

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220004

研究課題名(和文) 人のような存在感を持つ半自律遠隔操作型アンドロイドの研究

研究課題名(英文) Studies on semi-autonomous teleoperated androids that have humanlike presence

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 159,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、従来の遠隔操作型アンドロイドやロボットを、さらに進化させ、今後主流になると予測される遠隔操作型ロボットの研究開発プラットフォームとして、半自律遠隔操作型アンドロイドやロボットの実現を目指した研究開発を展開した。
具体的には次の課題について研究に取り組んだ。多様な相互作用が可能な半自律アンドロイドの開発。社会的存在としてのアンドロイドやロボットの機能開発。現実社会におけるアンドロイドやロボットの社会における実証実験。アンドロイドのブレインマシンインターフェース(BMI)による遠隔制御の研究。

研究成果の概要(英文)： In this research project, we have worked in research and development aiming at realization of semi-autonomous tele-operated androids and robots as a research and development platform that is expected to be the mainstream in the future.
Specifically, we have worked on the following subjects. Development of a semi-autonomous androids that enable various interactions. Development of android and robot functions as social existence. Field experiments of the androids and robots in real world. Studies on remote control by brain machine interface (BMI).

研究分野： 知能ロボット学

キーワード： アンドロイド 遠隔操作 社会性 認知科学 知能ロボット学

1. 研究開始当初の背景

ロボットの研究は産業用ロボットの研究から、日常活動型ロボットの研究に徐々に焦点が移りつつある。研究代表者は1999年に世界に先駆け、テレビ会議システムと移動台車を組み合わせた、日常活動型ロボットとしての遠隔操作型ロボットを提案した。同様のものがその後、米国の複数のベンチャー企業により実用化された。しかし直接的な遠隔操作のみでは、複雑な状況でロボットを利用することが難しい。自動車等の開発同様に、日常活動型ロボットにおいても、高度な自律機能を持つ半自律遠隔操作型の研究開発に取り組むことが、その利用範囲や利用者層を増やすために必要不可欠である。

一方、遠隔操作型ロボットの究極の姿として、研究代表者は遠隔操作型アンドロイドを世界に先駆け開発してきた。人間の脳が人間を認識する多くの機能を持つことから考えれば、人と関わるロボットとして最も理想的な姿形が人間に酷似したアンドロイドである。

本研究はこのような背景のもと、従来の遠隔操作型アンドロイドやロボットを、さらに進化させ、今後主流になると予測される遠隔操作型ロボットの研究開発プラットフォームとして、半自律遠隔操作型アンドロイドやロボットを実現する。

2. 研究の目的

本研究では、従来の遠隔操作型アンドロイドをさらに進化させ、操作者の操作能力の限界を補完して、かつて実現されることがない、高度に臨場感のある視覚、聴覚、触覚を通じた人との関わりを実現する半自律遠隔操作型アンドロイドの研究開発に取り組む。

これまでに開発してきた、人との多様な相互作用が可能なアンドロイドやロボットを改良するとともに、従来の遠隔操作機能を自律機能に置き換えていく。その自律化の対象となる振る舞いには以下の5つの段階が考えられる。

- (1) 瞬きや呼吸に伴う動作等、生命維持機能に由来する身体動作。
- (2) 声や表情表出に付随する身体動作。
- (3) 対人状況や社会的状況における注意に伴う動作。
- (4) 状況や発話内容に沿う動作や対話
- (5) 状況や発話内容に沿わない意図的な動作や発話

3. 研究の方法

研究は目的を踏まえて、以下の3つの課題について取り組む。

[多様な相互作用が可能なアンドロイドの開発]この課題では、人間と自然に触れ合うことのできるアンドロイドの実現を目指し、ダイナミックに動くことができる空気アクチュエータを用いたアンドロイドを開発する。また、従来改良を重ねてきたリニア電磁

アクチュエータをさらに改良し、それを用いて、アンドロイドのより人間らしい動きの再現に取り組む。

[社会的存在としての機能の実現]この課題では、これまで遠隔操作型アンドロイドに実装してきた対人対話機能を、社会的場面に拡張するための対話モデルを構築する。具体的な社会的状況としては、複数人による雑談等を想定している。

