

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20220002

研究課題名（和文） 遠隔操作アンドロイドによる存在感の研究

研究課題名（英文） Studies on humanlike presence by using tele-operated androids

研究代表者

石黒 浩（ISHIGURO HIROSHI）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：10232282

研究成果の概要（和文）：本研究では、人間に酷似した遠隔操作型アンドロイドのシステムを開発し、実験室実験と実環境における実証実験により、その効果を確認した。特に、遠隔操作する操作者と、アンドロイドと関わる訪問者の双方がアンドロイドシステムに適応できることを、認知科学的・脳科学的に確認した。また、得られた知見を基に、人と親和的に関わるができる遠隔操作型アンドロイドのミニマルデザインを考案し、その効果を確認した。

研究成果の概要（英文）：In this project, we have developed teleoperated androids which have very humanlike appearance and verified the effects through experiments in the laboratory and the real field. Especially, we have studied adaptations of the operators and visitors to the androids in cognitive science and neuroscience. Further, we have developed and tested the minimum design of the teleoperated android based on the knowledge obtained in this project.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	35,700,000	10,710,000	46,410,000
2009年度	32,000,000	9,600,000	41,600,000
2010年度	31,900,000	9,570,000	41,470,000
2011年度	32,000,000	9,600,000	41,600,000
2012年度	30,100,000	9,030,000	39,130,000
総計	161,700,000	48,510,000	210,210,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：アンドロイド、遠隔操作、存在感、認知科学、脳計測

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットの活躍の場を、人間の日常生活にまで広めた、日常活動型ロボットや人間と相互作用するロボットの開発は、近年ロボット工学や情報工学における重要な研究分野の一つになった。申請者は、世界に先駆け、人との関わりを目的とした自律型コミュニケーションロボット、ロボビー(ATR 知能ロボティクス研究所)を開発し、小学校や科学館といった公共の場で、実証実験に取り組んできた。

また、実験室においてもロボビーに対する人間の反応を観察し、人と親和的に関わるロボットの機能を同定し、ロボットの改良に反映してきた。

この人と関わるロボットの開発において問題となっていたのが、見かけの問題である。人間がロボットのどこに人間らしさを感じるのかという、基本的な知見を得るための精緻な認知心理実験を行うためにも、対話対象を擬人化するという人間の本质を見据えた

ロボット開発を行うためにも、人間に酷似したアンドロイドの開発が必要であった。このアンドロイドの開発に世界に先駆けて取り組み(右図)、アンドロイド開発と人間理解が密に結合した研究枠組みである、アンドロイドサイエンスを提唱してきた。この研究枠組みは **Scientific American** 等に取り上げられると共に、国内外で多くの招待講演を受け、世界中の多くの研究者に認知されるようになった。



## 2. 研究の目的

女性のアンドロイドに続いて、申請者と酷似した遠隔操作型アンドロイドを試作した。これをジェミノイドと呼んでいる。本研究では、このジェミノイドを用いた一連の研究を展開する。



先に開発した女性アンドロイドの問題は、その人間に酷似した姿から、人々はより長く対話することを期待したが、対話技術や人工知能技術には限界があり、人間らしさを維持したままのアンドロイドとの関わりには限界があった。この問題を遠隔操作によって解決したのがジェミノイドである。ジェミノイドは必要に応じて、オペレータが、声や動作を送ることにより、そのオペレータがジェミノイドの体を通して、遠隔地の人々と長時間対話することができる。

また、そのジェミノイドを用いて検証される認知心理学的知見も、女性アンドロイドのものとは異なる。女性アンドロイドの開発においては、アンドロイドとの短い相互作用における人間らしさや、不気味の谷の心理学的検証が中心であった。これに対して、遠隔操作により長時間対話が可能なジェミノイドでは、単なる人間らしさだけでなく、本人が遠隔地に存在する感覚さえも再現することができる。すなわち、人間らしさの研究から人間の存在感への研究へと発展している。また、直接本人(研究代表者)とジェミノイドを比較するため、より精緻な認知心理実験が可能となるだけでなく、研究に必要な直感を代表者自らが得やすい研究環境を作り出している。

