

# 積極的な挙手動作を代行する挙手ロボットの開発

青柳 西蔵<sup>1</sup> 河辺 隆司<sup>2</sup> 山本 倫也<sup>3,a)</sup> 福森 聡<sup>3</sup>

受付日 2016年7月21日, 採録日 2017年2月9日

**概要:** 挙手は, 根源的な身体動作の1つであるが, これを促す具体的な手段についてはほとんど議論されていない. 本研究では, 人の積極的な挙手動作の特徴を導入した腕型デバイス, 挙手ロボットの開発を行った. まず, 人の挙手動作を測定し, 分類することで5通りの典型的な挙手動作を抽出して, ロボットへの導入を可能とした. 次に, 分類した挙手動作をロボットに導入し評価実験を行い, ロボットの関節自由度にかかわらず, 手を高く・速く挙げる動作が, 好印象を与えることを明らかにした. そして, 挙手ロボットの使用感と使用効果に関する評価を行い, 気軽に挙手しやすい雰囲気を感じさせることなどを明らかにした.

**キーワード:** 挙手, 動作解析, クラスタ分析, ロボット

## Development of a Hand-raising Robot by Representing Embodied Motions of Active Hand-rising

SAIZO AOYAGI<sup>1</sup> RYUJI KAWABE<sup>2</sup> MICHIIYA YAMAMOTO<sup>3,a)</sup> SATOSHI FUKUMORI<sup>3</sup>

Received: July 21, 2016, Accepted: February 9, 2017

**Abstract:** Hand-raising is one of fundamental embodied motions. However, the concrete way to enhance such motions is discussed hardly. In this study, we developed an arm-shaped device hand-raising robot, in which the specification of active human hand raising is introduced. First, we measured motions in hand raising, and classified them to typical five patterns, which can be installed in the motions of the hand-raising robot. Then, we implemented them in the hand-raising robot and performed an evaluation experiment. It made clear that high and fast hand raising gives good impression irrespective to degrees of freedom of the hand-raising robot. We also performed evaluation experiment about usability and effect, and made clear that the hand-raising robot can provide atmosphere in which participants can feel free to raise their hands.

**Keywords:** hand-raising, motion analysis, cluster analysis, robot

### 1. はじめに

人は, 言葉だけでなく, うなずきや身振り, 手振りなど, 身体動作をともなってコミュニケーションしている. このような身体動作はコミュニケーションにおいて大きな役割を果たしており, エンブレム, 例示的動作, 調整的動作, 情

報表出, 適応的動作など, 様々な役割を果たしている [1]. この中で, 挙手は, 挨拶やお辞儀と並び, 幼児期から躰として教育される重要な身体動作の1つである. 挙手が行われる代表的な場所として教室があげられるが, 教室における挙手は, 学習者 (生徒) から教師に何かを伝える際に行われる動作であり [2], 授業への積極的参加を表す行動の1つとされる [3]. 一方で, 授業中に手を挙げない学習者がみられることが問題視されており, 学年が上がるごとに小学生の挙手が減少すること [3], 挙手して発言すべき状況にもかかわらず, 恥ずかしいなどの理由で挙手ができない学習者もいること [4] が指摘されている.

挙手に対する一般的なイメージも, このような教室における挙手の延長として創り出されていると考えられる. すなわち, 高校・大学生ともなると, 教室やグループワーク

<sup>1</sup> 東洋大学情報連携学部  
Faculty of Information Networking for Innovation and Design, Kita, Tokyo 115-0053, Japan

<sup>2</sup> 大日本印刷株式会社  
Dai Nippon Printing Co., Ltd., Shinjuku, Tokyo 162-8001, Japan

<sup>3</sup> 関西学院大学理工学部  
School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University, Sanda, Hyogo 669-1337, Japan

a) michiya.yamamoto@kwansai.ac.jp

の場で挙手することはなく、就職活動における企業説明会など、どうしても挙げざるをえない場面でのみ、挙手するという状況にある。ところが、欧米では、自らの意見を持ち、それを発言することが当たり前であり、ドイツの挙手制度など、挙手が成績評価の基準の1つとなっていることから分かるように、身体動作としての挙手は、失われていない。このような状況の中で、挙手を促す具体的な手段を開発することは非常に有益であると考えられるが、これまで挙手研究の報告例は、教育現場の実態把握や要因分析に関するものが中心であり [2]、これをどう支援すべきかについてはほとんど議論されていない。

一方、コミュニケーションの場の支援において、身体動作に着目したシステムが開発されている。たとえば福岡らは、ユーザの笑いに同期させてラフトラックを再生する際に、複数の人形に笑いの動作をさせることで、ラフトラックの観客を実体化し、あたかも観客のなかで笑っているような没入感を生成している [5]。また渡辺らも、身体動作の引き込みに着目し、コミュニケーションを支援する身体性メディア技術の研究を進めてきた。たとえば、うなずきロボット“InterRobot”を開発し、物理的な実体を持つロボットの身体性が遠隔コミュニケーションの支援に有効であることを示している [6]。さらに、複数のCGキャラクターのうなずきや身振り・手振りなどの引き込み反応がコミュニケーション場の伝達効果を高めることを明らかにしている [7]。こうした知見をふまえると、積極的な挙手を表現する身体性メディア技術が開発できれば、授業中や、様々なグループコミュニケーションの場面で、挙手しやすさも醸成できると期待できる。

