

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 20 日現在

機関番号：92712

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282108

研究課題名(和文) 災害探査ロボット群の半自律化とインターネット遠隔制御

研究課題名(英文) Half Autonomous Control of Multi Robots against Disaster and Teleoperation via Internet

研究代表者

小林 滋 (KOBAYASHI, Shigeru)

特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構・その他部局等・教授

研究者番号：10205461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：3大学2高専1研究所の連携研究により、ROS(ロボットオペレーションシステム)を用いてロボット間の通信制御統合化システム、相対位置・姿勢計測システム、まったく仕様や性能の異なる群ロボット制御動作アルゴリズム、及びLANを用いた遠隔制御システム等の基礎技術を開発し、先頭ロボットのみオペレータが無線遠隔操縦すると、他のロボットが順番に前に行くロボットを一系列になって自動追尾するシステムを開発した。また複数台のロボットが協調動作できるように6自由度の小型マニピュレータを開発した。小型レスキューロボット群による人命探査の実用化への方向性を示した。

研究成果の概要(英文)：Collaboration research by 3 Universities and 2 Technical Colleges and 1 Research Institute developed the integrated communication and remote control system by Robot Operation System, the relative position and posture measurement system, and the operation algorithm for swarm robots that have different specifications. And these works make the rescue robot system possible to chase forwarding robot automatically in single line by orderly rows, just by lead robot remote-controlled by operator. Also we developed 6 degree of freedom small manipulators for robots in collaboration work. We could show the direction to make a search operation by small rescue robots fit for practical use.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：知能ロボティクス 災害探査 群ロボット 遠隔操作 協調動作 半自律制御 計測工学 システム統合

1. 研究開始当初の背景

阪神淡路大震災を契機として、本研究の参画各機関はそれぞれ独自に実用化を目指したレスキューロボット開発を継続実施してきた。これらロボットを用いた消防関係者との実証実験などを通じ、災害時に必要となる探査ロボットは、「遠隔操作を基本とした半(部分)自律制御系」が最も望ましいとの結論に至った。これは、災害における探査では、迅速・正確であるべきことに加え、人命が掛かった失敗の許されない認識・判断が要求され、現在のロボット環境認識技術等のレベルを考慮すると、人間の介在が不可欠であることまた一方では、ロボットの全行動判断に人間がすべて介在することの過剰性が探査効率の点で問題とされ、半自律制御との組み合わせが不可欠である、と考えられるからである。

2. 研究の目的

現在その実用化が早急に望まれている、災害探査活動支援用モバイルロボットは、1)簡単な操作で、2)広域を迅速・確実に探査でき、情報は3)安全な場所へ送る、ことが要求される。本研究では、モバイルロボットに対し、1)半自律制御機能を持つ遠隔操作系、2)群ロボット制御とそのための HI(Human Interface)、3)インターネット遠隔制御系により解決する。またその前提として、各研究機関が開発した小型レスキューロボットは、その大きさや基本システムも含め仕様が違うものであり、実用化を旨としてより効率的な探査を実施するために、これまでに開発したこれらの個々のロボット技術やシステムをそのまま生かしつつ、各ロボットが互いに協調動作をとって、群として活動するためにシステム統合化する技術を開発し、問題なく運用していけるかを実証的に検証していくことである。

3. 研究の方法

研究体制として、国際レスキューシステム研究機構(以後 IRS)、京都大学、神戸大学、近畿大学、弓削高専、神戸高専の6研究機関協力の形を取った。本研究開発を推進するに当たって、これまでの研究開発で培ってきて、各研究機関が強みとするところを最大限に発揮していけるように、研究開発構造上の主要機能ごとに、その達成に最も適切な研究者を実績に基づいて担当する体制とした。また多機関で同時並行的に進められる研究開発の成果を最終的に統合するためには、開発開始前に基本的な開発ルールを決めて、それに基づいて実行するために、参画メンバーがおおよそ2ヶ月に1度、IRS 神戸ラボラトリに集まって打合わせを持ち、システムを統合しつつ進めていくこととした。また半自律化するプラットフォームロボットとして、これまでの研究成果物である UMRS×3台(IRS×2、近大×1)、KAMUI×1台(京大松野研)、FRIGO×1台(神戸大横小路研)

