［研究助成（A）］

協調的動作により“存在の感覚”の実験的誘起を可能にする基盤技術の創成

Development of Robotic Technology to Experimentally Induce “Feeling of a Presence” by Cooperative Actions

2201020

研究代表者　埼玉大学　大学院理工学研究科　准教授　原　正之

［研究の目的］

“存在の感覚（feeling of a presence：FoP）”，すなわちその場にいるはずのない“何か／誰か”の存在を知覚する体験は，一般的には幽霊体験などと呼ばれ，超常現象やオカルト現象の類として扱われることが多い。しかしながら，同様の体験は認知症患者やパーキンソン病患者などで多くの報告例があり（実体的意識性などと呼ばれる），また極限状態などでは健常者（例えば，登山家など）においても FoP 体験は度々報告されている（Geiger, 2009）。

これまでの研究では，スイス連邦工科大学の認知神経科学者との国際共同研究により，FoP 体験を報告する患者で自己認識や感覚運動などに関わる脳部位に皮質障害が見られることを明らかにし，また視覚と聴覚を遮断した状態で触力覚と位置感覚における感覚運動矛盾をリーダ・フォロワロボットにより引き起すことで（Hara et al., 2014），健常者で FoP を実験的に誘起することにも成功した（Blanke et al., 2014; Bernasconi et al., 2021）。このように，FoP はヒトの認知・脳機能に関わるものであり，認知神経科学などの分野では FoP の発生メカニズムを解明する試みが行われている。しかしながら，その目標達成には FoP 患者の協力が必要であり，また病気の進行度合などによって FoP 体験の強さや頻度なども異なるため，その科学的検証は極めて困難である。

そこで本研究では，一人あるいは複数人の健常者に FoP を実験的に体験させることを可能にする新しい基盤技術の創成を行い，FoP 発生メカニズムのさらなる解明を促すとともに，FoP を始めとする身体認知・身体錯覚研究に対してブレークスルーを与えることを目指す。この目標を達成するために，本研究では「協調的動作により FoP を複数人で体験させる新しいロボットシステムの試作」と「試作システムの FoP 研究に対する有効性の評価」の 2 つの研究課題を主として推進した。

［研究の内容，成果］

1. FoP 研究のための多自由度パラレルリンクロボットの設計・開発

一人あるいは複数人の研究参加者で FoP を体験させるために，まずは 6 自由度パラレルリンクロボットを試作した。具体的には，順運動学および逆運動学を導出することから始め，様々な条件下でロボットの動作をシミュレーションした結果（図 1）をもとに，直径 200［mm］の球体内を可動域としてロボットの設計・試作を行った。試作 1 号機は主として，ベースプレート，出力プレート，3 対のアームとロッドからなり，各アームはベースプレート上に配置された光学式エンコーダ付き DC モー

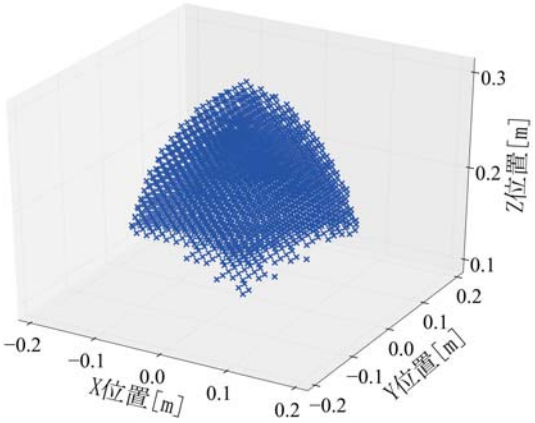
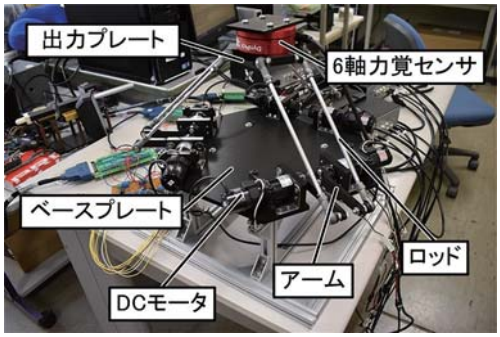
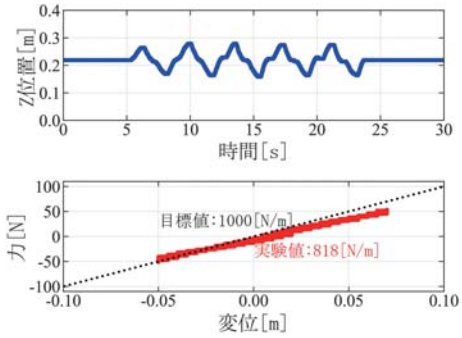