そこで本研究では、人の挙手の動作特徴を導入した腕型デバイス、挙手ロボットの開発を行った。挙手ロボットは操作に応じユーザの代わりに手を挙げることで積極的な挙手を支援する。本稿では、まず積極的なコミュニケーション場を生成する挙手ロボットのコンセプトを提案している。次に、ロボットが挙手の中でも見た目の印象の良い動作をすることが、コミュニケーション場を生成するうえで有効であると仮定し、これを方針としてシステムを開発している。この中でまず、どのような動作特徴を持つ挙手が印象が良いのかということがこれまでに明らかにされていなかったため、人の挙手動作の計測と結果のクラスタ分析を行い、人の挙手の典型的・代表的な動作を抽出している。次いで、人の腕と同様の構造・外観が挙手の動作特徴を最も反映できると考え、人のように手を挙げる腕型のロボットを開発している。さらに、抽出した挙手動作をこのロボットに導入し、動作の印象評価を通じてロボットに最終的に採用する動作を決定している。最後に、この動作を採用したロボットの使用感に関する評価を行っている。

なお以下では、ロボットが使用者に代わり挙手をした場合でも、使用者が挙手する、手を挙げると表現する。

## 2. 研究アプローチ

著者らはこれまで、身体動作が場の一体感や共有感に影響を与え、コンテキストに重要な役割を果たす点に着目し、うなずきや身振り、手振りを行うキャラクターを導入した教育支援システムなどを開発してきた。具体的には、複数のCGキャラクターを映像に重畳合成することで場の伝達効果が高まること [8]、CGキャラクターを介することで普段とは異なるコミュニケーションが可能になること [9]などを明らかにしている。また、大画面上のCGで身体動作やそのリズムを共有することで、インタラクションを深めて引き込みの度合いを高めるCGシステムのコンセプトを提案している [10]。

このように、身体動作が場づくりに重要な役割を果たす点に着目し、本研究では、積極的な挙手動作を代行する挙手ロボットの開発を行う。ここでは、フジテレビのバラエティ番組「トリビアの泉」における「へえボタン」\*1で、ボタンを押すと「へえー」とはっきりと代弁するように [11]、ボタン操作に対して自己の挙手を代行するようにロボットに積極的な挙手動作をさせることとした。これは、自己の延長としてロボットを位置づけることで、自己と場との関係性を強く保つためである。この有効性は、音声からCGキャラクターのコミュニケーション動作を自動生成することで、CGキャラクターになりきり、場との関係性を強めた、著者らの先行研究などでも示されている [12]。また、お笑い番組のラフトラックが、笑ってよい状況であることを伝えたり、著者らの先行研究において提示した積極的なうなずき [8]が、コミュニケーションにおけるうなずきの重要性を伝えたりするのと同様に、積極的な挙手動作を提示することが、結果として、利用者あるいは周囲にいる人々に自身の挙手の重要性を気づかせることにつながればと考えている。

図1に本研究の挙手ロボットのコンセプトを示す。挙手ロボットは、挙手という動作の特徴を体現する最もシンプルな形状として、人の腕と手だけを模した構造・外観をし



図1 挙手ロボットの使用イメージ

Fig. 1 Image of usage of a hand-raising robot.

\*1 視聴者から投稿されたネタに対して、出演者が、どのくらい「へえ〜」と共感したかをボタンを押してカウントするガジェットで、玩具として商品化されるほどの人気を博した。

ており、アームを上方に伸ばす機能を備えている。利用者は、机に置かれたデバイス进行操作することにより、自ら手を挙げる代わりに挙手ロボットを使って手を挙げるができる。これにより、自分で手を挙げることに抵抗のある場合でも気軽に意思表示を行うことが期待される。最終的な目標としては、挙手ロボットが手本となるような挙手を行うことで、ロボットを利用していない参加者も一緒に挙手したくなるような、積極的な雰囲気づくり、場づくりを促したいと考えている。

### 3. 挙手動作の計測実験

#### 3.1 目的と方法

本研究は、挙手ロボットに見た目の印象の良い動作を導入することを方針とする。しかし、どのような動作特徴を持つ挙手が印象が良いのかということはこれまでに明らかにされていない。そこで、ロボットに導入する挙手動作の決定に向け、まず、挙手動作のデータ取得を通じて人の典型的・代表的な挙手動作を把握することを目的とした計測実験を行った。

実験では、教室を模した個室で、スクリーンに教室の風景と、一般常識の問題を提示し、実験協力者に座った状態で挙手・解答させた。実験風景を図2に、実験環境を図3に示す。事前に実験協力者には設定された状況を説明し、すべての問題に自由なタイミングで挙手をして解答するように指示した。実験中の様子はビデオカメラ(ソニー, HVR-A1J)で撮影し、挙手動作をモーションキャプチャシステム(VICON, VICON MX)により100 Hzで計測した(図4)。実験協力者は18-25歳の32人(男性16人, 女性16人)であった。



図2 実験の風景

Fig. 2 Experimental scenery.

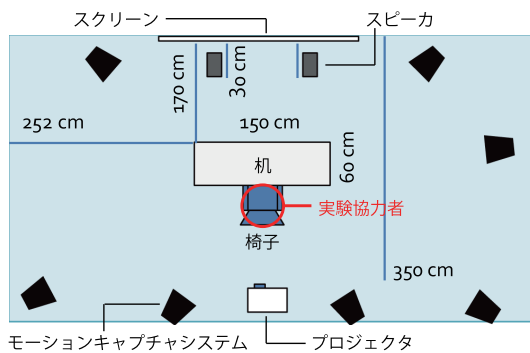


図3 実験環境

Fig. 3 Experimental environment.

