特集「無人観測ロボット」

伊豆大島における不整地移動ロボットの走行試験および自己位置推定試験

永谷 圭司[1]，大木 健[1]，Nathan Britton[1]，佐藤 毅一[1]，
野寄 敬博[1]，高橋 悠輔[1]，山内 元貴[1]，秋山 健[1]，吉田 和哉[1]

2012年3月29日受領，2011年5月2日受理.

（**要旨**）火山噴火時には，その噴火の規模によって定められる危険区域に人が立ち入ることはできない．そのため，噴火予測や住民の避難計画の策定を目指した遠隔操作型の不整地移動探査ロボットによる火山定点観察，移動観察の実現が求められている．ただし，これを実現するためには，不整地環境における高い走行性能，高い位置推定精度，遠隔操作のための長距離通信，長時間活動を支えるための電源といった，様々な技術課題が存在する．これらの課題は，月・惑星における移動探査を行う探査ローバーの技術課題にオーバーラップする部分が少なくない．そこで，本研究では，不整地軟弱土壌における走行性能ならびに，不整地環境におけるロボットの高精度な自己位置推定の実現を目指し，車輪型／クローラ型不整地移動ロボット4台の走行試験を，伊豆大島裏砂漠ならびに，三原山で実施した．本稿では，各走行試験の概要ならびにロボットを紹介すると共に，火山観察ならびに月･惑星探査ロボットに今後必要となる技術課題について考察する．

1. はじめに

活動中の火山の定点観察／移動観察は，噴火予測や住民の避難計画の策定を行う上で，非常に有用である．しかしながら，火山が噴火している最中，その噴火の規模によって定められる危険区域には，人が立ち入ることができない．そこで，筆者らの研究グループでは，堆積した火山灰と降雨による土石流発生の懸念ならびに，天然ダム形成による土石流発生の懸念という事態を想定し，遠隔操作により危険区域内を定点観察／移動観察する小型の火山探査ロボットの研究開発を目指している．この研究を進めていく中で，筆者らは，2009年よりこれまで，桜島山，浅間山，三原山，阿蘇山において，小型移動ロボットによるフィールド実験を実施した．その結果，火山探査ロボット実現のためには，軟弱凹凸不整地走行における高い走行能力が必要不可欠であることが分かってきた．特に，火山環境においては，火山灰や細かい砂利の中に，比較的大きな岩が散在し，車輪移動機構による走行を妨げる場所が多々ある．さらに，火山活動時，人が進入できない領域において，ロボットによる地震計などのセンシング機器の埋設が求められる可能性がある．この場合，不整地移動能力のみならず，ロボットには，高い自己位置推定能力が求められる．

一方，月・惑星における移動探査を行う探査ロボットは，地表面を広域に探査可能であるため，その実現が期待されている．しかしながら，対象とする環境が不整地かつ軟弱土壌であるため，これらのロボットには，車輪のスリップや，不整地走行能力が求められる．米国のアメリカ航空宇宙局（NASA）が火星に送った2台のMars Exploration Roverは，2004年に開始した移動探査活動により，いくつもの科学的成果を挙げてきたが，一台は，2009年に軟弱土壌において車輪がスタックし，身動きが取れなくなった．この事例からも，月・惑星移動探査ロボットには，軟弱土壌における高い走行能力が必要不可欠であることが分かる．さらに，このような環境においては，効率的な探査を行うためには，自律的な動作が不可欠であり，そのためには，ロボットの自己位置推定が非常に重要となる．

上記の研究において共通する要素技術は，軟弱凹凸

1. 東北大学
Keiji@ieee.org

不整地走行ならびに，広域フィールドにおける高い自己位置推定である．これらの技術を前進させるため，筆者らの研究グループでは，様々なアプローチでこれらの要素技術開発に取り組むと共に，広域フィールドにおける試験を行ってきた．特に，実験室で構築可能な模擬フィールドだけでは，実環境における実証にならず，また，野球グラウンド程度では，領域の狭さ，高低差の小ささ，地面のスリップの小ささから，軟弱土壌における広域自己位置推定手法の実証とならない．そこで，今回，広域かつ軟弱凹凸斜面を有する伊豆大島裏砂漠と三原山にて，軟弱不整地走行ならびに，自己位置推定に関するフィールド実験を実施することとした．本稿では，軟弱凹凸不整地走行ならびに自己位置推定に対する筆者らのアプローチを紹介すると共に，4台のロボットを用いて実施した伊豆大島三原山ならびに裏砂漠におけるフィールド試験の結果を報告する．

