

令和元年6月21日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00358

研究課題名(和文) 積雪地帯における半自律移動ロボットと地域情報データベースによる情報提供システム

研究課題名(英文) Information Service System Using Semi-autonomous Mobile Robot and Area Information Database for Snowy Cold Regions

研究代表者

三河 正彦 (Mikawa, Masahiko)

筑波大学・図書館情報メディア系・准教授

研究者番号：40361357

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：積雪寒冷地において観光客や地域住民に対して積極的に情報提供を行うロボットシステムを提案している。本研究では次に示す技術について研究開発を行なった。(1)クローラ型移動ロボットの試作、(2)Webブラウザによるロボット遠隔操作インタフェースの作成、(2)不整地を考慮したレーザレンジファインダ(LRF)に基づく地図生成と移動ロボットの自己位置推定技術、(3)カメラ映像の物体検出技術を利用した地図の高精度化、(4)複数の広角カメラを利用した水平360度自由視野と半自律遠隔制御手法、(5)顔インタフェースによるロボットの行動予告手法、(6)人の顔と名前の記憶による名前呼びかけ機能の実現と印象評価。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の国土の約半分が豪雪地帯にも関わらず、屋外かつ積雪環境下で利用可能な移動ロボットの研究開発はほとんど無く、またそれを地方都市活性化に利用する試みも無い。また都市部を含めても実環境下における実証実験自体も例が少なく、日本の国土の広い範囲へ適用可能という学術的インパクトと、地方都市活性化という社会的インパクトが期待できる。しかしながら、まだ実験室における評価実験で成果が得られた要素技術もあるので、今後も継続して実環境で評価実験を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：We are studying an information providing robot system for snow areas. In this study, the following functions were proposed. (1) Prototype of crawler type for snow environments, (2) Remote control interface using a gamepad and web browser, (3) Simultaneous localization and mapping (SLAM) using an inertial measurement unit (IMU) on an uneven ground, (4) SLAM utilizing visual object detection, (5) Horizontal 360 degree free field of view using multiple cameras and semi-automatic remote mobile robot control method, (6) Mobile robot with previous announcement of upcoming operation using a face interface, (7) Face memorization system and evaluation experiments.

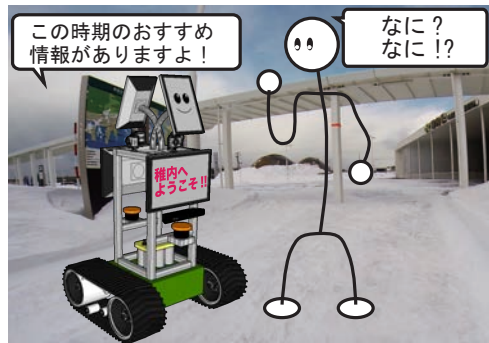
研究分野：ロボティクス

キーワード：移動ロボット 半自律 遠隔制御 地域情報 情報提供 積雪寒冷地 インタラクション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

移動ロボットは近年特に盛んな研究分野の一つである。Google の Self-Driving Car や、DARPA 主催のロボットカーレース Ground/Urban Challenge、市街地における移動ロボットの公開走行実験つくばチャレンジ等、完全自律の移動ロボットが注目を集め、一般公道走行を実現する等、技術進歩が目覚ましい。しかしながら安全性確保や、高価な機材を用いた複雑なシステム等、まだ課題も多い。また災害現場では、確実なタスク遂行のために遠隔操作移動ロボットの研究も盛んだが、特殊環境下の遠隔操作はオペレータ(人間)の熟練が必要となる。オフィス等の整った屋内環境では、利用者の分身となるテレプレゼンスロボットが数多く市販化されている。これらの研究では、砂漠や災害現場等の特殊で劣悪な環境、障害物や一般歩行者が存在するが比較的整った平坦な路面の屋外環境、整った屋内環境が中心である。一方、日本国土の約 51%が豪雪地帯で、かつ地方都市の活性化が望まれているにも拘らず、本研究の対象となる積雪環境下でサービス提供する移動ロボット研究は、世界的にもほとんど無い取り組みである。我々はこれまで、図書館に設置し、図書館利用者との会話や蔵書検索、情報提供機能を持つ図書館司書ロボットの研究を行ってきた。そこで蓄積した人とのインタラクション技術とセンサ情報処理技術を活用し、積雪屋外環境下における観光客や地元住民(以降、利用者)に対して積極的に情報提供し、地域の活性化を目指す移動ロボットシステムの研究開発を進めている。



