て、作業者がレーザポインタや指示対象物を見ることができるだけでなく、作業者がこういう状況にあることを指示者が認識することができるので、指示が成立する。このように、指示が成り立つための要件を満たしている身体配置を「基本的配置」と呼ぶことにする。

一方、基本的配置でない場合には指示が成り立たないので、基本的配置を再び構成しようとする指示が行われた。この実験で観察された方法の1つは、指示者の視点は動かすことなく、発言やレーザ光の動きを用いて、「こっちのほうを向いて」「これをどけて」などのような作業者の身体や物体の移動指示をし、基本的配置を構成させる方法である。

また、指示者が GestureLaser Car を動かすことによって、基本的配置を構成する方法もある。たとえば、図7左のように、指示したい対象物が手前の物体に遮られて直接指示できない場合には、指示者は物体を避けて対象物への指示を可能とする位置に GestureLaser Car を移動させた（図7右）。こうして、必ずしも作業者や物体を移動させる指示をしなくとも、指示者は作業空間の広い領域にある対象物を見ることができ、レーザによる指示が可能になった。

ただし、図7右で、右の作業者は GestureLaser Car の動きを見た後、身体を動かし、レーザ光が照射されるであろう場所を見ることができるよう、基本的

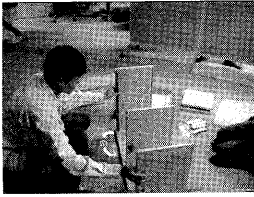


図 8 物体の回転指示

Fig. 8 The instruction of rotation.

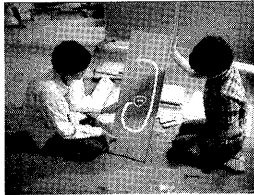


図 9 面の表示

Fig. 9 The indication of the surface.

配置を再び構成した。すなわち、基本的配置の構成は、GestureLaser Car のみの機能というよりも、参与者同士の相互行為によるところが大きい。その中で、GestureLaser Car は基本的配置の構成を助ける役割を果たしていると考えられる。

4.2.2 解析 (2)—レーザ光による非言語情報の表現

GestureLaser のレーザ光の動きや点滅によって、身振りや手振りなどの意味に近い表現をすることができた。なかでも、今回の実験で指示者が行った表現のうち、作業者が指示を瞬時に理解を表示していた実例を以下に列挙する。

(1) レーザ光の動きによる表現

図 8 は、対象物を水平に回転するように指示している場面である。指示者は、「こっちのほうに回して」と発話するとともに、図 8 の矢印のように、床に弧を描くようにレーザを動かした。この発話が終了して約 0.5 秒後、作業者は物体を指示方向に回転させた。その作業が完了して約 1 秒後、指示者は次の指示に移行した。

また、図 9 では、指示者が「板のこちら側を…」と発話しながら、レーザ光を面上で何度も回転させることで、面を指示していることを表現した。この発話が終了して約 0.3 秒後に、2 人の作業者はうなずき、理解を示した。ほかにも、指示者は物体の溝や辺をなぞったり、形を描画して部品や工具を表現するなどして、現在指示している対象物や場所などを示す場面が観察された。

(2) 点滅の使用

対象物の動作をとまなう作業は、上下左右に対象物を動かすことだけに限らず、対象物を押したり穴を開

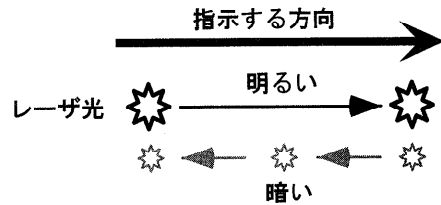


図 10 方向指示の時の点滅と動きの同時使用

Fig. 10 The use of blinking and movement at the same time when instructor indicates the direction.

けたりするような作業もあるが、そのような場合にはレーザ光の点滅が多用された。たとえば、ねじを入れる穴の場所を示す場面では、指示者はねじをはめこむ位置でレーザ光を点滅させ、「ここ」という指示語をとまわせながら指示を行っていた。点滅使用の例は何度か観察されたが、観察されたどの場面でも、指示が終了してから 0.3~0.5 秒の後に、作業者が了解を示す発話を行っていた。

(3) 点滅と動きの同時使用

レーザポインタによる表現が作業者に伝わっていない場合、指示者がレーザスポットを何度も繰り返し動かす場面があった。しかし、ある方向を指示しているつもりでも、レーザポインタによる表現を何度も繰り返すと、どちらの方向への指示なのかが分からなくなることがあった。