2. TrackWalker-Ⅱによる軟弱不整地走行試験

2.1 TrackWalker-Ⅱ開発の背景

第1章で述べた通り，火山地帯は，軟弱凹凸土壌であるため，高い走破性能を確保する必要がある．これらの不整地走行を実現するための一つの機構として，クローラ型移動機構が検討される場合が多い．実際に，このような自然環境で作業を行う建設機械のほとんどが，クローラ型移動機構を採用している．また，月・惑星の移動探査ロボットにおいても，軟弱土壌における高い走行性能が必要とされ，走破性の高いクローラ型の走行機構が検討され始めている[1]．また，移動探査ロボットには，可搬性が重視されることから，小型軽量であることが要求されるが，一般には，ロボットを小型化することで，不整地走行性能は低下する．そこで，クローラ型移動ロボットに自由度を追加し，走行性能を向上させる研究開発が幾つかの研究機関において行われてきた[2,3]．我々の研究グループにおいても，軟弱不整地環境における高い走行性能を有する機構の開発を目指し，高自由度クローラ機構を搭載したロボットTrackWalker[4]ならびに，Track-Walker-IIを提案してきた[5]．TrackWalker-IIの概観を図1に示す．この機構が，実際の火山地域で走行可能であること，ならびに，その走行限界を検証することが求められている．

図1：TrackWalker-Ⅱの概観．

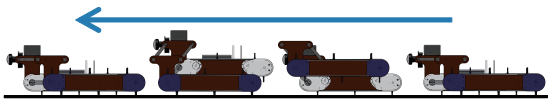


図2：サイドクローラの揺動動作．

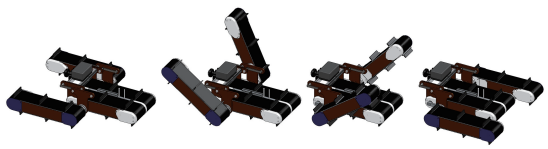
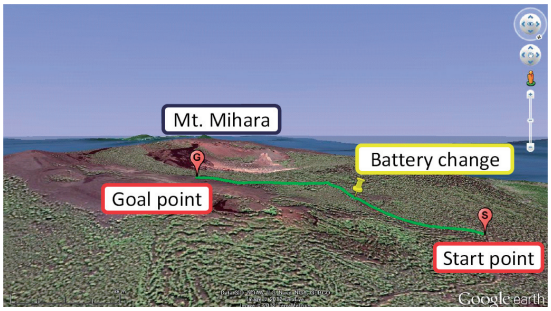


図3：サイドクローラのフリッパ動作．

2.2 TrackWalker-Ⅱの概要と試験目標

本試験で利用するTrackWalker-IIが有する高自由度クローラ機構は，本体に取り付けられたメインクローラと，左右の揺動サイドクローラからなる．メインクローラは，幅120 mmの歯付ベルトを2本使用し，本体に取り付けたDCモータにより，それぞれ同一方向に駆動する．また，左右のサイドクローラは，内部のDCモータにより駆動し，左右のサイドクローラを同一方向に駆動することで並進，互いに逆方向に駆動させることで信地旋回を可能とする．これらのサイドクローラは，3-平行クランク機構によって本体と接続され，このリンクを，本体に取り付けたDCモータを用いて回転させることで，本体とサイドクローラを交互に接地させる揺動動作を実現する(図2)．この揺動動作は，軟弱地盤において，大きな接地面でサイドクローラを地面に平行に接地させるため，地盤を崩さずに走行することが可能である．また，脚部に取り付け



©2011 Google, Image ©2011 GeoEye, ©2011 Cnes/Spot Image

図4：TrackWalker-Ⅱの走行軌跡.

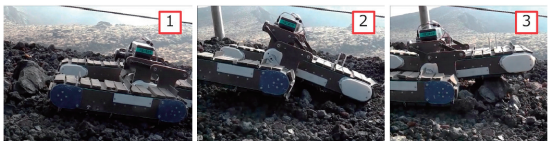


図5：TrackWalker-Ⅱの小障害物の乗り越え動作.

図6：TrackWalker-Ⅱの軟弱急斜面走行.