このようなこれまでのアンドロイドに関する研究と、ジェミノイドの試作に関する研究の経験をふまえ、本研究では、大きく以下

の4つの問題に取り組む。

①ジェミノイドにおけるセンサ情報処理機能、遠隔操作機能を充実、発展させ、遠隔地からの自然な対話が可能となる実用可能なシステムとして完成させる。

②認知心理学的手法(眼球運動や身体の不随意運動の計測やアンケート等)により、ジェミノイドに感じる人間らしさや存在感を評価し、認知心理学的知見を得る。

③脳科学的手法(fMRIや光トポグラフィー等)により、ジェミノイドやロボットに感じる人間らしさや存在感に関する脳の機能について明らかにする。

④得られた知見を元に、人間の存在を表現可能な最小限の遠隔操作型ロボットを試作し、その有効性を確かめる。

ここで重要なのは、①の開発と②及び③の開発は常に組み合わせて行うことである。認知心理学的手法及び脳科学的手法によって、発見・確認された人間に関する知識を元に、さらにジェミノイドを改良し、改良したジェミノイドで、さらに進んだ人間理解のための仮説検証を行う。すなわち、人間の存在に関して、ロボット(ジェミノイド)を用いた構成的なアプローチで人間理解の仮説を生成し、それを認知心理学的、脳科学的に検証するという、人間理解とロボット開発が密に融合した研究枠組みをさらに発展させることが、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

①のジェミノイドシステムにおける動作統合システム、遠隔対話システムの開発に関しては、ジェミノイドのシステムはある程度完成できているものの、より自然な動作、より自然で負担の少ない遠隔操作を実現するには、改良開発が必要である。ここでは、ジェミノイドシステムの周りに設置されたセンサからの情報や、遠隔操作で送られてくる音声情報や動作情報(意図を持った大きな動作)に応じて、自然な振る舞いを生成する機能を開発する。

またより興味深いのは、ジェミノイドシステムにおけるインターフェースのデザインである。現時点の試作では、オペレータは、ジェミノイドの体を見るモニタと、ジェミノイドと対話する人を見るモニタの2つを交互に見ている。そして、誰がジェミノイドを遠隔操作しても、まるでその体が自分の体であるかのように感じる。この強い引き込み感を得る最低限のインターフェースは何か? 逆に、より強い引き込み感を与えるためのインターフェースはどのように設計されるべきか。こういった問題について、様々なインターフェースをデザインしながら、認知心理学的研究によって、その効果を明らかにする。

②および③のジェミノイドの存在感に関

する認知心理学的、及び脳科学的研究では、特に認知心理学的研究に関して、インターフェース設計と引き込み感という問題以外にも、ジェミノイドシステムの改良開発に伴って、様々な興味深い問題が発生してくる。例えば、声と体の動きの同調の重要性や、遠隔操作における遅延に対する人の適応能力、さらには、遠隔操作による対話に一旦適応すると、操作者は画面のみを見ているにも関わらず、誰かがジェミノイドに触れると、実際に触れられた感覚を持つという、現象が起こる。これらの問題への認知心理学的取り組みを通して、人間の認知プロセスを明らかにする。

一方、脳科学研究は fMRI 利用における制約から、最初ジェミノイドや人間のビデオ映像を用いて取り組む。不気味の谷は多くの研究者によってその存在が示唆されてきたが、その客観的な現象を捉えた研究はない。これに対して、最近、研究代表者と共同研究者の Saygin, Chaminade らは脳イメージングによって「不気味の谷」の現象に関連すると考えられる脳活動を世界ではじめて捉えた。この研究をさらに発展させ、どのようなロボットに、どれほどの違和感を感じるのか、人間の体のどの部位が、またどのような動きが重要であるか等、人間が人間やロボットの関わりに関して、脳活動を客観的な評価指標に用いて明らかにしていく。