を用いた。

4. 研究成果

(1) システム統合化

基本的な考え方は、各ロボットが現有しているロボットオペレーションシステムはできるだけ変更せずに、群行動や協調動作をとらせるために必要な、制御信号やセンサ信号を各ロボットから入出力する部分のみを取り出し、統合化するシステムを作るという方法をとった。具体的には、統合システムの操作卓から各ロボットに送る走行系の制御出力である位置や速度の指令値、反対にロボットからこの操作卓に送られてくる位置や速度のセンサ値を、その粒度を調整する部分はロボット側に持つ形で、統合システムの操作卓から見ると各ロボットをコンポーネント化、モジュール化することにした。このことにより、探索域にて個々のロボット操作卓で操縦者が遠隔操作する場合は、各ロボットはこれまで開発してきたシステムにて操縦され、群ロボットや協調動作が必要などきのみ、この統合化システムの操作卓に切り替えて使えるシステムを用いることとした。またそのために用いる RT ミドルウェアとしては、本研究プロジェクト開始から1年あまりは RTC-aist を用いて開発していたが、その後、世界標準として ROS (Robot Operating System) が浮上してきたので、ROS にてシステムを開発することに切り替え、現在にいたっている。このように複数台のレスキューロボットを必要に応じ、個別に操作、統合化して全体を操作、と切り分けて使う試みは世界初であり、今後の発展活用が期待できる。

(2) 半自律化のための要素技術開発

操作者が各ロボットに、瓦礫上をこの方向に走破せよとか、階段を登れ、ドアを開ける等といった具体的な行動内容の指示を出すと、人が介在せずロボットは自身もつセンサ情報を基にそのタスクを実行する制御系を構成して、ロボットが自律的に働き実行する。また不具合が発生した時や探索域では、人が直接に注意を払ってロボットの動きを遠隔操作する。という半自律化システムを構築するために必要となる要素技術として、

① 小型ロボット用単眼カメラによる相対位置計測システム

限られた搭載場所や処理能力に対応できるように、小型ロボットに搭載可能な計測システムとして小型の単眼カメラとマーカーを用いた3次元相対位置計測システム(図1)

② 走行系サスペンションシステム

瓦礫や階段等の障害物に接触すると、自律的に自身のコンプライアンスを変化させ、乗り越えていくシステム(図2)