た DCモータによりサイドクローラを前方に展開するフリッパ動作を実現する(図3)．このフリッパ動作は，クローラ長を延長する効果があり，ロボット前方の障害物を乗り越える際にも有効である．なお，各クローラ表面には，硬質ゴム製のラグ(高さ30 mm，幅100 mm，厚さ5 mm)を取り付け，軟弱土壌における走行性能を向上させた．なお，本体のサイズは，全長70 cm，幅70 cm，高さ30 cmであり，総重量は，およそ20 kgである．

本試験では，この TrackWalker-IIの移動機構が，火山現場に適用可能であることを実証するため，三原山の凹凸登山道走行ならびに，雨水の浸食作用により生成された 30 deg以上の急斜面における軟弱地盤走行を行うこととした．なお，本試験では，ロボットのすぐ後方にオペレータが追走し，ロボットの操作は，目視で行うこととした．

2.3　三原山登山道における長距離走行試験結果

まず，三原山登山道で行った長距離走行試験について報告する．長距離走行試験は，三原山登山道の標高

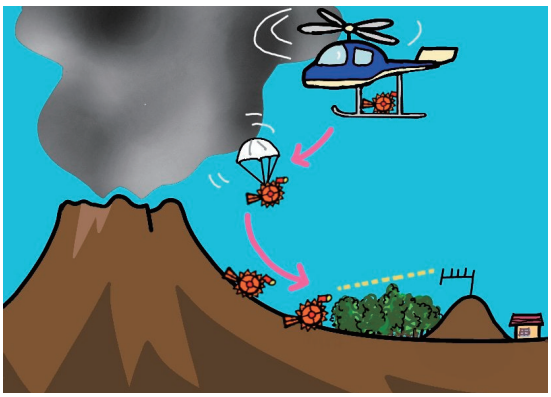


図7：小型対向二輪型ロボットを用いた火山観察シナリオ.

630 m付近から開始した．走行軌跡を図4に示す．TrackWalker-IIは標高629 mのスタート地点から標高714 mのゴール地点まで，標高差85 m，距離460 mを約2時間で走行した．なお，バッテリ交換は，途中で2回行った．対象環境は，敷き詰められた火山噴出物の粒径が大きく，また角ばっていたため，長距離走行の試験中，ロボットのクローラが大きな火山噴出物に接触し，走行を継続することが困難な場面も見られた．しかしながら，揺動動作により，その状況を脱出することで，走行を継続することができた．なお，この走行手法の切り替えについては，ロボットの後方より目視で操作を行っているオペレータが判断した．また，標高690 m以降は，斜度25 degの急斜面であったが，TrackWalker-IIは，左右の脚部を前方に展開したフリッパ動作に切り替えることで，安定した走行が可能であった．この状態で，図5に示すように，斜面上に散在していた粒径20 cm程度の礫も，問題なく乗り越え，走行を継続することができた．

2.4　裏砂漠の急斜面における不整地走行試験結果

次に，裏砂漠で行った軟弱地盤走行試験について報告する．この裏砂漠は，粒径10～20 mm程度のスコリアに覆われた軟弱地盤であるが，斜度が5 deg程度の地盤では，TrackWalker-IIは，特にスリップすることなく走行することができた．そこで，水が流れたあとに形成された急斜面にて，登坂走行試験を行った．斜度32 degの斜面では，図6に示すように，スリップしながらもサイドクローラを駆使した登坂が可能であった．しかしながら，斜度35 degの斜面になると，TrackWalker-IIは地盤を崩壊させ，斜面を登ること

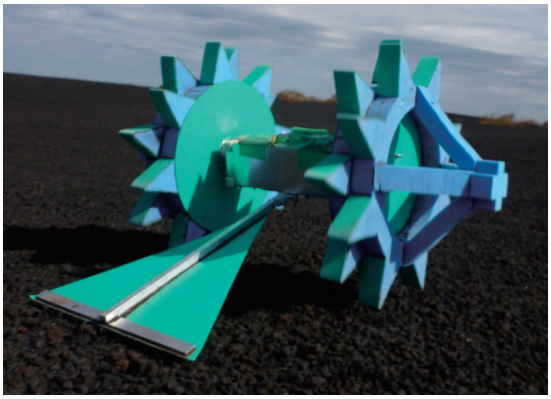
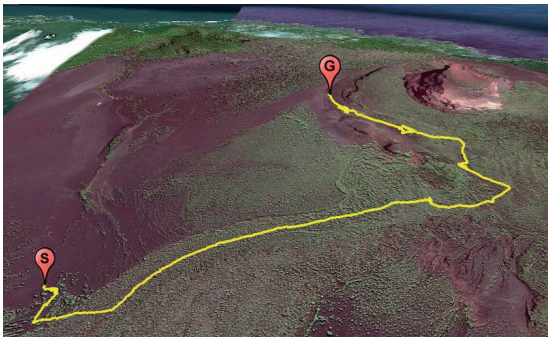


図8：小型対向二輪型ロボットGeoStarの概観.

