

遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究

-親子型複数ローバーを用いた被災環境探索システムの構築-

Development of a Networked Robotic System for Disaster Mitigation
-Parent-child type multi-rover system for exploration in disaster environment-

吉田 和哉, 永谷 圭司, 遠藤 大輔, 水内 健祐 Mora Andres (東北大)
清川 清, 八木 康史, 近藤 一晃, (大阪大)
足立 忠司, 斉藤 浩明, 新美 義博, 矢代 裕之, 芹澤 一雅, (IHIエアロスペース)
田中 紘幸 (映蔵), 大野 浩之 (情報通信研究機構)

Kazuya YOSHIDA, Keiji NAGATANI, Daisuke ENDO, Kensuke MIZUUCHI, Andres MORA
Tohoku University, endo@astro.mech.tohoku.ac.jp
Kiyoshi KIYOKAWA, Yasushi YAGI, Kazuaki KONDO, Osaka University
Tadashi ADACHI, Hiroaki SAITOH, Yoshihiro NIIMI, Hiroyuki YASHIRO, Kazumasa SERIZAWA
IHI Aerospace
Hiroyuki TANAKA, Eizoh, Hiroyuki OHNO, NICT

In this paper, a new project of multimedia information search by teleoperated robotic network in a disaster site is introduced. In this project, multiple robots are coordinately operated through wireless communication network, including satellite-based IP communication link, for the search and investigation tasks. The robot system consists of a large-scale outdoor robot to serve as a carrier of small robots and a fleet of small robots to be distributed inside a building. Laser Range Finders are used for real time remote operation and construction of 3D map data. This paper presents details about scenario of our mission project and development of networked multi-rover system for this project. In addition, it introduces the experiment using this system we had and its result.

Key Words : Parent-Child Type Multi-Rover System, Teleoperation, 3D Mapping

1 はじめに

1995年1月に発生した阪神淡路大震災では、救助活動の際には有効なツールが少なく、復旧活動を円滑におこなうことが困難な事態に直面した。また2004年10月に発生した新潟県中越地震ではがけ崩れにより孤立する地帯が多発し、電話や防災無線などの地上設備に依存する従来の情報通信網はほとんど機能せず、震災発生翌朝を迎えてくるまで、災害の全容がよく把握できないという問題が発生した。こういった事態に対処すべく、大規模災害時に人に替わって救助活動をおこなうロボットシステムの研究開発が、近年盛んにおこなわれている[2]。このような背景において、本研究グループは産学官の連携プロジェクトの下で、情報通信の観点から、遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集システムを提案し、その研究開発を進めている[1]。このプロジェクトにおいて筆者らは、衛星通信を用いた遠隔操作ロボットによる被災地の情報収集を目指し、親子型ロボットシステムを提案した。特に倒壊建造物内部における環境情報収集のための小型探索ロボットのシステムについては、通信データ量が少ない中でカメラ画像の情報に大きく依存しないで遠隔操作をおこなうための情報収集提示技術の開発を進めている。

本稿では、まず本研究プロジェクトが目指す、想定するミッションシナリオの概要を説明し、筆者らが現在まで開発をおこなってきた遠隔ロボットシステムの構成と開発の進捗状況を示す。また、2006年3月10日に埼玉県川越市において実施した環境探索公開デモンストレーションの詳細とその結果について述べる。

2 想定するミッションシナリオ

本研究では、広域自然災害の被災地における初動情報収集活動を行うことを第一の目的とする。具体的には都市部での大規模震災を想定し、建物は主にコンクリート建造物であり、震災によってその何割かは倒壊、あるいは半壊の状況にあるものとする。また、

地上交通は舗装道路の地割れや車両の放置などによって混乱し、通常の消防車などによるアクセスが困難な状況であると考えられる。

このような震災発生直後の初動時において効果的な情報収集を可能とする探索ロボットシステムとして、ヘリ空輸等による現地展開が可能で、コンクリートブロック等の瓦礫上を走破して倒壊建物に接近することができ、かつ上層階へもアプローチすることによって倒壊建造物内の人命捜索が可能なシステムを開発目標に設定した。この全てのミッションを単一のロボットで実施することは困難であるため、大型の瓦礫走破ロボットとそれに搭載される小型探索ロボットという複数台の移動ロボットで構成されるシステムを構築し、それらを有機的に協調させることを考える。その際、公衆通信回線は、地上インフラの被災や通話殺到により使用不能である可能性が大きいため、その場に持ち込む仮設の無線通信局および打ち上げが予定されている日本の技術試験衛星VIII型(ETS-VIII)衛星実験通信を用いて、インターネットとの接続が可能な状況を想定する。