を試作した。これらはまだ開発途中の状態であるが、多様な環境の中で活動するレスキューロボットの実用化のためには不可欠な要素技術であり、継続開発を必要とする。

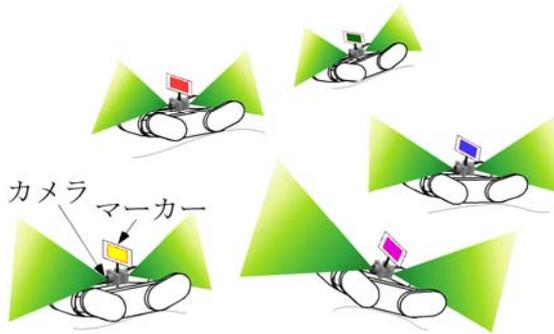


図 1. 単眼カメラによる相対位置計測概念図

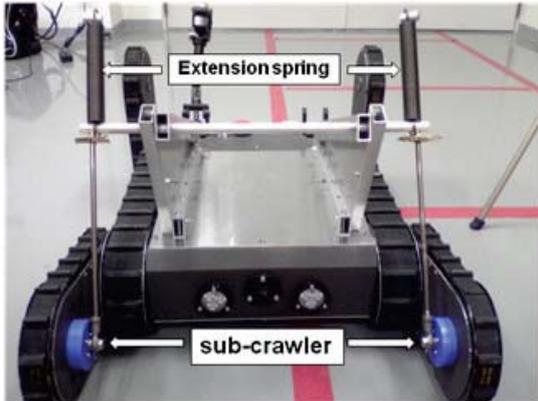


図 2. サブクローラ用コンプライアンス機構



図 3. ロボット 5 台による群制御行進の様子

(3) モバイル探索ロボット群制御の開発
 探索必要域が既にわかっており、その場所へのロボットの往復時や探索が必要ない場合など、先頭のロボットのみ操縦者が直接遠隔操縦すると、他のロボットは、順次前に行くロボットを自動追尾するシステムが構築できれば、探索作業の効率が上がり、操作者の負担が減ることが期待できる。前述の(1)項によるシステム統合化により、一つの操作卓で多数のロボットを、ある制御側のもとで同時に制御することが可能となった。ここでは、今回の参画ロボット群の状態に合わせて、固体ごとに性能が異なるロボット群を単一リーダーで誘導するアルゴリズムを群ロボットの制御則として組み込むことにより、5 台の小型ロボットを自動隊列行動させる実証実験も行った(図 3)。この試みは内外を問わず

レスキューロボットには初の試みであり、現状は前述の(2)項の要素技術の不完全さから、この群行動を実施できるの、まだ瓦礫の無い平坦地のみ、また相対位置を計測するシステムは逆光等ではまだ場合によっては不安定になること、その解像度からロボット間距離を 2m 以内としなければ誤動作する等の制約条件があるが、ロボット使用による探索活動の効率化の方向性は示せたと考えている。また周辺の要素技術の発展とともに、ロボット間メッシュネットが破れにくい隊列を組んでの探索行動等戦略的探査が可能となる。

(4) インターネットによる遠隔操作
 探索域は危険が予想される場所であり、ロボットを使用して探索するのも、探索するレスキュー隊員の 2 次災害を防ぐためであるが、安全を確保するために探索域から遠く離れた場所からインターネット経由で遠隔操縦する場合、常に変動する時間遅れが発生する。このために、時間遅れがあっても安定性が保証されている波変数に基づくバイラテラル制御システムを用いて、システムを構築すべく理論検討を行うとともに、マスタースレーブシステムを構築して実証試験を目指してきた。速度のみを制御するユニラテラル制御はできているが、スレーブ側の力検出が必ずしもうまくいかず、有効性を実験的に示までに至っていない。このバイラテラルシステムも不可欠なものであるので、ユニラテラル制御を改良しながら継続開発が必要である。

(5) 協調作業用マニピュレータの開発
 前述(3)の群ロボットの項で述べた戦略的探査は、レスキューロボットが搭載しているマニピュレータを用いた協調作業によって、瓦礫や危険物の撤去など戦略の幅を広げることができる。この目的で参画しているロボットに搭載することを目的に可動範囲が高さ方向及び前後方向に約 300mm の 6 自由度の小型マニピュレータを開発した。(図 4) 前(4)項のインターネットによる遠隔操作の実験用に現在使用しているが、今後はロボットに搭載して実証的に使う予定である。

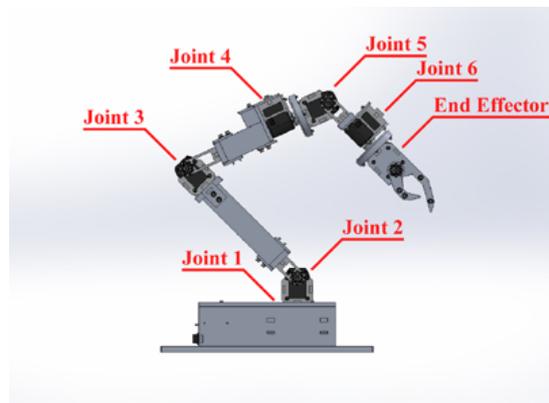


図 4. ロボット搭載用マニピュレータ

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 4 件)