図9：GeoStarの走行試験の様子.



©2011 Google, Image ©2011 GeoEye, ©2011 Cnes/Spot Image
図10：GeoStarの走行軌跡.

ができなかった．このとき，クローラに取り付けたラグにより地面が削られ，実質的な傾斜がほぼ安息角の状態となる．これにより，ロボットが少しでも進むと，ロボットを支えている地盤が崩れ，地盤ごとロボットが滑り落ちるといった現象が見られた．クローラを回転させない，揺動動作のみによる登坂も試みたが，TrackWalker-IIは同様にスリップし，斜面を登ることが不可能であった．

2.5 まとめと今後の課題

TrackWalker-IIによる走行試験により，クローラ機構に追加の自由度を加えた高自由度クローラ機構を利用することで，軟弱不整地環境における高い走破性を発揮することが実証できた．特に，三原山における長距離不整地走行試験により，この機構で三原山の火口までの走行が可能であることが実証できた．ただし，バッテリについては，2回交換を行っているため，電源の確保が，今後の大きな課題となる．一方，裏砂漠における軟弱急斜面の走行試験結果より，安息角付近の軟弱斜面における走行については，研究開発の余地が大きいことが判明した．

3. GeoStarによる不整地長距離走行試験

3.1 GeoStar開発の背景

火山探査ロボットには，軟弱凹凸不整地走行における高い走行能力が求められる．しかしながら，非常に軽量な不整地移動ロボットを，ヘリコプタによって探査目的地付近まで持って行くことができれば，登山が不可能なロボットであっても，山を下りながらの探査が可能である．そこで，筆者らのグループでは，図7に示すように，無人ヘリコプタを用いて小型ロボットを搬送する火山観察シナリオを策定し，その実現を目指している [6].

3.2 GeoStarの概要と試験目標

ヘリコプタ投下型の小型ロボットによる火山探査シナリオを実現するため，筆者らが開発したロボットGeoStarの外観を図8に示す．このロボットは，全長52 cm，幅40 cm，高さ30 cm，重量1.5 kgの小型軽量の対向二輪型ロボットで，横長の直方体のアルミ製のボディと，スポンジ製の大径タイヤ，ボディの空転を抑えるためのスタビライザ(後方に突き出した三角板)から構成される．スポンジ製のタイヤには，衝撃吸収能力があるため，パラシュートを用いた着地，もしくは，地表面付近からのロボットの直接投下が可能である．ロボットのボディ内部には，リチウムイオンバッテリと，2本のDCモータが搭載されており，最大時速約2 kmで，6 km以上の長距離走行を可能とす

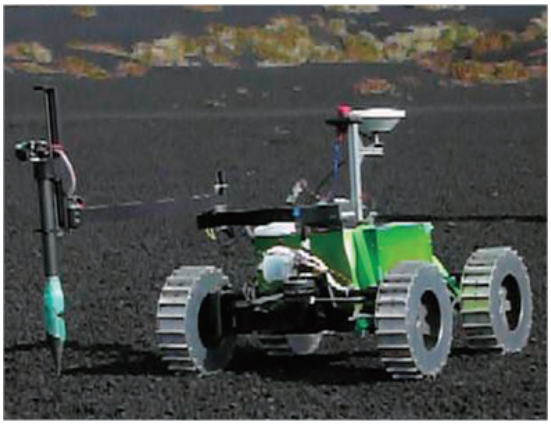


図11：不整地移動ロボットEl-Verdeの概観.

