

# 指差しによる人間への位置提示精度調査とその精度向上手法

廣井 富<sup>1,a)</sup> 伊藤 彰則<sup>2</sup>

受付日 2014年12月5日, 採録日 2015年5月9日

**概要:** 我々の考える指差しジェスチャを利用する最終目標は、人間とロボットが空間情報を共有することである。本論文は、部屋の中の特定の位置を空間情報として想定する。本研究の目的は、「ロボットが指差しをして人間がそれを理解する」というコミュニケーションチャネルを確立することである。そのため、次の2点について調査・検証を行ったので報告する。1. ロボットが特定座標を指差したとき、人間はその位置をどの程度の精度で認識可能なのか調査する。2. ロボットの指差しを制御することで、人間による位置認識精度を向上させることができるか検証する。ロボットの正面 3.5 m に実験参加者を立たせ、ロボットが6点をランダムに指差し、その座標と人間が認識した座標との誤差を測定する。結果、角度方向の誤差の平均値は、約  $-1$  degであったのに対し、距離方向は約  $-545$  mm と大きな誤差となった。しかし、距離方向の誤差に系統的な傾向が見られたため、線形回帰によってロボットの指差し座標の補正を行った結果、角度の誤差平均は約  $0.1$  deg、距離方向は約  $-235$  mm となり、43%誤差が低減した。

キーワード: ロボット, 指差し, 知覚, ヒューマン-ロボットインタラクション

## Investigation of Precision of Human Perception of Pointing Gesture and a Method for Precision Improvement

YUTAKA HIROI<sup>1,a)</sup> AKINORI ITO<sup>2</sup>

Received: December 5, 2014, Accepted: May 9, 2015

**Abstract:** Our aim of using a pointing gesture in a human-robot interaction is to share spatial information between a human and a robot. In this paper, we assume specific positions in a room as “spatial information.” The purpose of this study is to establish a communication channel where “A robot makes a pointing gesture and a human recognizes it.” To realize this, we investigated the following two points. First, when the robot is pointing a specific coordinate, we investigated how precisely a human perceived the pointed position. Second, we investigated whether the human perception error of the pointed position could be reduced by adjusting the pointing coordinate of the robot. We instructed the participants to stand at the position 3.5 m front of the robot, then the robot pointed 6 points, and finally we measured the error between the pointed positions and the perceived positions. As a result, the average error of the perceived angle was about  $-1$  degree, whereas the distance error was as large as about  $-545$  mm. We observed linear relationship between the distance error and absolute distance to the pointed position. Then we adjusted the pointing position based on a linear regression. As a result, the angle error reduced to  $-0.1$  degree. The distance error also reduced to about 235 mm, which was 43% smaller than the result without adjustment.

**Keywords:** robotics, pointing gesture, perception, human-robot interaction

### 1. 緒言

近年、生活を支援するロボットの研究・開発が行われている [1], [2]. 物を運ぶことやカーテンの開け閉めをするようなロボットは日常生活支援ロボットと呼ばれる [3]. こ

<sup>1</sup> 大阪工業大学  
Osaka Institute of Technology, Asahi, Osaka 535-8585, Japan

<sup>2</sup> 東北大学  
Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-7579, Japan

<sup>a)</sup> hiroi@med.oit.ac.jp

のようなロボットは、特別な知識を必要とせず、簡単に操作可能であることが望ましい。これを実現するために、ロボットと利用者のコミュニケーション手段としてさまざまなインタフェースを利用する研究が多く行われている。たとえば、トヨタ自動車株式会社は、HSRを開発している[4]。このロボットはタッチパネルを利用し、床面に落ちている対象物を回収することを可能にした。一方、Hiroiらは、呼びかけ音と顔画像を用いて、ユーザを認識し、音声対話によりいくつかの軽作業を行うことが可能な日常生活支援ロボットの開発を行った[5]。前者は、タッチパネルを利用することでユーザがロボットを直接操作可能なことがメリットであり、後者は、デバイスなしにユーザがロボットへ命令を与えることが可能なことがメリットである。ロボットを操作する場合にはユーザが直接ロボットに接触することなく、またコントローラなどのデバイスを使用しないほうが望ましいので、音声対話を使うインタフェースにはメリットがある。

しかし後者の場合、音声を利用するため、曖昧な言葉の指示に弱い。たとえば、「あれ取って」、「そこへ行って」というような指示に従うには音声だけでは困難である。このような場合、音声情報とジェスチャや顔の表情などを併用することで問題が解決すると考える。ジェスチャにはさまざまなものがあるが、本研究では特に指差しに注目する。指差しは、人間とシステムが空間情報を共有するために有効なジェスチャであり、これまでも多くの研究が行われてきている。最初期のシステムであるPut-that-there[6]では、ユーザが仮想空間内の物体の位置を指定するために指差しを利用し、物体の操作の指定には音声を使っている。Put-that-thereでは指示対象は2次元であった。ロボットを対象とする指差しインタフェースにおいては、初期には単一画像からユーザを発見してジェスチャを認識するだけであったが[7],[8]、その後の研究では、指差しを認識するセンサやアルゴリズムを工夫することで、ユーザの姿勢を3次元的に把握し、指差し認識を高精度化している。たとえば、モーションキャプチャを用いる研究[9],[10]、ステレオカメラや3つ以上の多視点カメラを用いる研究[11],[12],[13]、TOFを用いる研究[14],[15]などがある。指差しに関するその他のタイプの論文としては、飯尾ら[16]の研究がある。この研究では、ロボットが指差しを使用しない状況下で、ロボットが指示語を用いると人間の指差しの使用率が増加することが示された。また、鳩らの研究[17]では、指示語と指差しを併用したときに、意図される領域のモデル化が試みられている。

指差しジェスチャを利用するコミュニケーションの最終目的は、人間とロボットが空間情報を共有することである。空間情報としてはさまざまなものが想定できるが、本論文では、単なる方向ではなく、部屋の中の特定の位置(床面上の点の2次元座標)を空間情報として想定する。このと

き、人間とロボットが部屋の中の位置を共有するためには、次のような要素が必要となる。

- (1) 目標となる座標を、人間が指差す。
- (2) 目標となる座標を、ロボットが指差す。
- (3) 人間の指差しから、ロボットが目標となる座標を認識する。
- (4) ロボットの指差しから、人間が目標となる座標を認識する。

人間の指差しを機械が認識する研究は、上記の(3)を実現するための技術である。また、飯尾らの研究はこの分類でいえば(1)に類すると考えられる。しかし、人間とロボットが指差しによって位置情報を共有するためには、上記の(1)~(4)のいずれも重要である。にもかかわらず、(1),(2),(4)を扱った研究はあまり多くない。(2)に関しては、ロボットの腕や指の制御を正しく行えば実現可能と考えられているのだと思われる。

「人間とロボットのどちらかが指差しによって座標を指定し、もう片方がそれを理解する」という枠組みにおいては、上記(1)~(4)の課題は独立ではなく、(1)と(3),(2)と(4)が対になって実現されて初めて意味を持つ。にもかかわらず、我々の知る限り、そのような視点で指差しによるコミュニケーションを扱った研究はこれまで存在しなかった。本研究の目的は、「ロボットが指差しをして人間がそれを理解する」というコミュニケーションチャネルを確立することである。そのためには、上記の要素のうち(2)と(4)、すなわち「ロボットによる指差し」と「人間による指差し理解」が必要になる。これらのうち、特に「ロボットの指差しを人間がどれだけ認識可能か」については、重要な課題であるにもかかわらず、これまで検証が行われてこなかった。そこで本論文では、次のような課題に取り組む。