[現実社会におけるアンドロイドの社会参加の実現]先の2つの課題で開発した技術を基に、自律化の進んだアンドロイドを用いた、実社会での実証実験に取り組む。

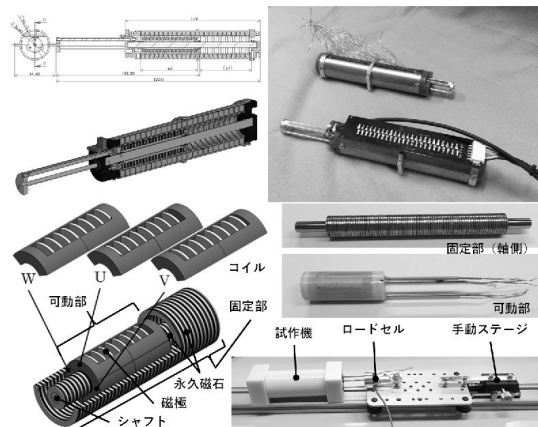
さらには、遠隔操作を通じた自律化に加えて、ブレインマシンインターフェース(BMI)による遠隔制御を導入する。これにより、よりユーザが適応しやすい遠隔操作機能を実現する。

4. 研究成果

研究の方法に従って得られた主な研究成果について述べる。

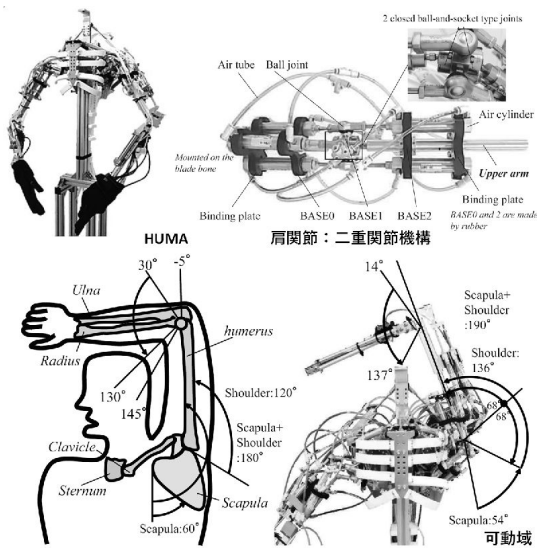
(a)リニア電磁アクチュエータの開発

アンドロイド用のリニア電磁アクチュエータを開発した。開発したのは、パーニア構造を取り入れたリニアパーニアモータと、横磁束型リニアモータである。横磁束型では、コイルの巻き線の向きを変えることで、コイル数を増加させることなく磁極ピッチを小さくできるため、さらなる推力向上が可能となる。下図上は、試作したリニアパーニアモータである。リニア電磁アクチュエータを腕または脚に搭載した際の効率的な制御についても検討を行った。



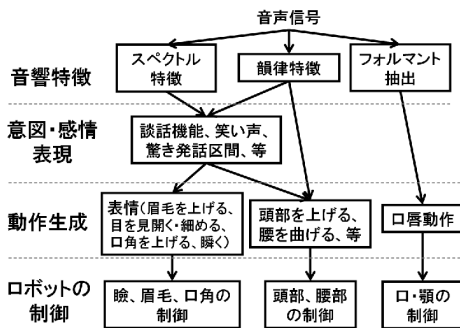
(b)人型上肢筋骨格アンドロイドの開発

対人場面や社会的場面で用いるアンドロイドは、空気圧アクチュエータを用いて開発した。その動作や運動能力を人間に近づけるため、可動範囲の広い関節機構を考案した。特に肩の可動範囲を大きくするため、連動する空気圧シリンダによって駆動される二重関節機構を開発した(下図)。また、本機構と肩甲骨を模した構造を組み合わせることで、人と同等の肩の可動域を実現した。また独自の連結連動メカニズムにより多様な筋の連動パターンを実現した。

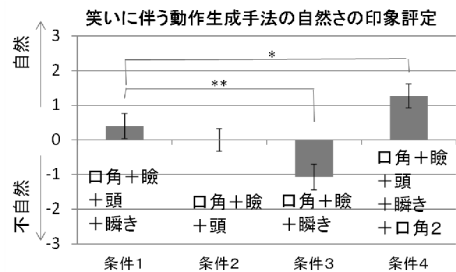


(c) 音声に伴う遠隔操作ロボットの動作生成

人と円滑な対話を成立させるには、人並みの自然な振る舞いが要求される。ここでは、人対人の対話インタラクションを分析し、音声と動作の関連をモデル化して、遠隔操作者の発話音声に伴うロボットの動作を自動的に生成する技術を開発した。具体的には、談話機能と頭部動作の関連性を考慮した頭部動作生成技術、頷きが頻繁に起きる相槌的発話の認識とそれに伴う頭部動作の自動生成システムの開発、感情表現に重要な笑い声および驚き発話に伴う表情、頭部、上半身の動作生成技術を開発した（下図参照）。