本研究では上述のシステムを利用し、以下に示す手順で災害時における初動情報の収集をおこなうことを目的としている。

1. ヘリ空輸により、大型ロボットとそれに搭載された複数台小型ロボットからなる探索システムを被災現場へ投入。
2. 大型ロボットが屋外不整地環境を走破し、倒壊建物へ接近。
3. 大型ロボットに搭載した梯子を利用し、小型ロボットを建物の上層階へ展開し、建造物内部を探索。
4. 得られた環境情報を、無線通信を用いて大型ロボットに集約し、さらに衛星通信を経て遠隔地に置かれるオペレーションセンターへ送信。
5. 獲得した情報をオペレーションセンターにて再構成提示。
6. 拡張現実感端末を用いてロボットを遠隔操作。

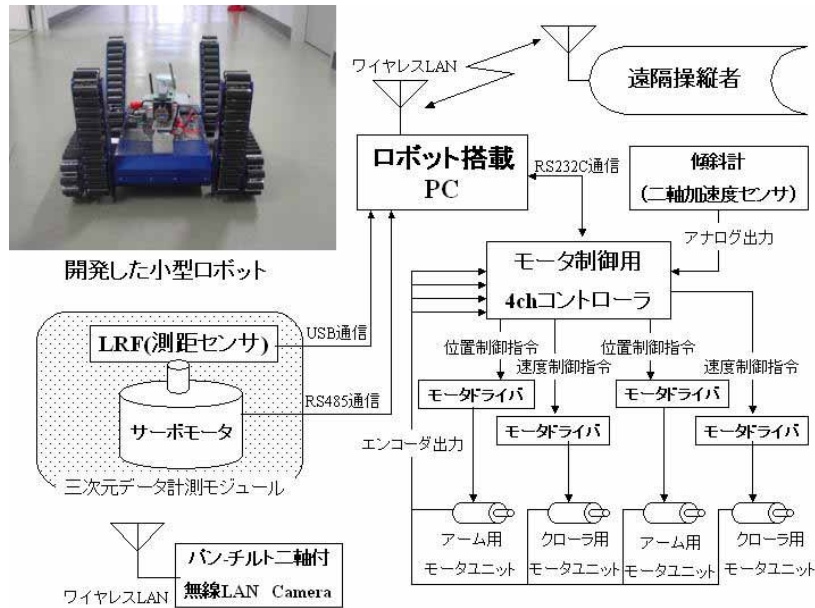


Fig. 1 小型探査ロボットシステムの構成と外観

3 システム構成と開発の進捗状況

本プロジェクトは東北大学、大阪大学、情報通信研究機構、株式会社映蔵、および株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペースとの共同研究開発によって推進している。以下に、現在まで開発を行ってきたロボットシステムの構成について紹介する。Fig.1 にその概要を示す。

3.1 小型探査ロボットのシステム構成

本ミッションを遂行するに当たって、小型ロボットには人が生活するような空間である建造物内部で、安定して走行できることが必要となる。そこで、本ロボットの筐体として、中越地震の災害復旧活動で実際に使用されRobocup Rescue大会等において優勝するなどの実績を持つ、テクノクラフト社製のレスキュークローラ、CV04を採用した。この機体は側面から見た時に、3つのクローラが連結した形をしており、前後の2つのクローラはそれぞれ独立に、中央のクローラとの連結軸を中心としてアクティブに回転させることができる。以後、この前後のクローラをクローラアームと呼ぶことにする。また、左右のクローラアームはそれぞれの回転軸がカップリングにより連結されている。すなわち、左右のクローラと前後のクローラアームという4つの駆動部を持つ移動ロボットである。Fig.1に、開発した小型ロボットシステムの構成と外観を示す。

3.2 三次元距離センシングユニット

本小型ロボットシステムが持つ特徴的なセンサとして、レーザーレンジファインダ（以後、LRFと略記）が挙げられる。これは周囲にレーザーを照射して、物体から反射して返ってきたレーザーの信号を読み取ることで、その向きに存在する物体との距離を計測することができるセンサである。このLRFとして北陽電機製のURG-04LXを用いることとした。LRFの計測面をサーボモータ（ROBOTIS社製DX-117）を用いて0.5[deg]きざみに回転させることで周囲環境を半径約4[m]の範囲でスキャンをおこなう。これによって約1分間でおおよそ270,000点の距離データを取得し、この距離データを基にして三次元の周囲環境のマップを構築することができる[3]。Fig.2にロボットへ搭載した三次元距離センサユニットの外観を示す。

