

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月10日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12495

研究課題名(和文)人間とロボットの協調的理解に基づくノンバーバルコミュニケーション

研究課題名(英文)Non-verbal Communication based on Mutual Understanding between Human and Robot

研究代表者

久保田 直行 (Kubota, Naoyuki)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：30298799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：近年、人間とロボットの共生に関する研究において、ノンバーバルコミュニケーションの重要性が示唆されるようになってきたが、操作対象や移動方向を指さして伝達するジェスチャの研究が多く、人間のような高度に社会化されたジェスチャの研究はほとんど行われていない。したがって、本研究では、人間とロボットの自然なコミュニケーションを実現するために、指さし行為に含まれる指示的意図と社会的意図の理解、物まね行為に含まれるアイコン的ジェスチャを理解するためのメカニズムをシステム論的な観点から解明する。次に、提案手法を用いた各種実験を通して有効性について検討し、協調的理解に関する今後の研究の方向性について検討する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人間とロボットが共生するためのノンバーバルコミュニケーションの一つとして指さしと物まねを学際的な観点から議論した点が学術的な特色である。特に、物まねに基づくアイコン的ジェスチャの認識は、行為的表象、映像的表象、象徴的表象の相互互換性が重要であり、相関的な学習が必要不可欠であることがわかった。また、指さしによる多段階の伝達意図の理解は状況依存性が高い反面、成功すれば、少ないジェスチャで多くを伝えあえることもわかった。本研究を通して得られた成果や知見は、原初的コミュニケーションなどを扱う認知発達心理学や生態心理学をはじめ、発達障害に関する療育など様々な研究分野の発展にも貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Recently, the importance of non-verbal communication has been increasing in the study on human-robot coexisting, but most of them focus on the simple gestures for proto-pointing and for command to control robots. Therefore, in this study, we discuss the methodology to realize (1) cooperative understanding of referential intention and social intention included in pointing (2) iconic gestures used for communication between human and robot from constructivism approach and systems approach. In this report, we propose the recognition method for pointing gestures and iconic gestures. Next, we conduct several experiments using the proposed method and discuss the effectiveness of the proposed method. Finally, we discuss the future research direction on the mutual understanding of non-verbal communication.

研究分野：知能ロボット

キーワード：ノンバーバルコミュニケーション ジェスチャ 協調的理解 ロボットパートナー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ノンバーバルコミュニケーションに関する研究は、身体動作の分類や異文化間コミュニケーションなど様々な観点から行われてきたが、近年では、人間とロボットの共存や共生に関する研究においても、その重要性が示唆されるようになった。

トマセロは人間特有のコミュニケーションの最初の形態を「指さし」と「物まね」と考えたが、この考えは、グライスや、スペルベルとウィルソンの語用論などの影響が見られる。グライスは、協調の原理と4つの格率を提案した。スペルベルとウィルソンが提案した関連性理論では、コミュニケーションとは情報意図と伝達意図が備わっており認知環境を共有することにより行われていると考えているが、人間とロボットのコミュニケーションの場合、その前提となる認知環境の共有が欠如している。一般に、ノンバーバルコミュニケーションが、バーバルコミュニケーションの補助的な役割に思われがちであるのに対し、トマセロは、ノンバーバルコミュニケーションを強力なコミュニケーション手段として述べている。本研究では、指さしと物まねを中心的なコミュニケーション手段として捉えた方法論を提案し、人間との協調的理解を促すメカニズムを解明する。

我々人間は、視覚空間、体性感覚空間、聴覚空間、嗅覚空間といった複数の空間の中で生活しており、各感覚の心的空間がモザイクのように組み合わせられている。発達心理学者のブルーナーは、脳の表象は何かを知るための手段であり、行為的表象(運動)、映像的表象(視覚)、象徴的表象(言語)の3つに分類している。人間がアイコン的ジェスチャを理解できるのは、これらの表象が相互に互換性を持ち、意味的に一致するからである。また、人間は過去の経験と予想に基づいてインタラクションを行うが、その際、メンタルモデルが構築される。このように、ジェスチャに基づくコミュニケーションでは、模倣や記号化の他に、伝達意図の理解など様々な要素を同時に考える必要がある。したがって、本研究では、従来のバーバルコミュニケーションを中心とした体系化ではなく、ジェスチャをコミュニケーション手段の中心として捉えることにより、様々な研究分野に基づく学際的な観点から議論を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では、ジェスチャを中心としたコミュニケーションを対象として、指さしと物まねの協調的理解に必要な方法論を確立する。本研究の目的は、科学的には、指さし行為に含まれる指示的意図と社会的意図の理解、物まね行為に含まれるアイコン的ジェスチャを理解するためのメカニズムを解明することであり、工学的には、これらの協調的理解に必要な方法論を確立し、体系化することである。