笑い声は日常の対話場面で頻出し、重要な役割を果たすが、笑い区間で視聴覚のミスマッチが生じると、非常に不自然になる。本研究では、対面対話データを基に、笑いの種類やパラ言語的機能と、それに伴う表情や身体動作との関連について調べた。そして、笑い声の区間と音声信号が与えられた際に、笑いに伴う動作生成手法を開発した。笑顔の表情（唼と口角）、頭部の動き、笑顔から平常時の表情に戻る際の瞬きの付加、笑い声以外の区間でのわずかな笑顔（口角2）の4つのファクタについて、アンドロイドの笑い声に伴う動作生成を通して、その効果を調べた。すべてのファクタを搭載した手法が最も自然な動きを生成できた（下図参照）。



頭部動作生成に関しては、操作者の音声から頭部動作をオンラインで生成し、それをロボットの頭部動作に重ね合わせる遠隔操作システムを提案した。発話の言語情報と韻律情報を用いることにより、多種類の頭部動作を生成した。

(d) 半自律遠隔操作アンドロイドの開発

ここでは、遠隔操作ロボットに自律ロボット研究の知見を組み合わせることで、適切な環境適応的な動作を生成できる、半自律遠隔操作システムを開発した。具体的には、操作者の視線を用いたインタフェースとフォースフィードバック機能を持つジョイスティックを用いた2種類の操作インタフェースを実装し、操作者に与える心理的影響の評価を行った。

操作者の視線を用いた操作システムは、視線計測装置を用いる事で操作者が画面上で注視した場所をロボットも同様に注視するシステムである。本システムでは、ロボットの操作者への介入の際、画面上に表示された操作者の注視点を強制的に動かすことで、操作者が介入に気づきにくくなり、操作感が損なわれない半自律遠隔操作システムを実現することができた。また、対話タスクに対して責任感や貢献感を対話者が感じたことが分かった（下図参照）。



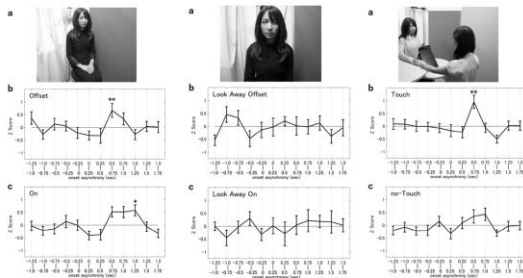
ジョイスティックを用いた操作システムでは、操作者はジョイスティックによりロボットの視線方向を操作する。本システムでは、ロボットの操作への介入を、ジョイスティックのフォースフィードバックにより提示することで、操作の介入を明示的に操作者に伝達した。評価実験では操作感の喪失や対話タスクの結果に対する操作者自身を感じる責任感への影響について検証をおこなった。その結果、高頻度の介入を行う条件においても、ロボットの操作感が損なわれないことが分かった。また、対話タスクの失敗に対する操作者が感じる責任感の低減が確認できた（下図参照）。



これらの結果から、遠隔操作ロボットを用いる状況に応じて、介入の明示性の異なるインタフェースを用いることで、操作者のタスクに対するパフォーマンスの向上や、ストレスの低減を期待できることが分かった。

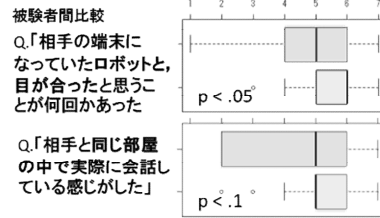
(e) アンドロイドに対する人の親和的反応

人は親近感を頂く他者に対して身体を同調させること、また逆に身体の同調が親近感の要因となることが知られている。健康者を対象とした実験により、人に向かって話をするアンドロイドの瞬目に対して、被験者の瞬目のタイミングが同期することが確認された(下図左)。また、アンドロイドの視線を人からそらさせた状態で話をさせると、そのような同調は消失した(下図中)。さらにアンドロイドの手を人の手を重ねさせた状態で話をさせると、そのような同調は増強された(下図右)。人は話す人の映像に対して、瞬目を同調させることが知られていたが、本実験により、アンドロイドも同様の同調を示すに足る存在感を有すること、そのような同調は複数モダリティの同調を利用することで強化できることが示唆される。



