

ロボットを介した遠隔コミュニケーションシステムにおける エコロジーの二重性の解決：頭部連動と遠隔ポインタの評価

葛岡 英明[†] 山崎 敬一^{††} 上坂 純一^{†††}

本研究はロボットを介した遠隔作業指示システムの開発を目的としている。このような遠隔コミュニケーションシステムではエコロジーの二重性の問題が生じる。本論文ではこの問題を解決するための設計ガイドラインを提案し、これに基づいて開発した GestureMan-3 を紹介する。GestureMan-3 は、遠隔地の指示者の頭部の動きに連動してロボットの頭部が動作する点、レーザポインタによる遠隔ポインティングのためのユーザインタフェースとして、タッチパネルを採用した点が特徴である。このシステムの有効性を評価するために、定量的実験と定性的な実験を実施し、考察を行った。

Mediating Dual Ecologies of a Robot Mediated Communication System

HIDEAKI KUZUOKA,[†] KEIICHI YAMAZAKI^{††} and JUN'ICHI KOSAKA^{†††}

The aim of our study is to investigate systems for supporting remote collaboration using mobile robots as communication media. It is argued that the use of a remote-controlled robot as a device to support communication involves the problem of dual ecologies. In designing a robot as a viable communication medium, it is essential to consider how these ecologies can be mediated and supported. In this paper, we propose design guidelines to overcome the problems inherent in dual ecologies, and describe the development of a robot named GestureMan-3 based on these guidelines. The characteristics of the system are 1) robot's head motion is synchronized with a remote instructor's head motion, 2) a touch panel is used as a user interface for an instructor to control a laser pointer. A qualitative experiment and a quantitative experiment revealed the effects and some problems of the system.

1. はじめに

かつて、テレビ会議システムのような実画像通信システムに期待されたのは、表情や身振り手振りといった非言語的情報の伝達である。しかし、コミュニケーションは、非言語情報、発話、そして環境が相互に関連しあうことによって意味を形成しており、1つだけを取り出しても意味をなさなくなってしまうことが指摘されてきた⁶⁾。この点で、実画像通信を介したコミュニケーションでは、身振り手振りが行われる環境とそれが提示される環境が異なるために、環境との相互関係が崩れ、ジェスチャや発話の意味が対話者にうまく伝わらないことが指摘されてきた^{1),3)-5)}。たとえば、テレビモニタに表示された物体に対して指さしをして

も、対話者はそれが自分の環境のどの物体に対する指さしなのかはほとんど分からないのである。

筆者らはこの問題を解決するために、ロボットをコミュニケーションメディアとして利用することを提案した。そして、システム開発と分析を繰り返す、いわゆる繰返し手法 (iterative approach¹⁵⁾) によって、GestureCam⁹⁾ に始まるいくつかのロボット^{12),18)} を開発してきた。これらの研究では、ロボットがどのような機能を持つべきかということに着目してきた。しかし、実験に対するエスノメソドロジ的な分析¹⁹⁾ の結果、ロボットの遠隔操作者用のインタフェースを適切に設計することも同様に重要であることが分かってきたのである¹³⁾。

本論文では、筆者らの最新のロボットである GestureMan の改良過程を紹介することによって、後述するエコロジーの二重性の問題を解決するためのガイドラインを提案する。そして、改良された GestureMan の評価実験を通して、エコロジーの二重性を考慮することの重要性和ガイドラインの有効性を示す。

[†] 筑波大学
University of Tsukuba

^{††} 埼玉大学
Saitama University

^{†††} 富山富士通
Toyama Fujitsu

2. 二重のエコロジー

2.1 遠隔コミュニケーションにおけるエコロジー

本来、エコロジー（生態学）とは、生物とそれを取り巻く環境との相互関係を研究する学問である。しかし Gibson が動物による環境の知覚（特に視覚）と、それによって生じられる行動との関係（アフォーダンス）を論じた生態学的アプローチ（ecological approach）を提案すると²⁾、ユーザインタフェースにおいても生態学的アプローチが論じられるようになった⁷⁾。

一方 Gaver は、遠隔コミュニケーションシステムのアフォーダンスについて考察した結果¹⁾、一方の空間にいる参加者の非言語的表現（たとえば視線）が、テレビカメラやモニタ等のメディアに媒介されることによって、他方の参加者に正しく伝わらなくなってしまうことを指摘した。彼はこの現象を、メディアでつながれた空間の非等価性（anisotropism）と呼んだ。

筆者らが主張するエコロジーの二重性の問題は、この Gaver の主張に立脚したものである。本研究では、ロボットの操作者とそのユーザインタフェース環境との間の相互行為の系と、ロボットと対話者、そしてそれらが存在する環境の間の相互行為の系という、環境と行為の系が2つ存在することを強調するために、「エコロジーの二重性」と呼んでいるのである。そして本論文は、コミュニケーションにおける継起性や予期と、エコロジーの二重性との関係に注目して、遠隔コミュニケーションシステムの設計指針と、その具体的なシステム例を提示することを目的としている。

次節では、筆者らが以前開発した GestureMan-1 と GestureMan-2 を紹介することによって、エコロジーの二重性の問題を具体的に説明する。

2.2 ロボットメディアによるエコロジーの二重性

GestureMan-1 と GestureMan-2 は筆者らが開発した遠隔操作型ロボットである（図1）^{12),13)}。これらを設計した際、筆者らはロボットにどのような機能を持たせるかということに重点を置いていた。

