

電波強度を考慮した複数台移動ロボットのタンデム走行による 「切れない」通信の実現

都築 遼平*¹, 山内 元貴*¹, 永谷 圭司*²

Toward robust-wireless-communication for mobile robots with tandem navigation strategy in consideration with radio-field-strength

Ryohei TSUZUKI*¹, Genki YAMAUCHI*¹ and Keiji Nagatani*²

*¹ Nagatani Lab.

Laboratory for Rare Metal Research Building 502,
Tohoku University, Aramaki-aza Aoba 468-1, Aoba-ku, Sendai 980-0845, JAPAN

*²New Industry Creation Hatchery Center(NICHe),
Tohoku University, Aramaki-aza Aoba 6-6-10, Aoba-ku, Sendai 980-8579, JAPAN

In our previous research, a hybrid communication system was proposed for teleoperation of mobile robots in unreliable wireless communication areas. It was a redundant system that is composed of two operators, two mobile robots, and two communication pathways. Due to the system, even if one robot is disconnected with its operators caused by weak communication signal area, it can be controlled via the other robot's communication and inter-robots-communication. The system was successfully installed on our robots, and we confirmed an advantage of our system. However, during evaluation tests of the system, we found a problem. Operators should control their robots not to be disconnected each other, and not to be disconnected from their operators, simultaneously. It is very difficult to satisfy these conditions, and very burden work. To solve the problem, in this research, we propose a robust tandem navigation strategy of two mobile robots: one operator controls the leader robot tele-operatively, and the follower robot is navigated autonomously to follow the leader with keeping a certain distance in consideration with radio-field-strength. In this paper, we introduce our tandem navigation strategy, and report our initial experimental results.

Key Words : Mobile robot, Robust wireless communication, Radio field strength, Tandem navigation

1. 緒 言

日本には110もの活火山が存在し、噴火時に発生する災害のために、人々の生活が脅かされている。そのため、火山の状況を把握し、噴火予測を行うことは、人々の避難計画を策定する上で、非常に重要である。しかしながら、火山が活動期に入ると、火口から一定の距離が立ち入り制限区域となる。例えば、浅間山では噴火警戒レベルが3に達すると、半径4km以内の立ち入りが制限されるため、この制限区域内で得られる情報は限定的となる。そのため、カメラ等の観測装置を搭載した移動ロボットが無線通信による遠隔操作により、立ち入り制限区域の探査を行うことが期待されている⁽¹⁾。このような理由から、様々な火山探査ロボッ

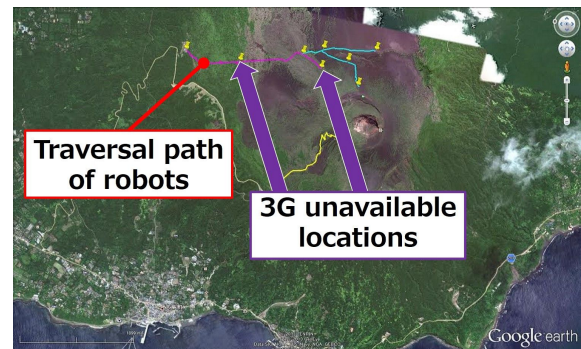


Fig. 1 Traversal path of robots and the locations where the robot failed to communicate with the operator via 3G network in Mt.Mihara

トが研究・開発されてきた⁽²⁾⁽³⁾。我々の研究グループでも、広域で通信が可能な携帯電話回線によって小型移動ロボットの操縦を行うシステムの研究・開発を行い、その遠隔操作試験を、浅間山や三原山などで実施してきた⁽⁴⁾。これらの試験では、小型移動ロボットに

*¹ 東北大学大学院工学研究科 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 東北大学レアメタル総合棟 502) tsuzuki@frl.mech.tohoku.ac.jp

*² 東北大学未来科学技術共同センター (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-10 東北大学未来科学技術共同開発センター 本館 4階 404号室) keiji@frl.mech.tohoku.ac.jp