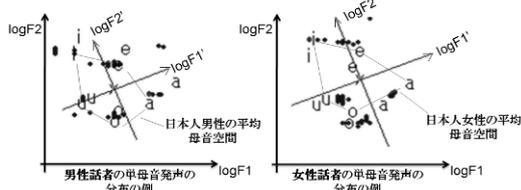
また、改良した光トポグラフィー装置や EEG 等、通常的环境でも利用できる脳活動計測装置を使い、実際のロボットを用いた脳イメージングやブレインマシンインターフェースの研究にも取り組む。

そして、④の研究では、①から③の研究で得られる知見を基に、存在感に関わるエッセンスに基づく、人と関わるための最低限の見かけ、ミニマルな見かけを持つロボットを開発し、再度、認知心理学的手法や、脳科学的手法によってその効果を検証する。

#### 4. 研究成果

①のジェミノイドのシステム開発では、操作機能を充実発展させ、自律的な機能と組み合わせ、より操作性の高い遠隔操作アンドロイドを実現した。特に、カメラについては、一人称視点のカメラと三人称視点のカメラの組み合わせや、自動的に視線追跡する機能等、様々な工夫を施した。

そうしたシステム開発で独自に開発した重要な技術は、操作者の声からアンドロイドの唇の動きを生成する技術である。下図は操



作者の声のフォルマント空間と唇の形状の関係を示している。

母音は第1および第2フォルマント(F1、F2)による空間で表現できる。そして、母音空間は話者(性別、年齢、身長など)によって異なるため、話者正規化をする必要がある。そのためF1-F2の空間において、母音空間の中心に原点を移動させる。そしてその後、軸を反時計周りにおよそ25度回転させることにより、回転後のlogF1'軸が唇の縦の開閉度合いと一致するようになる。また、唇の横開きの度合いには、回転前のF2と一致する。

これにより、操作者の声からアンドロイドの唇を正確に制御することができ、アンドロイドがしゃべっているように感じられるようになる。

このようなシステムを用いて、オーストリアのリンツと日本を結んだ長期の遠隔操作実験に取り組む、実社会(カフェ)で人々がジェミノイドをどのように受け入れるか、実証的な実験に取り組んだ。このようなアンドロイドを用いた実証実験は世界で初めてであり、数多くのメディアに取り上げられることとなった(下図参照)。

また、カフェにおける実証実験だけでなく、講演も行ってみた。無論動きは本人よりも制約されるが、十分に人間らしい講演を行うことができた。テレビ会議とは異なり、十分に



強い存在感を表現できるために、テレビ会議よりも迫力のある講演ができる(下図参照)。

②および③の認知科学的・脳科学的研究では、ジェミノイドと関わる人がジェミノイドをどのような存在として受け入れるかについて、様々な認知科学的実験を行った。実験対象は、成人だけでなく、幼児も対象とすることで、発達の過程で人は人をどのように認識するかについて研究を展開した。その認知

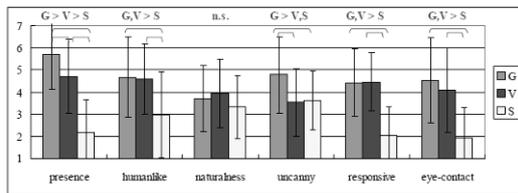


科学的研究の一例として、ジェミノイド(G)とビデオ(V)とスピーカー(S)の比較実験に

について報告する。

下図に示されるように、他のメディアよりもジェミノイドの方がより存在感のある対話が可能であるという結果になった。すなわち、人らしい外見を持ったメディアのほうが強い存在感を示すことができる可能性があるということである。

一方で、ジェミノイドと対話した被験者はビデオモニター上の人間と同様に人らしく、他のメディアと同等に自然であったと評価したにもかかわらず、同時に最も不気味であるとも評価した。このロボットの不気味さについては古くから「不気味の谷」と呼ぶ現象として知られている。「不気味の谷」とは、ロボットの外見が人間らしくなればなるほど、親近感が増加するが、かなり人間に近づ



