

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04454

研究課題名（和文）感覚間の相互作用に基づく高度な災害対応ロボットの研究開発

研究課題名（英文）Research on Rescue Robot Based on Cross-Modal Integration

研究代表者

元井 直樹 (Motoi, Naoki)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：10611270

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、研究代表者が研究を行っている力覚伝送を有する遠隔制御であるバイラテラル制御と移動ロボットにおける運動制御技術を基盤とし、視覚・力覚情報を用いた高度な災害対策ロボットの実現を目指した。本研究遂行の結果として、視覚・力覚融合型の遠隔制御システムおよび群制御による被災者探索のための災害対策ロボットを提案した。また確立した運動制御技術についてシミュレーション・実験により有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を実施した結果、視覚・力覚情報によるアシスト機能を有する遠隔制御システムを構築し、感覚情報伝送を有する遠隔操作における設計論の新たな知見を得た。また、群制御システムを用いた高効率な探索アルゴリズムに関する提案も実施した。これらの得られた成果は、感覚情報を基盤としたシステム設計論の確立や産業ロボット・工作機械などの産業システムの機能向上につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to create an advanced rescue robot for disaster situation by using both visual and force information. As a result, two advanced robot systems were achieved; one is the remote control method with visual and force assists for a mobile robot, and the other is a rescue robot by using particle swarm optimization with virtual pheromone. The effectiveness of the proposed control methods were confirmed from simulation and experimental results.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：モーションコントロール 制御工学 電機器工学 ロボティクス 遠隔操作

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では未曾有の天災を経験し、プラント事故や土砂崩れ等の甚大な被害が生じている。このような災害時の人命救助においては、時間の経過とともに生存率が急減するため、早急な救助が求められる。特に、災害現場において人間の介入が困難な環境において、人間の代替として迅速な情報収集や災害対応を可能とする高度な災害対策ロボットの実現が希求されている。

このようなロボットの実現には、高度な環境認識技術が不可欠となる。特に災害現場という複雑な環境では、人間の「五感」に基づくだれもが簡易に利用可能な環境認識技術が重要となる。本研究では人間の「五感」のうち環境認識・操作に関係する視覚・力覚情報に着目する。さらに視覚・力覚という複数の感覚情報とその相互作用を考慮したシステムの実現を目指す。

本研究では五感に基づく科学技術のうち、環境認識・操作に大きく関与する視覚・力覚情報に注視する。人間が環境認識・操作を行う際、複数の感覚情報を同時に受信するが、すべての感覚情報が互いに独立ではなく、感覚情報の選択・統合・修飾といった相互作用により、効果的・効率的に環境認知を行っている。つまり、視覚・力覚という複数の感覚情報の相互作用を考慮したシステムの実現が必須となる。

これまでの研究成果から、申請者は力覚情報伝送を有する遠隔操作技術であるバイラテラル制御や移動ロボットの高度な運動制御技術に対する技術を有する。また、視覚情報を用いた多自由度ロボットの運動制御技術の研究も実施している。つまり、視覚・力覚情報を用いた運動制御技術に関する知見を有している。本研究はこれらの研究成果を基盤とし、視覚・力覚という遠隔操作に直結する感覚技術に着目した高度な災害対応ロボットの実現を目指す。

## 2. 研究の目的

本研究では三年間の研究期間内において、力覚・視覚情報に着目し、感覚間の相互作用を考慮することで直感的に操作可能な遠隔制御技術を確立する。また、群制御を一例として遠隔操作を足掛かりとしたシステムの自律化を目指す。以上より、本研究では人間の感覚情報を鍵とした遠隔操作を構築し、本遠隔制御を足掛かりとしたシステムの自律化、および高度な災害対策ロボットの具現化を目指す。

## 3. 研究の方法

上述の本課題の目的を実現するための下記に示す三つの具体的な研究目標を示し、研究方法の概要について述べる。

### (1) 視覚情報と力覚情報の感覚間相互作用に基づく直感的な遠隔制御技術の確立

申請者が有する視覚・力覚情報を伝達可能な遠隔制御技術を計測技術として用い、実動作における視覚・力覚情報を抽出する。また、抽出したデータをもとに、各感覚情報に関するモデリングを行い、感覚間の相互作用を明確化する。最終的に視覚・力覚情報の相互作用を考慮した直感的な遠隔制御技術を確立する。

### (2) 遠隔・自律融合に基づく群制御技術の確立

災害時における情報収集において群制御に求められる要求仕様を確定し、評価指標を明確にする。その後、研究目標Aで確立した直感的な遠隔制御を用いて群制御を行うことで、群制御における災害対策技術の確立を目指す。また、最終的に遠隔操作量を減じていくことでシステムの自律化を目指す。