よる探査の有用性を示すことができたが、山体の凹凸などにより電波が遮られ、通信が確立しない地点が、数mの大きさで多数存在することがわかった。図1は、三原山でのフィールド試験において、小型移動ロボットが走行した軌跡（赤線）と、ロボットとオペレータとの通信が確立しなかった地点（紫矢印）を表している。このような通信が確立しない領域にロボットが入り込んでしまうと、遠隔操縦では、それ以上ロボットを運用することはできない。この致命的問題は、東京大学の Micro6 Volcano による実証試験においても報告されている⁽⁵⁾。そのため、火山探査ロボットにおいて解決すべき問題の一つであると考えられる。これまでに、災害現場における通信問題の解決方法として、メッシュネットワークを構築する手法が提案されているが⁽⁶⁾、火山噴火時に多くのロボットを投入することは、現実的ではない。そこで、この問題を解決するため、我々の研究グループは、2人のオペレータ、2台のロボットのみを使用し、2種類の通信回線を用いたハイブリッド通信システムによる協調探査手法を開発した⁽⁷⁾。このシステムを用いることで、ロボットとオペレータとの通信が遮断され、操縦が困難になった場合でも、他のロボットの回線を経由して通信を行い、操縦を継続することができる。このシステムの実証試験を浅間山で行い、通信不可能な地点が存在する領域を走破することに成功し、有用性を確認することができた。しかしながら、ハイブリッド通信システムを運用するためには、オペレータ2人が互いに意思疎通を図り、2台のロボット間の通信を確保しつつ、2台のロボットともオペレータとの通信が確立しない領域に同時に入らないように遠隔操縦しなければならない。これは、オペレータ2人へ大きく負担を強いることとなり、常にこの条件を満足することは、困難であることも分かった。

そこで、この問題を解決するため、本研究では、電波強度を考慮しつつ、基本的に1人のオペレータにより、2台のロボットをリーダー・フォロワー型で遠隔操縦するシステムを提案する。本稿では、ハイブリッド通信システムの仕組みとその問題点を紹介し、それを解決するためのシステムの概要、本システムを実現するために開発したロボット、さらにシステムの動作試験の結果について報告する。

2. ハイブリッド通信システム

本研究の前提にあるハイブリッド通信システム⁽⁷⁾について説明する。ハイブリッド通信システムとは、2台のロボットを使用し、2種類の通信回線を用いた冗長回線システムである。このシステムを用いることで、

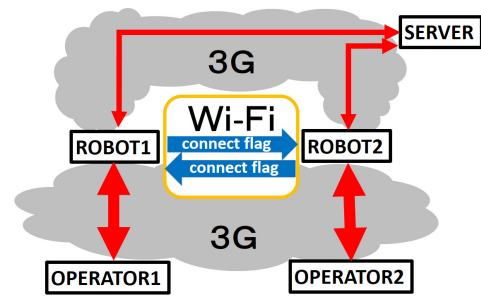


Fig. 2 Teleoperation of two robots via 3G network

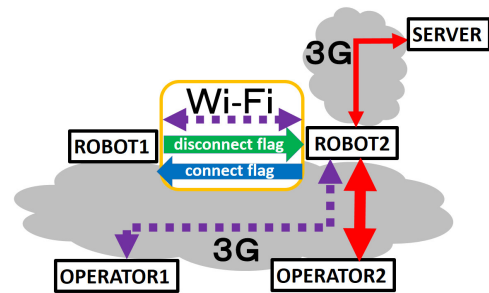


Fig. 3 Teleoperation of robots via combination of 3G network and Wi-Fi

走行中にロボットとオペレータの間の通信が遮断され、操縦が困難になった場合でも、他のロボットを経由して通信を行い、操縦を継続することができる。

このシステムを構築するためには、広域で通信が可能な回線と、比較的近距离で通信が可能な2種類の回線が有用であると考えられる。そこで、本研究では広域通信可能な3G回線と近距离で高速通信が可能な2.4GHz無線LAN(IEEE802.11g)を用いることとする。

2.1 仕組み 2台のロボットと2種類の通信回線を用いたハイブリッド通信の仕組みについて説明する。図2に示す通り、ロボット1, 2をそれぞれオペレータ1, 2が操作するものとする。また、オペレータとロボット間の通信には3G回線、ロボット間の通信には無線LANを用いるものとする。

