

逐次3次元環境取得システムを用いた不整地移動ロボットの遠隔操作支援

Tele-operation of all-terrain robot using continuous acquisition of three-dimensional environment

学 徳永 直木, 学 岡田 佳都, 正 永谷 圭司, 正 吉田 和哉 (東北大)

Naoki TOKUNAGA, Tohoku University, tokunaga@astro.mech.tohoku.ac.jp

Yoshito OKADA, Tohoku University, yoshito@astro.mech.tohoku.ac.jp

Keiji NAGATANI, Tohoku University, keiji@astro.mech.tohoku.ac.jp

Kazuya YOSHIDA, Tohoku University, yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

For search and rescue mission, it is important for mobile rescue robots to navigate in unknown environments and to map them. In such situation, three dimensional information is very useful to support robotic teleoperations used in locating victims and aid rescue crews in strategizing. However, to obtain this 3-D information, the operators must wait a few seconds and halt the robot's operation using conventional scanning systems. To solve this problem, our research group proposed a continuous acquisition of three-dimensional environment information for tracked vehicles using the three-dimensional gyro-based odometry. In this research, on the basis of the above system, we developed a tele-operation method for mobile robots that allows time delay and narrow bandwidth wireless communication. In this paper, we introduce the developed tele-operation system and report experimental results to confirm a validity of the system.

Key Words : Rescue robotics, Tele-operation, 3-D range sensor

1 はじめに

近年, 阪神淡路大震災や地下鉄サリン事件を例とした大規模災害現場で, 人に代わって救助・探査活動を行うレスキューロボットシステムの開発が期待されている[1]. これらの大規模災害における救助活動では, 二次災害の恐れがあるため, 安全が確保された遠隔地からのロボットの遠隔操作により, 災害現場を探索することが望ましい. しかしながら, 大規模な災害現場において, 十分に高速かつ広帯域の通信が確保できるとは限らない. また, 探査員が不足すると考えられる災害現場において, 衛星回線を用いた超遠隔操縦によりレスキューロボットを操作することができれば, 災害現場における探査活動の助力となることが期待できる. そこで, 本研究では, 衛星回線に代表される, 狭帯域かつ時間遅れを伴う通信回線でも遠隔操作が可能な, レスキューロボットの遠隔操作システムの構築を目指すこととした.

狭帯域の通信回線では, 遠隔地にいる操縦者に対し, 情報量の多いカメラ画像をリアルタイムに送信することは, 非常に困難である. また, 時間遅れを伴う通信回線では, 速度指令を基本としたレスキューロボットの遠隔操縦は, 不可能に近い. そこで, 本研究では, 動きながら三次元距離情報の獲得が可能な, 逐次三次元環境取得システム[2]によって得られる三次元情報を提示する手法を採用することとした. また, 通信の時間遅れにも対処するため, ロボットの操縦指令については, 三次元情報を元に, 間欠的にロボットにサブゴール位置を与えるという, 位置ベースの移動指令で動作を行うこととした. これにより, 時間遅れが存在する通信回線においても, 安定した走行が可能となることが期待できる. 一方, 障害物や階段などが存在する環境を走破するためには, フリッパと呼ばれるサブクローラアームの制御が有用である. しかしながら, これを遠隔から操作する際には, 操作者に高いスキルが要求される. そこで, 本研究では, 本研究グループが開発した不整地走行アシスト機能をレスキューロボットに搭載し, この問題を解決することとした[3].

本研究では, 以上の機能を搭載したレスキューロボットならびに遠隔操作システムを構築し, 実環境下において, 遠隔操作手法の比較実験ならびに, 遠隔操作による長距離走行実験を行った. なお, これらの実験は, 既存の高速通信網が機能しない災害現場を想定し, 技術試験衛星 ETS-VIII を利用した衛星通信を利用した. 本稿では, 構築したレスキューロボットと遠隔操作システムの解説ならびに, 実施した遠隔操作実験について紹介し, 提案手法の有効性について考察する.