- ロボットが特定座標を指差したとき、人間はその位置をどの程度の精度で認識可能なのか調査する。
- ロボットの指差しを制御することで、人間による位置認識精度を向上させることができるか検証する。

従来の多くの人間-ロボット間の指差しに関する研究は、人間とロボットは正対する位置関係、あるいは一方の視野の中に他方が存在する位置関係で指差しを行う場合がほとんどである[8],[12],[13],[18],[19],[20]。そこで本研究では、人間とロボットがある程度離れた位置にいて、それぞれ自身の前方にある床面上の1点を指差しによって指定する状況を想定する。実際の利用場面では、ロボットと人間が移動しながら指差しを行うこともありうるが、実験環境や計測精度の制約があるため、本論文では人間とロボットの距離は固定とする。

本論文の構成は以下のとおりである。1章では研究背景、目的について述べた。2章では、実験の概要と条件について述べる。3章では、人間対人間、人間対ロボットにおいて、指差しが認識可能であるか検証する。4章では、3章

で得られた結果を基に、精度向上を狙い、実験を行い、その結果、考察について述べる。5章では、人間対ロボットの位置関係を変更し、実験を行い、6章でまとめとする。

## 2. 実験の概要と実験条件

### 2.1 実験概要

本実験の概要について述べる。前述のとおり、本研究の目的は「ロボットの指差しを人間に認識させる」ことである。そこで、ロボットが床面の特定の位置を指差し、指差し位置を人間が目視で認識して答えるという実験を行い、人間による指差し認識の精度を明らかにする。また、その精度を向上させるために、ロボットが指差しを行う座標を調整する方法を提案し、その有効性を実験により確認する。

### 2.2 実験環境および手順

実験の環境と手順について述べる。実験は、基本的に「ロボット（または人間）が指定された点を指差し、3,500 mm離れた点にいる実験参加者が指差しによって指定された点を答える」という形で行われた。以下の記述では、指差しを行う主体（ロボットまたは人間）を「指示者」と記述する。

実験は5,000×8,000 mmの部屋で行った。実験時、光の影響を受けないよう外乱光を遮断した。実験参加者は、21歳～22歳の男子大学生8名である。人間対人間の実験配置図を図1に、ロボット対人間を図2に示す。なお、指差しに際して、腕をしっかり伸ばすように教示した。

実験手順は以下のとおりである。

1. 指示者の正面3.5 mの位置に参加者を立たせる。
2. 実験参加者は右手にレーザーポインタを持つ。

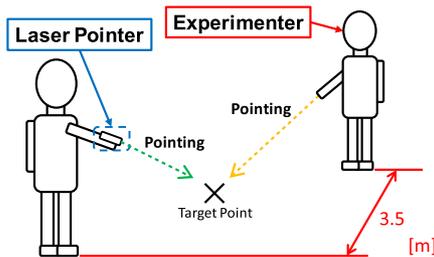


図1 実験概要（人間対人間）

Fig. 1 Outline of the experiment (Human condition).

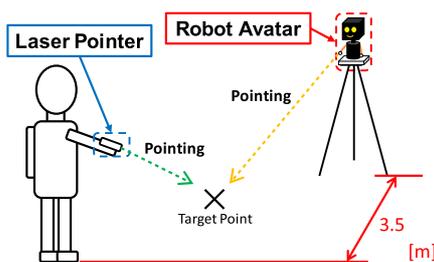


図2 実験概要（ロボット対人間）

Fig. 2 Outline of the experiment (Robot condition).

3. 指示者が指差しをする。
4. 実験参加者は、指差しされた地点をレーザーポインタで指し示す。
5. レーザポインタによって指示された点の座標を計測する。

1～5を指示者の右手、左手について6回ずつ、計12回行う。実験順序として、半数の実験参加者に対しては指示者の右手での指示を先に、もう半数に対しては左手での指示を先にした。指示者が指し示す点は、図3および図4に示す6点であり、指示順序は実験参加者ごとにランダムに設定した。

### 2.3 実験装置

指差しに用いるロボットの諸元について述べる。ここで用いるロボットは、筆者らが以前から用いているロボットアバタと呼ばれる小型ロボットである [21]。図5(a)にロボットの外観を、図5(b)にロボットの自由度を示す。左右の腕に1自由度、首に2自由度、土台に1自由度有する。アクチュエータは、双葉電子工業株式会社製RS301CRを用い、同社RSC-U485を介して、ラップトップPCによりコントロールする [22]。特定の座標を指差す際には、目標座標  $x, y$  について逆運動学を解き、土台を水平に、腕を上下方向に回転させることによって指差しを行う。このとき、ロボットの腕全体を延長した直線と床平面が目標座標で交差するよう制御した。同時に、首を上下方向に回転させ、目標座標と頭を中心を結ぶ線と顔の平面が直交するよ

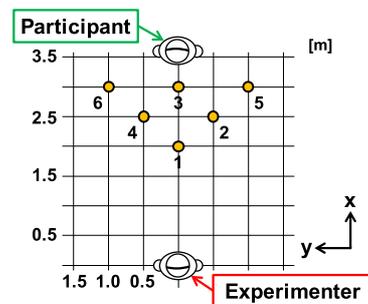


図3 目標座標（人間対人間）

Fig. 3 Arrangement of the target positions (Human condition).

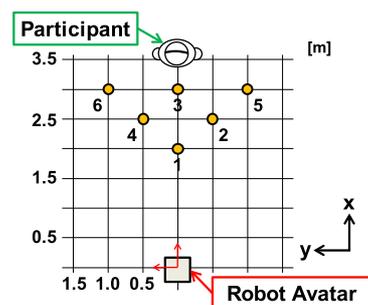
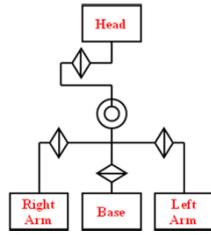


図4 目標座標（ロボット対人間）

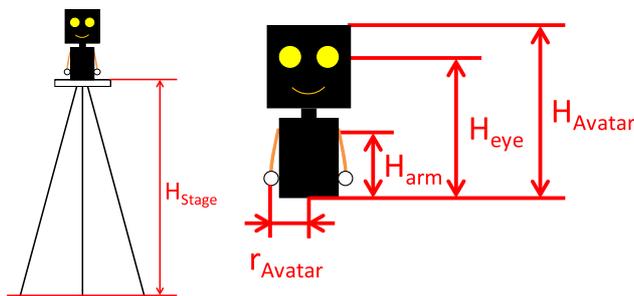
Fig. 4 Arrangement of the target positions (Robot condition).



(a) ロボットアバタ  
(a) The Robot Avatar

(b) ロボットアバタの自由度配置  
(b) A degree of freedom diagram of the robot avatar

図 5 ロボットアバタの概要  
Fig. 5 Outline of the robot avatar.



(a) 台の高さ  
(a) Height of the stage

(b) ロボットアバタの各種パラメータ  
(b) Parameters of the robot avatar

図 6 ロボットアバタの寸法  
Fig. 6 Size and parameters of the robot avatar.

表 1 各パラメータの値

Table 1 Values of the parameters.