GestureMan は高さ約1.2mの移動型のロボットで、頭部には3眼カメラとレーザポインタが搭載されていた。指示者（以後、遠隔地からロボットを操作しながら作業指示をする参加者を「指示者」と呼ぶ）は3面ディスプレイの前に座り、ジョイスティックを使ってロボットを操作した（図2）。ロボットの特徴の1つは、遠隔制御型のレーザポインタを持っていることであった。レーザの照射位置はマウスで操作できるようにしたため、指示者は作業者（以後、ロボット側において、作業指示を受けながら作業をする参加者を「作業者」

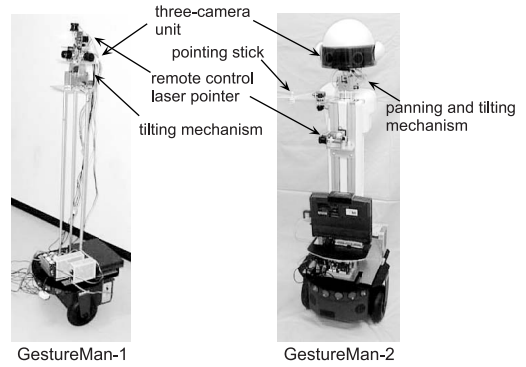


図1 GestureMan-1 と GestureMan-2

Fig.1 GestureMan-1 and GestureMan-2.



図2 頭部の3眼カメラユニット（右）と3面ディスプレイ（左）
Fig.2 Three camera unit (right) and three display system (left).

と呼ぶ)の対象物を容易に指示できるようになった。

GestureMan-1 と 2 の違いは、2 の方が志向（身体や視線の向き）を示すより多くの資源を装備していたことである。具体的には以下のとおりである。

- 頭部の動きに水平方向の自由度が追加された。
- レーザポインタが胴体に搭載されたので、カメラの動きとは独立して制御できるようになった。
- レーザの照射方向と同じ方向を向くように制御されたさし棒を肩部に取り付け、作業者がレーザを見つけるための補助とした。

GestureMan を利用した研究を進めるうちに、筆者らはエコロジーの二重性という問題を認識するようになった¹³⁾。このシステムの場合、指示者側のエコロジーと作業者側のエコロジーが存在する。前者は、指示者とロボット操作のインタフェースによって構成され、後者は作業者、ロボット、そして周囲の環境によって構成される。

ロボットが効果的なメディアとなるためには、システム設計者は作業者側だけでなく指示者側のエコロジーの重要性を認識しなければならない。たとえば、GestureMan-1 と 2 の場合、ロボットの胴体と頭の動作はジョイスティックでコントロールし、遠隔制御型レーザポインタはマウスでコントロールした。人間の

頭の動きや指さしといった動作は、ほとんど無意識的な動作であるにもかかわらず、GestureMan システムの場合には、指示者はロボットの頭や指さしを意識的に操作しなければならなかったのである。さらに、指示者はジョイスティックとマウスを利き手のみで操作しがちであったため、頭と指さし動作は交互にしか行われなかった。したがって、ロボットの動作は人間に比べてもたついたものとなってしまった。

一方、筆者らは、指示者がユーザインタフェースに対して無意識的な行為を行っていることに気づいた。まず、3画面ディスプレイが目の前で左右に広がって設置されていたため、遠隔の環境を観察するときに自然に頭を左右に回転させていた。しかし、この動きはロボットの動きに反映されなかった。さらに、しばしば指示者がディスプレイに直接指さしをしてしまうという動作が見られたが、これもロボットの動作には反映されなかった。指示者側環境では、指示者が無意識にユーザインタフェースに対して行為をしてしまうというエコロジーが存在していたのである。そうした行為は、本来継起的なコミュニケーションのための有効な資源であるにもかかわらず、作業側のエコロジーには反映されなかったのだ。この問題を解決するために、筆者らは以下の設計ガイドラインを提案する。

- G1 コミュニケーションに関する知見に基づいてロボットが提示すべき行為を決定する。
 - G2 指示者がその行為を自然に発生するようなユーザインタフェースを設計する。
 - G3 指示者のその行為を検出する方法を見つける。
 - G4 指示者の動作をロボットの動作へと変換する。
- 最初のガイドライン G1 に対しては、過去の研究に基づき、ロボットに対して以下の要件をあげる。
- R1 志向の移動や、空間または対象物に対する参照といった行為を認識できるような資源を提供する。
 - R2 対話者の位置、志向、そして参照の範囲を相互に観察できるようにする。
 - R3 コミュニケーションの資源となる音声、手振り、胴体、頭部の志向の伝達に遅れが生じないように設計する。行為の伝達に遅れがあると、参加者の相互行為の継起性が保てなくなる^{14),16)}。

要件 R1 に関しては、筆者らは特に頭部の志向に着目した。ある参加者の頭部の志向の変化は、その参加者の注目点の移動を表し、対話者はこれを見ることによって、ある対象に関する話題が終了したことから、次の対象が何かを予想することができるのである¹³⁾。