### 3. 研究の方法

本研究では、ジェスチャを中心としたコミュニケーションに関する研究を、(A)人間とロボットのコミュニケーションに関する社会実験からジェスチャの協調的理解に必要なとされる機能を明確にする構成論的研究と (B) その機能を計算論的に、システム論的に実現するための方法論の構築という両面から相互依存的に進める。本研究は、(1)ジェスチャ中心コミュニケーションシステムに関する計算論的研究、(2)ジェスチャの協調的理解に関するシステム論的研究、(3)ジェスチャの協調的理解に関する構成論的研究から構成される。

#### (1) ジェスチャ中心コミュニケーションシステム

##### ① ジェスチャ中心コミュニケーションのモデル化

発信者が受信者と認知環境を共有するために、注視や指さしなど注意を向けさせるコミュニケーションから始める。ここで、うまく伝わらない場合は、相手の認知環境を修正させるようなコミュニケーションを取る。その際、指さし行為と物まね行為が重要な役割を果たす(図1)。指さしは、相手が注意を払っていない対象物に注意を向けさせるために使われ、それでもなお、対象物が特定できない場合、物まねにより、対象物の視覚的表象や行為的表象を伝えようとする。このような一連の流れを実現するようなコミュニケーションモデルを構築する。図2に、本研究で提案するコミュニケーションモデルを示す。

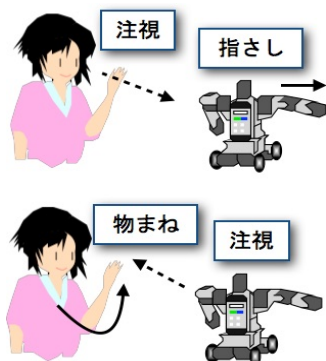


図1.ジェスチャに基づくコミュニケーション

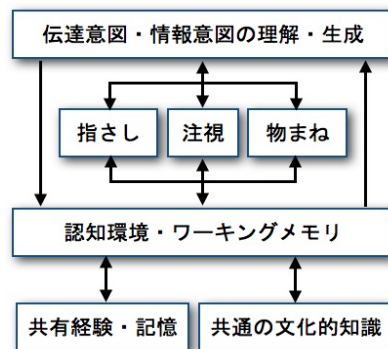


図2.コミュニケーションモデル

② 行為の分節化に基づく知覚と再現

問題の簡単化のため、人間の指さしに関する行為分節を抽出するため、距離画像センサを用いて上腕の動作と手指の動作を計測する。指さし行為は人差し指の指示方向を抽出することにより行う。距離画像センサを用いてスケルトン座標を取得し、顔の向きと指差し方向を求める。環境内に存在する物体の中心座標と、指差し方向の直線の式から、最も点と直線の距離が小さいものを指差しの参照物体とする。また、単語を特徴ベクトルで表現できる word2vec を用いて発話文内の単語と環境内に存在する物体の関連度合を求める。この時、ワーキングメモリーモデルを構築し、直近に出現した単語をより重みを強くする。発話文と指差しの両観点から環境内に存在する物体から指差しの指示的意図を推測することができるシステムを提案する。