Parameter	Symbol	Value [mm]
Height of Stage	$H_{stage}$	500,1000,1500
Height of Robot Avatar	$H_{Avatar}$	258.0
Height of Robot Avatar's eye	$H_{eye}$	172.1
Height of Robot Avatar's arm	$H_{arm}$	101.5
Radial of Robot Avatar	$r_{Avatar}$	58.0

う制御した。なお、ロボットの顔の向きの影響を調査するために、顔が床面上に向かない制御も行えるようにした。ロボットは図 6 (a) に示すように、三脚の上に設置される。各パラメータを図 6 (b) および表 1 に示す。

### 3. 人間による指差し位置認識の基礎調査

#### 3.1 実験概要

指差しを人間がどのように認識するかについて基礎的な実験を行う。この実験によって調べたいことは以下の 2 つである。

- 指差しを人間が行う場合とロボットが行う場合につい

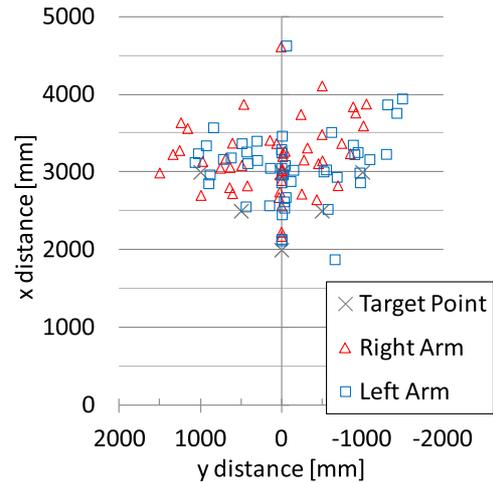


図 7 実験結果 (人間対人間)  
Fig. 7 Results (Human condition).

て、それを認識する側に違いはあるのか。

- 人間が指差しを認識するとき、その精度はどの程度なのか。また、その精度はロボットの状態によってどのように影響を受けるのか。

これを調べるため、以下の 4 つの実験を行った。

本節では、行った実験についてまとめる。行った実験は次の 4 種類である。

- 人間対人間の指差し位置認識実験 (実験 1)
- ロボット対人間の指差し位置認識実験-補正なし (実験 2)  
( $H_{stage} = 1,000$ )
- ロボットの高さの影響について調査するための、ロボット対人間の指差し位置認識実験-高さ変更 (実験 3)  
( $H_{stage} = 500, 1,000, 1,500$ )
- ロボットの顔の向きの影響を調査するため、ロボットの顔の向きを正面のままにするロボット対人間の指差し位置認識実験-顔固定 (実験 4)  
( $H_{stage} = 1,000$ )

#### 3.2 人間対人間の実験結果 (実験 1)

図 7 に目標座標に対する実験参加者の認識した位置について示す。原点は、実験者 (指示者) の立ち位置である。全体的に実験参加者側に認識した位置が分布している。そこで、距離と角度の関係を明確にするために、極座標系にまとめ直した図を図 8 に示す。各点に対する距離と誤差の関係を図 9 に示し、角度の関係を図 10 に示す。

距離の平均誤差は 460.95 mm、標準偏差は 394.80 mm であった。また、角度の平均誤差は  $-0.098$  deg、標準偏差は  $1.80$  deg であった。以上の結果から、距離方向は誤差が大きく、角度はおおむね正確であることが分かった。

図 9 において、目標座標までの距離と誤差の関係について「ピアソンの積率相関係数の有意性検定」を行い、これ

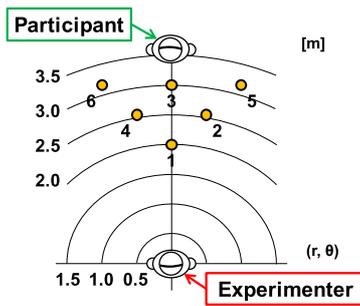


図 8 極座標に変換した実験結果 (人間対人間)  
Fig. 8 Polar coordinate (Human condition).

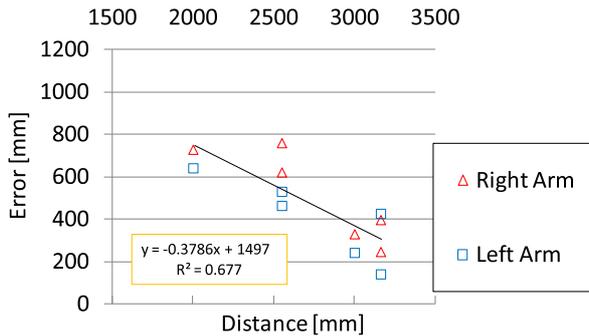


図 9 目標座標までの距離と誤差の関係 (人間対人間)  
Fig. 9 Relationship of pointed distance and errors (Human condition).

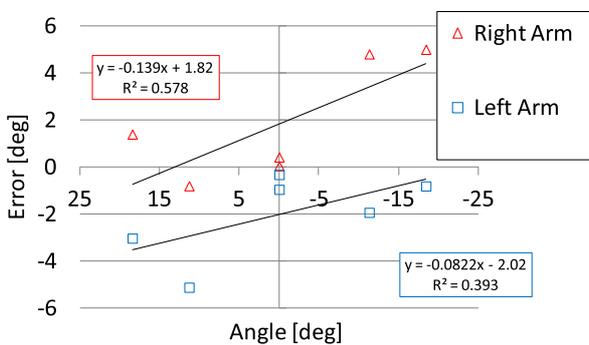


図 10 目標座標までの角度と誤差の関係 (人間対人間)  
Fig. 10 Relationship of pointed angles and errors (Human condition).

らに相関があることが分かった ( $p < 0.001$ ). 次に回帰分析を行ったところ, 目標座標に対する距離の誤差は, 距離が大きくなるほど, 誤差は小さくなるという結果が得られた. 相関係数は,  $-0.823$  であった. 一般に, 指示者による指差しの角度誤差による指差し地点の誤差は, 指示者と指差し地点との距離が長いほど大きい. したがって, 「距離が大きくなるほど誤差が小さくなる」という今回の結果は, 指示者の指差し角度の精度の問題ではなく, 指差しに対する実験参加者の知覚に何らかのバイアスがあることを示唆している.

また, 図 10 から, 目標座標に対する角度の誤差について指差しの腕 (右手と左手) について対応のある  $t$  検定を用い

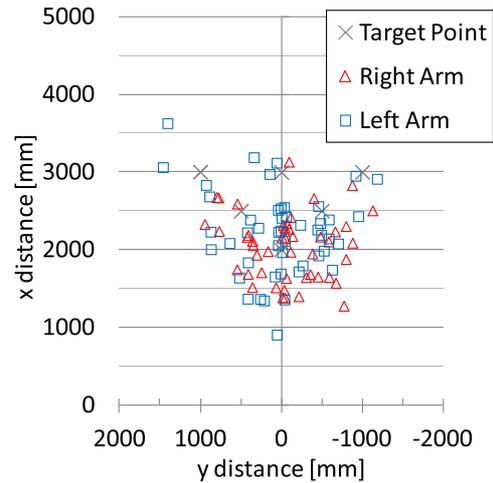


図 11 実験結果 (ロボット対人間-補正なし)  
Fig. 11 Results (Robot condition-before correction).

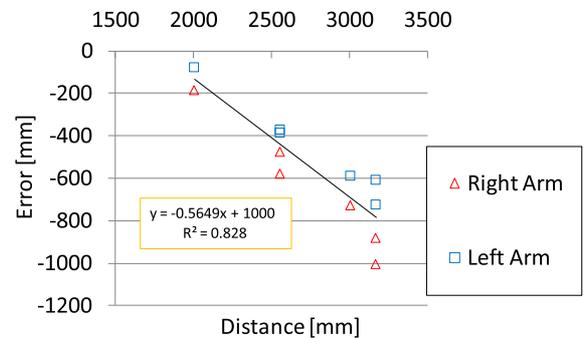


図 12 目標座標までの距離と誤差の関係 (ロボット対人間-補正なし)  
Fig. 12 Relationship of pointed distance and errors (Robot condition-before correction).