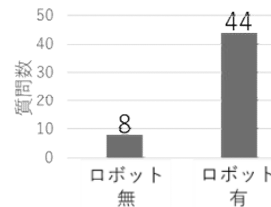
(f) 遠隔操作型ロボットの複数体化

半自律遠隔操作型ロボットの社会的存在としての機能の実現に関して、複数のロボットを連携させて、遠隔操作されるロボットから感じられる社会性を強化することを試みた。遠隔操作ロボットに別の自律型ロボットを同席させるという新しい形式の遠隔操作ロボットシステムを開発した。遠隔操作型ロボットが、視線そらし行動を示す際、そらす先に自律的な同席ロボットがいる状況では、遠隔操作者の社会的存在感(見られている感じ、同じ部屋にいる感じ)を強化できることを確認した(下図参照)。



(g) 集団型遠隔操作型ロボット

より実用的な遠隔操作型ロボットの応用として、複数のオペレータが1台のロボットを操作するシステムを開発した。本システムでは、各操作者が携帯端末から発言したい内容を投稿し、ロボットに発言させることができる。さらに投稿内容を実際に発言させるかを、他者の投票に託す民主的決定機能を持つことで、気兼ねない意見投稿を後押しするとともに、賛同されやすい意見が表に出されるようになることで、コミュニケーションを活性化できることが期待される。本システムを高校・大学生向け講演会(N=54)にて使用し、予備的ながら生徒の質問を5.5倍増加させる劇的な効果を確認した。



(h) ブレイン・マシン・インタフェースによるアンドロイドの遠隔操作

これまでの研究で、視覚フィードバックのみでアンドロイドを操作しても操作者はアンドロイドに適応し、アンドロイドを自分の身体と感ることが分かっていた。近年盛んにおこなわれているラバーハンド錯覚を用いた研究にみられるように、身体所有感の獲得には触覚が必須と考えられていたが、アンドロイド操作による操作者の適応から、視覚フィードバックのみでも身体所有感を生じ得る可能性があると考えられる。

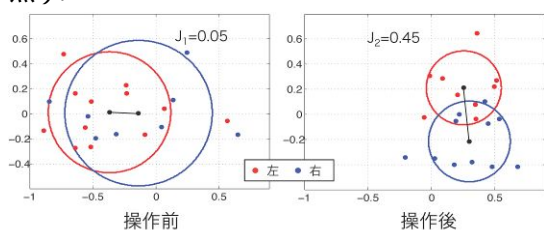
そこでブレイン・マシン・インタフェース(BMI)を用いてアンドロイドを動かす、アンドロイドへの身体感覚転移が生じるかを確かめた。その結果、質問紙による主観評価と皮膚コンダクタンスによる客観評価の双方において、BMI 操作時にもアンドロイドへの

適応が生じていることが確認できた。この結果は、従来のラバーハンド錯覚を用いた研究の知見とは2つの点で異なっている。一つ目は、触覚や固有感覚が生じなくとも、動かしたいという意図があり、それに応じた視覚フィードバックが得られるだけで、アンドロイドへの身体所有感が生じること。二つ目はアンドロイドのBMI操作では遅延が1秒程度生じるが、そのような遅延があっても身体所有感が生じることである。この結果から、人の身体所有感が生じるメカニズムが従来考えられていたよりもかなり柔軟であることを明らかにした。

特に二つ目の遅延耐性については、触覚や固有感覚によるフィードバックが遅延への耐性を低くさせている可能性が考えられる。実際にMoCap操作とBMI操作を比較してみると、BMI操作時のほうがアンドロイドへの適応が強く生じることがわかった。身体所有感の発生は運動意図の結果予測と各種の近心性入力(感覚器からのフィードバック)のマッチングにより生じると考えられるが、視覚フィードバックに対して遅延の小さい触覚・固有感覚フィードバックがこのマッチングと身体所有感の発生を阻害すると考えられる。

先のBMI操作実験では、BMIの正解率と身体所有感には正の相関がみられた($r=0.56$, $p<0.05$)。ここでは意図したとおり動くほど強く適応するという方向で相関が生じていると考えられる。逆に、身体所有感が高くなるとBMI自体の正解率も向上するという逆方向の関係も成立し、身体所有感とBMI操作率が互いに高めあうフィードバックループも考えられる。

これを確認するため、BMI操作によるアンドロイドが「正しく」動く率を恣意的に操作し、その際の脳活動の変化を調査した。アンドロイドが「正しく」動くことで、身体所有感が高まり、身体所有感が高くなることでBMI識別率も向上するという仮説である。その結果、恣意的にフィードバックを操作した場合に、BMIの正解率が高くなる方向に脳波パターンが変化することがわかった(下図参照)。



さらに、ロボットとアンドロイドを同様にBMI操作した場合とを比較すると、アンドロイドを操作した場合のほうが、脳波がより強く、ロバストに変化することも確認できた。これは従来からの、人に似た外観の対象のほうが適応しやすいとの知見に合致する結果である。実際、アンドロイドを用いてBMIの操作訓練を行うと、既存製品などで行われて

いる図形表示による訓練と比べて高い成果が得られることも分かった。

このように実験を通じて、アンドロイドを操作することで人の脳活動を変化させられることが分かってきた。ここで重要なのが、単に操作するだけでなく、操作による結果にシステムによる介入が行われている、すなわち半自律で操作が行われている点である。

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5件)

C. Ishi, T. Minato, H. Ishiguro, Motion analysis in vocalized surprise expressions and motion generation in android robots, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 3, pp. 1748-1754, 2017.