図1　6自由度パラレルリンクロボットの可動域のシミュレーション結果例



(a) 6自由度パラレルリンクロボットの構成



(b) アドミタンス制御特性

図2　FoP実験用6自由度パラレルリンクロボット（ヘキサロボット）の試作

タに取り付けられており，さらにロッドとロッドエンドベアリングで出力プレートと連結された構成となっている（図2(a)）。また，出力プレート上には力・トルク計測とその制御を目的として6軸力覚センサを搭載し，その上に円盤状の操作部を取り付けられるようにした。この6軸力覚センサの情報を用いてアドミタンス制御（力入力に対して位置出力を行う力覚提示手法）を適用して，外部入力に対する柔軟な動き

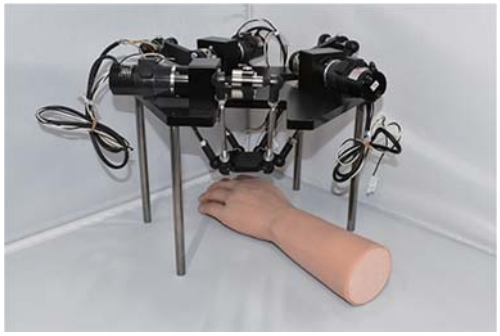


図3　手を刺激対象としたFoP実験用3自由度パラレルリンクロボットの試作

を実現した（例として，Z方向にロボットを押し引きした結果を図2(b)に示す）。この研究成果は，第21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（SI2020）にて発表を行い，SI2020優秀講演賞を受賞している。

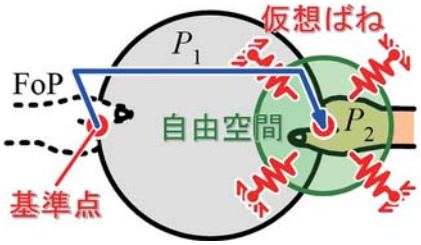
さらに，リーダ・フォロワロボットを用いて研究対象者の背中に能動的自己触刺激を与えた先行研究（Blanke et al., 2014）と他の研究課題で得られたヒトの自他認識操作の知見を参考にして，研究参加者の手への非同期の能動的触刺激提示でFoPを体験させる新たな手法も考案した。これに伴い，図2(a)の6自由度パラレルリンクロボット開発のノウハウを基礎として，機能を簡略化した3自由度パラレルリンクロボットの設計・開発も同様に行い，手を刺激対象としたFoP実験を可能にした（図3）。

2. FoPを効果的に誘起するための新しい力覚提示方法の導入

事前にプログラムした軌道を目標値として図2(a)の6自由度パラレルリンクロボットを位置制御することで，研究参加者に対する力覚的介入を試みた。数名の研究参加者で予備実験を行った結果，事前の予想に反して強いFoP体験の誘起には至らなかった。デブリーフィングの結果，ロボットによる力覚的介入が単なる外乱として知覚されていたことがわかり，“何か／誰か（すなわちFoP)”からのインタラクションと認知されなかった可能性が示唆された。