なお実験では、様々な挙手を実験協力者に行わせる目的で、問題ごとに難易度をランダムに変更した。同時に、挙手に対して、手音を鳴らすポジティブ状況と、ブーイング音を鳴らすネガティブ状況をランダムに設定した。

#### 3.2 クラスタ分析による挙手動作の分類

撮影した映像とモーションキャプチャのデータから、挙手動作には、いくつかの動作パターンがあることが確認された。そこで、挙手の高さ、肘の角度、挙手動作の速度に着目し、Ward法によるクラスタ分析を行った。分析に使用した各要素の概要を図5に示す。高さは指先のマーカ位置から取得した各試行の高さの最大値と事前に計測した高さの最大値との割合とした。速度は指先のマーカ位置における10フレーム間の移動距離から推定した最大速度とした。角度は高さが最大であるときの上腕と前腕のマーカ位置から推定した肘の角度とした。また、分析では、実験における各実験協力者の1度目に計測した動作を用いた。

分析結果から、解釈のしやすさを考えて、AからFの6つのクラスタを抽出することにした。それぞれのデンドログラムと動作の様子を図6、各クラスタのパラメータ例を表1に示す。Aのクラスタは計9人であり、挙手の最高点が比較的高く、肘はあまり曲がっておらず、挙手の最大速度がBを除く他のクラスタに比べて速い傾向があった。Bのクラスタは計1人であり、Aと同様に最高点が高く、肘を伸ばして真っ直ぐ挙げており、最大速度が一番速かった。Cのクラスタは計7人であり、肘はあまり曲がっておらず、最高点がA、Bと比べて若干低く、速度が緩やかな傾向があった。Eのクラスタは計8人であり、手を頭部くらいの位置まで挙げ、肘を曲げて挙手をする傾向があった。

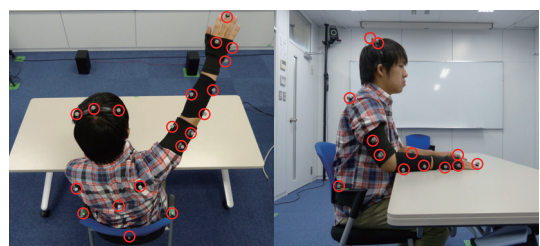


図4 各マーカの位置

Fig. 4 Positions of markers.

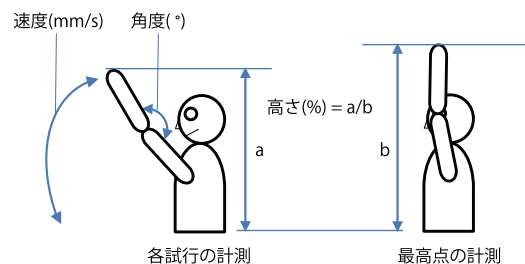


図5 動作解析のパラメータ

Fig. 5 Parameters of motion analysis.

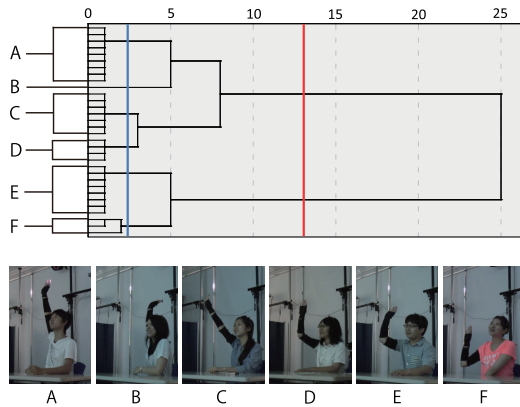


図 6 挙手の分類

Fig. 6 Classification of hand-raising.

表 1 各クラスターのパラメータ例

Table 1 Example of each cluster's parameter.

クラスター	高さ (%)	速度 (mm/s)	角度 (°)
A	90.6	2,796.0	174.3
B	92.3	4,710.9	162.5
C	79.2	2,347.3	171.1
D	75.0	1,776.0	114.4
E	70.0	2,234.9	110.0
F	47.3	2,452.2	51.6

Fのクラスターは計3人であり、上腕をほとんど動かさず、肘を曲げるだけで挙手し、高さが極端に低かった。Dのクラスターの計4人に関しては、高さ・速度・角度の各要素にばらつきがあり、共通点が明確ではないため、傾向を判断することが困難であった。

クラスター分析の結果により、動作傾向の判断が困難であったDのクラスターを除外した場合、挙手動作は、大まかに肘を曲げて挙手するタイプと肘を伸ばして挙手するタイプに分類できることが明らかになり、肘の角度が挙手の姿勢を分類するうえで重要な要因であることが明らかになった。一方で、各試行の動作を確認すると、問題の難易度や状況の設定によって、各個人の挙手を行う姿勢そのものに大きな変化は確認されなかった。

これら、得られたクラスターごとの挙手の傾向は、人が実際にしている挙手の典型的・代表的な動作といえる。そこで本研究では、この結果のうち、Dを除く5つのクラスターを動作の候補とし、ロボットを開発することにした。