要件 R3 の継起性は、実は要件 R1, R2 とも深く関

係する¹⁷⁾。たとえば、A が B に「これをとって」と指示をする場面を考える。A はまず、とってほしい対象物（たとえば机の上の本）の方向を見る。すると B はこの視線の動きを観察することによって、A が本の付近に興味を持っていることを予期し、その方向に視線を向ける。直後に A は「これをとって」と発話し、同時に本を指し示す。このとき A の指さしは A の発言「これをとって」に関係づけられる。そして、本に向いている A の指さしを見た B は、本の方に視線と身体を向け「OK」と発言する。B は、この身体動作と発言によって A の指さしと発言に対する理解を表現する。次に A は本に向けられていた自分の手を引く。これによって、A は B に対して、B が理解したということ A が理解したことを表現する。こうした順序化された時間的構造により、お互いの言葉や行為が相互的に、そして連続的に組織化されるのである。これが本論文でいう「継起的な組織化」である。この例から分かるように、こうした相互行為は単なる行為の機械的な連続ではなく、互いの行為を予期したり、示された行為の適切さを確認・観察したりすることによって、共同で達成されているのである。

次章では、このガイドラインと要件に従って設計された GestureMan-3¹¹⁾を紹介する。

3. GestureMan-3

3.1 頭部とカメラの設計

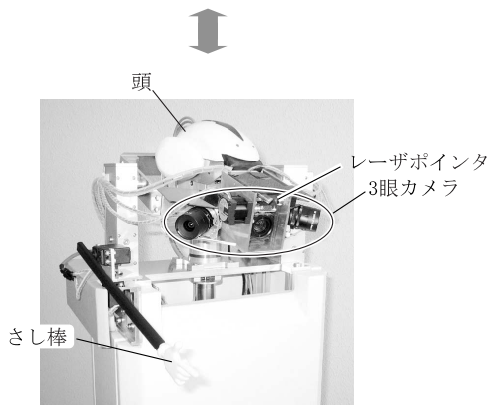
まずはじめに、ロボットに必要とされる動作・機能を決定する（ガイドライン G1）。要件 R1 と R3 に対応して、GestureMan-3 では特にロボットの頭部に、指示者の志向を、リアルタイムに表現させることにした。また、R2 に示したとおり、システムは相互観察を支援する必要がある。このためには、ロボットのカメラシステムは広い視野角を持つ必要がある。そこで、以前の GestureMan と同様に GestureMan-3 にも 3 眼カメラを搭載することにした。

次に、指示者のインタフェースを設計する（G2）。GestureMan-3 では、3画面ディスプレイを利用して、指示者の頭部に 3 次元磁気センサを装着することにした。3画面ディスプレイは左右方向に広がっているため、指示者が作業側環境を見回すと、自然に頭部は左右に振れる。そこでこの頭の動きを検出し、それに連動させてロボットの頭部（図 3）を動作させた。センサは軽いカチューシャに取り付けられており、指示者からはセンサの装着による不満は聞かれなかった。

このとき、もしロボットの頭部にカメラを搭載していると、指示者の頭部の動きに応じて 3 面ディスプレ



遠隔参加者サイト



GestureMan

図 3 GestureMan-3 システム概要

Fig. 3 Overview of GestureMan-3 system.

図 4 GestureMan-3 の頭部機構

Fig. 4 GestureMan-3's head mechanism.

イに表示される映像も変化してしまうことになる。そこで3眼カメラはロボットの胴体に取り付けられたカメラフレームに搭載し、ロボットの頭部はカメラとは独立に動作するようにした(図4)。したがってロボットの頭部は単に指示者が見ている方向を示すための方向指示器としての役割しか果たしていない。

ロボットの胴体は、ジョイスティックを前後左右に倒すことによって、前進、後進、左右回転させること

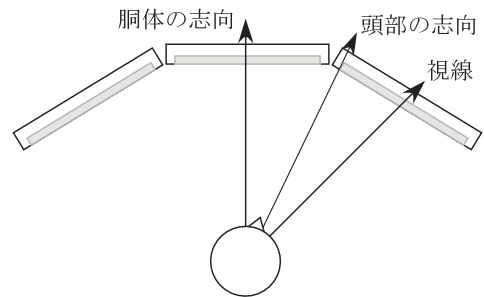


図 5 胴体の志向, 頭部の志向, 視線の関係

Fig. 5 Relationship between body orientation, head orientation and gaze orientation.

ができる。また、ハットスイッチを上下に倒すことによってカメラフレームをチルト動作させられる。

最後に、指示者の頭の志向をロボットの頭の志向に変換する(G4)。まず、遠隔側の3面ディスプレイが作る座標系と作業側側の座標系との変換をする。さらに、指示者の頭部の志向と視線とのずれも考慮しなければならない。人が胴体に対して横の方向を見るとき、頭部と同時に眼球をも回転させるため、頭部は実際の視線の向きまでは回転しないのである(図5)。頭部の志向角度と視線の角度との関係は、筆者らの過去の経験¹⁰⁾からおよそ1対2としておけばよいことが分かっているため、今回も同様の比率で補正を行った。