### (3) 感覚フィードバックを具現化する操作システムの設計試作

複合感覚フィードバック機能を有する操作インターフェース、群制御用移動システムを試作開発し、理論の具現化・実証を行う。また、最終年度はこれまでの試作システムを災害対応システムへと改良することで、最終評価試験を実施する。なお、実証評価実験で得られた研究成果においては国内・国際会議における研究成果発表や学術論文誌へ投稿を適時行う。

## 4. 研究成果

### (1) 視覚情報と力覚情報の感覚間相互作用に基づく直感的な遠隔制御技術の確立

視覚情報と力覚情報を融合した遠隔制御技術に関する研究を実施した。図1に開発した視覚・自律融合型移動ロボットの遠隔制御システムの概要を示す。図1に示すように視覚情報として遠隔制御における視覚アシスト情報を、力覚情報として操作システムを通じて力覚フィードバックを与える。なお、それぞれの感覚情報を考慮し、視覚アシストと力覚アシストに関する割合を適時修正する設計となっている。

図2に本システムを用いた実験結果を示す。10名の被験者の協力のもと、複数の障害物を設置した走行コースを準備し、スタートからゴール位置までの時間を計測した。従来法として視覚・力覚アシストなし(Case 1)、視覚アシストのみ(Case 2)の手法も同時に実験を行った。実験結果より、視覚・力覚アシストを有する手法(Case 3, 4)がゴール到達までの時間が最も短く、操作性が高い。また、感覚相互作用を考慮した設計を行う(Case 4)ことで、操作性が最もよくなった。以上より、視覚・力覚情報を統合した遠隔制御システムにより操作性の向上を実証した。