ロボット1, 2ともに3G回線を使用可能な場合(図2)、各オペレータは3G回線を用いてロボットを操縦する。また、この場合ロボットは、自らを操縦するオペレータと通信していることを示すフラグ(connect flag), をもう一方のロボットに送信する。このフラグを受け取っている間、ロボットは自らを操縦するオペレータからのみ、アクセスを許可する。次に、オペレータ1とロボット1の間の3G回線が切れた場合(図3)、ロボット1はオペレータ1との通信が切れたことを示すフラグ(disconnect flag)を無線LANを通してロボット2に送信する。そのフラグを受け取っている間、オ

ペレータ 1 からアクセスがあれば、ロボット 2 は無線 LAN によりロボット 1 にアクセスし、オペレータ 1 とロボット 1 との通信を中継する。ロボット 2 とオペレータ 2 との回線が切れたときも、同様の方法でロボット 1 を経由して、オペレータ 2 はロボット 2 にアクセスすることができる。なお、このシステムでは、ロボットは、通信が切れたことを判断するため、外部のサーバへの ping 応答の確認を行う。

このように、オペレータとの通信が確立する場所とそうでない場所で通信経路を切り替えてロボットを遠隔操縦するのがハイブリッド通信システムである。

2.2 問題点 ハイブリッド通信システムを運用する上で以下の 2 点の問題が起こる可能性がある。

- (1) 2 台のロボットが大きく離れ、ロボット間の Wi-Fi 通信が切れる。
- (2) 2 台のロボットが 3G が使用できない場所に同時に入る。

これらの事象が起こると、ハイブリッド通信システムは破たんする。よって、これら 2 つの問題が起こらないように、オペレータ 2 人は互いに意思疎通を図り、ロボットの無線 LAN と 3G 回線の使用可否を気にかけてつつ操縦する必要がある。しかし、これはオペレータに大きく負担を強いると共に、ヒューマンエラーも誘発するため、フィールド試験を通して実現が非常に困難であることが分かった。この問題を解決するため、本研究では、無線 LAN と 3G 回線の電波強度を考慮しつつ、2 台のロボットをリーダー・フォロワー型で遠隔操縦するシステムを提案する。これは、無線 LAN と 3G 回線の電波強度を考慮することで、フォロワーロボットを適切に自動操縦することにより、リーダーロボットのオペレータのみの操縦で、安定した通信を確立するものである。このシステムにより、(1), (2) の問題が起こることを防ぐことができる。

3. 電波強度を考慮したハイブリッド通信システム

3.1 概要 本システムを運用する際、図 4 のように先行するリーダーロボットをマニュアルで遠隔操縦し、後方からフォロワーロボットを自動走行で追従させる。ここで、2-2 章 (1), (2) の問題が発生しないために、3G と無線 LAN の電波強度を考慮し、適切にフォロワーロボットの行動を制御する。

3.2 ロボットの追従方法 本システムは、火山環境での運用を想定している。そのため、不整地環境でそれぞれのロボットは自らの位置を認識する必要があり、本研究では GPS センサを用いることにした。また、フォロワーロボットは、自らの方位を認識する必要がある。そこで、本研究では地磁気センサを用いる

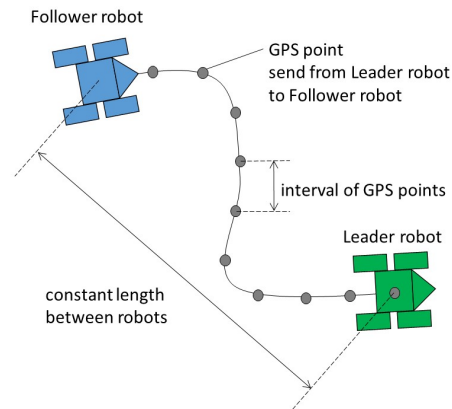


Fig. 4 Following motion of the follower robot

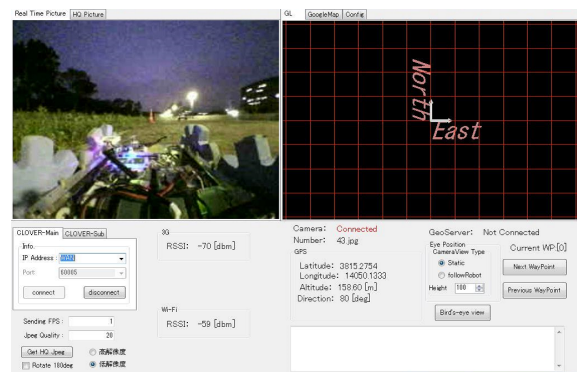


Fig. 5 Operation display. Upper left: camera image, upper right: global map based on GPS, lower left: radio field strength