3.2 遠隔ポインティング

G1: 筆者らはすでに、要件 R1 と R2 に関して、遠隔制御型レーザーポインタが有効であることを確認している^{9),12),18)}。以前は、レーザはマウスで操作できるようにし、この方法はおおむね好評であった。しかし、ロボット操作のためのジョイスティックからマウスへの持ち替えや、マウスを操作してレーザ光を目的の場所に移動させるための時間遅れは避けられなかった(R3)。

G2, G3: 以前の実験では、指示者が「これ」と言いながら思わず画面上に指さしをしてしまうという行動が多く見られた。そこで、タッチパネルをインタフェースとして採用することにした。ただし今回は機器の制約のため、中央の1画面のみタッチパネルとした。

G4: 最後に、タッチパネル上の位置を作業側側の座標系に変換する。変換を容易にするために、中央のカメラの光軸とレーザーポインタの光軸ができるだけ近くなるように設計した。これによって、タッチパネル上の指さし位置近傍にレーザが照射されるようになった。

ジョイスティックのスティック頭部について、小さな多方向のコントロールスイッチ

作業者側では、レーザ光の照射と同時にさし棒が上がり、レーザが照射されていることと、その方向を示す。レーザが照射されていないときには、さし棒は真下を向き、何も指されていないことを示す。

4. 予期に対する頭部運動の効果

GestureMan-3の頭部機構が、コミュニケーションにおける予期の支援に対して有効であるかどうかを確認するために、定量的な実験を行った。

4.1 実験方法

指示者が作業者に対して、作業者側にある対象物に触るように指示をした。指示者と作業者の環境の概要を図6に示す。

作業者側では作業者とGestureMan-3は、机を挟んで向き合った。机には、色と形状が異なる48個の物体が置かれた。作業者は、対象物に触れるとき以外は、ロボットの正面に立って待つように言われた。

各ペアは3種類の条件で実験を行った。条件1(運動なし条件)では、ロボットの頭は指示者の頭の動きに連動させなかった。条件2(頭部連動条件)では、指示者は3次元磁気センサを頭に装着し、ロボットの頭は指示者の頭の動きに連動させた。また、条件3(対面条件)は、指示者が作業者と対面して指示を行った。条件3では指示者は着席し、指示者の頭がロボットの頭の高さと同しくなるように調整し、さらに指示者は指さしは使えないこととした。

実験開始前に指示者は30個の物体の写真を渡された。写真は、セッションごとにランダムに選ばれた。セッションの間、

- (1) 指示者は写真を見て、
- (2) ディスプレイ上(条件3では実環境内)でその対象物を見つけ、
- (3) 作業者にその対象物を説明し、対象物に触れさせる、

という指示を繰り返した。このとき、指示者には、画面上で対象物を見つけてから、対象物に関する説明をするように制限した。それ以外は、指示者と作業者は

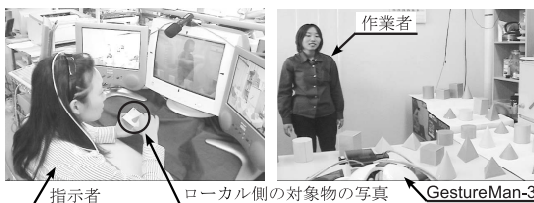


図6 実験の様子

Fig. 6 Overview of the experiment.

どのような発言をしてもよいとした。机の上のすべての対象物は、ロボットの3眼カメラの視野内に入るように配置し、実験中にカメラを左右に動かす必要がないようにした。本実験では、頭部運動の効果を確認することを目的としたため、レーザポインタは利用しなかった。被験者は筑波大学の学生12組であり、各組とも3種類の条件で実験を行ったが、各組の実験条件の順番は異なるようにした。

4.2 実験結果

対象物ごとに、指示者が写真を確認し始めたときを作業開始、言葉で対象物の説明を開始したときを指示開始、作業者が対象物に正しく触れたときを作業終了とした。そして、作業開始から指示開始までの時間を指示開始前時間、指示開始から作業終了までの時間を指示開始後時間として、対象物あたりの各時間の平均を計測した(図7)。Wilcoxonの符号順和検定により、作業時間と指示開始後時間に関して、連動条件の方が運動なし条件よりも有意に短いことが分かった($p < .01$)。

頭部連動条件では、指示者の自然な見直し動作がロボットの頭の動きに反映され、指示対象物の方へ向いていた。ロボットの頭が動作したときに、作業者がこれを見ることによって、指示者が言葉で明確に対象物を表現する前に、作業者は指示される対象物の方へ頭を向けることができた(図8)(本論文では、左右方向に関して、作業者が正しくこの反応を示した場合に、それを「予測反応」と呼ぶことにする。後述の理由により、上下方向の頭の動きはほとんど発生しなかった)。指示開始後時間に関して、頭部連動条件の方が運動なし条件と比較して短かったのは、頭部連動条件において、作業者が予測反応を起こすことができたからであると考えられる。そこで、実験のビデオデータから、予測反応の回数を計測した。具体的には、

- (1) 指示者が対象物の説明をはじめる前に、ロボッ

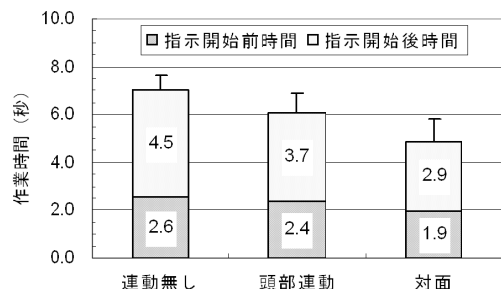


図7 作業時間

Fig. 7 Task completion time.