③ ジェスチャの協調的理解のための連想記憶システムの構築

トマセロは、人間の共通概念基盤を構築する能力として、共同注意、共有経験、共通の文化的知識の重要性を示唆した。本研究の中心的な課題がジェスチャの協調的理解であるため、ロボットは、共有経験に関する情報と共通の文化的知識を事前に保持していると仮定する。人は頭の中に様々な想定を持っており、自分の持つ想定を増やし、不確実な想定や誤った想定があれば新しい正しい想定に切り替えることを望んでいる。このように人がある時に頭に思い浮かべることができることを顕在的と呼び、知覚・推論可能な顕在的事実の集合を「認知環境」と関連性理論では定義されている。人間の想定とは時々刻々と変化していく。フッサールはこのような自身の過ぎ去りゆく瞬間の知覚が残っていることを過去把持、近くの予期の動きを未来予持と名付けている。人間の持つ想定とは、今に直属する過去把持と未来予持を含んでいる。本研究では、上記の項目を考慮し、認知環境を図3のように定義した。コミュニケーションについて、人間は未来予持によって想定を拡大していると考えられる。相手の想定を共有することにより、2者間での「相互認知環境」が共有され、本研究では、人間の認知環境の行動と物体を理解可能な相互認知環境システムを構築する。提案した相互認知環境システムでは情報構造化空間により得られた人間の状態と環境内に存在する物体から人間の認知環境の行動と物体を理解可能なシステムとなっている(図4)。

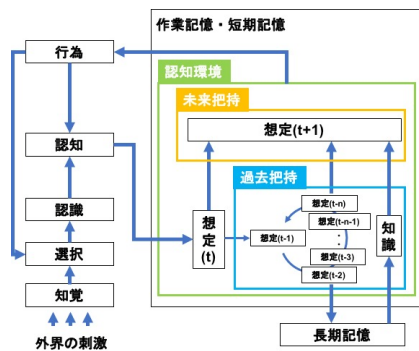


図3 認知環境

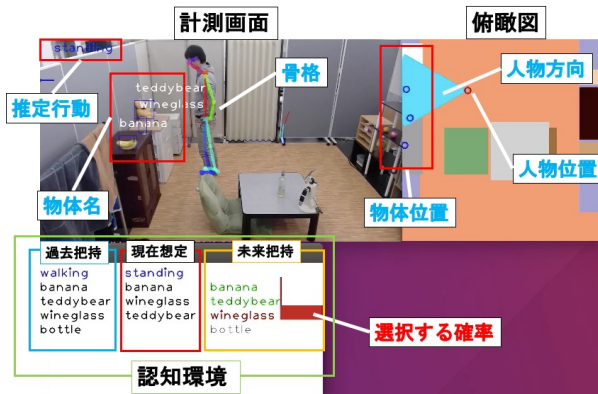


図4 相互認知環境システム

④ 共通概念基盤としての情報構造化空間

共通概念基盤は、共有経験に関する情報や共通の文化的知識などが基礎になっているため、認知環境を共有するためには、ロボットが人間との共有経験に関する情報や共通の文化的知識を持つ必要がある。ここでは、人間が利用するスマートデバイス内の個人的なコンテンツやインターネット上の情報、センサネットワークにより収集される環境情報を利用することで共通概念基盤とする。これらの環境情報は研究代表者らが提案してきた情報構造化空間(図5)の概念に基づき、環境情報を収集、保存、変換、提供するための構造化されたデータベース(DB)を構築する。本研究では、人間とロボットがDBを共有できるように、多数のプラットフォームで利用可能かつマルチスレッド構成であるMySQLにより情報構造化空間を実現する(図6)。

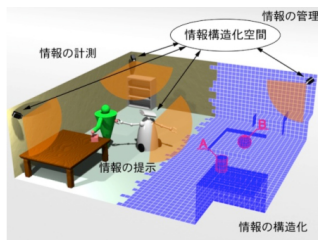


図5 情報構造化空間



図6 環境情報の流れ：情報の収集から利用へ

## (2) ジェスチャの協調的理解に関するシステム論的研究

### ① 「指さし」行為の学習と協調的理解

指さしは、受信者の注意を、直接的な知覚環境にあるものに空間的に向ける共同注意的な役割を果たし、大きく、「方向そのもの」と「指示対象」に分けられる。また、指さしは、共同注意を実現する視線追従とも深く関係するため、視線計測システムと併用し、指さしとの相互関係を明確にする。人間とロボットの認知環境を相互認知環境として共有化することを目的として室内の情報を計測、収集、通信、提示するための知覚システムとして、ノンバーバルコミュニケーションや注意に関するマルチモーダル計測システム(図7)を開発した。具体的には、視線検出、注視対象物体検出、頭部・指差し・ハンドジェスチャ認識、物体操作計測を同時に計測できる知覚システムである。