2 タスクの提案と問題解析

大規模災害における救助活動において, レスキューロボットの遠隔操作による探査活動が期待されるが, 大規模な災害現場において, 十分に高速かつ広帯域の通信が確保できるとは限らない. また, 探査員が不足すると考えられる災害現場では, 衛星回線を用いた超遠隔操縦による探査活動も期待される. そこで, 本研究の目標タスクを「狭帯域かつ時間遅れを伴う通信回線でも遠隔操作が可能な, レスキューロボットの遠隔操作システムの実現」と設定した.

一般に, 操作対象が操作者から直接見えない移動ロボットの遠隔操作は, 搭載したカメラ情報を用いて行われる. しかしながら, カメラ情報を用いた遠隔操作手法では, 以下に示す問題が指摘されてきた.

1. 環境情報の問題

カメラから得られる画像は二次元情報であるため, 操作者は, ロボットの移動に伴って変化する二次元の画像情報から, 三次元環境を予想する必要がある.

2. 視点の問題

通常, カメラから得られる画像にはロボットが映らないため, 画像による障害物とロボットの相対距離認識には, 高い熟練を要する. この問題に対し, 城間らは, 過去画像を利用した手法を提案した[4]. しかしながら, この手法には, 視点が選べない, 不整地への適用が困難といった問題が存在する.

3. 不整地走破の問題

障害物や階段などの不整地走行においては、操作を誤るとロボットの転倒という問題が生ずるため、操作者には大きな負担がかかる。また、多くのレスキューロボットは、不整地走破性能を向上させるため、可動式のサブローラアーム（通称フリッパ）を有するが、これらの機能を、遠隔から操作するには、非常に高い熟練を要する。

また、衛星通信に代表される、遅延が存在する狭帯域の無線通信下では、以下に示す3つの問題が考えられる。

4. 通信距離の問題

一般に利用される無線LAN通信を用いて遠隔操作を行う場合、現状の電波法の下での出力では、一般に50[m]程度が限界である。そこで、この範囲内に無線ノードを多数配置し、パケットリレー方式で情報を転送するメッシュネットワークという技術の研究が、近年進められている。筆者らが共同研究を行っている情報通信研究所の羽田らは、これを用いた移動ロボットの長距離遠隔操作に成功した[5]。本研究では、移動ロボットの通信距離を稼ぐため、このメッシュネットワークを利用することとする。

5. 通信量の問題

一般に、搭載カメラから得られる画像情報は、ストリーミングで逐次送られるが、低い画質で送信したとしても、そのデータ量は膨大となる。そのため、狭帯域通信下では、画像のコマ落ちによる操作性の低下、さらには、通信帯域の圧迫による操作コマンドの packets lost といった危険も存在する。

6. 時間遅れの問題

衛星通信やメッシュネットワーク通信においては、通信の時間遅れが必ず発生する。衛星通信については、およそ600[msec]、メッシュネットワークについては、ホップする段数が増える毎に、通信の時間遅れが増大する。この遅れは、ロボットから送られる環境情報の通信とロボットに対する操作情報の通信の双方に発生するため、速度指令でロボットを制御する場合、その時間遅れを予測した高度な操作技術が要求される。

狭帯域かつ時間遅れを伴う通信回線を用いて、レスキューロボットを遠隔操作するためには、上記の問題に対処が可能なシステムを構築する必要がある。

3 遅延が存在する狭帯域通信下での遠隔操作システム

前章で指摘した各問題を解決するため、本研究では、逐次三次元環境取得システム、三次元環境提示システム、ポインティング遠隔操作システム、不整地走行アシスト機能を実ロボット上に実装することとした。以下に、各システムの概要を紹介する。なお、通信距離の問題に対処するメッシュネットワークについては、詳細を参考文献[5]に譲り、ここでは省略する。