そこで本研究では，図4に示すような2種類

（a）仮想ばねの適用（従来方法）



（b）仮想ばねに囲われた自由空間の構築

図 4　協調的動作時における力覚提示手法

の力覚提示手法を導入することで，FoP からのインタラクションを自然（人間的）に行うことを試みた。まず図 4(a) の手法について，事前にプログラムされたロボットの軌道（P_1）と研究参加者の動作（P_2）の間に仮想ばねを導入して，FoP からの柔軟なインタラクションの実現を試みた。仮想ばねは協調的動作研究（Takagi et al., 2019）などでよく用いられ，研究参加者間の力覚的な結びつきを制御するのに非常に有効な手法であるが，見えない FoP と常にリンクされた状態となるため，予備実験の時と同様に単なる外乱として知覚されてしまう可能性もある。そこで図 4(b) に示すように，FoP の位置（すなわち事前にプログラムされたロボットの軌道）を基準に，研究参加者側に仮想ばねで囲われた自由空間を構築する方法も考えた（原ら，2021）。この手法では，自由空間内では FoP との力覚的な結びつきが切れることとなり，FoP と研究参加者の位置関係（$\Delta P = |P_2 - P_1|$）によって間欠的な力覚提示の実現が可能となるため，より自然な力覚的介入を実現できるものと期待される。現在は，これらの力覚提示手法を開発したロボットに適用し，一人あるいは複数人で行う FoP 実験において，FoP 体験の強さに及ぼす影響を調査する計画を立てている。

3. 手を刺激対象とした新しい FoP 実験

前述したように，リーダ・フォロワロボットを用いて研究参加者の背中に非同期の能動的自己触刺激を与えると，健常者においても FoP 体験を実験的に引き起こすことができる（Blanke et al., 2014; Bernasconi et al., 2021）。そこで本研究では，開発したロボットを基礎とした新たな試みとして，手への非同期の能動的自己触刺激提示により FoP を実験的に引き起こすことを試みた。具体的には，図 5 に示すようにリーダロボットから左側に 200[mm] 離れた位置（近距離条件）と 600[mm] 離れた位置（遠距離条件）にフォロワロボットを配置し，60 秒間の能動的自己触刺激提示を同期条件と非同期条件（フォロワロボットの動きに 500[ms] の遅れを導入）で行う実験を 30 名の研究参加者（予備実験 5 名，本実験 25 名）に対して実施した。仮説として，刺激される手の位置が刺激位置から遠ざかるにつれて，同期条件においてはセルフタッチ錯覚（自己刺激感）が弱まり，逆に非同期条件においては FoP 体験が強まるものと考えた。4 つの条件（同期－近距離，非同期－近距離，同期－遠距離，非同期－遠距離）を 5 回ずつランダムに提示し，各試行後には研究参加者に手を刺激対象とした FoP アンケート（表 1）に 7 段階リッカート尺度（0：not at all，6：very strong）を用いて回答するように指示をした。表 1 において，Q1 と Q2 はそれぞれ自己刺激感と運動主体感に関わる項目で，Q3～Q5 はコントロール項目（す

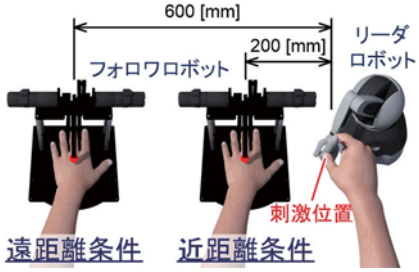


図 5　手を刺激対象とした FoP 実験

表1　手を刺激対象としたFoPアンケート

Q1	自分で自分の左手を棒でタッピングしているように感じた
Q2	左手に与えられたタッピング動作は右手で作り出した動きと一致した
Q3	自分の手がないように感じた
Q4	左手が大きくなっていくように感じた
Q5	左手が右方向に動いたように感じた
Q6	自分の近くに誰かがいるように感じた

なわち，錯覚に関係しない項目）である。また，Q6はFoPに関わる項目であり，非同期条件においてこの項目に0以外のスコアを付けた場合には，FoPの出現位置についても研究参加者の周囲を8分割したエリアに付与した番号で回答してもらった。

手を刺激対象とした場合におけるFoPアンケートの結果を図6に示す。まずQ1について，先行研究と同様に同期条件において有意に平均スコアが高く（Hara et al., 2015），また同期－近距離条件における平均スコアの方が同期－遠距離条件における平均スコアよりも有意に高くなっていることが確認できる。Q2については，刺激を受ける手の位置に寄らず同期条件における平均スコアが有意に高く，コントロール項目（Q3～Q5）の平均スコアについては全ての比較において有意差は見られなかった。最後にQ6については，刺激される手の位置に関わらず非同期条件において有意に高い平均スコアが報告された。以上より，先行研究と同様に手に対する同期の能動的自己触刺激提示で自己刺激感や運動主体感の向上を促せる一方で，非同期の能動的自己触刺激提示ではFoPを実験的に