て検定した結果,  $t = 8.680$ ,  $p < 0.001$ , 効果量  $r = 0.785$  となり, 有意差が認められた. よって, 目標座標に対する角度の誤差は, 指差しの腕によって, 正負が異なる傾向がある.

まとめると, この実験によって得られた結果は, 以下の 2 点となる.

- 人間対人間の指差しの認識は, 実験参加者側に寄る.
- 人間対人間の指差しは, 実験者の方に近い方が誤差は少なくなる.

### 3.3 ロボット対人間-補正なしの実験結果 (実験 2)

次に, ロボットが指示した場合の人間による認識結果について述べる. 図 11 に目標座標に対する実験参加者の認識した位置を示す. 原点は, ロボットの配置位置である. 人間対人間の実験結果とは逆に, 認識された点の位置はロボット側に分布している. そこで, 距離と角度の関係を明確にするために, 極座標系にまとめ直した実験結果を図 12 および図 13 に示す.

距離の平均誤差は  $-545.92$  mm, 標準偏差  $454.22$  mm であった. また, 角度の平均誤差は  $-0.916$  deg, 標準偏差は

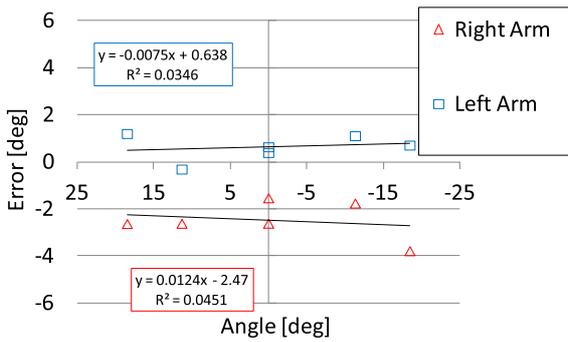


図 13 目標座標までの角度と誤差の関係 (ロボット対人間-補正なし)  
 Fig. 13 Relationship of pointed angles and errors (Robot condition-before correction).

2.89 deg であった。距離方向は誤差が大きく、角度はおおむね正確であることが分かった。図 12 において、目標座標までの距離と誤差の関係について「ピアソンの積率相関係数の有意性検定」を行い、これらに相関があることが分かった ( $p < 0.001$ )。次に回帰分析を行ったところ、目標座標に対する距離の誤差は、距離が大きくなるほど大きくなることが分かった。相関係数は、 $-0.910$  であった。また、図 13 から、目標座標に対する角度の誤差が指差しの腕 (右手と左手) で異なっているように見える。これについて、対応のある  $t$  検定を用いて処理した結果、 $t = 6.486$ ,  $p < 0.001$ , 効果量  $r = 0.687$  となり、有意差が認められた。よって、目標座標に対する角度の誤差は、指差しの腕によって、正負が異なる傾向がある。距離と誤差の絶対値の関係は人間対人間の場合と逆であるが、「距離が離れるほど指差し点を指示者寄りに知覚する」という点では共通している。

### 3.4 ロボット対人間の実験結果まとめ (実験 2, 実験 3, 実験 4)

次にロボット対人間の指差し位置認識実験-高さ変更 ( $H_{stage} = 500, 1,000, 1,500$ ) (実験 3:  $H_{stage} = 1,000$  は実験 2 と同じ条件であるが、再度実験を行った)、ロボット対人間の指差し位置認識実験-顔固定 (実験 4) の実験結果について示す。ここでは、ロボット対人間の指差し位置認識実験との違いがあるのみを調査したい。そこで、図 12, 図 13 で示した回帰式の傾きと切片をそれぞれ図 14, 図 15 にまとめた。次に、実験 2, 実験 3, 実験 4 について目標座標までの距離と誤差、および目標座標までの角度と誤差についてそれぞれ共分散分析を行った [27], [28]。まず距離誤差に関しては、実験間で有意な差が見られた ( $F(4, 474) = 12.788$ ,  $p < 0.001$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.097$ )。さらに Bonferroni 補正による多重比較検定を行ったところ、実験 4 とそれ以外のすべての実験間で有意差が認められた (表 2 に結果を示す)。この結果から、顔向きを制御しないと指差し地点をうまく知覚することができないことが示唆

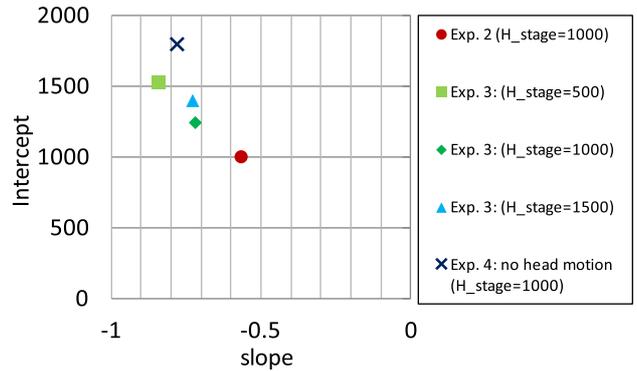


図 14 各条件での傾きと切片 (距離)  
 Fig. 14 Regression parameters for all conditions (distance).

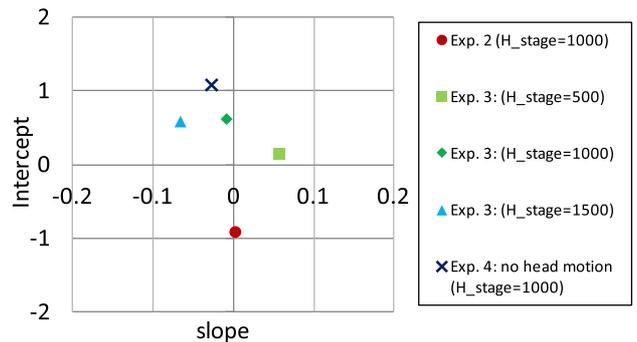


図 15 各条件での傾きと切片 (角度)  
 Fig. 15 Regression parameters for all conditions (angle).

表 2 統計処理の結果 (距離誤差)

Table 2 Result of statistical processing (Distance errors).

実験名	実験 3 $H_{stage}=1000$	実験 3 $H_{stage}=1500$	実験 3 $H_{stage}=500$	実験 4
実験 2	N. S.	N. S.	$p=0.007$	$p=0.023$
実験 3 $H_{stage}=1000$		N. S.	N. S.	$p<0.001$
実験 3 $H_{stage}=1500$			N. S.	$p=0.002$
実験 3 $H_{stage}=500$				$p<0.001$

される。

実験 3 の高さ 1,000 mm と高さ 500 mm および高さ 1,500 mm 間には、有意差は認められなかった。しかし、実験 2 と実験 3 の高さ 500 mm 条件間に  $p < 0.01$  の有意差が認められた。つまり、ロボットの高さによる影響はあるものの、はっきりとした影響は示唆されなかった。

図 14 に示したように、距離に関しては、傾きの大きさは  $-0.5$  から  $-0.9$  の間に分布しているが、平行性の検定から有意差は確認できず、傾きは同じと処理されたため、いずれも 3.3 節で述べた実験 2 においての結果と同様に「距離が大きいくほど、指差し位置を指示者に近いところに知覚する」といえる。

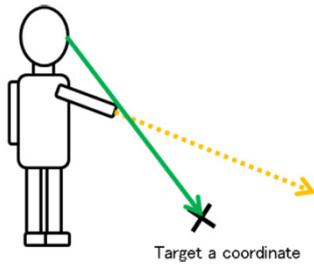


図 16 人間の指差し

Fig. 16 Example of human pointing.