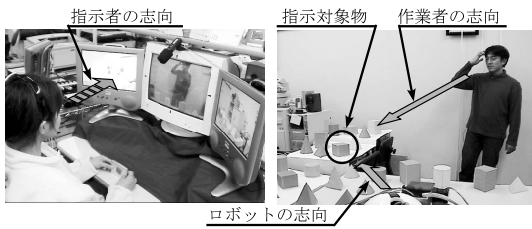


図 8 予測反応の例

Fig. 8 An example of the anticipatory reaction.

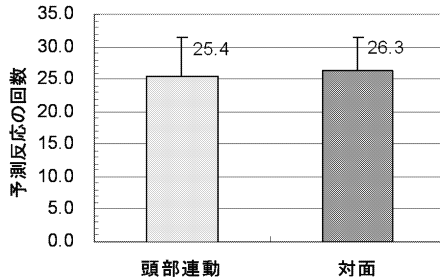


図 9 予測反応の回数

Fig. 9 The number of anticipatory reactions.

トの頭と同じ方向を見ていた回数, または,

(2) 指示者が対象物の説明を開始したときの最初の発話のうち, 「ええと」, 「白い」等, 左右の方向を特定できない発話と同時に, 作業者がロボットの頭と同じ方向を見た回数, を数えた. 頭部運動条件と対面条件における予測反応の回数(運動なし条件ではロボットの頭が動かないため, 予測反応は数えられない)を比較したところ(図 9), 頭部運動によって, 左右方向の予測反応の回数は対面と同程度となることが分かった. 作業者が予測反応を示さない場合には, 指示者は言葉で詳しく位置を表現しはじめるが, 予測反応が示された場合には, 比較的簡単な説明で対象物を表現することになる. これが頭部運動条件に置いて, 指示開始後時間が短くなった理由の 1 つであると考えられる.

ただし, 図 7 から分かるとおり, 対面条件と比べて頭部運動条件の方が, 指示開始前時間, 指示開始後時間ともに長い. これは, 指示者にとってディスプレイ画面上に表示される対象物が, 肉眼で見るとも, 認識しにくかったためと考えられる.

指示開始後時間の差が生じた理由について検討するためにビデオを観察した. その結果, ロボットから見て奥行き方向に対して, ロボットの頭部の志向から対象物を識別することが難しいことが推察された. 指示者側の 3 面ディスプレイ上では, 奥行き方向は画面の上下方向に対応するが, ほとんどの対象物が画面の下

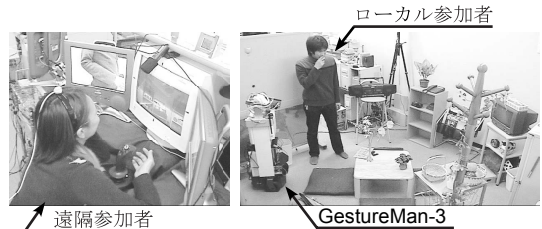


図 10 家具配置実験の様子

Fig. 10 A snapshot of the furniture arrangement experiment.

側 3 分の 1 の範囲内に収まっていた. このため, 奥行き方向に関して, 指示者の頭部の動きがほとんど発生せず, したがってロボットの上下方向の頭部の動きに表れなかった. 対面の場合も同様に指示者の頭部はほとんど動かないが, 作業者は指示者の視線を観察することによって, 対象物の予期が可能だったと考えられる.

以上の結果から, 頭部の左右方向の志向の変化による予期を支援することにより, 単純な対象物指定の作業に関して, コミュニケーションの効率を向上させられることが定量的に示された.

5. 定性的評価: 家具配置実験

5.1 実験方法

より実際の作業における GestureMan-3 の効果を定性的に分析するために, 家具の配置を遠隔から指示するという実験を行った(図 10). 実験開始時に, 作業者とロボットは家具が乱雑に置かれた小さな部屋に入れられた. 指示者はロボットを操作しながら, 作業者と会話をした. 被験者に与えられた作業は, 30 分の間に家具を整理して, 新婚家庭のための部屋をデザインすることであった. 会話を活発にするために, 指示者には, シンプルなデザインをするように指示をし, 作業者には, できるだけたくさんの家具を使うように指示をした. 被験者 11 組中, 5 組はロボットの頭が指示者の頭に連動する条件(頭部連動条件)で実験をし, 残りの 6 組は連動しない条件(運動なし条件)で実験を行った. ただし, いずれの場合もレーザーポインタは利用できるようにした.

定性的な評価には, エスノメソドロジ的な手法を用いた. そのために, 実験風景は複数のカメラで撮影し, その映像を利用して, 被験者の行動を詳細に分析することにした.