(1)前田弘文, 伊藤嘉基, 黒住亮太, 小林滋, 災害探査活動支援用マニピュレータの研究開発 -第 2 報: ROS を用いたプログラムのモジュール化-, 弓削商船高等専門学校紀要, 査読有, 38 巻, 2016, pp35-38

(2)Bin Zhang, Yingmin Jia and Fumitoshi Matsuno, Finite-Time Observers for Tracking Control of Multi-Agent Systems, Proc. 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2013, pp. 2764-2768

(3)Hiroaki Fukushima, Kazuyuki Kon and Fumitoshi Matsuno, Model Predictive Formation Control Using Branch-and-Bound Compatible With Collision Avoidance Problems, IEEE Transactions on Robotics, 査読有, Vol. 29, No. 5, 2013, pp. 1308-1317, DOI:10.1109/TR0.2013.2262751

(4)坂井大斗, 福島宏明, 松野文俊, 近傍のロボットと障害物の識別を必要としない移動ロボット群の制御アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 8, 2013, pp. 787-794

[学会発表] (計 26 件)

(1)小林滋, 前田弘文, 黒住亮太, 高森年, ロボット認識トラッキングと相対位置計測システムの開発, 第 16 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 (SI2015), (2015. 12. 15)名古屋

(2)黒住亮太, 前田弘文, 小林滋, 大坪義二, 高森年, モバイルレスキューロボットの群制御のための ROS によるシステムの開発, 第 16 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 (SI2015), (2015. 12. 15)名古屋国際展示場

(3)松山森仁, 大坪義二, 高森年, 小林滋, 災害探査活動支援用モバイルロボット群によるフォーメーション行動の実施について, 第 16 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 (SI2015), (2015. 12. 15)名古屋国際展示場

(4)小野寺真吾, 横小路泰義, 時間遅れのある通信回線を介しての移動ロボットに搭載されたマニピュレータのバイラテラル制御, 第 16 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 (SI2015), (2015. 12. 15)名古屋国際展示場

(5)前田弘文, 黒住亮太, 小林滋, 高森年, ROS によるカメラ情報の共有化, 第 16 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 (SI2015), (2015. 12. 15)名古屋国際展示場

(6)Yusuke Kobayashi, Masahiro Yoshimoto, Kazuyuki Kon, Hiroaki Fukushima, Fumitoshi Matsuno, Tomoyuki Morii, Mitsuru Kitagawa, Shigeru Tsuji, Koichi

Yoshikawa, Formation Control Considering Well-organized Crossing of Robot Swarms, The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, (2015. 10. 30), Kyoto

(7)Bo Hyeon Kim, Hiroaki Fukushima, Fumitoshi Matsuno, Cooperative Transportation of a Disk Object by Multiple Robots without Communication, The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, (2015. 10. 28), Kyoto

(8)小林裕介, 吉本昌弘, 根和幸, 福島宏明, 松野文俊, 守井知之, 北河満, 辻滋, 吉川浩一, 複数の移動ロボット群のすれ違いを考慮した編隊制御, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, (2015. 9. 5)東京

(9)小野寺真吾, 横小路泰義, モジュール化された遠隔操縦システムを介しての移動ロボットに搭載されたマニピュレータのバイラテラル制御, 第 15 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 (SI2014), (2014. 12. 15)東京ビッグサイト

(10)吉本昌弘, 松野文俊, 個体ごとに性能が異なるロボット群の単一リーダーによる誘導, 第 15 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 (SI2014), (2014. 12. 15)東京ビッグサイト

(11)東村拓, 大坪義二, 小林滋, 高森年, ROS を用いた複数の探査ロボットの群制御, 第 15 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 (SI2014), (2014. 12. 15)東京ビッグサイト