2. 研究の目的

半自律移動ロボットシステムの研究開発を筑波大学が主に担当し、地域情報デジタルアーカイブシステムの構築と稚内市内における評価実験を北星学園大学が主に担当する。本申請では、筑波大学が担当するロボットシステムを中心に、構築に必要な機能と課題を以下にまとめる。

【課題 1】半自律制御と遠隔操作: オペレータがゲームパッド等を用いロボットを遠隔操作する場合、例えば直進と指令しても、路面スリップ等が原因で直進すら困難で、オペレータは常に軌道修正しつつ、かつ周辺障害物にも注意する必要があり、遠隔操作の負担は大きい。そこで直感的な遠隔操作が可能で、半自律移動ロボット制御と遠隔操作インタフェースが必要となる。

【課題 2】ロボット活動範囲の環境地図作成と自己位置推定: オペレータがロボットを遠隔操作するにはロボットの正確な現在位置を知る必要があるが、特殊な GPS を除き、通常の GPS は数[m]程度の位置誤差を含み、道幅の狭い歩道上でロボットの位置把握と誘導は困難である。そこでレーザレンジファインダ(LRF)や慣性計測装置(IMU)を併用した走行制御、自己位置推定、環境地図作成機能が必要となる。

【課題 3】ロボット周辺の人間の把握: ロボット周辺の人間に脅威を与えずかつ親密さを表現するには、人に対して気の利いた行動/反応をロボットが行う必要がある。例えば、積雪期の狭い歩道で人とロボットがすれ違う際、人を気遣いつつ回避する行動を分かり易く歩行者に示す必要がある。

【課題 4】利用者との会話および情報提供: スマートフォン等の音声や画面を用いた情報提示では、利用者にとって理解しづらい場合があるため、音声と情報提示ディスプレイに加えて、直感的に分かりやすい情報提供方法が必要である。

本研究の目的は、これらの【課題 1~4】を明らかにし、オペレータが直感的かつ簡便に移動ロボットの遠隔操作が可能で、利用者に対し有益な地域情報を直感的に分かりやすいように提供したりすることが可能な移動ロボットシステムを構築することである。具体的には、次の四つの目的を軸に研究を進める。

【目的 1】課題 1 については、LRF を利用した歩道に沿った直進や曲がり角の自律走行/障害物回避制御と、オペレータからの遠隔操作指令とのハイブリッド制御を実現する。オペレータはゲームパッド等から、直進/右/左等の大雑把な指令を与えるだけで、ロボットの障害物回避は自律的に実行され、オペレータの負荷が軽減される。

【目的 2】課題 2 については、自己位置推定と環境地図作成を同時に行える Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)に基づき、LRF と IMU を利用することにより不整地に強いロボットの自己位置推定と環境地図作成を実現する。

【目的 3】課題 3, 4 については、図書館司書ロボットで用いた LRF による歩行者検出・追跡・行動予測機能を活用する。歩行者のロボットに対する興味の有無を確率モデルとして表現でき、興味の無い歩行者には自律的に回避行動を行い、興味の有りそうな歩行者に対しては、積極的にコミュニケーションをはかるように、オペレータに促すことができる。会話機能と提供情報提示機能も図書館司書ロボットの機能を活用/発展させることにより実現する。