指さしは、複数の対象を順に示す場合があり、例えば、自分が前方に移動したい場合、まず、「自分」を指さし、その後、「移動方向」を指さす。これは、自分を明示的に顕在化させた「三項関係」であり、多段階の指さしが含まれる。しかし、多段階の指差しは状況依存性も高く、状況と関連性がない指差し動作には伝達意図を見出すことができず、追加でより多くの伝達手段を必要とする場合もある。ここでは、ロボットの発話と多段階の指差しにより、多段階の指差しの状況依存性と人間が理解できるかを評価する。

### ② 「物まね」行為の学習と協調的理解

物まねにより、対象物の視覚的表象や行為的表象を伝えることができるが、視覚的表象の場合は、手指の動作で対象物の形状などの視覚的表象を創り出す。一方、行為的表象では、人差し指などの指先の軌道が行為の特徴量を表す場合と、対象物に対する上腕を含む動作そのものが意味を持つ場合がある。ここでは、身体座標系を基準とした手の動作に対応する行為分節を一つのニューロンに対応させ、その時系列発火パターンから視覚的表象、あるいは、行為的表象を推定する手法を提案する。また、MRNNによる物まね行為の学習を行う。

一方、これら視覚的表象、行為的表象から物まね行為を学習するためには、それぞれの表象を表す動作(ジェスチャ)を認識可能なシステム開発が必要である。しかし、ジェスチャには、個人によってその解釈や認識が大きく異なる場合がある。例えば、六角形の形状を示しても、それを全員が六角形だと正しく認識できるとは限らず、中には五角形や円形だと捉える人もいる(図8)。個々人によって解釈の異なるジェスチャでも、その構成は原始的な動作の組み合わせで表現されていると考え、動作の空間的な分解能を適応的に調整しながらジェスチャ認識が可能な方法が必要となる。さらに、ジェスチャを認識するためには、特定の動作を時空間的に表現したテンプレートが必要となるが、各動作の時間的な特性についても、個々人によって表現が異なるため、連続的なパターンの類似性を抽出可能な方法が必要となる。

本研究では、人間のジェスチャ認識を考慮するために、Spiking Neural Network (SNN)によるジェスチャの軌道の取得を行う。そして、1つのジェスチャのテンプレートや入力による軌道を移動方向や特徴的な動作による特徴抽出によりベクトルの量子化を行い、Dynamic Time Warping (DTW)を用いたジェスチャ認識を行う。

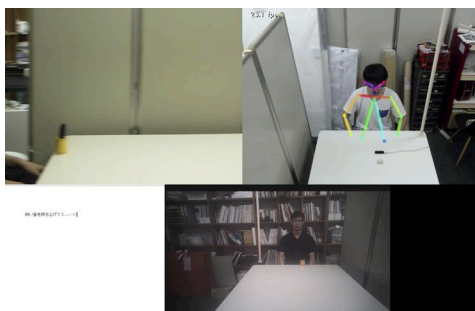


図7 マルチモーダル計測システム

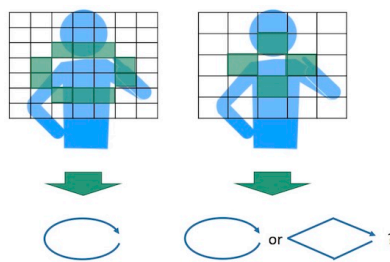


図8 空間的な分解能による表現の変化

## 4. 研究成果

### (1) ジェスチャの協調的理解に関する構成論的な理解

#### ① ジェスチャの協調的理解のための認識実験

提案するマルチモーダル計測システムの有効性を検討するために、コミュニケーションにおいて人間が参照している対象物をロボットが推定する認識実験を行った。図9は、ロボットとのインタラクションシナリオの一例であり、図9は環境内に[ペットボトル、スマートデバイス、本、ゲーム、菓子]の物体が存在するときの人間の参照物体の推測結果である。図10より、「メール」、「返信」等のキーワードが含まれたテキストにおいて関連度が急激に上がっていることがわかる。テキスト5~18間ではスマートデバイスが常に高く、話題が変わったテキスト17、18が発話されたあたりでお菓子の関連度が上がってきている。これにより、状況依存的にはあるが、指差しや視線追従といった共同注意行動を含めたインタラクションにおいて、社会的伝達意図を推測することができ、ロボットと人間との間で認知環境を共有できることを示した。