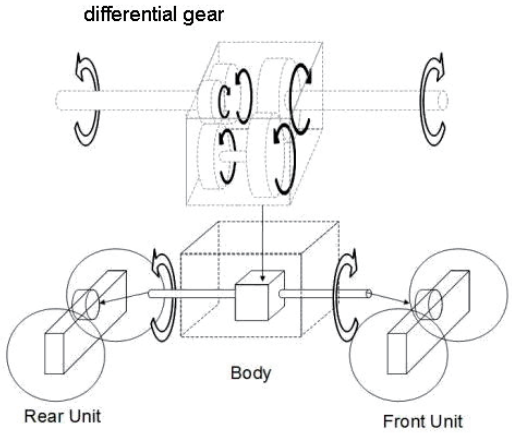


図12：四輪ロッカーリンクサスペンションの構造の概要.

る．また，電子機器類として，三原山での試験では，マイコン，GPS，無線通信を行うXbeeを搭載した．

これまでに，標高の高い浅間山において，GeoStarによる下山シナリオのフィールド試験が成功していたため，本試験では，このGeoStarを三原山裏砂漠より山頂へ向かうという探査シナリオを想定し，登山道に沿った長距離登山走行を行うこととした．なお，本試験では，ロボットのすぐ後方にオペレータが追走し，ロボットの操作は，目視で行うこととした．

3.3　三原山登山道における長距離走行試験結果

GeoStarの長距離走行試験は，三原山裏砂漠の中央部，標高530 mの地点（図10内のS点）から，三原山山頂（図10内のG点）まで，登山道に沿った走行を行った．その結果，三原山裏砂漠から三原山山頂まで，3.3 km，高低差 230 mの道のりを，バッテリの交換すること無く，1時間20分で走行した．走行経路の途中には，25 deg程度の比較的急な斜面も存在したが，ロボットは，タイヤがスリップすることやロボットの進行方向が左右にふらつくことがあったものの，目標経路の走行を達成することができた．

3.4　まとめと今後の課題

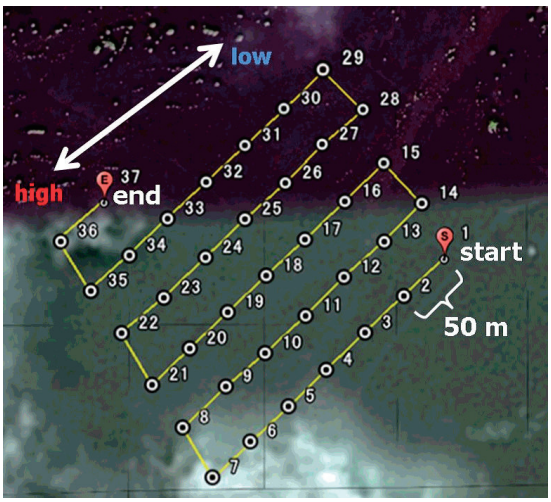
GeoStarを用いた走行試験により，三原山であれば，ヘリコプタを用いずとも，対向二輪型小型移動ロボットによる山頂までの登坂探査が可能であることが実証できた．ただし，今回は，ロボット背後からの目視操作によって試験を行っており，通信機の検討ならびに，遠隔操作手法の検討は行われていない．今後は，このロボットに搭載する通信機器の検討を行い，遠隔操作による火山観察の実現を目指す．

4. El-Verdeの位置推定試験

4.1　El-Verde開発の背景

第1章で述べたように，火山活動時，人が進入できない領域において，ロボットにより地震計を複数埋設することができれば，マグマ溜まりなどの地下構造推定が可能となり，噴火後の火山活動の予想が可能となると期待できる [7]．一方，筆者らの研究グループでは，これまで，石油等の地下資源探査を目的とした，移動マニピュレータを用いた複数の地震計設置による地中内部構造推定の自動化に関する研究を進めてきたが，ここのセンサ設置に関する手法は，マグマ溜まりを推定するための地震計の設置動作手法と原理的に同じである．

この手法を実現する上で，大きな問題となるのが，ロボットの位置推定である．一般に，屋外における位置推定は，Global Positioning System（GPS）に頼るところが大きいが，崖の存在によるGPS信号の反射や，植生の存在による GPS信号の減衰などにより，位置精度が大きく低下する場合があるため，GPSのみを頼りにすることができない．一方，屋内で活動する移動ロボットは，車輪の回転を積算して位置推定を行う手法が有用であるが，スリップを伴う軟弱屋外フィールドでは，その手法を単純に適用することが困難である



©2011 Google, Image ©2011 GeoEye

図13：手先の目標位置.