(12)黒住亮太, 前田弘文, 小林滋, 大坪義二, 高森年, UMRS2010 を用いた群制御のための追尾システムの検証, 第 15 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 (SI2014), (2014. 12. 15)東京

(13)前田弘文, 伊藤嘉基, 小林滋, 高森年, 遠隔協調作業を目的とした共通マニピュレータの改良, 第 15 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 (SI2014), (2014. 12. 15)東京ビッグサイト

(14)小林滋, 黒住亮太, 前田弘文, 高森年, 辻井祐, 単眼カメラ画像による群ロボット相対位置計測, 第 15 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 (SI2014), (2014. 12. 15)東京ビッグサイト

(15)竹本怜央, 前田弘文, 小型制御基板を用いたマニピュレータ制御, 日本機械学会中国四国学生会第 44 回学生員卒業研究発表講演会, (2014. 3. 6), 鳥取大学

(16)尾中哲哉, 曾我慎, 黒住亮太, 前田弘文, 小林滋, 大坪義二, 高森年, レスキューロボット UMRS2010 のコンポーネント化, 第 14 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 (SI2013), (2013. 12. 18), 神戸国際会議場

(17)東村拓, 大坪義二, 小林滋, 高森年, 前田弘文, 移動探査ロボット UMRS2009 の RT

ミドルウェア化, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(18) 吉本昌弘, 根和幸, 松野文俊, 未知障害物のある環境における複数ロボットによる移動体の協調追い込み, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(19) 藤田和友, 小林滋, 高森年, 前田弘文, 災害探査活動支援用モバイルロボット群制御のためのモジュール化構想, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(20) 國原一眞, 辻井祐, 小林滋, 高森年, 発光マーカーを用いた単眼カメラによる位置情報取得に関する研究, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(21) 小泉勇太, 小林滋, 黒住亮太, 高森年, レスキューロボット UMRS2010 の不整地走行系に関する試作, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(22) 村田諒介, 水本尚志, 根和幸, 松野文俊, 過去画像履歴を用いた移動マニピュレータの遠隔操作システム, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(23) 濱屋政志, 横小路泰義, 波変数に基づく移動ロボットに搭載されたマニピュレータのバイラテラル制御, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(24) 前田弘文, 藤田和友, 伊藤嘉基, 小林滋, 高森年, 遠隔協調作業を目的とした共通マニピュレータの研究開発, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(25) 小林滋, レスキューロボットの半自律化への方向性, 第 14 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 (SI2013), (2013.12.18), 神戸国際会議場

(26) Yasuyoshi YOKOKOJI 他 3 名, What can we learn from robots used for nuclear accidents in the past? IEEE-RSJ IROS2013 Workshop on Robotics and Automation in Nuclear Facilities, 招待講演, (2013.11.3) Tokyo,

テム研究機構・神戸ラボラトリ・教授
研究者番号: 10205461

(2) 研究分担者

松野 文俊 (MATSUNO Fumitoshi)

特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構・神戸ラボラトリ・教授
研究者番号: 00190489

横小路 泰義 (YOKOKOJI Yasuyoshi)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号: 30202394

大坪 義一 (OHTSUBO Yoshi)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号: 90257973

前田 弘文 (MAEDA Hirofumi)

弓削商船高等専門学校・講師

研究者番号: 10541930

黒住 亮太 (KUROZUMI Ryota)

神戸市立工業高等専門学校・准教授

研究者番号: 90457333

根 和幸 (KON Kazuyuki) 特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構・神戸ラボラトリ・助教

研究者番号: 80614297

(H26年10月末まで)

高森 年 (TAKAMORI Toshi)

特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構・神戸ラボラトリ・教授

研究者番号: 10031098

(H27: 連携研究者)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 滋 (KOBAYASHI Shigeru)

特定非営利活動法人国際レスキューシ