3.3 小型探査ロボットの遠隔操縦支援システム

一般に、遠隔操作でロボットを動かす場合、ロボット本体上、あるいはロボット自身がよく見える場所へ設置したカメラの実画像を用いて操作をおこなうが、災害現場では、予めその環境へカ



Fig. 2 三次元距離データセンシングユニット

メラを設置することは通常困難である。また、ロボットの本体上に設置した通常のカメラの映像を用いた場合、映像に距離感がなく、視野角も狭いため操作性があまりよくないため、操縦者には熟練の技術が求められることになる。この問題を改善するため、「カメラを複数台配置しステレオビジョンを用いて映像に距離感を持たせる」、「ロボットの視野角を広げる」という方法もあるが、本プロジェクトでは、通信データ量が極めて制限された衛星実験通信を用いたインターネット経由での遠隔オペレートを行うことを目標としているため、データ量が膨大になるカメラの実画像を基に操縦することは現実的ではない。

そこで、本研究プロジェクトでは、小型探査ロボットの遠隔操縦支援システムとして、三次元距離センサユニットを用いて構築した仮想的な3D環境の中で、ロボットの姿勢角や自己位置といったオドメトリデータを反映させたロボットのモデルを動かして表示させる技術の開発を進めている。本手法は、仮想空間の中でオペレータが見たい位置へ自由に視点を移動させてロボットの操縦をおこなうことができるという利点があり、カメラ画像の距離感のなさや死角といった問題をカバーできるため、遠隔でロボットを操作する上で非常に有効である。この仮想空間の中でロボットを動かしている三次元画像を次のFig.3に示す。現段階では、オペレータはロボット本体上に搭載したパン・チルト機能を有する1台の無線ネットワークカメラの映像と、構築した3Dの仮想空間の2つの情報を基に操縦をおこなっている。そのヒューマンインターフェースの概要をFig.4に示す。将来的には、情報量が膨大になるカメラによる動画映像を用いることなく、仮想的な3D画像の情報のみで遠隔操縦できるようになることが目標である。

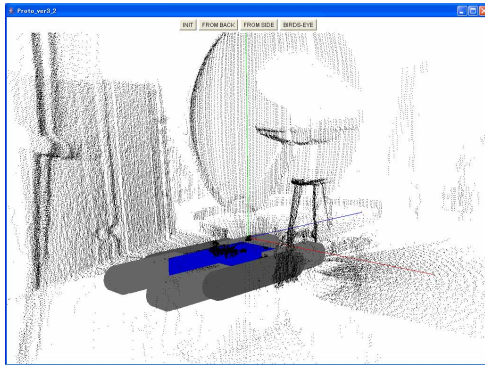


Fig. 3 仮想空間の中で動くロボット

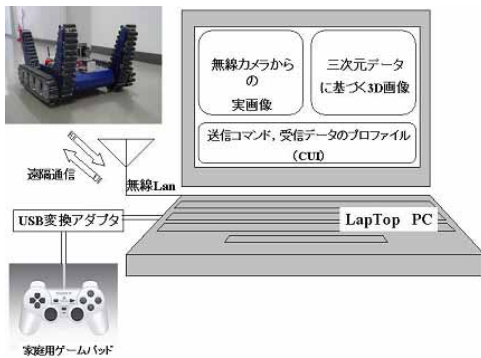


Fig. 4 ヒューマンインターフェース

3.4 大型不整地移動ロボット

小型探索ロボットを搭載する不整地移動ロボットをアイ・エイチ・アイ・エアロスペース社で製作した。この大型不整地移動ロボット（以下、親機）の外観をFig.5に示す。



Fig. 5 大型不整地移動ロボットの外観

親機は、被災地として想定される不整地環境を自在に踏破でき、かつ梯子を正確に目標点へ到達させるために位置の微調整ができるだけの運動性能が求められるため、足回りは6WD6WSかつロッカーボギー機構を採用した移動ロボットとなっている。また、小型探索ロボット（以下、子機）を高層階へ投入するための進展式梯子および、次に示す吊り下げ型の三次元距離センサユニットを搭載していることが本ロボットの特徴である。