5.2 頭部連動の有効性

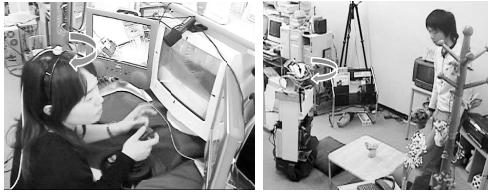
頭部連動条件では, 指示者の頭部とロボットの頭部が連動することによって, 指示者の志向が作業者から

- 1 指: このふたつは
作: (2つの植木鉢を持って)



(1行目の場面)

- 2 指: (右を見る)
作: (左を見る) こっちの方? (ロボットを見ながら左へ移動)



(2行目の場面)

- 3 指: (頭を左へ回転) (胴体を左へ回転)
作: (頭を右へ回転) (胴体を右へ回転)



(3行目の場面)

図 11 トランスクリプト 1

Fig. 11 Transcript 1.

実時間で観察できるようになった。これによって、指示者（ロボット）の頭部や身体の志向が、作業者の頭部や身体の志向と協調的に変化するという、志向が継起的に組織化される例が多く見られた。トランスクリプト 1（図 11）にその一例を示す。以下のトランスクリプトにおいて、「指」は指示者を、「作」は作業者を示す。身体的な行為は括弧の中に記述した。また、「右」「左」という表現は、その行為者から見た方向とする。

この例では、テーブルの上に置いてあった 2 つの植木鉢を置く適当な場所を探そうとしている。1 行目で、指示者は 2 つの植木鉢を指さしながら「この 2 つは」と言った。その直後（2 行目）、彼女は頭を右側のディスプレイに向け、これにともなってロボットの頭も右へ向いた。作業者はこのロボットの頭の動きを見て、すぐに左に頭を向けた。さらにその直後（3 行目）、ロボットの頭は左へ向き、これを見た作業者はほぼ同時に右を見た。そして、次の瞬間、ロボットと作業者はほぼ同時に胴体を同じ方向へ向けた。ロボットと作業者のこうした協調的な動作は、指示者の頭とロボット

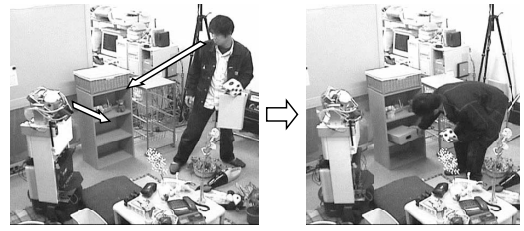


図 12 作業者が対象物を正しく推測した例

Fig. 12 An example that the instructor guessed the correct object.

の頭が実時間で連動するからこそ可能となる。実際こうした事例は、連動なしの場合には見られなかった。

次の図 12 は、指示者の非明示的な発言だけで対象物の位置を推測したときの場面である。まず、指示者は「箱はその中でいいんじゃないですか」といいながら、ロボットをカラーボックスの方へ少し回転させた。その後、ロボットの頭はカラーボックスの方に向いたが、ロボット本体は完全にはその方向に向いていなかった。これに対して作業者は、指示者の発言が始まると同時に振り返ってロボットを観察し、発言が終わった直後、箱をカラーボックスの中に入れた。この場面で、指示者がカラーボックスの中に入れるようにと明示的に説明していないうえに、ロボット本体はカラーボックスに志向していないにもかかわらず、作業者はその作業を達成していた。これは、ロボットの頭の志向から、指示者のいう「その中」を「カラーボックスの中」と推測できたためと考えられる。

以上のように、頭部連動条件では、ロボットの頭部の動きを資源とした継起的なコミュニケーションの例が観察された。頭部の動きによるこうした継起性は連動なし条件ではほとんど見ることができなかった。

5.3 連動なしの場合の問題点

連動なし条件では、ロボットの頭部はまったく動かない。このことによって、指示者の意図がうまく伝わらない例がいくつも見られた。トランスクリプト 2 の例（図 13）では、はじめのうち、指示者はティッシュの箱を置くべき場所を探していた。3 行目の場面で、指示者は左側のモニタ内に本棚があるを見つけ、「シェルフのところにも」と発言した。このとき、本棚は作業者の右前にあったのだが、ロボットの頭は作業者のやや後方を向いていた。このため、作業者は、指示者が自分の後ろ側に注目していると誤って推測し、4 行目において後ろを振り返り、「え？」と疑問を示すこととなった。この例は、ロボットの頭がまったく動いていない場合には、ロボットの頭部が有害な情報となってしまうことを示している。すなわち、作業者は

1 指: なんかティッシュもそこにあるのはあんまり
作:

2 指: よろしくない よろしくないので
作: よろしくない (ティッシュの箱をつかむ)

3 指: (左を見て) シェルフのところでも
作:



(3行目の場面)

4 指: (カメラを下に向けて)
作: え? (後ろを見る)



(4行目の場面)

図 13 トランスクリプト 2

Fig. 13 Transcript 2.

1 指:
作: どこに置くの?

2 指: pp
ここ(1.0)わかる?

作: ああ、はいはいはいはい



(2行目の場面)



(2行目の続き)

図 15 トランスクリプト 3

Fig. 15 Transcript 3.



図 14 作業者が誤って推測した例

Fig. 14 An example that an operator guessed the wrong direction.