同じく角度に関しては、共分散分析の結果から傾き、切片ともに、条件による有意な差は認められなかった。図 15 は、各実験における傾きと切片（角度）を示す。

まとめると、この実験で得られた結論は以下の 3 点となる。

- ロボットアバタ対人間の指差しの認識は、ロボットアバタ側に寄る。
- ロボットアバタ対人間の指差しは、距離が遠い方が誤差は大きくなる。
- ロボットアバタ対人間の指差しは、距離方向に誤差が大きい。

### 3.5 考察

人間対人間の実験においては、全体的に実験参加者側に認識した位置が分布した。人は指差しをする場合、図 16 実線に示すように目と指の延長線上を指差し点とする [23]。しかし、実験参加者は、破線のように、人間の腕の延長線上を指差した点として認識するために、指示者からの距離が長くなる（認識された指示座標が実験参加者側に偏る）結果となったのではないかと我々は考える。角度については、体を捻る方向に誤差が少なく、体を開いて指差しする方向に誤差が大きいことが見て取れる。体を捻る方が角度を理解しやすいと考える。

ロボット対人間の実験については、前の実験とは逆に、全体的にロボット側に認識した位置が分布した。

この分布に関して、高さの条件を変更 ( $H_{\text{stage}} = 500, 1,000, 1,500$ ) および、ロボットの顔の動きを固定した結果に関しても全体的にロボット側に認識した位置が分布した傾向は同様であった。ロボットの顔の動きを固定した結果に関して、図 14 から実験 2 と比較し、認識した位置までの距離（切片）が約 800 mm 程度異なった。実験 2 と実験 4 のアンケート結果を比較すると、実験 2 では正面が認識しにくいという回答（正面以外はまだ認識しやすい）があったのに対して、実験 4 では向きによらず空間全体が認識しにくいという回答が多かった。また、実験 4 に関して 8 名中 3 名が「ロボットの動きが不自然である、不気味だ」という回答をした。統計処理の結果からも、実験 4 だけ有意な差が認められた。よって、人間とのインタラクション

を志向した場合、ロボットアバタの顔の向きを目標点に向けた方が良いことが示唆された。

今回の結果から、人間による指差しに対する人間の知覚と、今回利用した小型ロボットによる指差しに対する人間の知覚について、以下のことが明らかになった。まず、今回の小型ロボットによる指差し位置の知覚と、人間による指差し位置の知覚には違いがあり、それはロボットの高さの影響だけでは説明がつかない。その原因としては、ロボットのサイズや腕の構造、指差し制御の方法などが考えられるが、今回の実験ではその原因までは明らかにはならなかった。いずれにせよ、小型のロボットの指差しを人間に正確に理解させる場合には、人間対人間の場合とは異なる対策を施す必要がある。

## 4. 指差し位置の補正による認識精度向上（実験 5）

### 4.1 実験概要

前章の実験結果（図 12）より、ロボットの指差し位置を人間が認識するとき、そこには系統的なバイアスがあることが分かる。そこで、そのバイアスを除くように最初から指差し位置を調整することにより、人間が指差し位置を認識するときの精度を向上させることができると考えられる。実験結果より、角度のバイアスは指示座標の角度によらずほぼ一定であるから、指示する際に角度を一定の値だけずらせばよいことが分かる。問題は距離の誤差の補正である。

図 12 より、指示座標の指示者からの距離とその誤差にはおおむね線形の関係があることが分かる。すなわち、ロボットからロボットが指示した座標までの距離を  $r$  とするとき、人間が知覚する座標とロボットとの距離  $R$  は、

$$R = r + e(r) \quad (1)$$

$$e(r) = ar + b \quad (2)$$

と表される。ここで、図 12 の結果を線形回帰分析すると、式 (2) の定数は  $a = -0.5649$ ,  $b = 1,000$  となった。

次に、ロボットの指示を補正することで認識される座標の精度を上げる方法について述べる。人間に認識させるべき距離を  $r$ 、そのためにロボットが指す距離を  $r'$  とする。このとき、

$$R = r' + e(r') = r \quad (3)$$

となるように  $r'$  を定めればよい。したがって

$$(1 + a)r' + b = r \quad (4)$$

$$r' = \frac{r - b}{1 + a} \quad (5)$$

ただし、右腕と左腕で正負が逆転しているため、それぞれを補正值として利用する。具体的には、ロボット対人間実

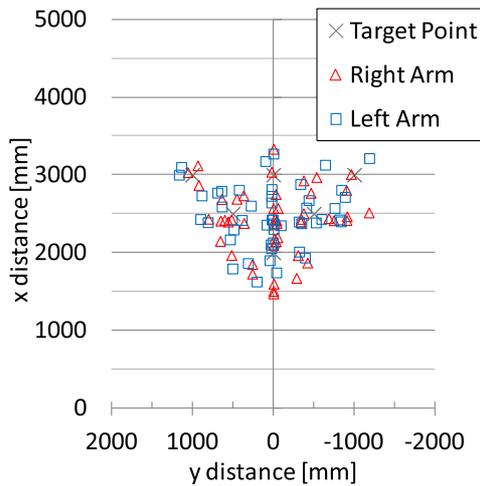


図 17 実験結果 (補正後)  
Fig. 17 Results (After adjustment).

験で用いた目標座標 6 点を式 (5) を用いて補正する。この新たな目標点をロボットアバタが指差せば、人間は、本来目標としていた 6 点と認識するはずである。

前章での実験のように、顔の向きに応じて、人間の指差し位置の知覚は変化する。しかし、全体の傾向としては類似しているため、今回は特定の条件下で指差し位置補正が有効かどうかを確認する。具体的には、 $H_{stage} = 1,000$  で、顔を目標地点に向ける制御を行った場合について検討した。この条件における補正がうまくいけば、他の条件においても、補正のパラメータを条件に合わせて調整することで同様な補正が可能だと考えられる。

#### 4.2 実験条件

以上の補正を行ったときに、実験参加者による座標の認識精度が向上するかどうか実験を行った。実験環境・手順ともに前章の実験と同じである。実験参加者は、21 歳～22 歳の男子大学生 8 名である。

#### 4.3 実験結果

図 17 に目標座標に対する実験参加者の認識した位置について示す。原点は、実験参加者の立ち位置である。3.3 節と同様にロボットアバタ側に認識した位置が分布している。そこで、距離と角度の関係を明確にするために、極座標系にまとめ直した図を図 18 および図 19 に示す。

距離の平均誤差は  $-234.75$  mm、標準偏差  $382.45$  mm であった。また、角度の平均誤差は  $0.090$  deg、標準偏差は  $1.92$  deg であった。補正前と補正後の誤差の平均値を表 3 に示す。なお、実験 2 と同様に目標座標までの距離と誤差の関係について「ピアソンの積率相関係数の有意性検定」を行い、これらに相関があることが分かった ( $p < 0.001$ )。相関係数は、 $-0.964$  であった。これは、補正前と類似した結果である。次に回帰分析をし、目標座標に対する角度の

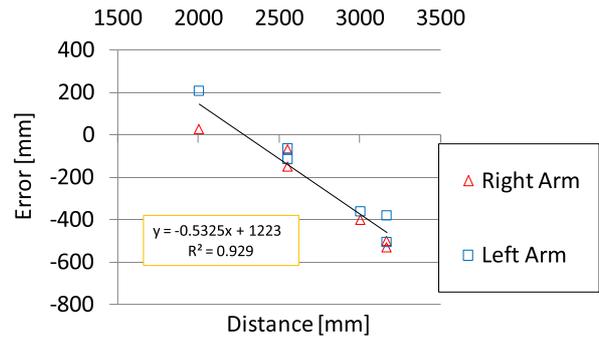


図 18 目標座標までの距離と誤差の関係 (補正後)  
Fig. 18 Relationship of pointed distance and errors (After adjustment).