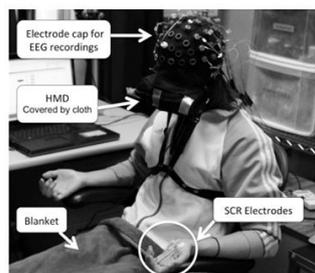
いたところで、急に、親近感が低下する。そして、その後、さらに外見が人らしくなる過程で親近感が急激に増すというものである。

本実験において、不気味さが増した理由はさらに精緻な実験を通して検証する必要があるが、本研究では実験状況は異なるものの、この「不気味の谷」についても、fMRIを用いた脳科学研究を展開し、世界で初めて「不気味の谷」に関わる脳の部位、すなわち、人間とそれ以外を区別することに貢献しているであろう脳の部位を明らかにしている。

脳科学的な研究は、これ以外にもミラーニューロンに関わる研究等に取り組んだ。人間は人間の行動に対してミラーシステムが活動するが、アンドロイドに対しても活動することを、EEGを用いて確かめることができた。

そして、そのEEGはブレインマシンインターフェースのデバイスとしても用いることができ、非常に重要かつ興味深い実験が可能となる。

遠隔操作型アンドロイドの研究における重要な問いの一つに、「操作者は遠隔操作をする際に映像を見るだけで、アンドロイドの体を自分の体であると感じることができるか？」というものがある。この問いに答えるには、操作者が一切体を動かさない状態で遠隔操作できるシステムが必要となる。それを可能にするのがEEGである。前行の図はEEGを用いて、システムが操作者の脳活動を直接読み取



り、アンドロイドを制御する様子を示している。無論、複雑な操作はできないが、左右の手の開閉を指示する程度の単純な操作なら可能である。

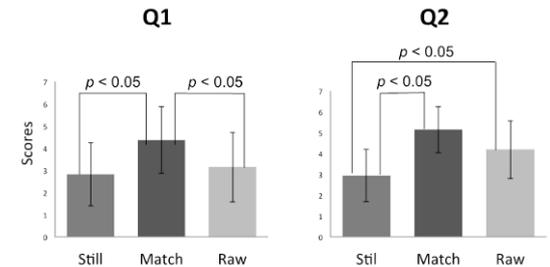
このシステムを用いて、操作者がアンドロイドの両手の動き（握ったり、閉じたり）を制御している最中に、突然、注射針でアンドロイドの手を刺した時、被験者がどのように感じるか、アンケートと手のひらの発汗で評価した。その結果、

Q1) アンドロイドの手に注射針が刺さったとき、自分の手に刺さったように感じましたか？

Q2) タスクを行っている最中に、アンドロイドの手を自分の手のように感じましたか？

という2つの質問に対し、アンドロイドが動かなかった場合 (STILL) とアンドロイドが意図通りに動いた場合 (MATCH) を比べると、下図のように、優位に、後者の方がアンドロイドの手を自分の手のように感じるようになった。

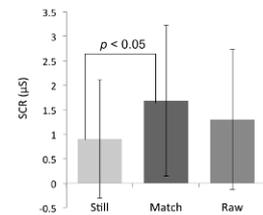
また、発汗に関しても、下図のように同様



の有意差が認められた。これらより、操作者は身体運動が無くても、脳波でアンドロイドを指示し、その結果をビデオで確認するだけで、アンドロイドを自分の体のように感じられることが分かった。すなわち、遠隔操作型アンドロイドに適応するのに、自己受容感覚 (Proprioception) は直接必要無いのである。例えば全身麻痺の患者であっても、遠隔操作型アンドロイドを自分の体のように感じながら操作できる可能性がある。これは世界的にも新しい重要な発見であると考えている。