ロボットの頭が向いている方向が、すなわち指示者が
見ている方向であると勘違いしてしまうのである。

もう一つ、指示者の意図した対象物が伝わらなかった
例を示す。図 14 のシーンの直前、指示者はロボッ
トの身体を右に回転させ、その直後に「ああ、そうい
えばラックの中には何がありますか?」と質問した。
指示者は作業者から見て右後方にあるマガジンラック
を見ていたのだが、ロボットが右回転したのを見た作
業者は、誤って自分の左側を見てしまったのである。
もしロボットが頭部連動で制御されていれば、頭部の
志向に注目して、正しい方向を見ることができたと予
想できる。この後、指示者は言葉で説明を試みたが、
最初の発話が終わってから操作者が雑誌ラックを見つ
けるのに約 10 秒を要することになった。

これらの例のように、推測の間違いは、コミュニケー
ションの効率を低下させるうえ、作業の失敗につな
がる可能性がある。一方、頭部を連動させた場合には、
こうした問題は非常に少なかったのである。

5.4 遠隔ポインティングの効果と問題点

トランスクリプト 3(図 15)は、現状の GestureMan-
3 が持つさし棒の効果と同時に問題点を示している。
このトランスクリプトで、“p”の連続は指示者がタッ
チパネルを指し続けていることを示す。

この場面で作業者は花瓶を指示者に示しながら、そ
れをどこに置くべきかを聞いている。2 行目で指示者
が「ここ、分かる?」と発言している間、彼女はタッチ
パネルをさし続けていた。しかし、彼女が「ここ」と
言った瞬間に、すでにレーザは本棚の 2 段目を照射し
ていたにもかかわらず、作業者はその場所を見つけれ
ることができなかった。しかしその直後、さし棒が上
がりはじめ、作業者はその動きを追うことによって、最
後にレーザ光を見つかることができた。レーザが現れ
てからそれが認識されるまでに約 2 秒を要したのだ。

この例は、さし棒の有効性と問題点を示している。
さし棒は確かにレーザポインタの発見を支援してい
た。しかし、その後の作業者の反応の遅れは、指示者
にとっては問題として感じられた。このことは、指示
者が「これ」と発言した約 1 秒後に「見える?」と発
話したことから分かる。

これは、安全性の問題から、さし棒の動作速度を遅くしたことに原因がある。動作速度を速くすればこの問題はある程度解決できるが、危険性は増加する。そこで筆者らは、さし棒の速度を遅くしたままこの問題を緩和しようと考えている。対面における会話では、ある参加者が指さしをするとき、手を持ち上げるという予備的な動作に対話者が気づくことによって、実際に対象物が指される前にその対象物の方向に視線を向けるという動作が観察される。したがって、もし指示者の指さしのための予備的な動作を検出して、タッチパネルに触れる前にさし棒を動作させはじめれば、これによって作業者は指さしを予期できると期待される。

6. 考察

6.1 設計ガイドライン

本論文では、遠隔的なコミュニケーションにおいて、継起性や予期を支援するために、エコロジーの二重性を考慮してシステム設計を行うことを提案し、そのための設計ガイドラインを提案した。また、これに従って設計された GestureMan-3 の有効性が示されたことによって、このガイドラインの有用性も示されたと考える。エコロジーの二重性の問題はあらゆる遠隔コミュニケーションにおいて共通する問題であり、通常の遠隔会議システム等の設計にも応用可能である。

しかし、本ガイドラインに従って設計することによって、システムの有効性が保証されるわけではない。たとえば、5.4 節の遠隔ポインティングの例でも、ガイドライン G1 において、指さしに関する予備的な動作の必要性を見すごしたために、十分な支援ができなかった。その一方、実験の分析から明らかになった問題点に対して新たな解決策を考案し、システムの再設計をする、繰返し手法のためのガイドラインとして利用できるとも考えられる。事実、筆者らは指さしの予備的な動作の必要性をガイドライン G1 の新たな項目として設定し、これを解決するためのシステム設計を進めているところである。

6.2 GestureMan-3 の有効性

本論文では、定量的な実験と定性的な実験から、GestureMan-3 が、筆者らの以前のシステムが持つ問題点のある程度解決できたことを示した。しかし、対面でのコミュニケーションと比較すると多くの問題点が残っている。たとえば 4.2 節で示した、カメラの解像度の不足や、志向の提示精度の低さの問題がある。志向の提示に関しては、精度ばかりではなく、その多様性も不足している。人間は、足、胴体、頭部、目、腕、指といった身体部位を利用して、複数の志向

を階層的に示すことができる⁸⁾。これによって、下半身の志向は、現在最も話題の中心となっている方向を示し、頭部は短期的な話題の対象を示すことができる。GestureMan-3 にはこのような多様な志向を表現するための機能が不足している。これを解決するために、指示者のすべての身体の動作を計測することも可能であるが、そのために指示者に装着するセンサが増加すると、かえって指示者の自然な動作を阻害しかねない。指示者に負担の少ない検出法の開発が必要である。

今回の実験では問題となった例は見られなかったが、指示者が 3 面ディスプレイ以外の場所を志向したとき（たとえば手元の資料を見たとき）のロボットの頭の動きを、作業者が勘違いする可能性がある。通常は会話の文脈によって、そうした間違いは防がれることが多いが、システム側にも、そのような間違いがおこらないような対策が必要である。たとえば指示者が 3 面ディスプレイの範囲外を志向したときにはロボットの頭部と連動させない等の方法が考えられる。