3.5 吊り下げ型三次元距離センサユニット

親機もまた、周囲環境計測取得のためにLRF（SICK社製LMS291）を搭載している。子機同様に回転ステージ（中央精機社製ARS-936-HP）を用いて周囲環境を半径約30[m]の範囲のスキャンを行い、3D環境を構築することができる。これを大阪大学が製作したHBPミラーを用いた非方向性全方位カメラと組み合わせることで、LRFで構築した3D形状モデルにカメラで取得した画像の各画素の色情報を対応するモデル表面上に割り当てていくテクス



Fig. 6 親機搭載用吊り下げ型三次元距離センサユニット

チャマッピングを行い、周囲環境を詳細にかつ臨場感豊かに提示することが可能となる[4]。

また、センサを単純にロボット本体上に固定した場合、周囲環境のスキャンをおこなう際にロボット本体の姿勢が傾いていると、獲得したデータもまた同じだけ傾いた情報となってしまうため、提示する際にロボットの姿勢の傾きだけ補正の必要がある。また、将来的に連続した大域マップを構築するためのマッチングアルゴリズムを導入する際にも傾きを考慮する必要性が生じるために望ましくない。そこで、ロボット本体が傾いてもセンサユニットそのものは水平を保つ受動的な機構を持たせた。このセンサユニットの外観をFig.6に示す。具体的には、回転ダンパ付の2軸フリージョイントでセンサユニットを吊り下げるという方法で、受動的な機構を実現した。

4 公開デモンストレーション

本節では、本研究プロジェクトの実質的な中間報告会である2006年3月10日に埼玉県川越市で実施した公開デモンストレーションの詳細について紹介し、その結果について述べる。

4.1 公開デモンストレーションのシナリオ

2006年3月10日に、株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペース川越事業所内にて、以下のプロセスによって公開デモンストレーションをおこなった。本デモンストレーションには3台のロボットを用いており、うち2台は東北大学で開発した小型探索ロボット（子機）であり、1台はアイ・エイチ・アイ・エアロスペース社で開発した大型不整地移動ロボット（親機）である。2台の子機を親機に搭載した状態をFig.7に示す。

1. 子機二台を親機の上に搭載した状態で不整地を走行させる。親機の操縦は無線で行うが、操縦者は親機を直接目視しておこなう。
2. 親機はLRFを用いて不整地形の計測を数回行う。LRFならびに全方位カメラのデータは無線にて、離れた場所にあるデータ収集装置に送信する。
3. コンクリート製の3階建て建造物に接近し、高さ約4.2[m]の地点にある2階アクセスドアに進展式梯子をかける。
4. 2台の子機が梯子を伝って建物の2階へ進入する。子機の操縦者は無線LANを用いて送られてくるカメラ画像とセンサデータを基に、子機本体を直接見ることができない状態で遠隔操作をおこなう。
5. 2台の子機のうち、1台は階段を昇って3階へ、もう1台は階段を降りて1階にそれぞれ移動して周囲環境の探索をおこなう。要救助者を検索する。

また、本実験において遠隔操縦用の無線ネットワークの構築については、予め必要な場所にアクセスポイントを設置することで対処している。



Fig. 7 親機に搭載された2台の子機

4.2 公開デモンストレーションの結果

4.2.1 親機の動作について

デモンストレーション当日は降雨にみまわれ、親機は、急遽屋外での不整地走行デモを取り止めて開始することとした。まず、子機2台を搭載した状態で走行を開始し、LRFと全方位カメラを用いて周囲環境の計測を行った。LRFによって獲得した3D画像にHBPミラーを用いて、テクスチャマッピングを行った後再現した3次元環境を次のFig.8に示す[4]。計測を行った後、地上から高さ4.2[m]の地点にある棟2階のアクセスドアへ進展させた梯子をかけることに成功した。デモンストレーションを行っている最中に雨が止んだため、子機を屋内へ投入後、屋外不整地へ移動してマウンドおよび段差乗り越えを行わせた。