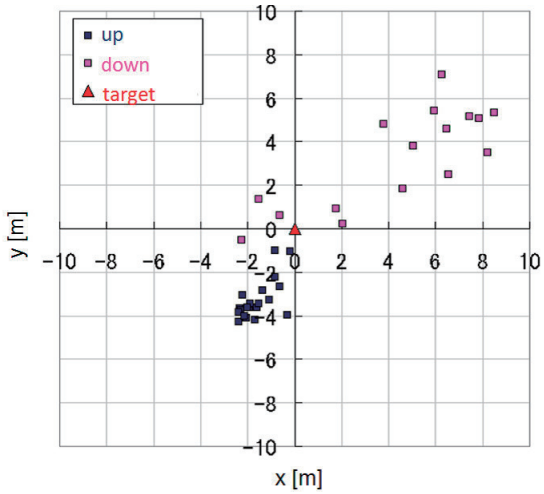


図14：RTK-GPSで計測したEl-Verdeの手先位置.

という問題がある．そこで，上記の手法を融合した，より精度の高い位置推定手法の実現が，現在，求められている．

4.2 El-Verdeの概要と試験目標

前節に示した通り，筆者らの研究グループでは，フィールドへのセンサ機器設置に関する研究を進めるため，不整地移動マニピュレータのプロトタイプ El-Verdeを製作した．このプロトタイプの概観を図11に示す． El-Verdeのサイズは，全長80 cm，幅70 cm，高さ78 cmであり，重量は，およそ37 kgである．本体は，4つの独立した駆動輪と前輪操舵機能を有する車輪移動型ロボットであり，図12に示すように，前輪と後輪をロッカーリンク機構で接続する構造を採用した．このロッカーリンク機構により，例えば，右前輪が障害物に乗り上げた場合，Front Unitが回転するが，その回転は，ディファレンシャルギアを通じて，Rear Unitを逆回転させる動きとなる．これにより，右後輪を地面に押しつける力が働くことで，通常の車輪型ロボットの走行性能と比較し，不整地走破性能が大きく向上した．また，このロボットの上部には，3自由度スカラ型マニピュレータが搭載されており，可動範囲内において，手先位置を任意の場所に移動させることが可能である．

位置推定については，GPSが利用できなくなる環境についても対処するため，GPSのみならず，車輪の回転数とジャイロスコープを利用した位置推定手法ジャイロオドメトリを併用することとした．この手法は，ジャイロスコープによって車体の姿勢を取得し，車輪回転から得た並進移動量をその姿勢を考慮して積算することで，初期位置に対するロボットの位置，姿勢を推定する手法である．ただし，この手法には，車輪のスリップやジャイロスコープのドリフト誤差の影響のため，累積的な位置推定誤差が発生するという問題がある．そこで，本研究では，上記の2つの位置情報を，パーティクルフィルタ[8]と呼ばれる手法で融合する位置推定手法を採用することとした．

以上のマニピュレーション機能ならびに，位置推定機能により，ロボットは，目標地点付近まで走行した後，手先を目標地点まで正確に移動させることが可能となる．よって，手先に地震計の埋設機構を搭載することができれば，自律的な地震計埋設が可能となることが期待できる．そこで，本試験では，上記の位置推定システムの有用性を検証するため，裏砂漠における不整地移動マニピュレータの走行試験ならびに，手先位置の推定試験を行うこととした．

4.3 裏砂漠におけるEl-Verdeの位置推定試験結果

本試験では，図13に示すように，裏砂漠を広くカバーする50 m間隔のメッシュ状に，ロボットの手先の目標座標を設定した．ロボットは，これらの目標座標に対し，目標付近まで自律走行し，その地点でマニピュレータの手先座標を目標座標に一致させるマニピ

図15：小型月探査ロボットプロトタイプMoonrakerの概観.

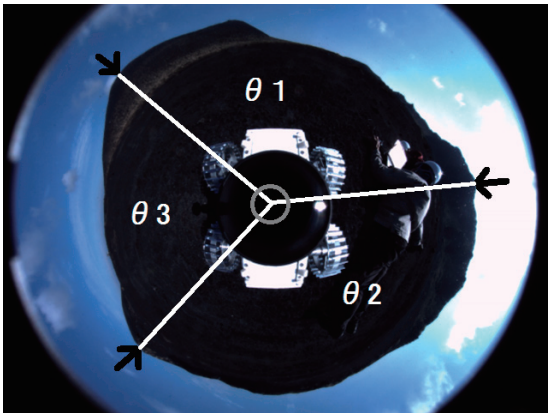


図16：全方位カメラを用いたロボット周囲の画像.