#### 4. 挙手ロボットの開発

次に、挙手ロボットのハードウェアを開発した。図7に制御システムも含めた挙手ロボットのシステムの全体図を示す。ロボットのサイズや使用した部品の詳細は表2のとおりである。ロボット本体は人の腕を模した形をしており、3自由度 (Degree Of Freedom, DOF) 構成となっている。関節部には3個のサーボモータを使用しており、肩・

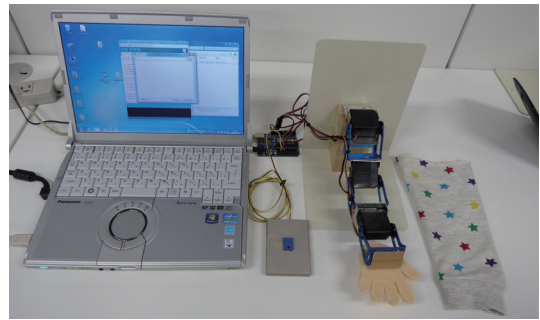


図 7 システムの全体図

Fig. 7 Overall view of system.

表 2 挙手ロボットのサイズと構成要素

Table 2 Size and parts of the hand-raising robot.

サイズ	幅 65 × 高さ 122 × 奥行 280 (mm)
関節部モータ	VS-S092J × 3
制御用基板	Arduio UNO SMD R3
電源	DC 5V
制御用 PC	Panasonic CF-S10

肘・手首それぞれの関節が縦方向に1軸のみ回転する。ロボットの大きさは、机に設置し使用することを想定し、人の手のおおよそ1/2スケールとした。また、ロボットの動作制御には Arduino<sup>\*2</sup>を用いており、PC上のソフトウェアやロボットに付属した物理ボタンからサーボモータを操作できる。

#### 5. 挙手ロボットに導入する挙手動作の印象評価実験

##### 5.1 目的と方法

3章の分析結果から、挙手は動作に様々な特徴を持つことが確認され、それぞれに印象の違いがあると考えられる。また、本研究では、一般的に印象の良い挙手動作が、一緒に手を挙げなくなる挙手であり、挙手を支援するうえで有効であると仮定している。そこで、得られた5つの動作のうち印象の良い挙手動作を明らかにすることを目的として印象評価実験を実施した。

まず、得られたA, B, C, E, Fの各クラスターの挙手動作を参考に、ロボットの動作として5種類の動作を作成した(図8)。これらの動作はロボットに反映させるにあたって、実際の角関節の角度・手を上げる速さ・指先の位置が、実際の動作に近づくように調整した。加えて、著者らは自由度(関節で駆動するサーボモータの個数)をさらに減らすことによって、他のロボットにも挙手動作を導入可能にすることや、キャラクターを持ったロボットの開発も視野に入れている。そのため、3自由度の動作に加えて、2自由度で肩と肘の関節、1自由度で肩の関節のみ回転させる合計15種類の動作を作成した。各自由度の挙手動作は、正

\*2 Arduino: <http://www.arduino.cc/>



図 8 ロボットの動作例

Fig. 8 Example of robot's motions.

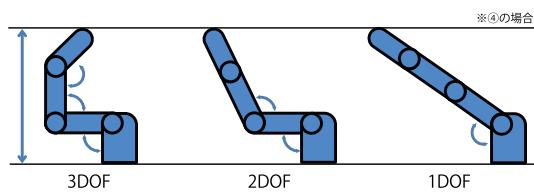


図 9 各自由度の調整

Fig. 9 Adjustment of each DOF.

面からの外観が同じになるように、指先の位置と手を挙げる速度を調整した (図 9)。そして、これらの動作の中から、人がどの挙手に好印象を持つかを調査した。

### 5.2 同一自由度内における印象評価

前節の図 8 における挙手動作のうち同一自由度内の ①～⑤ の動作を評価する実験を行った。実験では、①～⑤ の動作のうち異なる 2 つを設定した 2 体の挙手ロボットを左右に並べて、実験協力者に「より良い挙手であると感じた動作」を選択させ、一対比較法により印象を評価した。2 つの動作の比較回数は  ${}_5C_2 = 10$  通りである。実験協力者は 21～25 歳の 10 人 (男性 8 人, 女性 2 人) であった。

各自由度の動作の印象の一対比較の結果を表 3 (a)～(c) に示す。表中における横軸の数値は一対比較において、縦軸に対する勝ち数を表している。たとえば、3 自由度における ② の動作は、④ の動作に 8 回勝っている。そして、各動作の「強さ」を定量的に評価するため、Bradley-Terry

表 3 挙手の印象の一対比較の結果

Table 3 Result of paired comparison of impression of hand-raising.

(a) 3 自由度

	①	②	③	④	⑤	勝敗
①		10	10	10	10	40
②	0		9	8	9	26
③	0	1		5	8	14
④	0	2	5		9	16
⑤	0	1	2	1		4

(b) 2 自由度

	①	②	③	④	⑤	勝敗
①		10	10	10	10	40
②	0		9	9	10	28
③	0	3		7	10	20
④	0	2	3		8	13
⑤	0	0	0	2		2

(c) 1 自由度

	①	②	③	④	⑤	勝敗
①		10	10	10	10	40
②	0		9	9	10	28
③	0	1		7	10	18
④	0	1	3		8	12
⑤	0	0	0	2		2

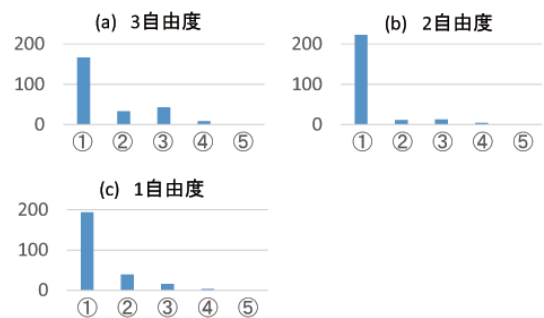


図 10 挙手の印象の強さ  $\pi$

Fig. 10 The strength of the impression of hand-raising:  $\pi$ .