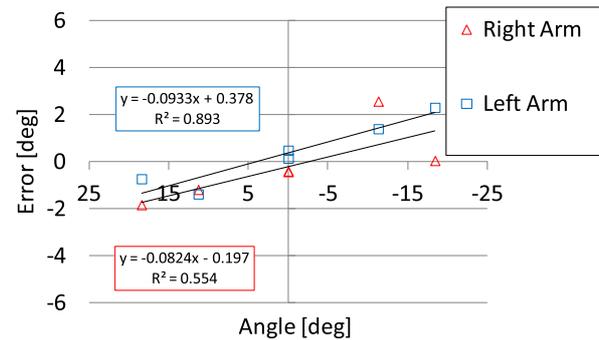


図 19 目標座標までの角度と誤差の関係 (補正後)  
Fig. 19 Relationship of pointed angles and errors (After adjustment).

表 3 ロボットアバタの指差しの認識精度の比較

Table 3 Comparison of errors of pointing perception errors.

	Before correction	After correction
Distance [mm]	-545.92	-234.75
Angle [deg]	-0.916	0.090

誤差について、指差しの腕 (右手と左手) を要因とする対応のある t 検定を行ったところ、右手と左手で有意な差は認められなかった。

#### 4.4 考察

精度向上手法 (線形近似) を行うことによって、距離に関して 43% 誤差が軽減された。しかし、奥行き方向には、誤差が残った。つまり、人間は、奥行き方向についての認識の精度が悪く、角度に対する感度は高い。たとえば、人間が指差しをして、その確認のためにロボットが「これですか」と音声情報を併用して、指差ししたとする。その物体がロボットから角度方向がずれていれば、今回の結果から人間はどちらの物体か判別が可能である。しかし、奥行き方向に物体が 2 個以上置かれた場合には、「これ」がどれを意味するか人間には理解できなくなる。

この結果に注意して、人間-ロボット間の相互理解を深

める工夫をすることが必要である。

## 5. ロボットと人間が正対しない場合（実験6）

### 5.1 実験概要

4章までは、ロボットと人間が正対していた。しかし実際の状況においては、ロボットと人間は必ずしも正対しているわけではない。ロボットと人間の位置関係は主として次の3つに分類できる [24], [25]。

- (a) ロボットと人間が正対している状態
- (b) ロボットに対して人間が斜めに向いている状態
- (c) ロボットと人間が同じ方向に向いている状態

これらの位置関係を図 20 に示す。

4章までは、(a) に対する検討を行ってきたことになる。本章ではそれ以外の位置関係についての検討を行う。1章で述べたように、この論文における人間・ロボット間インタラクションでは、人間がロボットから離れた位置にいて、指差しと音声対話によってロボットに指示を与える状況を想定している。つまり、人間と同じ方向をロボットが向く(c) は対象外とし、(b) について実験を行う。具体的には、ロボットアバタに対し、45度の位置に実験参加者が立つようにする。

### 5.2 実験条件

実験環境・手順ともに2章と同様である ( $H_{stage} = 1,000$ , ロボットの顔は目標座標を向く制御)。ロボットアバタに対する実験参加者の向きが異なることが相違点である。実験参加者は、21歳~22歳の男子大学生8名である。図 21 にロボットアバタと実験参加者の位置関係を示す。

### 5.3 実験結果

斜めの位置関係におけるロボットが指示した場合の人間による認識結果について述べる。図 22 に目標座標に対する実験参加者の認識した位置を示す。原点は、ロボットの配置位置である。距離と角度の関係を明確にするために、極座標系にまとめ直した実験結果を図 23 および図 24 に示す。距離の平均誤差は  $-992.33$  mm, 標準偏差  $388.02$  mm であった。また、角度の平均誤差は  $4.34$  deg, 標準偏差は

$5.76$  deg であった。

これらの結果から、全体の傾向としては人間とロボットが正対した場合の結果(図 12, 図 13)と同じであることが分かる。なお、実験2と同様に目標座標までの距離と誤差の関係について「ピアソンの積率相関係数の有意性検定」を行い、これらに相関があることが分かった ( $p < 0.001$ , 相関係数  $-0.974$ )。次に回帰分析をし、目標座標に対する角度の誤差について指差しの腕(右手と左手)について対応のある t 検定を用いて処理した結果,  $t = 7.223$ ,  $p < 0.001$ ,

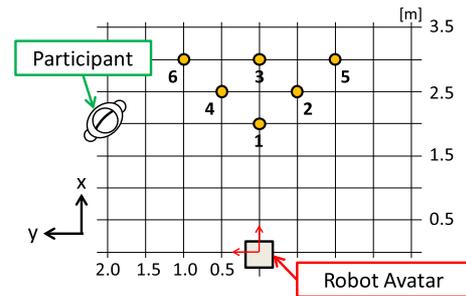


図 21 目標座標 (ロボット対人間)

Fig. 21 Arrangement of the target positions (Robot condition).

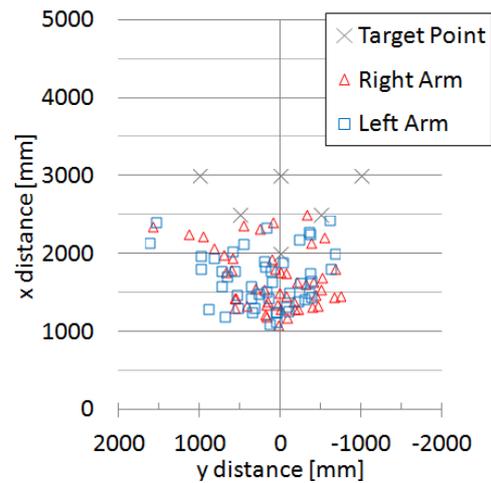


図 22 実験結果 (ロボット対人間)

Fig. 22 Results (Robot condition).

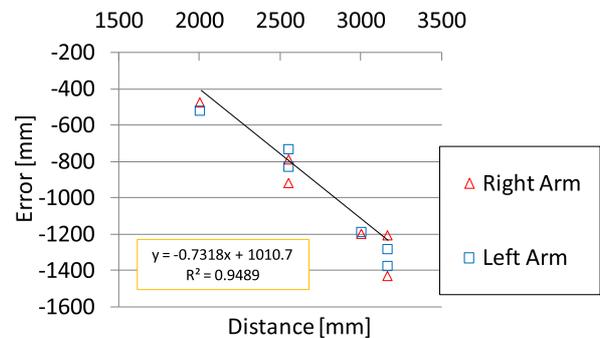


図 23 目標座標までの距離と誤差の関係 (ロボット対人間)

Fig. 23 Relationship of pointed distance and errors (Robot condition).

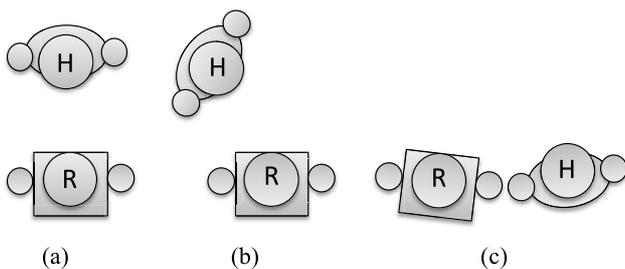


図 20 ロボットと人間の位置関係 (H: 人間, R: ロボット)

Fig. 20 Relationship between robot position and human position (H: Human, R: Robot).