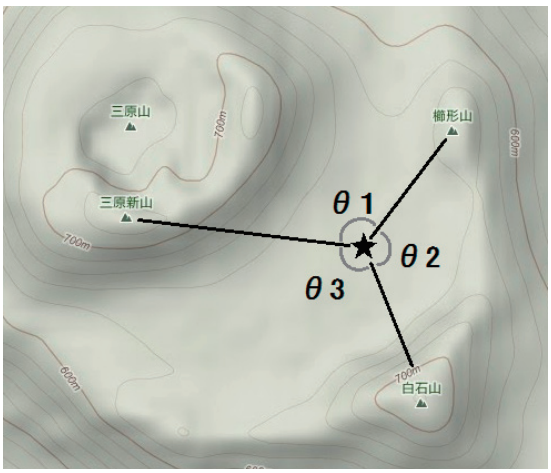
ュレータの制御を行う．なお，この環境は，図中の左下側に三原山が位置しているため，図の左下から右上に向かって，なだらかに下る地形となっている．

手先位置の精度評価には，手先の目標位置とマニピュレータの手先位置の，誤差と標準偏差を用いた．目標手先位置は，緯度・経度でユーザが指定した位置座標であり，マニピュレータの手先位置の取得については，1 cm程度の精度で絶対標測定が可能な，Real Time Kinematic（RTK）GPSを用いることとした．

試験では，37点において，上記のマニピュレータの位置制御を行い，延べ1.8 km以上の走行を行ったところで試験を終了した．各目標手先位置を原点にとり，実際の接地位置をプロットしたグラフを，図14に示す．標準偏差 σ は，X方向に3.88 m，Y方向に3.64 mとなった．本試験での手先接地位置精度は，一般的に数mオーダーとされるGPSの測位精度を大きく下回る結果となっており，所定の目標での手先の位置推定が実現できなかった．

4.4　まとめと今後の課題

本試験における位置推定は，ジャイロオドメトリで得た位置と，GPSから得た位置情報をパーティクルフィルタを用いて融合しているが，そのフィルタ中で利用するモーションモデルには，「並進移動量の誤差が最大10パーセント以内である」という仮定をおいていた．しかしながら，今回のロボットの走行履歴の解析結果より，対象とする裏砂漠の走行においては，軟弱土壌のため，想定を超えるスリップが発生していたことが明らかとなった．これにより，パーティクルフィルタが破綻し，結果として，満足のいく精度の位置推定ができなかったことが分かった．



©2011 Google, ©2011 ZENRIN

図17：山頂情報を用いたロボットの自己位置推定.

現在，この走行履歴を元に，車輪のスリップにも頑強な位置推定フィルタの設計を進めている．今後は，新たに構築するフィルタを元に，再度，広域軟弱土壌における位置推定試験を行い，高精度の手先位置推定の実現を目指す．

5. Moonrakerによる自己位置推定試験

5.1 Moonraker開発の背景

月・惑星探査ロボットの効率的な探査を行うためには，自律的な動作が不可欠であり，そのためには，ロ

ボットの自己位置推定が非常に重要となる．しかしながら，月面や火星では，GPSを利用することができない．そのため，別の方法を用いて，自己位置推定を行う必要がある．その一手法として，環境の凹凸情報である Digital Elevation Map（DEM）が利用可能であるという前提で，地平線の画像からロボットの自己位置推定を行う Skyline Localization 手法（地平線情報を用いた自己位置推定手法）[9,10]が提案されてきた．本フィールド試験では，小型ロボット Moonraker を利用し，これらの手法の可能性について評価を行う．

5.2 Moonrakerの概要と試験目標

図15に，開発したロボット Moonraker の外観を示す．このロボットのサイズは，全長 55 cm，幅50 cm，高さ58 cmであり，重量は，およそ 10 kgである．このロボットは，直径200 mmの車輪を4つ備え，それぞれ独立にモータで駆動することが可能な，四輪駆動の走行機構を有する．なお，ステアリング用のアクチュエータは搭載しておらず，ロボットの旋回には，左右の車輪を逆方向に回転させることで，車輪を滑らせながら旋回させるスキッドステア方式を採用している．