3.1 逐次三次元環境取得システム

従来のカメラ情報を用いた遠隔操作手法では、前章で指摘した問題1、問題2が存在する。そこで、本研究では、三次元距離センサによって獲得する三次元距離情報をベースとした環境情報提示を行うことで、これらの問題解決を目指

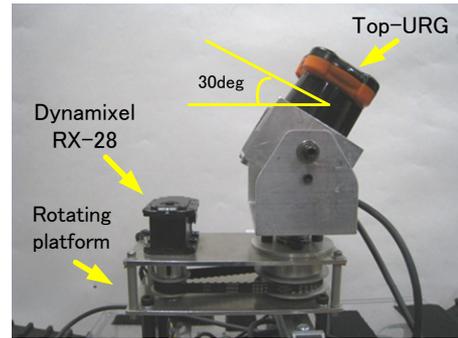


Fig. 1 3-D range scanner

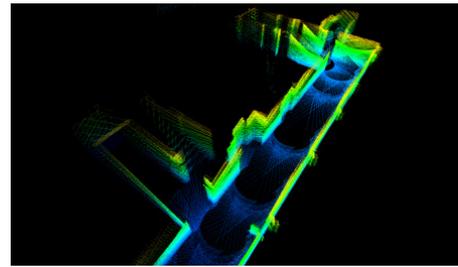


Fig. 2 Scanned example by continuous acquisition system

すこととした。この手法により、オペレータは、ロボットと障害物との距離を容易に把握することができ、操作の負担を大きく低減することが期待できる。ただし、従来手法では、三次元情報を獲得するため、操作者はロボットを停止させ、スキャン動作が完了するまで待つ必要がある。この時間のロス、一刻を争う探査活動において致命的ともいえる。そこで、筆者らは、ロボットを停止させずに逐次環境情報を獲得することが可能な、逐次三次元環境取得システムを開発した[2]。このシステムは、ロボットの三次元オドメトリ情報と、三次元距離センサから得られる距離情報の時間同期を厳密に行うことで、ロボットを停止させずに、三次元環境情報を取得するシステムを実現している。

本研究グループで構築した三次元距離センサを図1に示す。この三次元距離センサは、二次元測域センサ（UTM-30LX：北陽電機社製）とアクチュエータ（Dynamixel RX-28：Robotis社製）、ならびに回転台から構成され、回転台の回転面と、二次元測域センサのスキャン面のなす角が一定角度（図の構成では30度）を有することで、三次元距離情報を獲得することが可能となる。このセンサを移動ロボットに搭載し、廊下を停止せずに走行した際の環境情報取得の結果を図2に示す。この図より、逐次三次元環境取得システムが期待通りに機能していることが定性的に見取れる。

3.2 三次元環境提示システム

前節に示すように、ロボットの遠隔操作において、三次元距離情報の提示は有効であると期待できるが、狭帯域の無線通信下では、図2に示すような点の集合（以下、ポイントクラウドと呼ぶ）で表現された三次元環境を逐次送信することは、通信に大きな負荷をかける恐れがある。そこで、本研究では、ロボットが獲得したロボット周囲の三次元環境情報をDigital Elevation Map（以下、DEMと略す）に圧縮変換した後に、操作者に送信することとした。このDEMとは、主に自然地形の表現に利用される手法で、基準面からの高さ情報を各グリッドに格納することで、環境の凹凸を表現するものである。この手法により、三次元