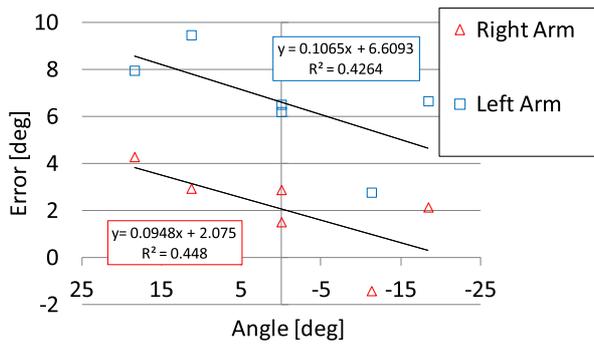


図 24 目標座標までの角度と誤差の関係 (ロボット対人間)

Fig. 24 Relationship of pointed angles and errors (Robot condition).

効果量  $r = 0.725$  となり、有意差が認められた。

すなわち、ロボットと指差し位置の距離が遠い方が誤差が大きく、知覚される指差し位置はロボット側に偏る。角度の誤差は全体として小さく、ロボットからの角度による影響はそれほど大きくない。しかし、それぞれを詳細に比較すると、左腕（実験参加者に近い方の腕）による指示の認識精度が距離・角度とも悪く、それによって全体の精度が落ちていることが分かる。この結果から、ロボットと人間の位置関係に応じて、人間から遠い方の腕で指示を行ったほうが良いことが示唆される。この点に関して、もっと確定的な結論を得るには、さらなる実験が必要であろう。

## 6. 考察

本考察では、個々の実験で示すことのできなかった箇所について考察する。本論文では、「ロボットの指差しを人間がどれだけ認識可能か」について議論してきた。指差しにこだわらず、たとえばレーザーポインタをロボットに装着し、位置情報を提示する手法もある。Kuzuokaら [29] は、GestureMan を提案している。遠隔地よりロボットを操作し、対象物にレーザーを照射し、作業者に物体の指示を行う。ただし、レーザーを使用すると、作業者が照射点に気がつかないことがあること [30] や、レーザーポインタは一般的なクラス 2 の製品であっても「0.25 秒以上の直視は危険」[31] とされており、本論文で行っているような、人間とロボットが対面する状況を設定しがたい。

先ほどとは逆に座標を人間がロボットへ教示するという観点から見れば、Kempら [32] のレーザーポインタを用いて人間が対象物を直接指示する方法が有効であるが、レーザーポインタというデバイスを使用しなくてはならないこと、レーザーの照射点に他の人がいないことなど、により使用する箇所が制限される。

次にロボットの形状の影響について述べる。今回はある 1 種類のロボット（小型のロボット）による指差しで実験を行ったが、ロボットが人間型で人間と同様のサイズの場合は、人間対人間に近い実験結果が得られる可能性がある。

これについても今後の検討を要する。

次に人間の利き目について述べる。本論文では、人間の利き目については特に記録していない。利き目による影響はないとはいきれないが、指差し位置の認識精度と比較し、十分に影響は小さいと考える。

最後に実験参加者について述べる。本実験参加者は、男子大学生のみを対象として行った。空間認知において性別による差は明確でないことから [33]、性別による認識精度の差は考えにくい。ただし、子供の場合（身長が低い）には、認識精度に差が生じるかもしれないが、いずれにせよ、他の年代・性別については今後の課題となる。

## 7. 結言

本論文では、人間-ロボット間の相互理解を深めるために、ロボットの指差しを人間が認識可能か検証した。

まず、人間同士で指差しをどの程度認識可能か実験を行い、次にロボットアバタの指差しをどの程度認識可能か実験を行った。その結果、人間とロボットでは、指差しの認識に異なる傾向が見られた。それは、ロボットの高さの影響だけでは説明がつかない。

一方、指示者からの距離が離れるほど指差し位置の知覚が指示者に寄るなど、人間とロボットで共通する部分もある。これらの理由の解明は、今後の課題である。なお、人間とのインタラクションを志向した場合、ロボットアバタの顔の向きを目標点に向けた方が良いことが示唆された。

次にロボットアバタの指差しで得られた結果より、精度向上手法（線形近似）を導入した。これを用い認識精度向上を図った結果、距離に関して 43% 誤差の軽減が見られ、本手法の有用性が得られた。なお、ロボットアバタと人間の位置関係が斜めの場合についても実験を行った。

本論文で得られた知見を以下に示す。

- 人間対人間の指差しの認識は、実験参加者側に寄る。
- 人間対人間の指差しは、実験者の方に近い方が誤差は少なくなる。
- ロボットアバタ対人間の指差しの認識は、ロボットアバタ側に寄る。
- ロボットアバタ対人間の指差しは、距離が遠い方が誤差は大きくなる。
- ロボットアバタ対人間の指差しは、距離方向に誤差が大きい。

これらから人間同士は指差しによるコミュニケーションを行っているが、検証してみるとあいまいなやりとりであることが分かった。ロボットとインタラクションする場合には、角度に関しての情報伝達は問題なく用いることが可能（角度の平均誤差は 0.090 deg）だが、奥行きに対しては誤差が大きい（距離の平均誤差は -234.75 mm）ことに注意しなければならない。

今後の展望として、指差しコミュニケーションを用いて

人間が指示した点へロボットを誘導することや床面上の物体をロボットに指示し、ロボットがそれを拾うというタスクを実現したいと我々は考えている。当初はまず人間が指差しによって物体を指定し、ロボットが同じ物体を指差すことによって指示物体を確認するというプロトコルを想定していた。しかし、今回の結果を受けると、距離方向（多くの場合、ロボットの進行方向）に対する物体の特定精度が低い場合、人間が指示した物体がロボットから遠い場合には、ロボットが対象物の近くまで移動してから再度、物体を検出すること [26] や再度物体を人間に指示してもらうよう要請するなど、の工夫が必要になると考えた。これについても今後実験を行う。なお、本提案手法は、杉山ら [24] と異なり、対象物を指差しするのではなく、床面の点という人間が認識しにくい環境で実験を行ったことに意義がある。