Fig. 8 テクスチャマッピングによって再現された3次元画像

4.2.2 子機の動作について

2台の子機ともに親機の梯子上を走行し、棟2階へと進入することに成功した。進入後、1台は階段を昇り3階へ移動、もう1台は階段を降り1階へと移動し、内部環境の探索をおこなった。要所ごとにLRFを用いて周囲環境の3次元データを計測しながら、構築した仮想的な3D画像の情報と本体上に搭載したカメラの実画像を基にオペレータは遠隔操縦をおこなった。階段の踊場で計測を行い構築した3D画像を次のFig.9に示す。1階へ向かった子機は屋内探索を行った結果、被災者が見当たらなかったためにそのまま1階の廊下を走行して投入を行った現場まで帰還した。一方、3階へ向かった子機は探索の途中で散乱した段ボールの影に隠れて倒れている被災者役の学生を発見することができた。

子機に関しては無線通信が途中で幾度が途絶するというトラブルが発生した。これは事前の予備実験の段階で明らかになっていた問題であったため、ロボットの制御PCの再起動を遠隔で行うことなどによりリカバーすることはできた。今後はアドホックネットワークを構築することなどによって、よりロバストな通信システムを構築する必要があると考えられる。また、現在のとこ

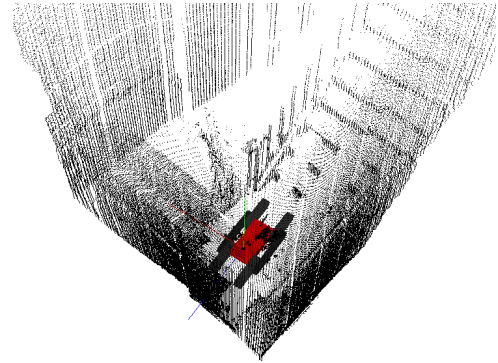


Fig. 9 デモ中に獲得した仮想3次元画像

ろ操縦は完全にオペレータのマニュアル操作で行わせているために、操縦ミスによるロボットの転倒等が懸念されている。これを解決するために、ある程度の自律性をロボットに持たせて危険な動作を回避するような制御を導入することが検討課題となる。

4.2.3 遠隔地への情報提示について

本公開デモンストレーションでは、将来的に、災害現場で収集した情報を遠隔地へ設置するオペレーションセンターへ転送し、ロボットの遠隔操作を行うことを想定し、アイ・エイチ・アイ・エアロスペース川越事業所（埼玉県川越市）から情報通信研究機構本部（東京都小金井）への情報提示実験をおこなった。結果、公共のインターネット回線を通じて、走行中の親機の全周囲カメラ画像と、三次元距離センサユニットによって獲得した3次元画像情報を、遠隔地で提示できることを確認した。

5 まとめ

本研究プロジェクトでは、遠隔ロボットを用いた災害時における屋外および屋内被災環境の初動情報収集システムの技術開発を目的としており、特に東北大学では屋内環境で運用する2台の小型探索移動ロボットシステムの制御系とオペレータの整備をおこなってきた。現在までのところロボットの基本的な走行・動作の実現、LRFからの距離データとロボット自身のオドメトリデータを基に構築した3D仮想空間の提示、およびカメラからの実画像と仮想空間の映像を基に遠隔操縦を行うことが可能となっており、プロジェクトの中間報告会として公開デモンストレーションを行った。

今後の課題として、まず仮想空間内におけるロボットの位置と姿勢が正しく反映されるよう、クローラロボットの横滑りを考慮したキネマティックモデルに基づいたオドメトリを行い、さらに自己位置推定を3次元に拡張する。また、オドメトリだけでは不整地に対応しきれないためにSLAM的な手法を導入することで自己位置推定の誤差を修正すること、および連続した大域マップの構築を目指し、不整地移動ロボットの遠隔操作支援システムの更なる改良をおこなっていく。

6 謝辞

本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度SCOPE-Rプロジェクトとして実施中のものである。

文献

- [1] 吉田 和哉他：“遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究”，第10回ロボティクスシンポジウム，pp.435-440,2005
- [2] 田所 諭他：“大都市大震災軽減化特別プロジェクト-レスキューロボット等次世代防災基板技術の開発-”，日本ロボット学会誌 vol.22, No.5, pp.1-44,2004.
- [3] 川田浩彦、森利宏、油田信一，“移動ロボットの環境認識用小型軽量2D光レンジセンサの構成”，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '04, 2P2-L2-23, 2004.
- [4] 近藤 一見、八木 康史、谷内田 正彦，“知能作業ロボットのための非等方性全方位視覚”，電子情報通信学会論文誌，Vol.J88-D-II, No.8, 2005.