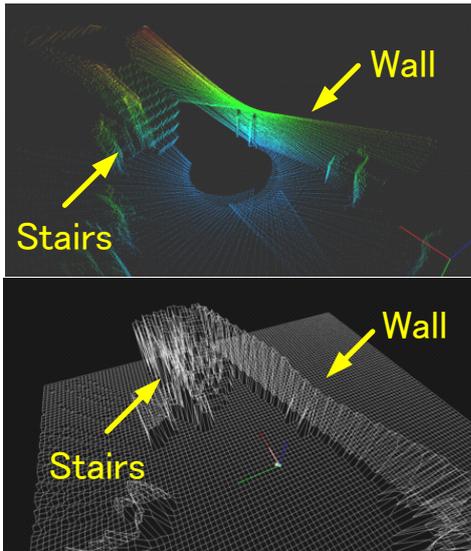


Fig. 3 Environment expression by point cloud and DEM

空間内の多数の点情報が、二次元平面内の高さ情報に変換されるため、高い圧縮率を実現することが可能となる。なお、天井の下といった空間の表現を行うことは不可能であるため、本研究では、高さに閾値を設けることで、この問題を解決することとした。

図3に、ロボットがある環境で獲得した三次元環境情報のポイントクラウドによる表現例（上）ならびに、DEMによる表現例（下）を示す。この図より、多少情報は劣化するが、操作者がロボットの遠隔操作を行う上で、十分な情報を提供できることが見て取れる。また、この環境表現において、ポイントクラウドで表現した際のポイント数は約95,000点であり、データサイズは、およそ4[MByte]であった。これに対し、DEM表現では、 100×100 のグリッド（グリッドサイズは一辺100[mm]）のとき、データサイズは、およそ25[KByte]となった。このことから、DEM表現による大きな圧縮ができ、狭帯域の無線通信でも通信に大きな負荷をかけないことがわかる。

3.3 ポインティング遠隔操作システム

三次元環境提示システムにより、操作者は、ロボットの周囲の環境を獲得することができる。しかしながら、前章の問題6に示した通り、通信に時間遅れが存在する環境において、速度指令でロボットを遠隔操作することは、非常に困難である。

そこで、この時間遅れの問題に対処するため、本研究では、走行速度を指示するのではなく、サブゴール位置を指示する手法でロボットの走行を行うこととした。これにより、操作者に送られてきた三次元環境情報が最新のものでなくても、操作者がDEM上でサブゴール位置を指示し、このサブゴールに向かってロボットが経路追従走行を行うことで、通信の時間遅れに強い遠隔操作システムとなることが期待できる。

3.4 不整地走行アシスト機能

前章の問題3で示した通り、遠隔操作によるフリッパーの操作には、非常に高い熟練を要する。さらに、位置ベースの操作では、ロボットがサブゴールに向かって自律的に走行する間に、操作者がフリッパーを遠隔操作することは不可能に近い。そこで、この問題3の解決策として、本研究が

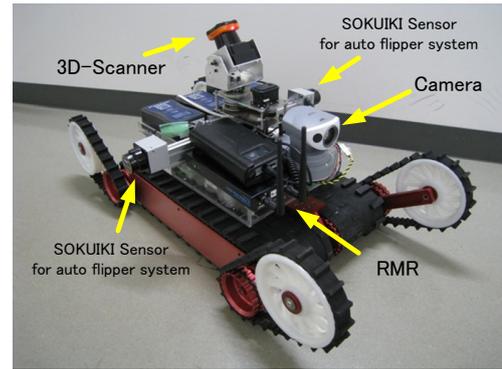


Fig. 4 Rescue robot platform "Kenaf"

ループで開発した不整地走行アシスト機能を利用することとした[3]。このアシスト機能は、走行路面の凹凸形状に合わせて、ロボットのフリッパーを自律制御するものである。走行路面の形状検知については、ロボットの左右に取り付ける二次元測域センサを利用する。このシステムにより、ロボットに搭載したフリッパーが、路面の凹凸に自律的にならうため、操作者は、障害物乗り越えの操作を行う必要なく、段差や障害物、階段を乗り越えることが可能となる。