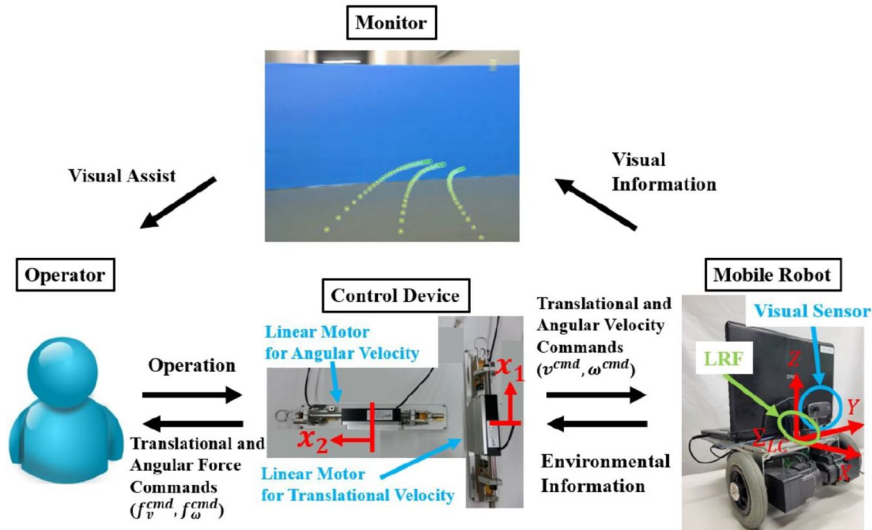


図1 視覚・力覚融合型遠隔制御システムの概要

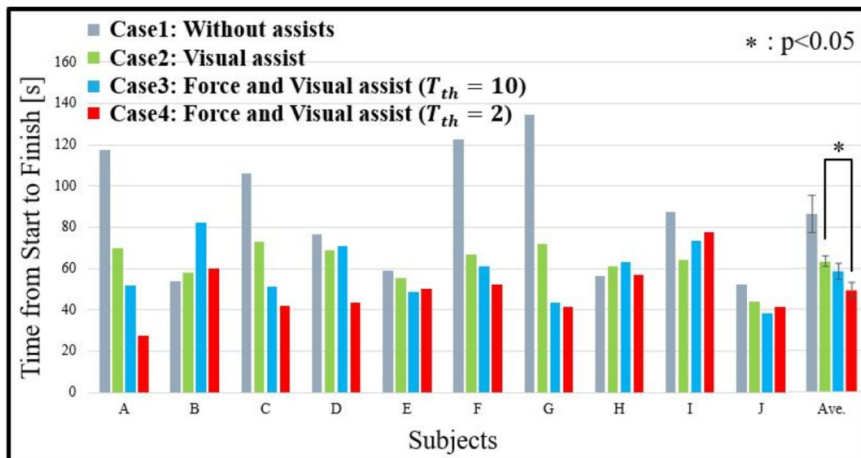


図2 実験結果

## (2) 遠隔・自律融合に基づく群制御技術の確立

災害時における情報収集や被災者の探索のために群制御を用いた災害対策技術に関する研究を実施した。被災者探索のための災害対策ロボットでは、より高効率に被災者を探索する必要があり、複数台のロボットによる探索が効率的であると考えられる。群制御による探索アルゴリズムは広域における探索と狭域における探索に大別される。広域探索とは環境を広範囲に渡って探索を行うことである。狭域探索では呼気や磁気などの被災者からの信号強度が増加する方向へ探索を進め、信号強度が最大になる位置を探索し、被災者の位置を特定する。

本探索アルゴリズムにおいて広域探索の高効率化が探索効率の向上に直結する。そこで、遠隔

操作における探索効率向上のために仮想フェロモンという概念を提案した。仮想フェロモンは付着、濃度および蒸発によって表現される。群制御における各ロボットの移動履歴に応じた仮想フェロモンが付着されることで

未探索領域の探索が効率的に可能となる。なお、本手法における仮想フェロモンや群制御における小集団の分裂・統合等において遠隔制御における人間の判断要素を加味し、設計を行っている。

図 3 に仮想フェロモンを用いた提案法と従来法のシミュレーション結果を示す。なお、青丸がロボットであり、赤線がロボットの移動軌跡とする。また被災者を 3 名とし、緑丸が被災者から発生される呼気等の信号である。図 3 では 3 名の被災者位置が特定されるまでのシミュレーションを実施した。図 3(a)(b)の比較より、従来法では同一個所を何度も探索しているのに対し、提案法では同一個所の探索があまり行われておらず、効率的な探索が実現できている。また、図 4 に探索環境における障害物割合を増加した場合の被災者発見までの探索時間を示す。なお、\*は T 検定における 5% 優位を示す。本結果からも提案手法を用いることで統計的にも効率的な探索が実現できていることが分かる。

## (3) 感覚フィードバックを具現化する操作システムの設計試作

複合感覚フィードバック機能を有する操作インターフェースとして、視覚・力覚情報フィードバックが実現可能なシステムを構築し、研究目標(1)-(2)において確立した運動制御技術に関する実証評価を実施した。また、群制御用移動システムとして複数台の小型移動ロボットを設計・試作し、GPS を模擬した室内環境にて実証評価実験を実施した。また、実証評価試験で得られた研究成果については国内・国際会議における研究成果発表や学術論文誌への投稿を適時実施した。最終的に、学術論文誌論文 7 編、国際会議発表論文 6 編、国内会議発表論文 9 編の研究成果を得た。