モデルを想定し、強さ  $\pi$  (合計 250) を最尤推定した。このモデルにより、一対比較に基づく強さを一義的に定めることができる [13]。

得られた各自由度のそれぞれの動作の強さ  $\pi$  の値を図 10 (a)～(c) に示す。いずれの自由度においても、肘を曲げている ④・⑤ よりも、肘を伸ばしている ①・②・③ の動作が高く評価された。この結果から、肘を伸ばしてロボットが挙手を行っていることが、好印象を与えていると考えられる。加えて、①・②・③ の動作を比較した場合、特に ① の動作が高く評価されており、手を挙げる速度が高いと好印象を与えることが明らかになった。また、実験協力者から「挙げるスピードが速い方が良い挙手だと感じた」などのコメントが得られたことから、挙手の速さが

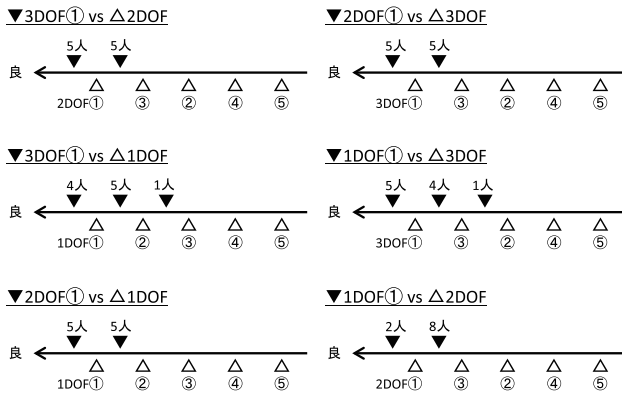


図 11 自由度間の比較

Fig. 11 Comparisons between a DOF and other DOF.

勝敗の大きな基準となったと考えられる。一方、実験協力者から「高く手を挙げた方が良い挙手だと感じた」というコメントもあり、挙手を行う際の高さが、挙手に対する印象に影響を与えることが示唆された。

これらの考察と一対比較に基づく強さを考慮し、研究のコンセプトを実現するために①の動作をロボットに導入することが望ましいと考えられる。

### 5.3 自由度の変化における印象評価

本研究では、関節の減少による挙手ロボットの小型化も視野に入れて開発を行っている。そこで、前節の評価実験において、最も高く評価されている各自由度の①の動作が他の自由度の動作における順位と比べて、どのような順位として評価されているかを調べた。

比較結果を図 11 に示す。たとえば図 11 左上において、3DOF の ① の動作が、2DOF の動作においてどの順位に位置するのかを表しており、3DOF の ① の動作は、2DOF の ① の前後に順位づけされている。比較の結果、ある自由度の ① の動作と他の各自由度の ① は、すべての比較において評価された順位が近いことが確認された。

これらの結果から、自由度を変化させても、その印象に大きな変化がないと考えられ、最も印象が良い ① の挙手において、3 自由度の挙手を 2 自由度と 1 自由度で行うことが可能であると考えられる。これは少ない関節の自由度で最も印象が良い挙手動作を表現可能であることを示しており、ロボットに使用する関節を減少させることで、挙手ロボットの小型化やキャラクター性を重視した開発が可能になると期待される。

## 6. 挙手ロボットの評価

### 6.1 目的と方法

挙手ロボットの使用効果と使用感を評価するために、実験協力者が挙手を行う場合とロボットが実験協力者の代わりに挙手を行う場合を比較する実験を行った。特に本実験では、挙手ロボットの使用者が気軽に挙手できるようにな



図 12 実験の様子

Fig. 12 Experimental scenery.

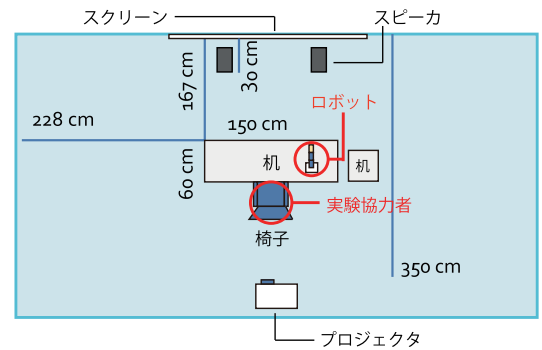


図 13 実験環境

Fig. 13 Experimental environment.