テキスト番号	発話者	発話内容
1	人	あつ、そういえば。
2	ロボット	どうしたんですか？
3	人	一つ用事を忘れてたや。
4	ロボット	何の用事ですか？
5	人	仕事のメールに返信しないといけないんだ。
6	ロボット	それは大変ですね。急いで返信しないと。
7	人	だるいなあ。
8	ロボット	さあさあ早く。
9	人	うーん。
10	ロボット	どうしたんですか？
11	人	よくよく考えるとそんなに急ぎの用事でもないし、説明もいからあとでしようかな。
12	ロボット	えー。
13	人	うん、やっぱり今はいいや。仕事の間じゃないし。
14	ロボット	後で忘れないでくださいね。
15	人	はいはい。
16	ロボット	まったくもう。
17	人	そういえば、友人にお土産をもらったんだ。
18	ロボット	ご当地の食べ物とかですか？
19	人	そうそう。ちょうど小腹がすいてきたし食べてみようかな。
20	ロボット	良いんじゃないですか？

図9 実験シナリオの例

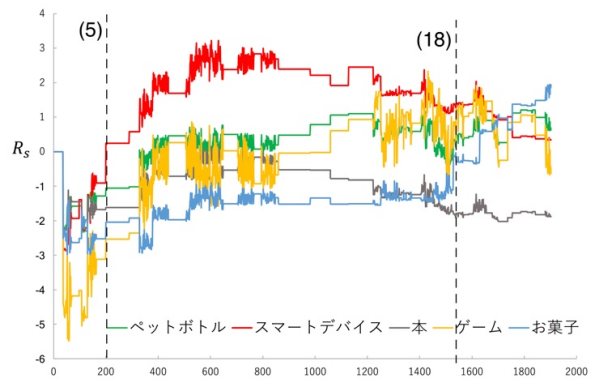


図10 推定された関連度

## ② アイコン的ジェスチャの認識

本研究では、様々な種類のあるジェスチャの中で、物体の形状の物まねを両手で行うジェスチャの認識を対象にした実験を行った。この動作は、物体の形状を言い表すことができない事柄を、相手に説明する時にしばしば使われ、直感的なイメージを与えることができることからコミュニケーションにおけるジェスチャ認識に必要であると考えられる。また、両手を計測し左右それぞれのジェスチャ認識を行うことで、どちらか類似度の高いものを認識結果として採用することでより認識精度を上げることができると思われる。

そこで物体の形状を表す左右対称の物まね行為のジェスチャ認識について、SNNを用いた指先の軌道取得とDTWによるテンプレートとの類似度の計算をすることによりジェスチャ認識が可能なシステムを構築した(図11)。

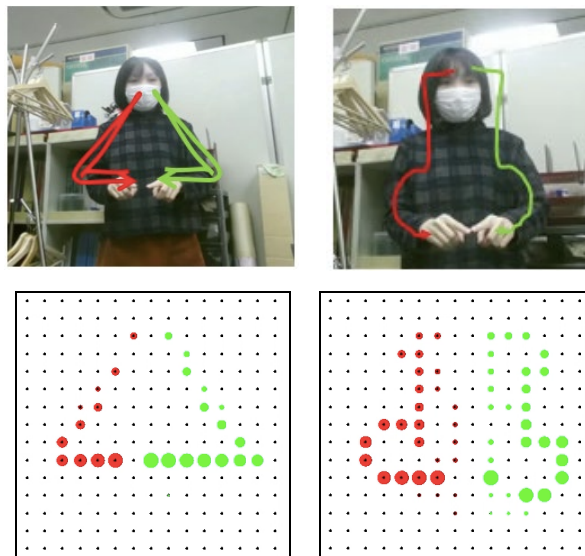


図11. アイコニック・ジェスチャの認識

## ③ ロボットパートナーとのジェスチャの協調的理解

ここでは、ロボットが発信者で人間が受信者のケースで指差し行為の社会的意図が伝達するかどうかを検証する。ロボットの行為を人間が理解できるかという社会実験であり、この実験からロボットに必要な機能や要素技術を明確にする。参照物体としてテニスボールを用意し、ロボットは“テニスボールからロボット”、“ロボットからテニスボール”、“テニスボールから相手”、“相手からテニスボール”の4パターンの異なる順序で指差しを行う。また、指差しを行う前に、「一緒に遊びたいな」、「今日は暑いね」のどちらかをランダムに発話する。