ことにした。

本システムにおける GPS と地磁気センサを用いた追従方法について述べる。まず、図 4 に概略図を示す。リーダーロボットは、2m の移動毎に、フォロワーロボットに対して自身の走行軌跡を示す GPS 座標を送信する。これに対し、フォロワーロボットは、自身の GPS 座標、地磁気センサを用いて、リーダーロボットから送られてきた走行軌跡に対する追従走行を行う。なお、リーダーロボットは、1 秒ごとに、フォロワーロボットに対して 2 台のロボット間距離を保つため現在位置の GPS 情報を送信する。これを基に、フォロワーロボットは、ロボット間距離を算出し、一定距離を保ちつつ走行する事が可能となる。

なお、本システムは、障害物などで GPS センサを使用できない場所では運用できない。そのため、そのような場所では、オペレータの操縦画面 (図 5) にて 3G と無線 LAN の電波強度を確認しながらハイブリッド通信システムを運用しつつ、通信が切れないよう細心の注意を払い、2 台のロボットをマニュアルで遠隔操縦する必要がある。

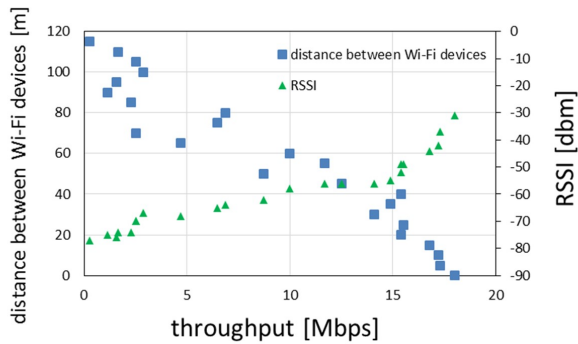


Fig. 6 Throughput graph according to the Distance and RSSI between Wi-Fi devices

3.3 3G 回線を使用できる領域を走行する場合
 ロボットが2台とも3G回線を使用できる領域を走行する場合、ハイブリッド通信システムを運用するためには、2-2章(1)の問題が起こらないように、2台のロボット間の通信を常に確立すればよい。本研究では、2台のロボット間距離を一定に保つことでロボット間通信を確立する。図6は、今回のシステムでロボットに搭載した無線LAN機器の評価試験の結果であり、見通しのきく空間における2台の無線LAN機器間の通信速度に対する距離と電波強度(RSSI)を示している。なお、無線LAN機器としては、CONTEC社製2.4GHz無線機(FXE2000)とスリーブアンテナ(FX-ANT-A7)を使用した。通信は、環境条件に大きく依存するが、この評価試験より10m程度あれば、16Mbps以上の良好な通信を確保できることが分かった。そこで、ロボット間距離を10mに設定し、この距離を保つようフォロワーロボットを追従させることとした。

ここで、ロボット間通信とロボット間距離の関係について補足する。本来、一定の通信速度以上を維持するためには、フォロワーロボットは環境情報を取得し、目標の電波強度が得られるであろう経路を選択し、行動することが望まれる。しかし、火山環境においては、ロボットは比較的に見通しの良い環境にあるため、本研究では電波強度と距離は1対1に対応するものとし、通信速度を一定に保つために、単純にロボット間の距離を一定に保つことで対応することとした。

3.4 3G 回線を使用できない領域を走行する場合
 ロボットが3G回線を使用できない領域を走行する場合、2-2章(1),(2)の問題が起こらないように、以下のシナリオに基づき走行する。リーダーロボットは2mの移動ごとに、フォロワーロボットに対して、追従の目標位置となるGPS座標とその時の3G回線の電波強度を送信する。フォロワーロボットは、ロボット間距離10mを保ちつつ、リーダーロボットを追従する