る効果に焦点を当てて評価を行っている。

実験の方法として、図 2 と同様に教室の風景と一般常識の問題をスクリーンに提示し、実験協力者またはロボットが挙手を行った後に、実験協力者に問題を解答させた。問題は、就職活動用の問題集 [14] から正解率約 50%の問題をピックアップした 2 セットを作成し、条件と問題セットの対応付けはランダムとし、実験全体で同数となるようにした。実験の様子を図 12 に、実験環境を図 13 に示す。挙手ロボットは、6 章で最も高い評価を得た ① の 3 自由度の動作を行うように設定しており、実験協力者は付属するボタンを押すことで、挙手ロボットに挙手をさせることができる。また、挙手ロボットを配置する位置は図 12 右のように、実験協力者の手の右側に配置した。

実験では、実験協力者にすべての問題に自由なタイミングで挙手をして解答するように指示した。また、実験協力者が挙手を行う場合と、ロボットが挙手を行う場合の 2 つの条件を設定し、各条件で 6 問解答するごとに、7 段階評価のアンケートを行った。ここで、どちらの条件から実験を始めるかはランダムとし、実験全体で同数となるようにした。また実験終了後、実験協力者に挙手ロボットの印象についての 6 項目のアンケートを「はい/いいえ」の 2 段階で回答させた。その後、挙手ロボットの感想について自由記述のアンケートを行った。実験協力者は 18–23 歳の 20 人（男性 10 人、女性 10 人）であった。

### 6.2 結果と考察

挙手動作に関する主観評価の結果を図 14 に示す。解析

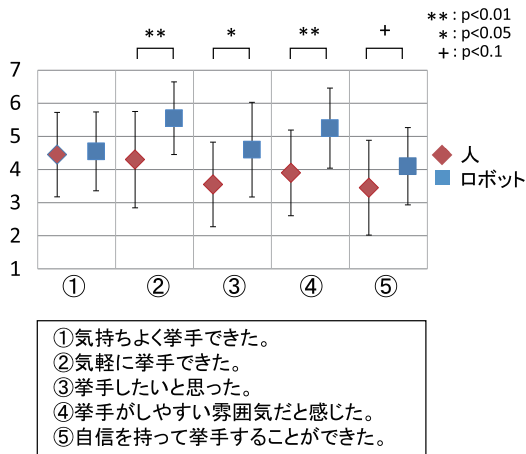


図 14 7段階評価の結果

Fig. 14 Result of seven-point bipolar ratings.

表 4 挙手ロボットについての感想

Table 4 Comments of the hand-raising robot.

質問項目	はい	いいえ
(1) 実際に自分の机にあれば嬉しいと感じた	12	8
(2) 授業が楽しくなりそうだと感じた	15	4
(3) 問題に回答することが楽しくなった	14	6
(4) 自分の分身のようだと感じた	6	14
(5) 一緒に手を挙げたいと思った	4	16
(6) 挙手ロボットに対し愛着がわいた	16	4

の有効性を示すために Wilcoxon の符号順位検定を行った。解析結果から、②「気軽に挙手できた」、④「挙手しやすい雰囲気だと感じた」の項目に対して有意水準1%の有意差が認められた。また、③「挙手したいと思った」の項目に対して有意水準5%の有意差が認められた。加えて、⑤「自信を持って挙手することができた」の項目に対しては有意水準10%の有意傾向が認められた。一方、①「気持ちよく挙手できた」の項目に対しては有意差が認められなかった。

②の項目から、ロボットを使用することで、気軽に挙手できることが示された。加えて、③、④の項目より、実験協力者が積極的に解答することを支援していると考えられる。一方、①の項目より、挙手することへの気持ち良さは、ロボットを使用した場合でも、実験協力者自身が挙手する場合と同程度の結果が得られることが明らかになった。

次に、6項目のアンケートの結果を表4に示す。アンケートによると、(2)「授業が楽しくなりそうだと感じた」、(3)「問題に回答することが楽しくなった」、(6)「挙手ロボットに愛着がわいた」の項目において、70%~80%の実験参加者が「はい」と回答し、挙手ロボットに対して肯定的な考えを持ったことが明らかとなった。特に、(2)の項目から、実験協力者の挙手ロボットが授業を楽しくすることへの期待が明らかになった。ただし、どちらともいえず回答しなかった実験協力者が1人いた。また、(3)の項目や、自由記述アンケートでの「早押しゲームみたいで楽しい」

のような感想から、このロボットを使用することによって、質問に答えることを楽しくすることが明らかになった。これらの結果から、学習者の意思表示に関しても挙手ロボットによって支援できることを示している。加えて、(6)の項目や、自由記述のアンケートにおける「フェルトの手や服がかわいい」、「動きが健気でかわいい」、「ゴツゴツしたロボットよりはかわいい」などの感想から、ロボットの動きや外観が実験協力者の好感を得ていたことが明らかになった。

一方、(4)「自分の分身のようだと感じた」、(5)「一緒に手を挙げたいと思った」の項目において、70%~80%の実験協力者が「いいえ」と回答していることから、本研究で開発した挙手ロボットは、ボタン操作に対して身体動作を起こす仕組みであったため、実験協力者には、自分の一部でも他者でもなく、道具的なデバイスとして認知されていたことが示唆される。また、授業中に手を挙げることに抵抗のない一部の実験協力者からは、「自分で挙げた方が答えた気になる」、「声を出しながら自分の手を挙げるのが楽しい」など、ロボットを操作することに対して否定的な感想もみられた。このようなユーザに対しては、ユーザと一緒に手を挙げるような自律して動く挙手ロボットの開発も必要になると考えられる。