最後に④については、他の研究項目における研究の

結果と経験から、テレノイドと呼ぶ、ミニマルデザインの遠隔操作型アンドロイドを作り出した (右図)。テレノイドの研究は、ジェミノイドとは正反対の方向性によって、人間らしさを追及する試みである。つまり、人間の人間らしさから引き算していき、いかに最小限に人間らしさを残せば、人間として認められるロボットを作れるかという挑戦を



している。

テレノイドの開発で、まず最初にやったことは、頭の中のイメージを具体的な形にすることである。そのために、コンピュータの造形システムを使った。コンピュータの造形システムを使えば、粘土で模型を作るよりも遙かに早い速度で模型を作ることができる。

その制作においては次のようなデザインポリシーを用いている。まず基本となるのが「明らかに人間に見えるが、人との対話において、一切不要なものを持たない人間」という考えである。それを実現するために、まず、対話において最も重要な目を中心にして、体の周辺に向かうにつれて、特徴が消えていくようなデザインにしている。加えて、性別も年齢も不明なままにしている。顔は左右対称で、眉毛などをなくせば、男にも女にも見える。大人の顔で、顔と頭の比率を、子供の比率にすれば、大人にも子供にも見える。体は、おしりや太ももの面影を残しつつも、基本的には中性的にする。このようにして、人間のミニマルデザインであるテレノイドの外見を作り上げた。

テレノイドはロボットのシステムとしては、だいぶ簡略化されているものの、基本的にはジェミノイドと全く同じである。システムは、主に三つの要素から構成される。テレノイド本体と、遠隔操作用のカメラ付きパソコン、それに、テレノイドと、テレノイドと対話する人を映し出す外部のカメラである。操作者は外部のカメラで撮影され、パソコンに映し出される、テレノイドと対話する人の様子を見ながら話をする。同時にパソコンのカメラが操作者の表情を捉え、唇や頭部の動きを解析して、テレノイドに送ると、テレノイドは操作者の声を出しながら唇や頭を動かす。

テレノイドはオーストリアの一般の人と、日本の高齢者に試してもらった。試してもらったオース

トリア一般人の半分以上は、最初「気持ち悪い」とか「不気味だ」というような感想を述べていた。しかし、おもしろいことに、遠隔操作されているテレノイドを腕に抱いて対話してもらおうと、急に、意見が変わって、「か



わいい」とか「楽しい」と言い出す。ほとんど全ての人がそうであった（上図参照）。

日本の高齢者の反応はさらに良かった。デイケアセンターから高齢者を50人程招待し、テレノイドを使ってもらった。遠隔操作は、デイケアセンターの職員の方にお預りした。そうしたところ、高齢者は、テレノイドを一切不気味だとは全く言わなかった。そして、対話が始まると、非常に喜んでた。特に抱擁をしながらの対話は好評だった。普段、介護者ともほとんど話をしない人でも、こちらが止めましょうというまで、ずっと話をしていた（上図参照）。



アンドロイドやジェミノイドは、世界に先駆けて開発したものであるが、このテレノイドも世界に類を見ない、新しいロボットである。人間に酷似したアンドロイドは、アンドロイドのモデルの存在感を持つが、一方でテレノイドは、そこから聞こえる声を頼りに、自由に対話相手を想像することができる。これらは人間の代わりに人間と対話する遠隔操作型アンドロイドの両極に位置しており、それぞれ、目的に応じて実用的に利用されるともに、両者の比較等を通して、さらに深い人間らしさや人間の存在に関する知識が得られると期待している。

このように、本研究では、遠隔操作型アンドロイド、ジェミノイドに関して、操作者と訪問者双方のジェミノイドへの適応という視点から、その認知科学的・脳科学的研究に取り組み、新しい科学的知見を得るとともに、ジェミノイドとは対局に位置しながらも、状況によってはジェミノイドよりも人らしい存在感を持てるテレノイドを開発することができた。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計73件）

- ① C. Liu, C. Ishii, H. Ishiguro, N. Hagita (2013) Generation of nodding, head tilting and gazing for human-robot speech interaction. Int. J. Humanoid Robotics, 10, 1-19. 査読有. DOI:10.1142/S0219843613500096
- ② 松田剛, 神田崇行, 石黒浩, 開一夫 (2012) ヒューマノイドロボットに対するミラーニューロンシステムの反応. 認知科学, 19 (4), 434-444. 査読有.
- ③ 渡辺哲矢, 西尾修一, 石黒浩 (2011) 遠

隔操作によるアンドロイドへの身体感覚の転移. 電子情報通信学会論文誌, 査読有, J94-D (1), 86-93.