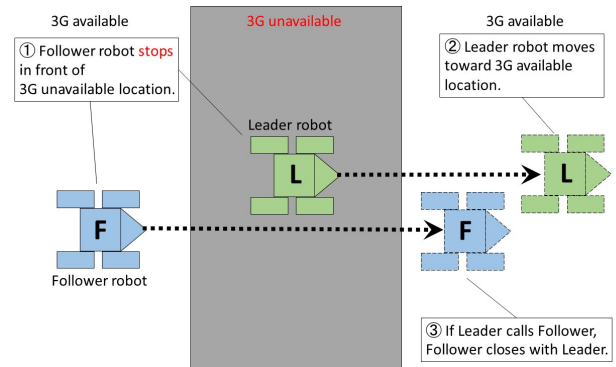


Fig. 7 Leader and Follower robot's motion in case of existence of the weak communication signal area

が、目標のGPS座標の3G回線の電波強度が極端に小さくなった場合、その目標点に移動せず、手前で停止する(図7①の状態)。リーダーロボットのオペレータは、操縦画面に示された3Gと無線LANの電波強度を確認しつつ操縦し、電波強度が回復し、通信が良好な場所となる地点で停止する(図7②の状態)。リーダーロボットは、オペレータの指令により、フォロワーロボットをリーダーロボットのいる位置まで走行させる(図7③の状態)。その後、再びリーダーロボットを操縦し、フォロワーロボットがロボット間距離10mを保って追従する。これらの行動の繰り返しにより、3G回線を使用できない領域を通過する事ができると考えられる。なお、本システムにおける3Gの電波強度(RSSI)の強弱を認識するスレッシュホルドの値は、経験的に-100dbmに設定した。

ここで、本システムが適用可能な3G使用不可能距離について補足する。本システムが対象とする3G使用不可能距離は、Wi-Fiの通信可能範囲内である。火山は、開けた環境ではあるが実際には凹凸が存在するため、距離が大きくなるにしたがってWi-Fiの通信可能距離が大きく減少する可能性がある。そのため、開けた環境では、図6より、約110mまで通信可能であったが、安全を考え、適用可能な3G使用不可能最大距離を50mと設定した。

4. 対象とする2台の移動ロボット

4.1 火山探査ロボット El-Verde 本システムのリーダーロボットには、ステアリング操舵機構を有した車輪型後輪4輪駆動ロボット El-Verde を利用した。

図8左に El-Verde の外観を示す。El-Verde は、全長800mm、全幅700mm、全高780mm、重量は約37kgであり、このロボットに、ネットワーク機器として、



Fig. 8 El-Verde (left) and CLOVER (right): Both robots mount the proposed this system

3G 回線通信機器 (TABrain 社製 3GIM) と 2.4GHz 無線機 (CONTEC 社製 FXE2000) を搭載した。2.4GHz 無線機のアンテナは、スリーブアンテナ (CONTEC 社製 FX-ANT-A7) を搭載した。これらの機器から、3G、無線 LAN の電波強度を取得することができる。GPS センサとしては、ニコン・トリンプル社製の zephyr を、地磁気センサとしては、3D Robotics 社製の uBlox GPS を搭載した。また、ロボット前部に、カメラ (Axis 社製 212 PTZ) を搭載した。コントロールシステムとしては、PC (Intel 社製 NUC5i3RYK) とモーターコントローラ (STM32F103VF)、車輪部、ステアリング部モータ (Maxon 社製 REmax-35 24V)、およびモータドライバ (HiBot 社製 1-Axes DCPower Module) を搭載した。また、バッテリーには、リチウムイオンバッテリー (IDX 社製 E-HL9S, 14.4V, 6150mAh) を利用した。

4.2 火山探査ロボット CLOVER 本システムのフォロワーロボットに、小型かつ軽量の車輪型後輪 2 輪駆動ロボット CLOVER を利用した。

図 8 右に CLOVER の外観を示す。全長 400mm, 全幅 350mm, 全高 300mm, 重量は約 4kg である。ネットワーク機器として、El-Verde と同様の 3GIM と 2.4GHz 無線機を搭載した。GPS と地磁気センサは、3D Robotics 社製の uBlox GPS を搭載した。また、ロボット全体を俯瞰しつつ操縦するため、後方上部に、俯瞰カメラ (Panasonic 社製 CY-RC70KD) を搭載した。コントロールシステムとしては、組込 PC (アットマーク社製 Armadillo-810) とマイコン (STM32F103VF)、モータ (Maxon 社製 REmax-24 12V) を 2 個、およびモータドライバ (HiBot 社製 3-Axes DCPowerModule) を搭載した。またバッテリーには、リチウムフェライトバッテリー (A123 社製 LiFePO4, 13.2V, 2300mAh) を利用した。