## 7. 総合考察

本研究では、3章の実験により、人の典型的・代表的な挙手動作を明らかにし、積極的な身体動作を表現する手段としてロボットに導入した。特に5章の実験により、肘を伸ばして手を高く・速く挙げるような挙手動作は、ユーザに好印象を与えることが明らかになり、この挙手動作は関節の自由度に制限されることなくロボットに導入可能であることが示された。この結果により、挙手の身体性は様々な形態の各種ロボットへの導入が容易になり、挙手ロボットの小型化やキャラクター性を重視した開発も可能となった。

また、6章の実験によって、気軽に挙手できる、挙手しやすい雰囲気、と感じさせ、積極的な発言を支援できる可能性が示された。詳細に見ると、②「気軽に挙手できた」の項目については、簡易なボタン操作により、積極的な挙手動作が代行された結果であると考えられる。③「挙手したいと思った」については、②に加えて、「自分の机にあれば嬉しい」「回答することが楽しくなった」など、挙手ロボットを使いたいということも、高く評価された理由であると考えている。④「挙手がしやすい雰囲気だと感じた」は、②③の結果が、「授業が楽しくなりそうだと感じた」の感想に代表されるように、全体の雰囲気に影響を与えた結果であると考えられる。この理由として、ボタンを押すという小さい操作によって積極的なアクションを表現する挙手ロボットの特性が気軽な意思表示を実現しているためであると考えられる。これらの結果から、たとえば笑いの



図 15 スマートフォンを用いた小型挙手ロボット

Fig. 15 Compact hand-raising robot by utilizing a smart phone.

研究において、周囲に同調する例が報告されている [15] のと同様に、このような挙手ロボットがコミュニケーションの場に存在することで、実際の挙手もしやすい雰囲気になるのではないかと期待できる。

挙手動作の役割として、本研究のような答えが分かったという意味だけでなく、コミュニケーション時の割込みや発言権の獲得の意図をシンボリックに表現するエンブレムや、自然とターンを取得する調整的動作、「はい」という発言の例示的動作など、様々な役割がある。ただ、役割が変わったとしても挙手動作そのものが大きく変化する可能性はそれほど高くはないと考えられるため、他の役割での応用も十分可能であると考えている。また、挙手をするタイミングで挙手ロボットを動作させることは、ラバーハンドイリュージョン [16] や、ミラーニューロン [17] と関連する、無意識の知覚に作用する可能性もある。一方で、目的を答えが分かったという表現に限定すれば、クイズ番組で広く使われているボタンと音、あるいは簡易な手による動作でも、一定の効果があると考えられる。現在、図 15 のようなスマートフォンを用いた小型挙手ロボットの開発を進めており、アタッチメントにより、手のパーツから、クエスチョンマーク、電球のアイコンなどに変更可能にしている [18]。従来の仕組みに対する優位性や、組合せによる相乗効果の検証は、今後の課題である。

また近年では、情報システムの発達・普及によって、教育環境への情報メディアの導入が増えてきており、Kandaらのように、ロボットを授業に導入するための検証も行われている [19]。こうした流れの中で、本研究においても挙手ロボットを実践授業で導入することを視野に入れ、それにとまなうシステムの改善が必要であると考えている。たとえば、意味もなくボタンを連打する参加者がいる場合、場の一体感に対して負の影響を与えると考えられる。これは、伊藤らの博物館・美術館などでの鑑賞ツアーを支援するシステム “CoPle” の実践活用でも指摘されているため [20]、状況に応じて学習者のボタン操作を制限する必要があると考えられる。

今後の展開として、挙手ロボットが「気軽に挙手できた」「挙手したいと思った」のような積極的な意思表示にかかわる項目で評価を得ていることや、「授業が楽しくなりそ

うだと感じた」のような場の盛り上げに関する項目で評価を得ていることから、挙手ロボットにより、「発言したいことがあるが言い出せない」状況を改善し、より活発な意思表示が行われる授業が展開されることが期待できる。これらのことは、参加型授業のような複数人と意見交換を行いながらコミュニケーションをとる場合においても挙手ロボットが有効であることを示す。著者らは、このような複数人でコミュニケーションを行う授業での挙手ロボットの活用の検討も始めており、集団コミュニケーションを対象に、挙手ロボットによる引き込み効果や場の盛り上げ効果を明らかにすることで、挙手ロボットのさらなる応用展開が期待できる。

## 8. おわりに

本研究では、積極的な挙手動作を代行する挙手ロボットの開発・評価を行った。まず、人の挙手動作を測定し、分類することで5通りの典型的・代表的な挙手動作を抽出して、ロボットへの導入を可能とした。次に、分類した挙手動作をロボットに導入し、ロボットの関節自由度にかかわらず、手を高く・速く挙げる動作が、好印象を与えることを明らかにした。そして、挙手ロボットの使用感と使用効果に関する評価を行い、気軽に挙手しやすい雰囲気を感じさせることなどを明らかにした。授業や問題を解答することが楽しくなりそうという感想も多く、今後、ロボットをグループコミュニケーションに導入することで学習者の授業参加支援が可能であることも十分に示唆された。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 16H03225、関西学院大学共同研究「モチベーション・コミュニケーションの研究」などの支援による。また本研究の遂行において、関西学院大学理工学部人間システム工学科卒業の澤菜々美、野田圭太郎氏らの協力を得た。ここに感謝する。