4 実機実験

前章に示した機能をレスキューロボットテストベッドに搭載し、実環境における実機実験を行った。以下に、実験の概要ならびに実験結果について紹介する。

4.1 不整地移動ロボットテストベッド

遠隔操作支援システムを搭載するレスキューロボットプラットフォームとして、千葉工大、東北大学 田所研、筑波大学、岡山大学、情報通信研究機構（NICT）、産業総合技術研究所（AIST）らと共同で開発を進めているKenafを利用することとした（図4参照）。このロボットは、本体底面部分に駆動用クローラ、機体前後に2本ずつ独立駆動可能なフリッパーを装備している。また、このロボットは、エンコーダ、三軸加速度センサ、三軸ジャイロセンサを有し、三次元自己位置推定を行う三次元オドメトリ機能を搭載している。また、本体の中央部には、3次元距離センサを搭載し、逐次三次元環境取得システムを実現する。一方、ロボットの左右には、不整地走行アシスト機能を実現するための測域センサ（URG-04LX：北陽電機社製）を有する。また、通信デバイスとして、メッシュネットワーク用のノードであるRokko Mesh Router（RMR：シンクチューブ社製）を搭載し、メッシュネットワークによる無線通信を実現する。

4.2 対象とする環境とネットワーク環境

本実験では、東北大学 青葉山キャンパス内吉田・永谷研究室に設置した操作卓から、およそ8[km]離れた仙台市天文台内のレスキューロボットの遠隔操作を行うことを具体的な目標に設定した。仙台市天文台は、三階建ての建物であるが、その中の一階から二階を利用する。

なお、東北大学と仙台市天文台間の通信には、技術試験衛星 ETS-VIII を利用した。この通信衛星は、直径1.2[m]のパラボラアンテナを利用し、最高で768[Kbps]の相互通信を可能とするものである。実測では、768[Kbps]の通信における実効帯域は704[Kbps]、時間遅れは、平均561[msec]であり、384[Kbps]の通信における実効帯域は352[Kbps]、

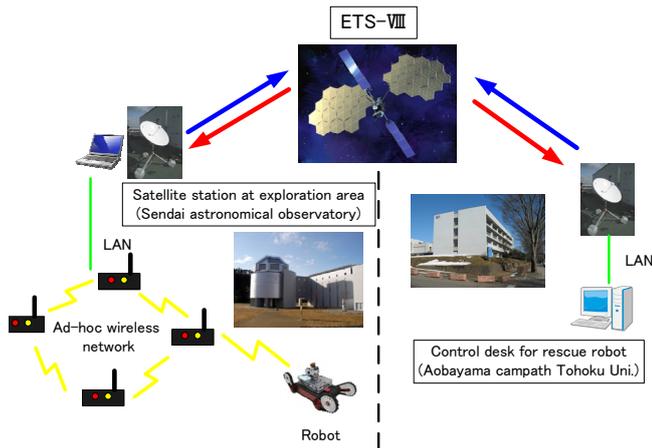


Fig. 5 Network configuration

時間遅れは、平均554[msec]であった。

また、仙台市天文台内には、建物の1階ならびに2階にメッシュネットワークノード6台を配置することで、メッシュネットワークを構築した。このネットワークと衛星通信回線を接続することで、東北大学に設置した操作卓より、天文台内で走行するレスキューロボットにアクセス可能となる。図5に、ネットワークの構成概略を掲載する。

4.3 実験1：スラローム走行の遠隔操作

開発した遠隔操作支援システムの有用性を確かめるため、まず、遠隔操作によるスラローム走行の実験を行った。経路は、天文台のホールに5[m]おきに設置した二箇所のパイロンを中心に8の字に走行し、スタート地点まで戻ってくるもので、3人の操作者で実験を行った。なお、遠隔操作手法としては、(1)カメラ画像のみを用いた速度指令による操作、(2)カメラ画像と三次元環境提示システムを用いた速度指令による操作、(3)カメラ画像と三次元環境提示システムを用いたポインティング遠隔操作システムによる操作の3種類について行った。なお、通信速度については、768[Kbps]と384[Kbps]の2種類に対して行った。

この実験において、ゴールまでたどり着いたのは、通信速度にかかわらず、(3)の場合のみであった。このことから、時間遅れの存在する通信環境において、速度指令による遠隔操作は非常に困難であり、本稿で提案したポインティング遠隔操作システムの有用性が確認できた。