実験の風景を図12に示す。複数の被験者への実験結果から、ロボットが「一緒に遊びたいな」と発話した後、ロボットの動作(指差し行為)が“テニスボールから相手”または“相手からテニスボール”であった場合、被験者はボールを手を取ったり、ロボットに渡したりといった行為が見られた。ボールには遊ぶという使用用途もあると人間は認識しており、ロボットの「一緒に遊びたいな」という発話により、人間が認識した指差し行為に社会的意図が付加された。「今日は暑いね」という発話には、ボールとの関連性は含まれておらず、人間はロボットの指差し行為に意味を見出すことができず、反応はなかった。これにより、指差しによる多段階の伝達意図の理解は状況依存性が高い反面、少ないジェスチャで多くを伝え合えることが確認できた。

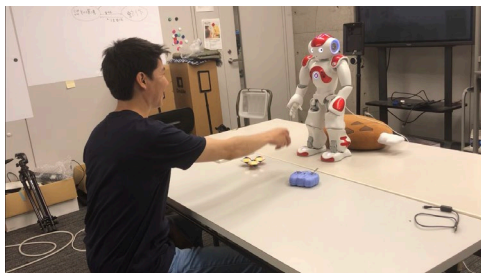


図 12 ジェスチャの協調的理解に関する社会実験

(2) 構成論的な理解にむけた考察と体系化

人間とロボットのジェスチャを中心とするコミュニケーションにおいて、「指さし」と「物まね」の協調的理解に必要となる方法論の体系化を行うとともに、提案手法の適用可能性と限界を探究することにより、ノンバーバルコミュニケーションとバーバルコミュニケーションの相補的な機能とその重要性を議論した。本研究は、人間とロボットが共生するために必要となるジェスチャに基づくノンバーバルコミュニケーションの仕組みの一つとして指さしと物まねを学際的な観点から扱う点が学術的な特色である。また、本研究を通して得られた成果や知見は、原初的コミュニケーションなどを扱う認知発達心理学や生態心理学をはじめ、発達障害に関する療育など様々な研究分野の発展にも貢献できるため、引き続き、これらの分野に応用しつつ、理論的な研究開発を行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- (1) Ryosuke Tanaka, Jinseok Woo and Naoyuki Kubota, “Nonverbal Communication based on Instructed Learning for Socially Embedded Robot Partners”, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 3(22), 2019, (Accepted) (査読あり)

〔学会発表〕(計5件)

- (1) Jinseok Woo, Kouhei Yamamoto and Naoyuki Kubota. “Interaction Design Using Multi-Robot System for Information Support.”, 2018 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications, 2018.
- (2) Ryosuke Tanaka, Jinseok Woo and Naoyuki Kubota, “Cognitive Environment System by Joint Attention Behaviors and Relevance Theory for Robot Partners.”, 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2018.
- (3) Takenori Obo, Ryosuke Kawabata, Naoyuki Kubota, “Cooperative Human-Robot Interaction based on Pointing Gesture in Informationally Structured Space”, World Automation Congress 2018, 2018.
- (4) Jinseok Woo and Naoyuki Kubota. “Interaction Content Design for Information Support based on Robot Partner”, The 10th International Conference on Human System Interactions, 2017.
- (5) 粕谷千秋, 大保武慶, 武田隆宏, 久保田直行, “指さし・物まね行為を用いた人とロボットのコミュニケーションシステム”, 第18回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：武田 隆宏

ローマ字氏名：(TAKEDA, takahiro)

所属研究機関名：第一工業大学

部局名：工学部

職名：助教

研究者番号(8桁)：70748186

研究分担者氏名：大保 武慶

ローマ字氏名：(OBO, takenori)

所属研究機関名：東京工芸大学

部局名：工学部

職名：助教

研究者番号(8桁)：60771889

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：禹 珍碩

ローマ字氏名：(WOO, jinseok)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。