

活火山活動の監視を目的とした 不整地移動マニピュレータの遠隔操作実験

桐林 星河 (東北大学) 永谷 圭司 (東北大学) 吉田 和哉 (東北大学)
小柳 栄次 (千葉工業大学) 羽田 靖史 (情報通信研究機構) 滝澤 修 (情報通信研究機構)

Teleoperation test of mobile manipulator via satellite communication for surveillance of volcano areas

Seiga KIRIBAYASHI (Tohoku Univ.), Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.),
Kazuyuki YOSHIDA (Tohoku Univ.), Eiji KOYANAGI (Chiba Institute of Technology),
Yasushi HADA (NICT), Osamu TAKIZAWA (NICT)

Abstract: In Japan, there are a lot of active volcano areas, and an observation of volcano activity is very important in case of the volcanic eruption. In such case, tele-operated mobile robots for observation are great help to obtain volcanic activity information. In this research, we aim to confirm a validity of tele-operation of a mobile manipulator for volcano observation via satellite communication. In our experiments, an operator succeeded in controlling the mobile manipulator to grasp a target rock at a river close to the Mt. Asama from Tokyo.

1 はじめに

日本は世界でも有数の火山大国であり、数多くの活火山を有する。そこで、国土交通省や東大地震研(ERI)は、このような活火山の周辺において、これまで監視カメラや地震計を設置し、定点観測を行うことで、噴火の予兆や規模等を推測し、防災・減災に努めている。しかし、一度噴火が始まると、火口の周囲は立ち入り禁止となり、追加の監視カメラや地震計を設置することは難しくなる。例えば浅間山では、噴火警戒レベルが3になると火口の周囲4kmは立ち入りが禁止となる。

このため、近年、小型の遠隔操縦ロボットによる火山監視技術が求められている。また、このロボットにマニピュレーション機能が搭載されると、岩石サンプル採取などその用途が広がることも期待できる。また、筆者らは、2009年8月、桜島山において、無線LANを利用した、不整地移動ロボットの長距離遠隔操作実験を行い[1]、市販の無線機器を用いたロボットの長距離移動が可能であることを確認した。しかし、火山周辺では、無線基地局までの通信を確保すること自体が非常に困難となることが予想される。

そこで本研究では、無線基地局と操縦者の間に衛星回線を挟んだ際の不整地移動ロボットの遠隔操作の実証実験を行うこととした。本実験を行うにあたり、JAXA, NICTの協力により、通信回線として超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)を利用し、東京ビッグサイト-浅間山間に回線を設置した。一般的な衛星回線は通信帯域が狭く、画像を使った操縦は困難である[2]が、WINDSを用いることで、十分な通信帯域を確保でき、画像を使った遠隔操作を利用することができるものと期待される。

本稿では、超高速衛星回線を利用した、マニピュレータ搭載型不整地移動ロボット(Quince)の遠隔操作実験について報告する。

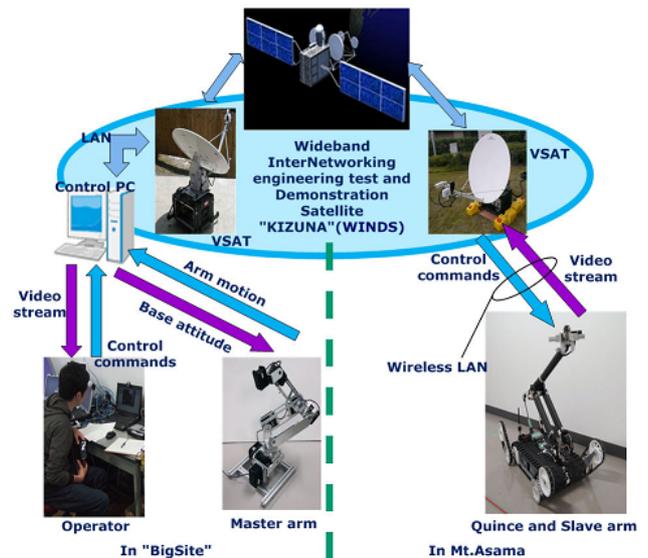


Fig. 1: Diagram of network

2 衛星回線を用いたネットワークシステム

本実験では、超高速インターネット回線として、JAXAの打ち上げた「きずな」(WINDS)を利用することとした。WINDSを用いたネットワーク構成の概要をFig.1に示す。本実験で使用した移動地上局VSATは、直径1[m]のパラボラアンテナを有し、最大で51[Mbps]の通信速度が得られる構成である。VSATとその他の機器はEthernetにより接続され、一般的なインターネット・LANとほぼ同等に使用可能となる。

操縦者側は、東京ビッグサイトに設置した一台の操縦用PCを、同会場屋外駐車場に設置したVSATに接続し、これを操縦卓とした。ロボット側は、長野県浅間山の片蓋



Fig. 2: Trial point of Mt. Asama



Fig. 3: Operation display

川河川敷(Fig.2)にVSATを設置し、市販の無線LANルータを接続した。ロボットは、この無線LANルータ経由でVSATと接続する。なお、互いの状況把握のため、市販のテレビ会議システムを同一の回線上に接続し、フルハイビジョンの相互通話システムも構築した。WINDSは静止軌