- ④ S. Nishio, H. Ishiguro (2011) Attitude change induced by different appearances of interaction agent. Int. J. Machine Consciousness, 査読有, 3 (1), 115-126.
- ⑤ S. Shimada, K. Fukuda, K. Hiraki (2009) Rubber hand illusion under delayed visual feedback. PLoS ONE, 4 (7), e6185. 査読有.
- ⑥ 開一夫, 板倉昭二 (2009) ロボットによる認知発達研究: アンドロイドはヒトなのかモノなのか. バーチャルリアリティ学会誌, 14 (1), 12-14. 査読有.
- ⑦ 石黒浩 (2009) アンドロイドの存在感. バーチャルリアリティ学会誌. 14 (1), 8-11. 査読有.

[学会発表] (計 302 件)

- ① G. Matsuda, K. Hiraki, H. Ishiguro, Does a humanoid in front of you activate your mirror neuron system? 34<sup>th</sup> Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Sapporo, Japan. 2012 年 8 月 4 日
- ② M. Alimardani, S. Nishio, H. Ishiguro, BMI-teleoperation of androids can transfer the sense of body ownership. Cognitive Neuroscience Society's Annual Meeting, Chicago, Illinois, USA. 2012 年 4 月 1 日

[図書] (計 11 件)

- ① 石黒浩 (2011) アンドロイドを造る. オーム社.
- ② 石黒浩 (2011) どうすれば人を造れるか? 新潮社.
- ③ 石黒浩 (2009) ロボットとは何か. 講談社.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 遠隔操作ロボット (ジェミノイド M)

発明者: 石黒浩

権利者: 大阪大学, ATR

種類: 特許

番号: 特願 2011-159729

出願年月日: 平成 23 年 7 月 21 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

名称: 遠隔操作ロボット (テレノイド)

発明者: 石黒浩

権利者: 大阪大学, ATR

種類: 意匠

番号: 意匠登録第 1412034 号

取得年月日: 2011 年 3 月 25 日

国内外の別: 国内

[その他]

<http://www.irl.sys.es.osaka-u.ac.jp/>

<http://www.geminoid.jp/ja/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石黒 浩 (ISHIGURO HIROSHI)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号: 10232282

### (2) 研究分担者

開 一夫 (HIRAKI KAZUO)

東京大学・総合文化研究科・教授

研究者番号: 30323455

板倉 昭二 (ITAKURA SHOJI)

京都大学・文学研究科・教授

研究者番号: 50211735

西尾 修一 (NISHIO SHUICHI)

国際電気通信基礎技術研究所・社会メディア総合研究所・主任研究員

研究者番号: 80418532

宮下 敬宏 (MIYASHITA TAKAHIRO)

国際電気通信基礎技術研究所・知能ロボティクス研究所・研究員

研究者番号: 50332771

神田 崇之 (KANDA TAKAYUKI)

国際電気通信基礎技術研究所・知能ロボティクス研究所・上級研究員

研究者番号: 90374107

中西 英之 (NAKANISHI HIDEYUKI)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 70335206

中村 泰 (NAKAMURA YUTAKA)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号: 70403334

吉川 雄一郎 (YOSHIKAWA YUICHIRO)

大阪大学・基礎工学研究科・講師

研究者番号: 60418530

(H23 から分担者として参画)

### (3) 連携研究者

松本 吉央 (MATSUMOTO YOSHIO)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門 サービスロボティクス研究グループ・研究グループ長

研究者番号: 00314534