また、衛星回線の通信速度を384[Kbps]に設定した際、カメラ画像のコマ落ち間隔時間が長くなり、画像情報を利用することは、大変困難となった。しかしながら、5秒ごとに送信する約25[Kbyte]程度のDEM情報については、更新間隔に変化はなかった。以上より、情報量の少ないDEM情報を用いた遠隔操作が、有効に活用できることが示された。

4.4 実験2：階段を含む長距離走行

次に、衛星回線とメッシュネットワーク通信を含む遠隔操作の実証を行うため、階段走行を含む、屋内の長距離走行を行った。この環境には、走行が容易な平坦な路面の他に、2階に上がるための階段や、通り抜けが困難な狭い通路などがある。走行経路は、天文台の一階から階段を伝って2階に上がり、設定したゴール地点までのトータルで片道150[m]の経路について、遠隔操作を行った。なお、この実験も、768[Kbps]ならびに、384[Kbps]の2種類の通信帯域での走行実験を行った。

上記の実験において、両通信速度においても、遠隔操作

支援システムを利用することで、ゴールまで到達し、さらに、スタート地点まで戻ることができた。なお、天文台一階から二階へ上がる階段では、不整地走行アシスト機能が有効に働いたため、操縦者は特別な操作を行うことなく、階段の昇降を行うことができた。

5 おわりに

本稿では、レスキューロボットの遠隔操作を行うため、筆者らが研究開発を行った遠隔操作支援システムについて紹介した。特に、遅延を有する狭帯域の通信を利用した遠隔操作において、不整地移動ロボットに実装した「DEMを用いた三次元環境提示システム」、「ポインティング遠隔操作システム」ならびに、「不整地走行アシスト機能」を利用することで、遠隔操作の操作性が格段に向上することが確認できた。上記の機能は、衛星回線を利用して行った遠隔操作実験により、その有用性が確認された。

今後は、逐次三次元環境取得システムで得られた三次元情報をもとに、経路探索を行い、操作者の負担をより軽減できるシステムの拡張が考えられる。

謝辞

本研究は、NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトで研究開発したレスキューロボットを利用して行われた。また、技術試験衛星 ETS-VIIIを用いた実験は、ETS-VIII利用実験実施協議会のバックアップならびに、宇宙研究開発機構の協力の下で行われた。また、メッシュネットワークの整備では、情報通信研究機構の羽田さんに協力を頂いた。さらに、仙台市天文台には、実験環境を無償で提供して頂いた。以上の皆様に感謝の意を表す。

文献

- [1] Special issue of advanced robotics: Advanced research and development of robotics for search and rescue. *Journal of Advanced Robotics*, 19(3):219–347, 2005.
- [2] Keiji Nagatani, Naoki Tokunaga, Yoshito Okada, and Kazuya Yoshida. Continuous acquisition of three-dimensional environment information for tracked vehicles on uneven terrain. In *Proceedings of the 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pages 25–30, 2008.
- [3] Keiji Nagatani, Ayato Yamasaki, Kazuya Yoshida, Tomoaki Yoshida, and Eiji Koyanagi. Semi-autonomous traversal on uneven terrain for a tracked vehicle using autonomous control of active flippers. In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2667–2672, 2008.
- [4] Maki SUGIMOTO, Georges KAGOTANI, Hideaki NII, Naoji SHIROMA, Masahiko INAMI, and Fumitoshi MATSUNO. Time follower's vision: A teleoperation interface with past images. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(1):54–63, 2005.
- [5] 羽田 靖史, 海藻 敬之, 松山 健太郎, 行田 弘一, 大坪 義一, and 滝澤 修. アドホックネットワークを用いた移動ロボット群の長距離遠隔操縦. In 第14回 ロボティクスシンポジウム予稿集, pages 465–470, 2009.