そこで、指示する方向に動かすときは左クリックを押してレーザ光を明るくし、そうでないときは左クリックを離してレーザ光を暗くすることで（図 10）、指示方向をより明確にしていた場面が観察された。この指示が終了してから 0.5 秒後に、作業者が指示方向を指差ししており、理解を示す行動と考えられる。

(4) レーザ光の表現では難しかった例

カメラに対して奥行き方向への指示は、レーザ光の表現では困難な場合があった。たとえば、横たわっている物体をカメラ側に起こすという指示を行った場面で、指示者は「こっち側に起こして」と発話し、物体に対して上下にレーザ光を動かした。しかし、作業者は理解することができず、指示者は口頭で指示を行っていた。このように、レーザ光は万能ではなく、表現に限界があることも分かった。

4.2.3 解析 (3)—複数の作業員への指示

ここでは、作業者が複数人いる場合における指示の例を詳細に解析し、指示者の表現に対する理解を作業者がどのように示しているか、そして指示者はこれをどう認識しているかを明確にしたい。

図 11 は、作業員 O_1 (図 11 左側) と O_2 (図 11 右側) が持っている小さな三角形の部品を取り付ける位

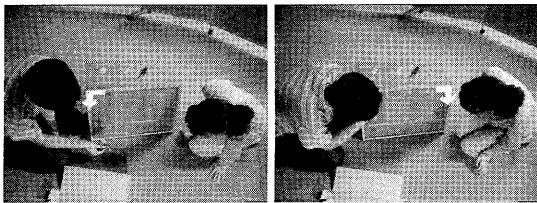


図 11 カップボードの角に指示をする場面

Fig. 11 The scene of instruction to the corner of the cupboard (the arrow shows a trace of laser).

置（カップボードの左右上側の角）を、指示者 I_1 が作業者に指示しようとしている場面である。そのときのやりとりを、図 12 のトランスクリプトに表した。この図は、左から右に時間が推移している。

トランスクリプトの (1) の時点では、 I_1 は「ここ」と言いながら、レーザでカップボードの左上の角をなぞっている。しかし、 O_2 だけがレーザ光を見ており、体を曲げてカップボードの反対側を向いている O_1 はスポットを見る状態ではなかった。すると、(2) の時点で I_1 は「ここ」という言葉をともなって、同じ角を再びなぞっている。指示が再実行された後すぐ、 O_1 は自分の体をレーザ光の照射方向に向けた。この身体動作によって、 O_1 は指示を聞くことができる体勢に入り、身体配置の要件が満たされ、指示を行うことが可能になっている。

しかし、(3) の時点で I_1 は左から右にレーザ光を動かし、「ここ」という発言とともに右の角をなぞり始めた。この動作は、 O_1 が身体の向きを変え、 O_1 の頭によってレーザ光が遮られたことによるものと見られる。

すると、(4) の時点で O_1 と O_2 がほぼ同時に「ああ」と、指示を理解したことを示す発言をした。 O_1 と O_2 が同時に発言をしたことは、レーザ光の直接照射による指示が複数の作業者に同時に情報を伝達していることを表している。

そしてすかさず、(5) の時点で I_1 は「ここここに入れるような感じですね」と答えながら右の角をもう一度なぞるが、この発言は指示に対する作業者の理解を I_1 が理解していることの表示であると考えられる。互いが理解していることを他の参与者に表示することで、指示が完了したことを全員が理解し、次の指示への移行が実現するのだが²³⁾、GestureLaser システムが、そうした理解の表示や、それに対する他者の認識を表示するための資源となる可能性があるということが、この例で示された。

4.3 ま と め

以上の分析結果は、実空間上での遠隔共同作業を支

援するための 3 つの要件を、状況の変化に呼応した相互行為の中で、GestureLaser システムが満たす可能性があることを示唆している。

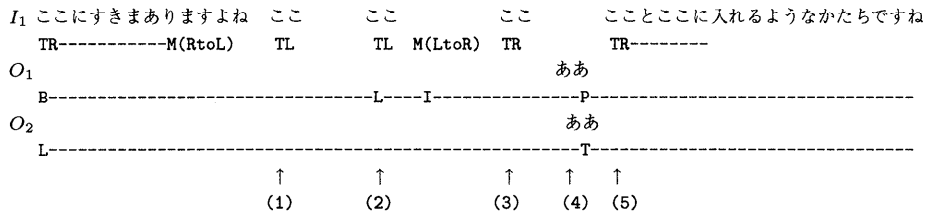
身体配置の要件は、実験の解析 (1) で述べたように、参与者同士の相互行為によって基本的配置を構成することで満たされている。そして、GestureLaser Car によってもたらされる広範囲性と可動性が、基本的配置の構成を手助けしている。