このロボットには，ロボット周囲の環境ならびに，後に示す位置推定を実行するためのセンサとして，全方位カメラを搭載した．このカメラは，図15のロボット上部に見えるコーン型ミラーを上向きカメラで撮像することで，ロボットの周囲360度の環境情報を取得することができる．これにより，Skyline Localization 手法を実現することが，本研究の目標の一つである．

本試験では，この手法の前段階として，地平線から3ヶ所の山頂位置を手動で取得し，DEM内の自己位置を推定するといった手法を実装し，その手法の評価を行うこととした．具体的には，各地点で取得した全方位画像の中から，山頂に該当する部分を手動で抽出し（図 16の矢印部分），それぞれの山頂がなす角度を求める．次に，DEM内において，山頂の向きのベクトルが，この角度をなすような地点を求めること（図17参照）で，ロボットの自己位置推定を行うものである．

5.3 裏砂漠におけるロボットの絶対位置推定結果

本試験の主目的は，位置推定アルゴリズムの検証であるため，ロボットの走行を必要としない．そこで，裏砂漠内の複数地点にMoonrakerを置き，周囲の画像を取得した後，前節で紹介した手法を用いて位置推定を行った．その結果，ロボットの周囲全体に山頂が明確に確認可能な，位置推定にとって有利な環境であれば，平均40 m程度の位置誤差で，位置推定を行うことができた．一方，山頂が同方向にしか確認できない，位置推定にとって不利な環境においても，60m程度の誤差の範囲内で位置推定を行うことができた．現状では，位置精度に関する具体的な要求精度が固まっていないため，60 mという誤差の評価が難しいが，提案手法により，比較的精度の高い絶対位置推定が可能であることが確認できた．

5.4 まとめと今後の課題

本試験では，比較的起伏に富んだ地形における絶対自己位置推定を行うため，全方位カメラ画像から三点の山頂を選び，DEMに記載された山頂と比較することで，自己位置推定を行う手法を実装し，裏砂漠において自己位置推定試験を行った．将来的には，山頂だけでなく，取得した地平線のデータを全て用いたSkyline Localizationを用いることで，その自己位置推定の精度が向上することが期待できる．さらに，ロボットが移動しつつ，逐次位置推定を行うことで，その位置精度も逐次的に向上することが期待できる．

6. 全体のまとめ

本稿では，筆者らが実施した三原山ならびに裏砂漠における4つのロボットによるフィールド試験について紹介した．各ロボットの開発背景は様々であるが，今回の試験における評価項目は，不整地の走行性能と自己位置推定の2つに集約される．各章において述べた通り，これらの項目に関する複数の試験を実施することができた．その結果，不整地移動に関する試験項目については，TrackWalker-IIとGeoStar共に，三原山の軟弱不整地に対する走行性能は，十分であることが実証できた．ただし，より斜度が大きく，大きな岩が散見する浅間山等の軟弱不整地においては，これまでの試験により，更なる走行性能の向上が必要であることが明らかとなっている．一方，広域軟弱土壌環境における自己位置推定については，オドメトリとGPSを利用する位置推定手法では，スリップを想定しなけ

れは非常に困難であることが判明した．現在，走行と同時にスリップを予想し，位置推定精度を向上させる研究を進めている．また，地形観察を利用したグローバル位置推定手法についても，今後，この手法を更に発展させることで，精度向上が期待できる．

謝 辞

フィールド実験の企画や準備にご尽力頂いた，大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻佐伯和人先生に，この場を借りて感謝いたします．また，初稿に対して丁寧で適切な批評をいただいた松島亘志氏に感謝いたします．

参考文献

[1] Wakabayashi, S. et al., 2009, Journal of Terramechanics 46, 105.
[2] Yamauchi, B., 2004, Proceedings of SPIE, 228.
[3] Rohmer, E. et al., 2010, Proceedings of ICAM, 225.
[4] Nagatani, K. et al., 2011, Journal of Field Robotics 28, 950.
[5] 秋山健, 他, 2011,ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A2-L14.
[6] 永谷圭司, 他, 2010,第12回建設ロボットシンポジウム予稿集.
[7] 井口正人, 2007, 物理探査 60, 145.
[8] Thrun, S. et al., 2005, Probabilistic Robotics (The MIT Press).
[9] Wettergreen, D. et al., 1999, Journal of Robotics and Autonomous Systems 26, 127.
[10] Ramalingam, S. et al., 2010, Proceedings of IROS, 3816.