3. 研究の方法

本研究の 3 つの目的を実現するために、次の 3 項目について研究開発を進める。

- 移動ロボットの試作
- SLAM の検討

(c) 周辺の人に優しい遠隔制御手法の検討

(d) 周辺の人に優しい情報提供手法の検討

2014 年冬季に稚内市内で実際に現場を調査したところ、駅前から駅前商店街周辺の人々の往来の多い歩道ですら、除雪の行き届いた路面、新雪、氷雪、圧雪、小山状の積雪といった様々な路面状態が短い区間で変化し、更に頻繁な降雪と除雪作業により、日々、路面地形が大きく変化する環境下で、移動ロボットは自在に行動する必要がある。また狭い歩道で方向転換する場合や、多数の人に囲まれた中で行動する場合も考慮し、様々な移動機構を検討し、構造が単純で悪路走破性が高い移動機構を採用する必要がある。これらのことを踏まえ、(a)については、情報提供方法と合わせて移動ロボットの試作を行う。

(b)については、LRF による SLAM は Mobile Robot Programming Toolkit (MRPT) 等を利用し、自己位置推定と環境地図作成が可能となる。しかし、歩行者等の移動物体が SLAM に誤差を生じさせたり、不整地の凹凸が推定位置の誤識別が発生したりする問題点を、画像処理や IMU を利用することにより、自己位置推定や地図の精度を向上させる。

(c)については、特殊な PC 環境を必要とせず、インターネットと Web ブラウザ、ゲームパッドだけで移動ロボットの遠隔操作を実現する。Web ソケット通信の利用により可能となる。ただし移動ロボットに搭載する PC だけで全ての情報処理を行うのは、処理能力と移動ロボットの駆動時間(バッテリー)の観点から適切ではなく、負荷の高い処理を実行するシステム制御 PC を用いる。

(d)については、地域情報提供データベースとの連携、移動ロボットの外観デザインの検討により、ロボット周辺の人々を惹きつけるシステム構築を目指す。

いずれも、システムの性能評価、利用者の印象を評価を実施する。

4. 研究成果

<移動ロボットの試作>



図 1: 試作した移動ロボット



図 2: 柔らか素材による雪だるま型外装を持つ移動ロボット(2017 年度試作)

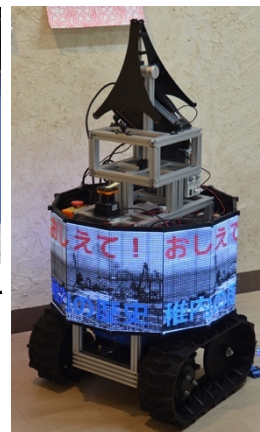


図 3: 胴体に情報表示用 LED パネルを備える移動ロボット(2018 年度試作)

試作した移動ロボットを図 1~3 に示す。タブレット PC を利用した情報提供用ディスプレイを兼ねた顔インタフェース、複数の広視野カメラから構成され遠隔操作用 360 度視野が得られるカメラシステム、SLAM 用 LRF、転倒防止や SLAM 地図の高精度化に用いる IMU 等を備える。また複数の移動機構、顔インタフェース表示情報提供用ディスプレイの配置を検討した結果、全高は高いが、バッテリー配置の低重心化により、その場回転が可能で雪上の走破性の高いクローラ式移動機構と、人とのインタラクションを行いやすい円筒形の外観を持つロボットを試作することができた。図 2 に示す雪だるま型外装は、断熱材を利用した柔軟素材で構成され、人に優しい外観と安全な柔軟性を特徴とする。図 3 ではより遠くの利用者にロボットの存在をアピールし、情報を提供できるように、胴体 360 度に提供情報を表示可能な LED ディスプレイを備える。この胴体もヒンジを利用した変形機構による柔軟性を備え、安全性を考慮した設計となっている。

<Web ブラウザによる遠隔操作>

図 4 に示すように、本ロボットは、ネットワークを介して、Web ブラウザに表示される遠隔地の映像、現在地、LRF の距離データ等を見ながら、ゲームパッドを用いて遠隔操作することが可能である。