また、実験の解析 (2) は、GestureLaser による動きや点滅を用いた様々な表現が、人間の身体表現に近い意味を持ち、ジェスチャー表現の要件を満たす可能性であることを示した。GestureLaser の表現手段はレーザ光という「点」であることから、他の遠隔協同作業システムよりもはるかに表現力が劣ると思う人がいるかもしれない。前述したように、奥行き方向に対しての指示は困難で、うまく指示できない場面も見られた。しかし、指示者はレーザスポットの動きや点滅という制限された表現の種類を、言語表現とともにうまく使って、予想以上に表現を創造していたことが観察された。

これらのレーザ光の動きは、まったく恣意的にある意味を与えられるのではない。たとえば、指で何度も指示対象を指すという動作に対し、指示者はレーザスポットの点滅という動作に対応させており、強調の意味を示した。また、指を回転させるという動作に対しては、レーザスポットの回転に対応させ、回転方向の指示であることを示した。このように、レーザ光の動きは、実世界で指示をするために行う身体動作や身体表現と相関性を保っている。

ただし、言語表現は身体表現の意味を決定するのに重要な役割を持っていることを忘れてはならない。レーザによる表現は、指示者の言語表現に付加的表現を与えるという意味では、十分良いと思われる。

さらに、解析 (3) で示したように、GestureLaser システムは作業領域内の作業者それぞれに同時に情報を伝達したりすることが可能で、複数作業者の要件を満たしていることが分かる。個々の作業者に異なる指示を与えるためには、作業領域内の作業者それぞれへの指示が可能で、指示がどのように与えられているかを指示者と作業者が観察することができなければならない¹²⁾。また、指示の過程における作業者間の作業の不一致を起こさないためには、一方の作業者に与えられている指示が、他の作業者にも見えていなければならない。レーザ光を作業空間に直接照射することができる GestureLaser システムが、この問題を解決する糸口となりうることは、解析 (3) で示したとおりである。



<凡例>

TL:左の角をなぞる **TR**:右の角をなぞる **M(LtoR)**:左(L)から右(R)にレーザ光を動かす
B:姿勢の移動(レーザ光は見えない) **L**:レーザ光を見る **I**:作業者がレーザ光の照射場所を遮る
P:部品を角に取り付ける **T**:角を指で触る **-**:動作の継続

図 12 図 11 でのトランスクリプト

Fig. 12 Transcript on Fig. 11

ただし、人数が増えればレーザ光が遮られやすくなってしまう。これに対しては、GestureLaser システムの動作機構を改良することによって(移動ロボットに搭載する、高さ方向を可変にするなど)、ある程度は改善できると考えている。その可能性は、解析(1)で取り上げた GestureLaser Car の動作によって示されている。

このようにして、GestureLaser システムは、実世界上の作業の支援に役立つ可能性を持っている。

5. 他のシステムとの比較

実験結果により、GestureLaser システムの有用性を示したが、限界があることも事実である。ここでは、GestureLaser と既存のシステムを比較することによって、利点と欠点を定性的に考察し、システムを改良するときに考慮すべきことを明らかにしたい。

まず、身体表現を伝達することができる既存の遠隔共同作業システムを簡単に説明する。VideoDraw²⁰⁾と TeamWorkStation⁹⁾は、共有されたデスクトップの表面の上に参加者の手の画像をオーバーレイする種のものとしては最初のシステムである。また、ClearBoard¹⁰⁾は、描画可能な共有面の上に参加者の上半身をオーバーレイさせ、アイコンタクトやゲイズアウェアネスを有効に支援するように改良されたシステムである。

Double DigitalDesk²¹⁾は、1組のビデオプロジェクタとカメラがそれぞれの机の上に取り付けられている。カメラはその局所的なデスクトップから画像を撮影し、プロジェクタが遠隔地のデスクトップからの画像を投影する。このようにして、ローカルの机の上にある実物体と手振りは遠隔地の机に投影され、逆もまた同様に行われる。