## 参考文献

- [1] リッチモンド, V.P., マクロスキー, J.C. (著), 山下耕二 (編訳): 非言語行動の心理学, 北大路書房 (2006).
- [2] 藤生英行: 教室における挙手の規定要因に関する研究, 風間書房 (1996).
- [3] 布施光代, 小平英志, 安藤史高: 児童の積極的授業参加行動の検討—動機づけとの関連および学年・性による差異, 教育心理学研究, Vol.54, No.4, pp.534-545 (2006).
- [4] 平田幹夫, 知花優希: 小学生の授業における質問や発表をとおした意思表示に関する研究 (1)—意思表示認知尺度の作成, 琉球大学教育学部紀要, Vol.63, pp.347-356 (2003).
- [5] 福嶋政期, 橋本悠希, 野澤孝司, 梶本裕之: 笑い増幅器: 笑い増幅効果の検証, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.12, No.3, pp.199-207 (2010).
- [6] 渡辺富夫, 大久保雅史, 小川浩基: 発話音声に基づく身体的インタラクションロボットシステム, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.648, pp.2721-2728 (2000).
- [7] 渡辺富夫: 身体性メディアによるメディア芸術創造支援, 情報処理, Vol.48, No.12, pp.1327-1334 (2007).
- [8] 山本倫也, 渡辺富夫: 音声駆動型身体引き込みキャラクターを映像に重畳合成した教育支援システム, 情報処理学



- 会論文誌, Vol.47, No.8, pp.2769-2778 (2006).
- [9] 山本倫也, 渡辺富夫: 教師と生徒の InterActor を一人二役で演じるエデュテインメントシステムの開発, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.4, pp.1677-1685 (2013).
- [10] Yamamoto, M., Shigeno, Y., Kawabe, R. and Watanabe, T.: Development of a Context-enhancing Surface based on the Entrainment of Embodied Rhythms and Actions Sharing via Interaction, *ACM Interactive Tabletops and Surfaces 2012 Conference*, pp.363-366 (2012).
- [11] バンダイ: へえボタン, 入手先 (<http://www.bandai.co.jp/releases/J2003090201.html>) (参照 2016-07-20).
- [12] Kanegae, H., Yamane, M., Yamamoto, M. and Watanabe, T.: Effects of a Communication with Make-Believe Play in a Real-Space Sharing Edutainment System, *Proc. 15th International Conference on Human-Computer Interaction*, Vol.13, LNCS 8016, pp.326-335 (2013).
- [13] 広津千尋: 多重比較法による Bradley-Terry モデルの適合度検定, *The Japanese Society for Quality Control*, pp.37-45 (1982).
- [14] 角倉裕之: 2014 年度版一問一答一般常識 [頻出] 1500 問, 高橋書店 (2012).
- [15] Sakata, M. and Suzuki, N.: Effects of Peer Pressure on Laughter, *The HCI International 2014 Conference Proceedings*, LNCS 8522, pp.479-488 (2014).
- [16] Botvinick, M. and Cohen, J.: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, *Nature*, Vol.391, p.756 (1998).
- [17] Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V. and Fogassi, L.: Premotor cortex and the recognition of motor actions, *Cognitive Brain Research*, Vol.3, No.2, pp.131-141 (1996).
- [18] 野田圭太郎, 河辺隆司, 山本倫也, 青柳西蔵: 集団コミュニケーション支援のための拳手ロボットの開発, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 講演論文集, pp.927-928 (2014).
- [19] Kanda, T., Sato, R., Saiwaki, N. and Ishiguro, H.: A Two-Month Field Trial in an Elementary School for Long-Term Human-Robot Interaction, *IEEE Trans. Robotics*, Vol.23, No.5, pp.962-971 (2007).
- [20] 伊藤香織, 小泉直也, 苗村 健: 感想共有・鑑賞体験記録に基づくミュージアムツアー支援システム "CoPlet" の提案, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2014 DVD-ROM 論文集, pp.781-788 (2013).



青柳 西蔵 (正会員)

2012 年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了。同年情報・システム研究機構特任研究員, 2013 年神戸大学大学院海事科学研究科助教, 2014 年関西学院大学工学部研究員, 2017 年東洋大学情報連携学部助教, 現在に至る。ヒューマンインタフェース学会論文賞, IEEE RO-MAN Best Interactive Presentation Award 等受賞。情報通信技術を用いたコミュニケーションの場のデザインに興味を持つ。ヒューマンインタフェース学会会員。博士 (エネルギー科学)。



河辺 隆司

2015 年関西学院大学大学院理工学研究科人間システム工学専攻博士課程前期課程修了。同年大日本印刷株式会社入社, 現在に至る。在学時, 身体動作によるインタラクション支援に興味を持つ。修士 (工学)。



山本 倫也 (正会員)

2002 年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了。同年岡山県立大学情報工学部情報システム工学科助手, 2007 年同助教, 2009 年関西学院大学理工学部人間システム工学科准教授, 2015 年同教授, 現在に至る。身体的インタラクション, コミュニケーション支援の研究に従事。ヒューマンインタフェース学会論文賞, 情報処理学会全国大会大会奨励賞, IEEE RO-MAN Best Interactive Presentation Award 等受賞。ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM 等各会員。博士 (エネルギー科学)。



福森 聡

2015 年岡山大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年関西学院大学理工学部人間システム工学科契約助手, 現在に至る。IEEE RO-MAN Best Interactive Presentation Award 等受賞。ヒトの身体認知とその医療応用に興味を持つ。ヒューマンインタフェース学会会員。博士 (工学)。