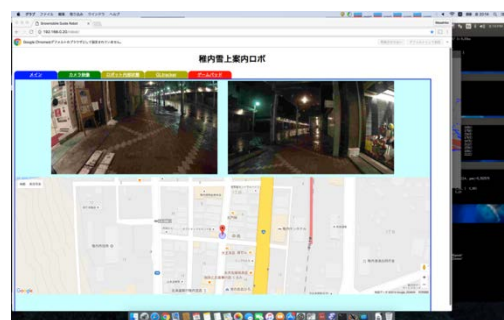


図 4: Web ブラウザによる遠隔操作インタフェース

<不整地を考慮した SLAM>

稚内中央商店街内にあり、実験の拠点としている稚内北星学園大学まちなかメディアラボ(まちラボ)を起点とし、積雪による地面の凹凸を IMU により補正しつつ SLAM により作成した地図を、図 5 に示す。同時に移動ロボットの自己位置推定も可能である。

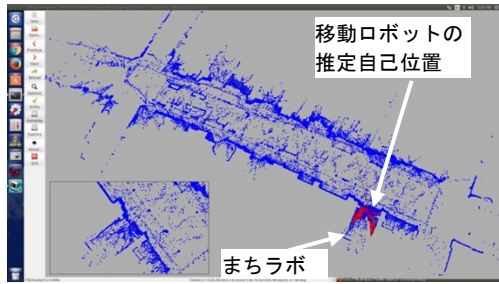


図 5: IMUによる姿勢補正とSLAMにより作成した稚内中央商店街の地図



図 6: 視覚情報に基づく人検出を利用したSLAM

〈移動物体を考慮したSLAM〉

ロボット周辺に歩行者や車等の移動物体が存在する場合、LRFが取得する距離データにそれらの移動物体が含まれ、地図作成やロボットの自己位置推定に悪影響を与える。

そこで図6に示すように、移動ロボットに搭載する複数の広視野カメラで得られる周辺画像から、人や車を検出する。LRFの距離データからそれらの移動物体に対応するデータを削除し、SLAMを行うことにより、人や車の影響を受けずに、地図生成とロボットの自己位置推定の精度が向上する。

〈水平360度自由視野を利用した移動ロボットの遠隔制御手法〉

駆動部を減らし、簡便な遠隔操作を実現するために、図7に示すように、複数の広角カメラを利用した水平360度自由視野を有する遠隔操作システムを提案した。図8に示すように、4つのカメラ映像をステッチングすることにより、オペレータは移動ロボットを動かすことなく、周辺360度を自由に観察することが可能である。また本研究で使用するいずれの移動ロボットの移動機構は非ホロミックだが、移動ロボットの回転中心とカメラシステム原点にオフセットを設けることにより、一人称視点での遠隔移動が可能となる。さらにLRFを利用することにより、障害物の自動回避も可能である。

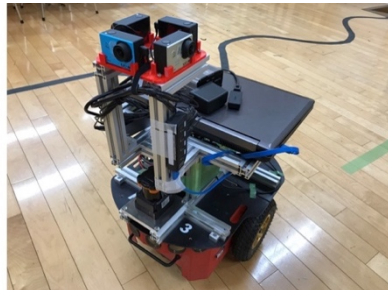


図 7: 広角カメラを利用した水平360度自由視野を有する遠隔移動ロボット



図 8: 画像ステッチングによる360度画像の生成

本遠隔制御手法の有効性を示すために、固定視野、自由視野のみ、自由視野+自動障害物回避の三つの遠隔制御手法を、図9に示す実験環境で13名の実験協力者に対して評価実験を行った。自由視野+自動障害物回避による遠隔操作手法が最も快適に操作できたと回答した人数が最も多いという結果が得られた。