さらに、HMD (Head Mounted Display) と Head

Mounted Camera を使ったシステム(以下、HMD システムと呼ぶ)も、実世界指向型システムとして提案されている。これは、作業者の頭部に取り付けたカメラからの映像に、指示者の手やカーソルをオーバーレイさせて、作業者が装備している HMD に映し出すシステムである^{13),14)}。

これら 3 つのシステムと GestureLaser システムを、以下の 5 つの視点から比較してみる。

5.1 表現力

GestureLaser システムでは、前述したように発言をともなって指示者はレーザ光を動かしたり明るさを変化させたりすることで様々な表現を伝えることができた。ただし、もし実際の手の画像を使って指示することが可能ならば、指示者にとってより使いやすくなるし、作業者にとってより理解しやすくなるのは明らかで、レーザ光による表現力には限界がある。

5.2 指示デバイスの見やすさ

実世界上の作業の遠隔指示を支援するためには、作業者が容易に認識できるように指示を表現することができるシステムである必要がある。VideoDraw と ClearBoard は、基本的に机上のみに作業空間が限定されるが、TeamWorkStation のような技術が採用されれば、実世界上の作業の遠隔指示を与えるシステムとして使うことが可能である。しかし、対象物はモニタ上で指定されるので、作業者は指示をもとに実世界にある実物体を探さなければならない。もし指示した物体の近くに似た物体が存在すると、正しいものを選ぶのが困難である¹⁶⁾。

HMD システムは、HMD 上に指示デバイスが現れるので、作業者は容易に認識できる。

Double DigitalDesk のような、プロジェクタを用いたシステムは、作業領域が平面である必要がある。なぜなら、物体が散在している 3 次元空間に投影する

表 1 GestureLaser システムと他システムの比較
Table 1 Comparison of GestureLaser system with other system.

	VideoDraw など	Double DigitalDesk	HMD システム	Gesture Laser
表現力	良	良	良	やや良
指示デバイスの 見やすさ	やや良	やや良	良	良
作業領域	狭	狭	広	やや広
作業者の数	1 人	1 人	1 人	多数
安全性	良	良	要注意	要注意

と、(1) 焦点が合う距離が短いため投影画像がぼやける場所がある、(2) 投影する面が投影方向と直角でないと画像がゆがむ、(3) 作業者が作業対象とプロジェクタの間に入ると影ができる、などの問題が生ずるからである。

一方、GestureLaser の場合は、レーザスポットが投影されているだけなので、(1) と (2) の問題が緩和される。また、作業者がレーザ光を遮ったときは、GestureLaser Car によって位置を変えることができるので、(3) の問題も緩和している。しかし、将来小さくて軽いプロジェクタが開発されれば、動作機構上にそれを搭載することによって、以上の問題を解決することができるかもしれない。

5.3 作業領域の広さ

GestureLaser の場合、軽く小さく設計されているので、GestureLaser Car によって作業領域が広がる。しかし、現在のシステムではレールに沿ってしか動くことができないので、背後から対象物を指し示すことしかできない。

HMD システムは、作業者が動き回ることによって作業領域が広がる。その他のシステムは、カメラとディスプレイの位置が固定されているので、作業領域に限界がある。

5.4 1 人以上の作業者をともなう協同作業の支援

作業が増えると、Double DigitalDesk のような投影システムの場合、作業者が投影画像を妨害する確率が高くなり、より不便になると考えられる。また、HMD システムでは、作業者それぞれに HMD を装着させ、それぞれに指示デバイスを投影することになるので、指示者の負担が増大する。

一方、GestureLaser は作業者の視角とは独立に対象物へ直接指示ができ、同時に数人の作業者へ正確な指示を与えることができる。もちろん作業者による妨害の問題もあるが、GestureLaser Car を使えばある程度回避することができる。

5.5 安全性

HMD システムの場合、HMD を長時間装着するこ

とによる人体への影響が指摘されており²²⁾、長時間の作業にはあまりふさわしくない。また、レーザポイントを使うことの大きな問題の 1 つは、強いレーザ光が目に入ると危険であるということである。そのようなアクシデントはまだ起こっていないが、より弱い出力のレーザまたは通常の光線を使うことも考慮しなければならない。

5.6 比較のまとめ

表 1 は、既存のシステムと GestureLaser システムとの比較をまとめたものである。表が示すように、GestureLaser システムは 4 つの側面（表現力、可視性、作業領域、作業者の人数）を適度に支援している。したがって、複数人の作業者をともなう実世界内の実物体に対する遠隔指示を支援するという条件においては、GestureLaser システムは他のシステムに比べて有用である。