道にあるため、電波の往復だけで240[msec]の時間を要する。よって、ハンドシェイク方式の通信であるTCP/IP方式では、通信相手からの返答を待ってデータをやり取りするため、実質の通信速度が数百[Kbps]程度と低くなってしまふ。そこで本実験では、ロボットの操作や、画像取得に、ハンドシェイクの必要がないUDP方式を用いることとした。この構成において、スループットが最大31[Mbps]となったが、この値は、測定に使用したPCやVSATとの間に入っているスイッチングハブの制約によるものが大きく、衛星回線の限界ではないと考えられる。Fig.3にロボットの操作画面の例を示す。左の画面がマニピュレータの手先に取り付けられたカメラ画像であり、右上にはロボット全体を俯瞰視するカメラ画像が表示されている。これらの画像は、前述のとおりUDP通信を用いてオペレータに送られ、必要とする帯域は、最大5[Mbps]程度となる構成である。また、画面中央は、マニピュレータ操作ソフトウェアの画面であり、ロボットの状態表示及び、操作コマンドの送信を行っている。操作コマンドの送信に必要な帯域は、最大で250[kbps]程度である。

テレビ会議システムは、通信帯域を4[Mbps]に設定し、



Fig. 4: Quince and manipulator

ロボットの操縦システムと合計して10[Mbps]に満たない構成とした。本実験で用意したVSATは、最低31[Mbps]の帯域が確保されていることから、通信帯域が不足する問題は発生しないといえる。

上述のシステムを構築した後、通信遅延を測定したところ、実際には約650[msec]の遅延が確認された。

3 不整地移動マニピュレータの遠隔操作システム

3.1 使用ロボット

本実験で使用したロボットは「NEDO戦略的先端ロボット開発プロジェクト」により開発を進めている不整地移動ロボットQuinceに、6自由度のマニピュレータを搭載したものを使用した(Fig.4)。

Quinceは、メインのクローラ他に、能動的に動作する4本のサブクローラ(以下フリッパ)を有し、これを駆逐することで、不整地の移動性能を向上させたロボットである。そのため、移動に関しても6自由度有することとなり、合計で12自由度の超多自由度の不整地移動マニピュレータとなっている。これにより、操縦が非常に困難であるため、以下に挙げる遠隔操作支援技術を用いた。

3.2 遠隔操作支援技術:オートフリッパ

フリッパは、地面形状にしたがってロボットが安定するように逐次動作することが望ましい。そのためには、リアルタイムに路面状況を判断し、4本のフリッパを個別に動かす必要がある。しかし、今回のような通信遅延がある環境では、そのような動作を遠隔操作で行うことは難しい。そこで、これまでに岡田らが研究・開発してきたオートフリッパ[3]を支援技術として導入することとした。これは、ロボット左右に取り付けた2次元測域センサによりフリッパの接地点付近の地形情報を取得し、ロボットの姿勢が安定するようにフリッパを自律的に動作させる技術である。この技術を導入することで、フリッパの操作を行わずとも常に姿勢が安定するため、操縦者は移動にのみ専念できるようになる。



Fig. 5: Trial flows

3.3 遠隔操作支援技術:姿勢同期マスタスレーブ

多自由度マニピュレータを最も直感的に操作できるシステムとして、マスタスレーブシステムがよく知られている。本実験では、このマスタスレーブシステムを採用すると同時に、これまでに筆者らが開発してきた姿勢同期機能[4]を採用することとした。

マニピュレータを搭載するロボットが不整地を移動すると、ロボット座標系は、慣性座標系から大きく異なってしまう。そのため、マスタとスレーブの間で動作が乖離し、操作性が損なわれる問題が発生する。この問題を解決するのが姿勢同期機能であり、ロボットの姿勢をマスタコントローラの土台に反映し、マスタコントローラを動かすことで姿勢の乖離問題を解消する。

このシステムは、ロボットからの姿勢情報を受け取り姿勢同期を行うため、通信遅延が発生すると、移動に伴う姿勢変動の分だけ動作に乖離が生じることとなる。しかし、マニピュレータを操作する際には、通常、ロボットを停止させるため、姿勢同期に通信遅延があっても大きな問題とはならない。

4 衛星回線を用いた不整地移動マニピュレータの遠隔操縦実験

4.1 実験概要

実験は浅間山火山砂防用の片蓋川内の不整地にて行った。なお、片蓋川は非常時に火砕流や土石流を流すための河川であるため、通常、水は流れていない。本実験で目標とした評価項目は、

1. 衛星回線を用いた不整地移動マニピュレータの遠隔操作が可能であるか
2. 開発中の遠隔操作支援技術の有用性の確認

の二点である。予備実験として行った岩石サンプル採取実験により、1.が実現できることを確認できたため、ここでは、衛星通信を用いた場合の遠隔操作支援技術の有用性を確認する比較実験を行った。