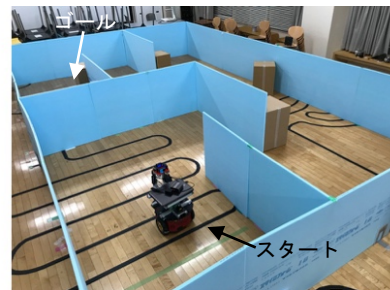


図 9: 評価実験のための実験環境

〈顔インタフェースを利用したロボットの動作予告〉

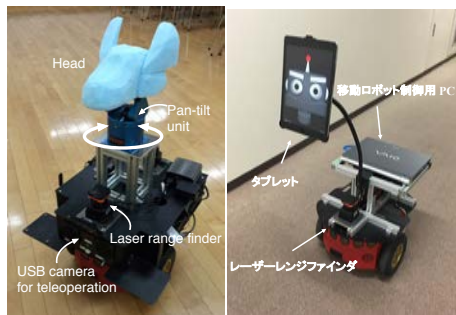


図 10: 2種類の顔インタフェース

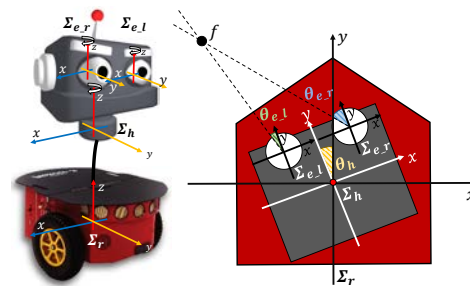


図 11: 頭部と眼球の角度制御

図 1 に示す移動ロボットの走行実験を行なった際、人がロボットを避けようとする様子が見受けられた。人にとって、ロボットの行動が分かりにくい印象を与えているものと思われる。そこで、移動ロボットが実際に行動する前に、その動作を分かりやすく予告するために、図 10 に示す 2 種類の顔インタフェースを試作した。遠隔操作の移動ロボットが、歩道で人すれ違う状況を想定し、ロボットがすれ違いや障害物回避時に回避動作を起こす前にロボットの頭部や眼球の方向を制御し、動作予告を行う手法を提案した。LRF により検出されるロボット周辺の障害物と歩行者の位置やパーソナルスペースに基づき、図 11 に示すように、頭部や眼球の方向を決定する。動作予告のタイミング等も、実験協力者による評価実験により決定した。また実験協力者 24 名を対象に、廊下のすれ違い実験(図 12)の印象評価により、動作予告を行う条件と行わない条件を比較し、ロボットの行動の“分かりやすさ”や“好ましさ”で提案手法が有意に優れているという結果が得られた。



図 12: 顔インタフェースによる動作予告評価実験

〈顔記憶と名前の呼びかけ機能によるロボットの印象評価〉



図 13: 人の顔と名前の記憶機能

人とロボットの円滑なインタラクションには、人が受けるロボットの印象の向上が重要である。そこで図 13 に示すように、初めて出会った人の顔と名前を記憶し、次出会った時には名前を呼びかける機能を実現する。しかし新しい顔画像が追加されると、顔識別のために多くの処理時間が必要となる再学習を行わなければならない。そこで本システムでは、人の睡眠覚醒機能を模した数理 AIM(Activation-Input-Modulation)モデルを利用し、周りに人が居ない時にシステムは睡眠状態に移行し、顔画像の(再)学習機能を実行する。

実現した人への名前の呼びかけ機能が、人のロボットに対する印象を向上させるかを評価するために、人と操作ロボットがカードゲームを行い(図 14)、印象評価を行なった。22 名の実験協力者に対し、名前の呼びかけを行なった場合と行わない場合の印象評価を行い、“好ましさ”で提案手法が優位に優れているという結果が得られた。



図 14: 名前呼びかけ機能評価実験

〈その他イベントへの参加〉

図 15, 16 に示すように、稚内市内における情報収集実験やイベントへ参加した。



図 15: 稚内中央商店街食料百貨店における古写真情報収集実験(2017年3月)



図 16: 第 58 回稚内みなと南極まつり(2018年8月)

5. 主な発表論文等
〔学会発表〕(計 14 件)