もちろん、GestureLaser システムは万能ではなく、参加者の数や仕事の種別、環境などの条件によって、有効に遠隔指示を支援するシステムは異なってくる。本論文の目的は、GestureLaser が最善のシステムであることを主張するのではなく、システムを設計するときに考慮すべきこと、そして改良されるべき機能を明確にすることである。したがって、次のシステムの設計のために、今回の比較結果を有効に利用していく。

6. 結論と今後の展望

GestureLaser と GestureLaser Car は、実世界上の実物体に対する作業の遠隔指示を支援するための要件を満足する可能性が示された。また、今回の実験のように、システムの利用者が 1 人ではない場合に、相互行為における利用のされ方を観察する方法が、従来のアプローチの補完的役割を果たしていることも注目すべきである。

GestureLaser システムの今後の展望としては、まず、作業対象物の陰に隠れている物体への指差しを十分にできるほどの可動性を持たせることである。GestureLaser は小型・軽量なので、PRoP¹⁹⁾ のような自

立移動ロボットに搭載することによって、動作範囲を拡大できる。また、GestureLaserを上下に動かす伸縮機構も現在開発中である。また、手動マウスのみを用いた表現だけでは、理解するのが容易でないことがあるので、高速のレーザ動作によって矢印や円のような、単純な表意文字を描く機能を現在開発中である。

また、言語表現と身体表現の関係というのも重要な課題である。本論文では、指示者の身体表現の仲介をすることに焦点を置いてきたが、言語表現が身体表現の意味を決定するのに重要な役割を持っていることが再確認された。したがって、コミュニケーションシステムを設計するときには、言語表現と身体表現をどのように、およびどの程度伝達するべきであるかについて、より明らかにする必要がある。

そして、システムの成熟度にともない、他の評価手法も併用する必要があるだろう。今回は、参加者の相互行為など定性的な側面のみに議論をとどめ、作業時間など定量的側面には触れなかったが、今後行う実験においては、定量的分析を行っていく予定である。

このようにして今後改良を重ね、遠隔作業指示に有効なシステムを構築するとともに、様々な遠隔作業指示の場面に試用することで、共同作業における相互行為のメカニズムの解明を目指す。

謝辞 本研究は、通信放送機構ならびに沖電気工業(株)の支援による。また、本研究に使用したステッピングモータは、オリエンタルモーター(株)の提供による。感謝の意を表したい。