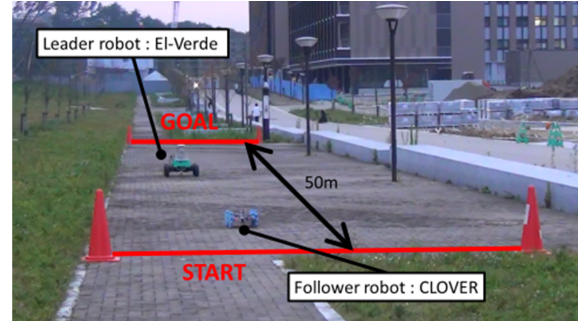


Fig. 9 Teleoperation test in a basic environment

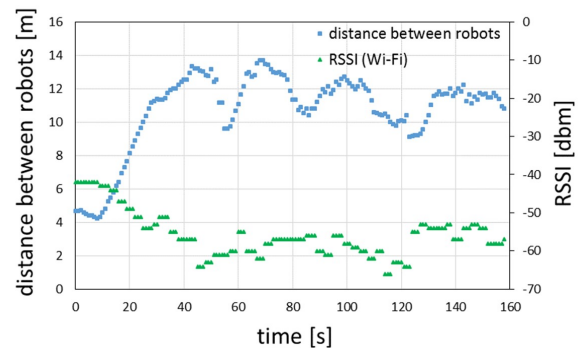


Fig. 10 An experimental result of distance between two robots and RSSI

5. 動作試験

本システムの基本動作試験を、3G が使用できる領域を走行する場合、3G が使用できない領域を走行する場合に分けて実施した。それぞれの試験の内容と結果について述べる。

5.1 3G 回線を使用できる領域を走行する場合 3G 回線を使用できる領域を走行する場合の動作試験を東北大学青葉山キャンパス・レアメタル総合棟前で行った。試験方法としては、見通しのよい 50m の直線にて本システムを使用し、リーダーロボットをマニュアルで遠隔操縦し、フォロワーロボットを自動で追従させ、その時の 1 秒ごとのロボット間距離と無線 LAN 回線の電波強度を測定した。なお、El-Verde をリーダー、CLOVER をフォロワーロボットとした。スタート位置では、リーダーロボットの後方 5m にフォロワーロボットを配置し、リーダーロボットが 50m 走行したところをゴール地点と設定した。

図 9 に、試験中の様子を示す。また、図 10 に走行時間におけるロボット間の距離と電波強度 (RSSI) を示す。試験開始から 25 秒経過するまでは、ロボット間距離が 10m 未満のためフォロワーロボットは停止したままである。25 秒経過後、フォロワーロボットが動き出し、平均ロボット間距離約 11m でリーダーロ

ボットを追従したことが図 10 より分かる。その時の RSSI は、 -66dbm 以上を保つことができた。これにより、3G 回線を使用できる領域を走行する場合は、約 10m のロボット間距離を保つことで、十分にロボット間通信が可能であり、ハイブリッド通信システムを運用することができることが分かった。

5.2 3G 回線を使用できない領域を走行する場合
 3G 回線を使用できない領域を走行する場合の動作試験も、同じく、東北大学青葉山キャンパススレアメタル総合棟前で行った。5.1 節の試験と同様に、見通しの良い場所で図 11 に示す全長 50m のコースを設定し、本システムを使用して走行試験を行った。また、先行研究で行った浅間山の走行試験では、3G 使用不可能区間が数 m 程度であったことから、本試験では、図 11 の中央、灰色の領域に、3G が使用できない区間を幅 10m として設定することとした。この区間にロボットが入り込んだ際、ロボットの 3G デバイスの外付けアンテナを取り外すことで、3G が使用できないことを模擬した。なお、本試験も、リーダーロボットとして El-Verde、フォロワーロボットとして CLOVER を利用した。