<査読付国際会議>

- (1) Liayi Lyu, Masahiko Mikawa, Makoto Fujisawa, Wasuke Hiiragi, "Mobile Robot with Previous Announcement of Upcoming Operation Using Face Interface," 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2019), We1D.2, January 14-16, 2019. (Sorbonne University, Paris, France) 査読あり
- (2) Haolin Chen, Masahiko Mikawa, Makoto Fujisawa, Wasuke Hiiragi, "Face Memorization System Using the Mathematical AIM Model for Mobile Robot," 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2019), Tu2C.6, January 14-16, 2019. (Sorbonne University, Paris, France)
- (3) Morito Sato, Masahiko Mikawa, Makoto Fujisawa, Wasuke Hiiragi, "Social Norm Based Collision Avoidance in Human-Robot Coexistence Environment," The 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'18), pp.3801-3806, October 21-23, 2018. (Omni Shoreham Hotel, Washington D.C., U.S.A.)
- (4) Masahiko Mikawa, Yuriko Yoshikawa, Makoto Fujisawa, "Expression of Intention by Rotational Head Movements for Teleoperated Mobile Robot," The 15th International Workshop on Advanced Motion Control (IEEE AMC 2018), March 9-11, 2018. (TOYOSU campus, Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Japan)
- (5) Yuta Odate, Masahiko Mikawa, Wasuke Hiiragi, Makoto Fujisawa, "Wide View Image Stitching Method with Little Distortion Using Multi Cameras and Application to Mobile Robot Teleoperation", SICE Annual Conference 2016, We2E.3 (6 Pages), September 20-23, 2016. (Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan)

<査読無国内会議>

- (6) 王 有為, 三河 正彦, 藤澤 誠, 柊 和佑, 石橋 豊之, "視覚情報を利用した SLAM 地図生成時の人の影響の軽減", HAI シンポジウム 2018, 6 pages, 2019 年 3 月 8-9 日. (神奈川県川崎市, 専修大学生田キャンパス)
- (7) 呂 佳芸, 三河 正彦, 藤澤 誠, 柊 和佑, "移動ロボットのための行動意図の予告伝達手法の提案", 第 5 回制御部門マルチシンポジウム, Su33-4, 2018 年 3 月 8-11 日. (東京都世田谷区, 東京都大学世田谷キャンパス)
- (8) 石橋豊之, 柊和佑, 三河正彦, 安藤友晴, "地域新聞からみる地域特有のメタデータ: -大韓航空機墜落を事例に-", デジタルアーカイブ学会第 2 回研究大会, A14, 2018 年 3 月 9 日. (東京都文京区, 東京大学本郷キャンパス)
- (9) 三河 正彦, 陳 浩林, 柊 和佑, 大館 雄太, 藤澤 誠, "睡眠機能により効率良く顔を学習する親しみやすい移動ロボット", 第 35 回日本ロボット学会学術講演会, 1G3-01, 2017 年 9 月 11-14 日. (埼玉県川越市, 東海大学川越キャンパス)
- (10) 大館 雄太, 三河 正彦, 柊 和佑, 藤澤 誠, "移動ロボットのための水平 360 度自由視野を利用した一人称視点に基づく遠隔操作手法", 第 9 回 RSJ 北海道ロボット技術研究専門委員会学術講演会, 2017 年 2 月. (北海道札幌市, 北海道大学工学部)
- (11) 三河 正彦, 柊 和佑, 大館 雄太, 藤澤 誠, "積雪寒冷地における地域情報提供移動ロボットのための数理 AIM モデルによる柔軟な知覚情報並列処理系", 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 3G2-05, 2016 年 9 月.
- (12) 大館 雄太, 三河 正彦, 柊 和佑, 藤澤 誠, "遠隔操作移動ロボットのための 4 つのカメラを利用した水平 360 度視界画像生成手法の提案", 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 2W2-05, 2016 年 9 月. (山形県山形市, 山形大学子白川キャンパス)
- (13) 三河 正彦, 柊 和佑, 曹 暢, 藤澤 誠, "積雪寒冷地における地域情報提供移動ロボットと数理 AIM モデルによる省電力化", 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, 2015 年 8 月.
- (14) 曹 暢, 三河 正彦, 藤澤 誠, 柊 和佑, "アバターを利用した空間共有型遠隔案内システム", 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, 2015 年 8 月.

[その他]

・新聞報道

"寒冷地でロボ実験", 稚内プレス, 2019 年 3 月 14 日.
(<http://wakkanaipress.com/2019/03/14/37240>)

・ホームページ

<http://www.slis.tsukuba.ac.jp/~mikawa/>
<http://srlab.slis.tsukuba.ac.jp/>

6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 藤澤 誠

ローマ字氏名: FUJISAWA, Makoto

研究協力者氏名: 柊 和佑

ローマ字氏名: HIIRAGI, Wasuke

※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。