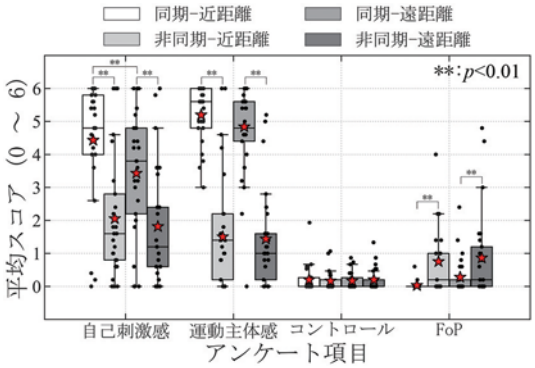


図6　FoPアンケートの結果

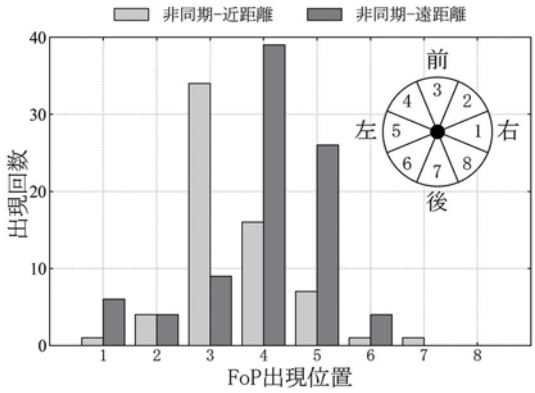


図7　非同期条件におけるFoPの出現位置

誘起できることが確認できた。ただし，予想とは異なり刺激される手の位置によるFoP体験の強さの違いは見られなかった。

次に，非同期の能動的自己触刺激提示時におけるFoPの出現位置の回答結果を図7に示す。まず非同期－近距離条件について，3と4の位置に回答数が集中していることから，研究参加者の前方にFoPが出現していたことが確認できる。一方，非同期－遠距離条件では4と5の位置で回答数が多くなり，非同期－近距離条件に比べて左方向にFoPが出現していたことが示唆される。以上のことから，刺激を受ける手の位置によってFoPの出現位置が変化する可能性があることが示唆された。

4. まとめ

本研究では，協調的動作によりFoPを実験的に体験させるための多自由度パラレルリンクロボットの開発を行い，そのFoP研究への適用可能性について検討した。また。新たな試みとして手を刺激対象としたFoP実験を実施し，手に非同期の能動的自己触刺激を与えることでもFoPを実験的に誘起できることを確認するとともに，刺激される手の位置によってFoPの出現位置が変化する可能性も示唆した。

［今後の研究の方向，課題］

今後の研究では，開発した多自由度パラレル

リンクロボットにさらなる改良・改善を施し，一人あるいは複数人の研究参加者で体験されるFoPの制御を試みる。また，本研究で開発した基盤技術および新しく得られる知見を利用して，パーキンソン病患者などで報告されるFoP体験の主要因や基本メカニズムを明らかにしていくとともに，FoPに関わる疾患に対して新たな治療・診断方法の開発に貢献し，最終的にはFoP患者の生活の質（QOL）の向上を図る。

［成果の発表，論文等］

［1］ 原正之，國松勇希，三木将仁，“実験的なFoP誘起のための新しいロボットシステムの開発”，第21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（SI2020），2F1-05，2020年12月［SI2020優秀講演賞受賞］

［2］ 齋藤誠，金山範明，三木将仁，原正之，“自他認識操作のためのリーダフォロワシステムの開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021（ROBOMECH2021），2P2-I14，2021年6月

［3］ M. Hara, O. Blanke, and N. Kanayama, “Feeling of a presence and anomalous body perception,” Body Schema and Body Image: New Directions, Oxford University Press, Jul. 2021.

［4］ 守下奈那，金山範明，三木将仁，原正之，“アクティブセルフタッチを用いた実体的意識性に関する研究”，日本機械学会第17回「運動と振動の制御」シンポジウム（MoViC2021），M-OS14-D4，2021年12月.