以下に、試験結果を述べる。スタート位置から 3G が使用できる区間においては、オペレータがマニュアル操縦するリーダーロボットを、フォロワーロボットが距離約 10m を保ち、自動追従した。この時の 3G の RSSI は、約 -60dbm であった。リーダーロボットが 3G が使用できない区間に入ったとき、3G デバイスのアンテナを取り外し、3G の RSSI は、 -116dbm まで下がった。その後、リーダーロボットを走行させ続け、再び 3G が使用できる区間に到達し、3G デバイスのアンテナを装着し、約 5m 程進んだのち、停止させた。この時のリーダーロボットの 3G と無線 LAN の RSSI は、それぞれ -66dbm 、 -60dbm であり、通信が良好となった。リーダーロボットが移動している間、フォロワーロボットは、リーダーロボットからの通信不能の連絡を受け、3G が使用できない区間の手前約 2m 位置で自動停止していた。その後、リーダーロボットオペレータのコントローラからの指令により、フォロワーロボットがリーダーロボットへ近づき、リーダーロボットの手前約 2m 位置で停止した。最終的に、ロボット間距離約 10m を保ち、2 台は設定した経路を走破した。この基本動作試験より、本システムは正常に動作することを確認した。

6. 結 言

本研究では、火山環境でロボットと安定した通信を行うために、電波強度を考慮しつつ、1 人のオペレー

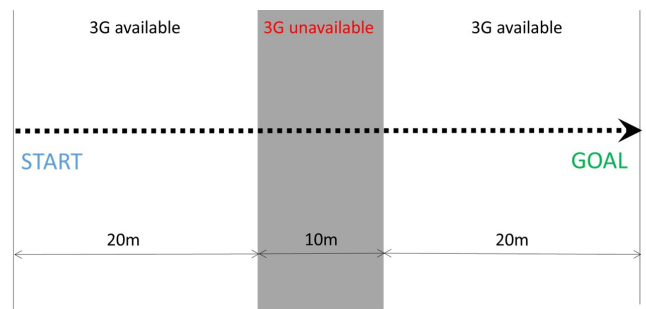


Fig. 11 Traversal course of robots with existence of weak communication signal area

タが、2 台のロボットをリーダー・フォロワー型で遠隔操縦するシステムを提案した。また、このシステムを実際にロボットへ実装して基本動作試験を行った。その結果として、携帯回線の使用可否によって分類した 2 パターンの状況において、いずれもシステムが正常に動作することを確認した。

今後は、平成 27 年 11 月に、再び伊豆大島にて、本システムの実証試験を行う予定である。その試験を通して、より実用的なシステム開発を目指す。

参 考 文 献

- (1) 永谷圭司, 安藤詳平, 飯野勝博, 西真佐人, “火山噴火後の遠隔調査システムの開発”, 砂防学会誌 Vol.65, (2013-03), pp.56-60
- (2) Daniele Caltabiano, Danilo Ciancitto, Giovanni Muscato, “Experimental results on a traction control algorithm for mobile robots in volcano environment,” Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics Automation (2004-04).
- (3) John E. Bares, David S. Wettergreen, “Dante II: Technical Description, Results, and Lessons Learned”, The International Journal of Robotics Research, (1999-07)
- (4) 山内元貴, 秋山健, 高橋悠輔, 永谷圭司, 吉田和哉, 羽田靖史, “車輪型軽量火山探査ロボットの開発と遠隔操作試験”, 第 13 回計測自動制御学会論文集, (2012-12), pp.652-654
- (5) Hada Yasushi, Takizawa Osamu, “Development of Communication Technology for Search and Rescue Robots”, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology Vol. 58, 2011
- (6) 黒田洋司, 迎田賢太郎, 西川佑樹, 永田祐也, 高橋佑弥, 谷口雅彦, 井上直人, “長期連続観測が可能な火山観測ローバの開発とフィールド試験”, 日本惑星科学会誌 Vol. 21, No. 3, 2012
- (7) Ryohei Tsuzuki, Keiji Nagatani, Genki Yamauchi, “Teleoperation of mobile robots using hybrid communication system in unreliable radio communication environments”, Proceedings of the 2014 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, (2014-10)