参 考 文 献

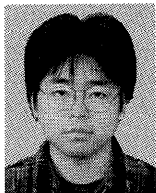
- 1) Dourish, P., Adler, A., Belloti, V. and Henderson, A.: Your Place or Mine? Learning from Long-Term Use of Video Communication, EuroPARK Technical Report, EPC-1994-105, Rank Xerox EuroPARK, UK. (1992).
- 2) Goodwin, C.: Professional vision, *American Anthropologist* 96, pp.606-633 (1996).
- 3) Goodwin, C.: *Pointing as Situated Practice*, presented at the Max Planck Workshop on Pointing Gestures (1998).
- 4) Heath, C. and Luff, P.: Disembodied Conduct: Communication through video in a multimedia environment, *Proc. CHI'91*, pp.99-103 (1991).
- 5) Heath, C. and Luff, P.: Media Space and Communicative Asymmetries: Preliminary Observation of Video-Mediated Interaction, *Human Computer Interaction*, Vol.7, No.3, pp.315-346 (1992).
- 6) Heath, C., Luff, P. and Sellen, A.: Reconsidering the Virtual Workplace: Flexible Support for Collaborative Activity, *Proc. ECSCW'95*, pp.83-89 (1995).
- 7) Heath, C.: The Analysis of Activities in Face to Face Interaction Using Video, *Qualitative Sociology*, Silverman, D. (Ed.), Sage, London, pp.183-200 (1997).
- 8) Heritage, J.: Conversational Analysis and Institutional Talk, *Qualitative Sociology*, Silverman, D. (ed.), Sage, London, pp.161-182 (1997).
- 9) Ishii, H. and Miyake, N.: Toward an Open Shared Workspace: Computer and Video Fusion Approach of Team WorkStation, *Comm. ACM*, Vol.34, No.12, pp.37-50 (1991).
- 10) Ishii, H. and Kobayashi, M.: ClearBoard: A Seamless Medium for Shared Drawing and Conversation with Eye Contact, *Proc. CHI'92*, pp.525-532 (1992).
- 11) Kato, H., Yamazaki, K., Suzuki, H., Kuzuoka, H., Miki, H. and Yamazaki A.: Designing a Video-Mediated Collaboration System Based On a Body Metaphor, *Proc. CSCL'97*, pp.142-149 (1997).
- 12) Kendon, A.: *Conducting Interaction: Patterns of Behavior In Focused Encounters*, Cambridge Univ. Press (1990).
- 13) Kraut, R., Miller, D. and Siegel, J.: Collaboration in Performance of Physical Tasks: Effects on Outcomes and Communication, *Proc. CSCW'96*, pp.57-66 (1996).
- 14) Kuzuoka H.: Spatial Workspace Collaboration: A SharedView Video Supported System for Remote Collaboration Capability, *Proc. CHI'92*, pp.533-540 (1992).
- 15) Kuzuoka H., et al.: GestureCam: A Video Communication System for Sympathetic Remote Collaboration, *Proc. CSCW'94*, pp.35-43 (1994).
- 16) Kuzuoka H., et al.: Can the GestureCam be a Surrogate?, *Proc. ECSCW'95*, pp.181-196 (1995).
- 17) Kuzuoka H., et al.: *GestureLaser: Supporting Hand Gestures in Remote Instruction*, Video Program of CSCW'98 (1998).
- 18) Nardi, B., Schwarz, H., Kuchinsky, A., Lechner, R., Whittaker, S. and Sclabasi, R.: Turning Away from Talking Heads: The Use of Video-as-Data in Neurosurgery, *Proc. INTERCHI'93*, pp.327-334 (1993).
- 19) Paulos, E. and Canny, J.: PRoP: Personal Roving Presence, *Proc. CHI'98*, pp.296-303 (1998).
- 20) Tang, J. and Minneman, S.: VideoDraw: A Video Interface for Collaborative Drawing,

Proc. CHI'90, pp.313-320 (1990).

- 21) Wellner, P.: Interacting with the Paper on the DigitalDesk, *Comm. ACM*, Vol.36, No.7, pp.87-96 (1993).
- 22) 杉原敏昭, 宮里 勉: ヘッドマウントディスプレイにおけるヒューマンファクタ上の諸問題, パーチャルリアリティ学会誌, Vol.3, No.2, pp.126-131 (1998).
- 23) 山崎敬一, 山崎晶子, 加藤 浩, 鈴木栄幸, 三樹弘之, 葛岡英明: 指示・道具・相互性—遠隔協同作業システムの設計とそのシステムを用いた人々の協同作業の分析, *認知科学*, Vol.4, No.1, pp.51-63 (1997).

(平成 11 年 3 月 31 日受付)

(平成 11 年 10 月 7 日採録)



小山 慎哉

1995 年, 仙台電波工業高等専門学校情報工学科卒業。現在, 筑波大学大学院博士課程工学研究科に在学中。修士(工学)。主として遠隔作業支援を目的としたグループウェア

の研究に従事。



葛岡 英明 (正会員)

1992 年, 東京大学大学院情報工学専攻博士課程修了。工学博士。同年, 筑波大学構造工学系(現機能工学系)講師, 現在に至る。主としてグループウェア, 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。



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。



山崎 晶子

東京都立大学大学院社会科学研究所社会学専攻修士課程修了。現在, 埼玉大学教養学部非常勤講師。社会学理論の研究に従事。



加藤 浩 (正会員)

1983 年, 慶應義塾大学大学院工学研究科(電気工学専攻)修士課程修了。同年, NEC に入社し, 教育システムの研究開発に従事。現在, NEC C & C システム市場開発推進本部に所属。専門分野は教育工学, 認知科学。



鈴木 栄幸 (正会員)

1988 年, 慶應義塾大学大学院社会学研究科修士課程修了。同年, NEC に入社し, 教育システムの研究開発に従事。現在, NEC C & C システム市場開発推進本部に所属。専門分野は教育工学, 認知科学。



三樹 弘之 (正会員)

1985 年, 東京理科大学大学院修士課程修了。工学修士。1990~92 年, カリフォルニア大学サンディエゴ校認知科学科訪問研究員。現在, 沖電気工業(株)マルチメディア研究所勤務。主に CSCW, 認知工学, ならびにユーザビリティ評価技術の研究に従事。