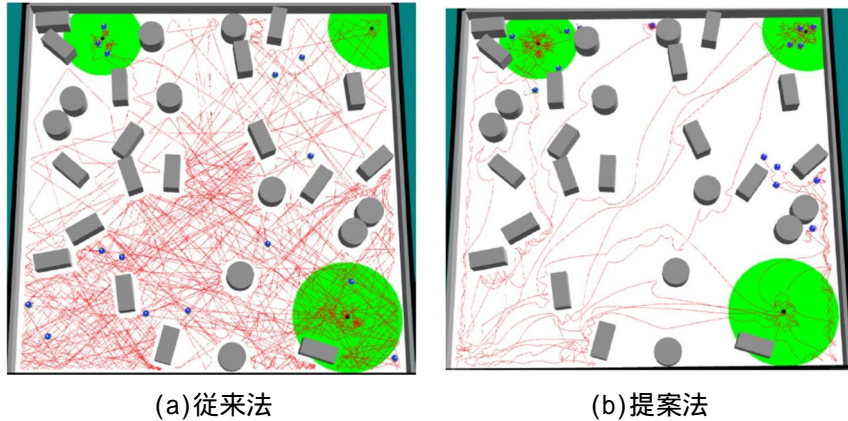


図 3 シミュレーション結果

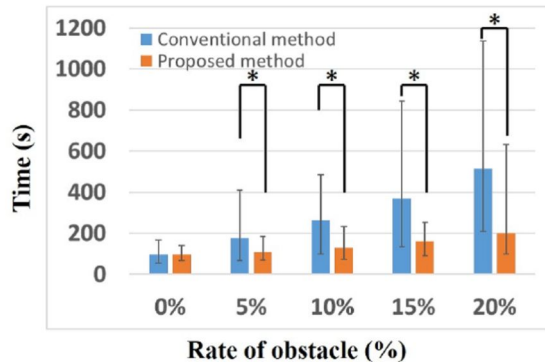


図 4 被災者探索発見までの探索時間

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Motoi Naoki, Kobayashi Masato, Masaki Ryo	4. 巻 8
2. 論文標題 Remote Control Method for Mobile Robot Based on Force Feedback Generated using Collision Prediction Map	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 727 ~ 735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.8.727	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Shoki, Motoi Naoki	4. 巻 140
2. 論文標題 Development of Exoskeleton Haptic Device using Powder Brake and Constant Torque Spring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 651 ~ 661
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.140.651	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaki Ryo, Motoi Naoki	4. 巻 1
2. 論文標題 Remote Control Method With Force Assist Based on Time to Collision for Mobile Robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society	6. 最初と最後の頁 157 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OJIES.2020.3013249	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Masato, Motoi Naoki	4. 巻 9
2. 論文標題 Hybrid Control of Trajectory Planning for Desired Trajectory and Collision Avoidance Based on Optimization Problem for a Wheeled Mobile Robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 331 ~ 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.9.331	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Kobayashi, N. Motoi	4. 巻 9
2. 論文標題 Hybrid Control of Trajectory Planning for Desired Trajectory and Collision Avoidance Based on Optimization Problem for Wheeled Mobile Robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Inahara Hiroto, Motoi Naoki	4. 巻 142
2. 論文標題 Research on Search Algorithm Using Particle Swarm Optimization with Virtual Pheromone for Swarm Robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 86 ~ 94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.86	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Masato, Motoi Naoki	4. 巻 10
2. 論文標題 Local Path Planning: Dynamic Window Approach With Virtual Manipulators Considering Dynamic Obstacles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 17018 ~ 17029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3150036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Hironobu Takatani, Masato Kobayashi, Naoki Motoi
2. 発表標題 Human Tracking Control by Using Model Predictive Control with Human Trajectory Model for Mobile Robot
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Masato Kobayashi, Naoki Motoi. Motoi
2 . 発表標題 Local Path Planning Method Based on Virtual Manipulators and Dynamic Window Approach for a Wheeled Mobile Robot
3 . 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Tsubaki, Y. Ueda, N. Motoi
2 . 発表標題 Research on Bilateral Control with Frequency Modification by using Fast Fourier Transformation
3 . 学会等名 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 H. Inahara, N. Moto
2 . 発表標題 Research on Search Algorithm by PSO with Virtual Pheromone and Dynamical Niche for Swarm Robots
3 . 学会等名 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 N. Motoi, D. Hirayama, F. Yoshimura, A. Sabra, W.K. Fung
2 . 発表標題 Sliding Mode Control with Disturbance Estimation for Underwater Robot
3 . 学会等名 IEEE International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kobayashi, A. Yamaguchi, N. Motoi
2. 発表標題 Motion-Reproduction Method Based on Iterative Learning Control for Variable Reproduction Speed
3. 学会等名 IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高谷 拓伸, 元井 直樹
2. 発表標題 モデル予測制御を用いた移動ロボットによる人追従制御に関する研究
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲原 大翔, 元井 直樹
2. 発表標題 移動ロボット群のための仮想フェロモンを伴う粒子群最適化を用いた探索アルゴリズムに関する研究
3. 学会等名 電気学会産業計測制御・メカトロニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 昇暉, 元井 直樹
2. 発表標題 受動力フィードバックを用いた外骨格型ハプティックデバイスの開発
3. 学会等名 ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 山口 瞭, 元井 直樹
2. 発表標題 VR空間における視覚・力覚を用いたトレーニング手法に関する研究
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高谷 拓伸, 元井 直樹
2. 発表標題 モデル予測制御と人モデルを用いた移動ロボットによる人追従制御に関する研究
3. 学会等名 電気学会産業計測制御研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 友亮, 元井 直樹
2. 発表標題 狭路走行環境下における切り返しを考慮した移動ロボットの経路計画に関する研究
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田 洋輔, 元井 直樹
2. 発表標題 障害物軌道を考慮した衝突時間に基づく移動ロボットの局所的経路計画に関する研究
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口 瞭, 小林 聖人, 元井 直樹
2. 発表標題 再現速度変更型モーションコピーシステムの反復学習制御による精度向上
3. 学会等名 電気学会産業計測制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 椿 崇裕, 元井 直樹
2. 発表標題 パイラテル制御における高速フーリエ変換を用いた周波数修正法の有効性検証
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

神戸大学 元井研究室 <a href="http://www.research.kobe-u.ac.jp/gmsc-motlab/">http://www.research.kobe-u.ac.jp/gmsc-motlab/</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------