最後に人間-ロボット間コミュニケーションをよりスムーズにする手法を今後も開発していく予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費基盤研究 (B) 24652111 および科研費・若手 (B) (26870723) の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] Yamazaki, K., Ueda, R., Nozawa, S., Kojima, M., Okada, K., Matsumoto, K., Ishikawa, M., Shimoyama, I. and Inaba, M.: Home-Assistant Robot for an Aging Society, *Proc. IEEE, Centennial Year, Special Issue, Quality of Life Technology*, Vol.100, No.8, pp.2429–2441 (2012).
- [2] Mertens, A., Reiser, U., Brenken, B., Lüdtke, M., Hägele, M., Verl, A., Brandl, C. and Schlick, C.: Assistive Robots in Eldercare and Daily Living: Automation of Individual Services for Senior Citizens, *Proc. 4th International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA 2011)*, Volume Part I, pp.542–552 (2011).
- [3] 中野栄二, 廣井 富: 介護支援ロボットの開発例, *日本福祉工学会誌*, Vol.10, No.1, pp.8–13 (2008).
- [4] 山本貴史, 齋藤史倫, 橋本国松, 池田幸一: 生活支援ロボット HSR の開発, 第 30 回日本ロボット学会学術講演論文集 DVD-ROM, 3C2-1 (2012).
- [5] Hiroi, Y., Nakano, E., Takahashi, T., Makino, S., Ito, A., Kotani, K., Takatsu, N. and Ohmi, T.: A Patient Care Service Robot System Based on a State Transition Architecture, *Proc. 2nd International Conference on Mechatronics and Information Technology (ICMIT2003)*, pp.231–236 (2003).
- [6] Bolt, R.A.: “Put-that-there”: Voice and gesture at the graphics interface, *Proc. 7th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, pp.262–270 (1980).
- [7] Kortenkamp, D., Huber, E. and Bonasso, R.P.: Recognizing and interpreting gestures on a mobile robot, *Proc. 13th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-96)*, pp.915–921 (1996).
- [8] Waldherr, S., Romero, R. and Thrun, S.: A Gesture Based Interface for Human-Robot Interaction, *Autonomous Robots*, Vol.9, pp.151–173 (2000).
- [9] 新谷晃市, 間下以大, 清川 清, 竹村治雄: 指差し動作における身体の左右差に関する調査, 電子情報通信学会 Human Communication Group (HCG) Symposium (2010).
- [10] Kehl, R. and Van Gool, L.: Real-time pointing gesture recognition for an immersive environment, *Proc. 6th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp.577–582 (2004).
- [11] Yamamoto, Y., Yoda, I. and Sakaue, K.: Arm-pointing Gesture Interface Using Surrounded Stereo Cameras System, *Proc. 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2004)*, Vol.4, pp.965–970 (2004).
- [12] Nickel, V. and Stiefelhagen, R.: Visual recognition of pointing gestures for human-robot interaction, *Image and Vision Computing*, Vol.25, No.12, pp.1875–1884 (2007).
- [13] Sato, E., Yamaguchi, T. and Harashima, F.: Natural Interface Using Pointing Behavior for Human-Robot Gestural Interaction, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.54, No.2, pp.1105–1112 (2007).
- [14] Droeschel, D., Stuckler, J., Holz, D. and Behnke, S.: Towards Joint Attention for a Domestic Service Robot – Person Awareness and Gesture Recognition using Time-of-Flight Cameras, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011)*, pp.1205–1210 (2011).
- [15] Droeschel, D., Stückler, J. and Behnke, S.: Learning to interpret pointing gestures with a time-of-flight camera, *Proc. International Conference on Human-robot Interaction (HRI '11)*, pp.481–488 (2011).
- [16] 飯尾尊優, 塩見昌裕, 篠沢一彦, 秋本高明, 下原勝憲, 萩田紀博: 物体指示対話におけるクロスモーダル効果, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol.13, No.1, pp.9–22 (2011).
- [17] 鳩 康彦, 佐竹 聡, 神田崇行, 今井倫太, 萩田紀博, 安西祐一郎: コミュニケーションロボットによる領域参照のための直視的インタラクションのモデル化, *日本ロボット学会誌*, Vol.29, No.6, pp.52–63 (2011).
- [18] Yang, H.-D., Park, A.-Y. and Lee, S.-W.: Gesture Spotting and Recognition for Human-Robot Interaction, *IEEE Trans. Robotics*, Vol.23, No.2, pp.256–270 (2007).
- [19] Van den Bergh, M., Carton, D., De Nijs, R., Mitsou, N., Landsiegel, C., Kuehnlitz, K., Wollherr, D., Van Gool, L. and Buss, M.: Real-time 3D Hand Gesture Interaction with a Robot for Understanding Directions from Humans, *Proc. Int. Symp. on Robot and Human Interactive Computation (RO-MAN2011)*, pp.357–362 (2011).
- [20] Ohmura, R., Kusano, K. and Suzuki, Y.: Pointing gesture prediction using minimum-jerk model in human-robot interaction, *Proc. Int. Conf. on Human-agent Interaction*, pp.181–184 (2014).
- [21] 廣井 富, 伊藤彰則, 中野栄二: 人間共存型ロボットのためのロボットアバタを用いた親しみ感の向上, *感性工学研究論文集*, Vol.7, No.4, pp.797–805 (2008).
- [22] Futaba Corporation, available from (<http://www.futaba.co.jp/en/index.html>) (accessed 2012-01-27).
- [23] Nickel, K. and Stiefelhagen, R.: Pointing Gesture Recognition based on 3D-Tracking of Face, Hands and Head Orientation, *Proc. 5th International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI 2003)*, pp.140–146 (2003).
- [24] 杉山 治, 神田崇行, 今井倫太, 石黒 浩, 萩田紀博, 安西祐一郎: コミュニケーションロボットのための指さしと指示語を用いた 3 段階注意誘導モデル, *日本ロボット学会誌*, Vol.24, No.8, pp.964–975 (2006).
- [25] 山岡史享, 神田崇行, 石黒 浩, 萩田紀博: 情報提示ロボットのための立ち位置モデル, *日本ロボット学会誌*, Vol.27, No.2, pp.230–238 (2009).
- [26] 二上啓大, 廣井 富, 黒田尚孝, 鈴木直人, 伊藤彰則:

- 指差しと音声対話併用による床面上の物体回収手法の提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集 DVD-ROM, 2A1-F07 (2014).
- [27] 石村貞夫, 石村光資郎: 入門はじめての分散分析と多重比較, 東京図書株式会社 (2014).
- [28] 石村貞夫, 石村光資郎: SPSS による分散分析と多重比較の手順, 第 4 版, 東京図書株式会社 (2011).
- [29] Kuzuoka, H., Oyama, S., Yamazaki, K., Suzuki, K. and Mitsuishi, M.: GestureMan: A mobile robot that embodies a remote instructor's actions, *Proc. 2000 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, pp.155–162 (2000).
- [30] Luff, P., Heath, C., Kuzuoka, H., Hindmarsh, J., Yamazaki, K. and Oyama, S.: Fractured ecologies: Creating environments for collaboration, *Human-Computer Interaction*, Vol.18, No.1, pp.51–84 (2003).
- [31] Karl, S.: The risk of retinal injury from Class 2 and visible Class 3R lasers, including medical laser aiming beams, *Medical Laser Application*, Vol.25, No.2, pp.99–110 (2010).
- [32] Kemp, C.C., Anderson, C.D., Nguyen, H., Trevor, A.J. and Xu, Z.: A point-and-click interface for the real world: laser designation of objects for mobile manipulation, *Proc. 3rd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp.241–248 (2008).
- [33] 若林芳樹: 空間認知と GIS, *地理学評論*, Vol.76, No.10, pp.703–724 (2003).



廣井 富

2005 年石巻専修大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同大学助手, 2006 年東北大学大学院国際文化研究科 COE フェロー, 岩手県立大学ソフトウェア情報学部客員教員, 2009 年大阪工業大学工学部機械工学科講師, 現在, 同大学ロボット工学科准教授。主に生活支援ロボットの開発, 親和性向上に関する研究に従事。博士 (工学)。日本機械学会, 日本ロボット学会, ヒューマンインタフェース学会等の会員。



伊藤 彰則 (正会員)

1986 年東北大学工学部通信工学科卒業。1991 年同大学大学院博士課程修了。同年同大学応用情報学研究センター助手。1992 年同大学情報処理教育センター助手。1995 年山形大学工学部講師。1998~1999 年米国ボストン大学客員研究員。現在, 東北大学大学院工学研究科教授。工学博士。音声言語情報処理, 音声信号処理, 音楽情報検索等の研究に従事。日本音響学会, 電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会, IEEE 各会員。