7. 結論

本論文では、エコロジーの二重性の問題を解決するための設計ガイドラインを提案し、これに従って GestureMan-3 を開発した。実験の結果、頭部連動機能がコミュニケーションの継起的な組織化に対してある程度の効果があることを、定量的な実験と定性的な実験に基づいて示した。一方、遠隔ポインティングに関する問題を含めて、いくつかの新たな問題が明らかになった。しかし、ここで重要なことは、エコロジーの二重性、そして予期の支援という考え方によって、問題点を明確にできたと同時に、その解決策を検討できたことである。今後も、本提案のガイドラインに従って、手、およびその他の身体的構成要素に関する継起的な相互行為の支援を試みる予定である。

謝辞 本研究は、独立行政法人情報通信研究機構、沖電気、独立行政法人日本学術振興会 2004 年科学研究費補助金基盤 (B) (課題番号 16300261) の補助金によって実施されました。

参考文献

- 1) Gaver, W.: The Affordances of Media Spaces for Collaboration, *Proc. CSCW '92*, pp.17-24 (1992).
- 2) Gibson, J.: *The Ecological Approach to Visual Perception*, Houghton Mifflin Company (1979). 生態学的視覚論, サイエンス社.
- 3) Heath, C. and Luff, P.: *Disembodied Conduct: Communication Through Video in a*

- Multi-media Office Environment, *Proc. CHI '91*, pp.99–103 (1991).
- 4) Heath, C. and Luff, P.: Media Spaces and Communicative Asymmetries: Preliminary Observations of Video Mediated Interaction, *Human-Computer Interaction*, Vol.7, pp.315–346 (1992).
 - 5) Heath, C., Luff, P., Kuzuoka, H. and Yamazaki, K.: Creating Coherent Environments for Collaboration, *Proc. ECSCW '01*, pp.119–128 (2001).
 - 6) Hutchins, E. and Palen, L.: *Constructing Meaning from Space, Gesture and Speech* (1997).
 - 7) 堀部保弘:インタフェースのエコロジー, 認知的道具のデザイン, 加藤 浩, 有元典文 (編), pp.39–64, 金子書房 (2001).
 - 8) Kendon, A.: *Conducting Interaction: Patterns of Behavior in Focused Encounters*, Cambridge University Press (1990).
 - 9) Kuzuoka, H., Kosuge, T. and Tanaka, M.: GestureCam: A Video Communication System for Sympathetic Remote Collaboration, *Proc. CSCW '94*, pp.35–43 (1994).
 - 10) Kuzuoka, H.: Spatial Workspace Collaboration: A SharedView Video Support System for Remote Collaboration Capability, *Proc. CHI '92*, pp.533–540 (1992).
 - 11) Kuzuoka, H., Kosaka, J., Yamazaki, K., Suga, Y., Yamazaki, A., Luff, P. and Heath, C.: Mediating Dual Ecologies, *Proc. CSCW '04*, pp.477–486 (2004).
 - 12) Kuzuoka, H., Oyama, S., Yamazaki, K., Yamazaki, A., Mitsuishi, M. and Suzuki, K.: GestureMan: A Mobile Robot that Embodies a Remote Instructor's Actions, *Proc. CSCW '00*, pp.155–162 (2000).
 - 13) Kuzuoka, H., Yamazaki, K., Kosaka, J., Suga, Y. and Heath, C.: Dual Ecologies of Robot as Communication Media: Thoughts on Coordinating Orientations and Projectability, *Proc. CHI '04*, pp.183–190 (2004).
 - 14) Ruhleder, K. and Jordan, B.: Meaning-Making Across Remote Sites: How Delays in Transmission Affect Interaction, *Proc. ECSCW '99*, pp.411–429 (1999).
 - 15) Tang, J.C.: VideoWhiteboard: Video Shadows to Support Remote Collaboration, *Proc. CHI '91*, pp.315–322 (1991).
 - 16) Tang, J.C. and Minneman, S.L.: VideoDraw: A Video Interface for Collaborative Drawing, *Proc. CHI '90*, Seattle, pp.313–320 (1990).
 - 17) 葛岡英明, 山崎敬一, 山崎晶子, 池谷のぞみ: リモートコラボレーション空間における時間と身体的空間の組織化, *組織科学*, Vol.36, No.3, pp.32–45 (2002).
 - 18) Yamazaki, K., Yamazaki, A., Kuzuoka, H., Oyama, S., Kato, H., Suzuki, H. and Miki, H.: GestureLaser and GestureLaser Car: Development of an Embodied Space to Support Remote Instruction, *Proc. ECSCW '99*, pp.239–258 (1999).
 - 19) 山崎敬一 (編): 実践エスノメソドロジー入門, 有斐閣 (2004).

(平成 16 年 5 月 7 日受付)

(平成 16 年 11 月 1 日採録)



葛岡 英明 (正会員)

平成 4 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士(工学)。現在筑波大学大学院システム情報工学研究科助教授。CSCW, 人工現実感, ヒューマンインタフェースの研究に従事。共著に『ヒューマンコンピュータインタラクション』(オーム社)等。



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。著書に『美貌の陥穽』(ハーベスト社), 共編著『実践エスノメソドロジー入門』(有斐閣)等。



上坂 純一

平成 16 年筑波大学大学院修士課程理工学研究科理工学専攻修了。修士(工学)。同年株式会社富山富士通に入社。現在, 組み込み機器向けインターネットブラウザのコアソフト研究に従事。