なお、マニピュレータを含めたロボットのすべての操作は、筆頭執筆者が担当した。

4.2 実験手順

本実験では、遠隔操作支援技術の有用性の確認をするため、不整地上に置かれたこぶし大の石を採取し、持ち帰る動作を想定して遠隔操縦を行った。遠隔操縦の各動作を行う際に、遠隔操縦支援技術の有効時と無効時での操作にかかった時間の比較を行うこととした。具体的な動作を以下に示し、一連の動作の様子をFig.5に示す。

1. 不整地移動マニピュレータを前進させ、斜面に乗り上げる(Fig.5(a),(b))
2. マニピュレータを操作し、ターゲットとなる石まで手先を移動させる(Fig.5(c))
3. ターゲットとなる石を把持する(Fig.5(d))
4. マニピュレータを格納する(Fig.5(e))
5. 不整地移動マニピュレータを後進させ、元の位置まで戻る(Fig.5(f))

4.3 結果と考察

操作時間をまとめたグラフをFig.6に示す。このグラフの縦軸が試行にかかった時間となっており、3回の試行の平均値と誤差を示している。このグラフから、すべての動作において、遠隔操作支援技術を有効とした場合の方が、試

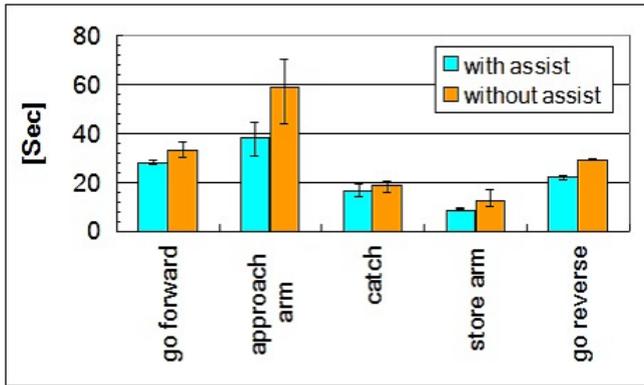


Fig. 6: Result of trial

行時間が短いことがわかる。また、Table.1は、操縦支援無しの場合の試行時間に対する、操縦支援有りの場合の試行時間の減少率を示している。この表からは、特にアームアプローチ動作において34[%]以上の時間短縮が見られる。このことから、不整地移動ロボット上のマニピュレータを操作する上で、マスタスレーブマニピュレータの姿勢同期機能は、時間遅れのある環境において、大きな負担低減を実現できるものと考えられる。なお、アプローチに比べ、格納時の時間短縮が小さいことについては、マニピュレータの格納は、ロボット座標系上で格納場所が決まっていることが原因と考えられる。また、把持に関しては支援を行っていないため、大きな差とならなかったと考えられる。

5 まとめ

本実験では、JAXAの超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)を用い、一般的なLAN回線と同等の衛星回線を用意し、その回線を通して不整地移動マニピュレータQuinceの遠隔操縦を行った。その結果、たとえ衛星通信経由であっても、高速なネットワークを構築することで、画像を使った遠隔操縦により、岩石のサンプル採取を行うことができた。また、これまでに開発してきた遠隔操作支援技術をQuinceに搭載することで、通信遅延があったとしても、操縦者の負担を低減し、試行を短時間で処理できることを確認できた。

これらのことから現状のシステムが、衛星通信を用いた遠隔操作にも有用であることがわかった。

6 謝辞

本実験はJAXA(宇宙航空研究開発機構)、NICT(情報通信研究機構)の協力により実施することができた。また、国土交通省より実験場所の提供を頂いた。さらに、実験で使ったロボットはNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の支援により開発された。上記の方々に、この場を借りて感謝いたします。

参考文献

- [1] 永谷圭司,岡田佳都,徳永直木,桐林星河,小柳栄次,吉田智章,油田信一,久武経夫,“火山探査を目的としたクローラ型移動ロボットKenafによる桜島での遠隔操作実験”,第10回システムインテグレーション部門講演会,pp.1943-1946,2009
- [2] Keiji Nagatani, Naoki Tokunaga, Yoshito Okada, Kazuya Yoshida, Yasushi Hada, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, "Teleoperation of all-terrain robot using continuous acquisition of three-dimensional environment under time-delayed narrow bandwidth communication", Proceedings of the 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (2009-11)
- [3] K. Nagatani, N. Tokunaga, Y. Okada and K. Yoshida, "Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain", The IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics, pp.25-30, 2008
- [4] 桐林星河,岡田佳都,永谷圭司,吉田和哉,小柳栄次,“不整地移動マニピュレータの直感的遠隔操作が可能なベース姿勢同期機能を有するマスタスレーブシステム”,第28回日本ロボット学会学術講演会,1C3-5,2010
- [5] 谷口宏充,後藤章夫,市原美恵,菅原一宏,藤田健昇,大平修二,“火山探査機「MOVE」の開発”,ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2005, 176, 2005-06-09

Table 1: Improvement value

	forward	approach	catch	store	reverse
Improvement[%]	15.78	34.46	12.42	28.80	23.49