DOI:10.1109/LRA.2017.2700941

K. Tatsukawa, T. Nakano, H. Ishiguro, Y. Yoshikawa, Eyeblink synchrony in multimodal human-android interaction, Scientific Report, Vol. 6, No. 39718, 2016.

DOI:10.1038/srep39718

有本庸浩, 吉川雄一郎, 石黒浩, 遠隔対話ロボットと連動して振る舞う陪席ロボットによる遠隔話者の社会的存在感の向上, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 101(2), pp. 253-262, 2018.

DOI:10.14923/transinfj.2017HAP0009

M. Alimardani, S. Nishio, H. Ishiguro, Removal of proprioception by BCI raises a stronger body ownership illusion in control of a humanlike robot, Scientific Reports, Vol.6, No. 33514, 2016.

DOI:10.1038/srep33514

M. Alimardani, S. Nishio, H. Ishiguro, The Importance of Visual Feedback Design in BCIs; from Embodiment to Motor Imagery Learning, PLOS ONE, Vol.161945, pp. 29-47, 2016.

DOI : 10.1371/journal.pone.0161945

[学会発表](計1件)

C. Ishi, T. Funayama, T. Minato, H. Ishiguro, Motion generation in android robots during laughing speech, Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 3327-3332, 2016.

〔図書〕(計1件)

H. Ishiguro, F. Libera (Eds.), Geminoid studies, Science and technologies for humanlike teleoperated androids, Springer, 2018.

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

名称: 会議システムおよび制御プログラム
発明者: 吉川雄一郎, 小川浩平, 石黒浩
権利者: 大阪大学
種類: 特許願
番号: 2017-070851
出願年月日: 2017年3月31日
国内外の別: 国内

名称: ヒューマノイドロボットの驚き動作生成装置
発明者: 石井カルロス寿憲, 港隆史
権利者: (株)国際電気通信基礎技術研究所
種類: 特許願
番号: 2017-047509
出願年月日: 2017年3月13日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

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

平田 勝弘 (HIRATA, Katsuhiko)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号: 00403139

小川 浩平 (OGAWA, Kohei)
大阪大学・基礎工学研究科・講師
研究者番号: 10586027

(平成26年度より研究分担者)

開 一夫 (Hiraki, Kazuo)
東京大学・総合文化研究科・教授
研究者番号: 30323455

石井 カルロス寿憲
(ISHII, Carlos Toshinori)
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・石黒浩特別研究所・グループリーダー
研究者番号: 30418529

吉川 雄一郎 (YOSHIKAWA, Yuichiro)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 60418530

岩井 儀男 (Iwai, Yoshio)
鳥取大学・工学研究科・教授
研究者番号: 70294163
(平成26年度より研究分担者)

西尾 修一 (NISHIO Shuichi)
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・石黒浩特別研究所・主幹研究員
研究者番号: 80418532
(平成26年度まで研究分担者, 以後は連携研究者)

(3) 連携研究者

中村 泰 (NAKAMURA, Yasushi)
大阪大学・基礎工学研究科・特任准教授
研究者番号: 70403334

吉峰 俊樹 (YOSHIMINE, Toshiki)
大阪大学・医学系研究科・教授
研究者番号: 00201046

平田 オリザ (HIRATA, Oriza)
東京藝術大学・COI 研究推進機構・特任教授
研究者番号: 90327304

神田 崇行 (KANDA, Takayuki)
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・知能ロボティクス研究所・室長
研究者番号: 90374107

宮下 敬宏 (MIYASHITA, Takahiro)
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・知能ロボティクス研究所・室長
研究者番号: 50332771

板倉 昭二 (ITAKURA, Shoji)
京都大学・文学研究科・教授
研究者番号: 50211735

港 隆史 (MINATO, Takashi)
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・石黒浩特別研究所・研究員
研究者番号: 50359585

平田 雅之 (HIRATA, Masayuki)
大阪大学・医学系研究科・特任准教授
研究者番号: 30372626