

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25303012

研究課題名(和文) ロボットシステムによる地雷探知および地雷・金属片判別技術の研究開発

研究課題名(英文) Research on Discrimination Method for Landmines and Metal Fragments using Robot System

研究代表者

福島 E. 文彦 (FUKUSHIMA, Edwardo F.)

東京工科大学・工学部・教授

研究者番号：80262301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：世界で最も地雷の埋設量と種類が多いとされているアンゴラ共和国において、現地機関の協力の下でフィールド調査を実施し、地雷や金属片の埋設深さ、姿勢、種類や隣接状態等の観測、およびロボットシステムに搭載された金属探知機を用いた高精度空間位置・姿勢制御された自動操作による信号収集と信号解析を行った。本海外学術調査により、電磁誘導方式地雷センサ(いわゆる金属探知機)による地雷と金属片の判別技術の研究開発を推進することにより、人道的な観点からの地雷探知除去作業の効率向上の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Electromagnetic induction-based detectors are the main sensor used in manual humanitarian landmine detection and removal tasks. However, because these types of commercially available metal mine detectors (MMDs) cannot distinguish metal fragments from landmines, all metal fragments are also needed to be carefully removed from the ground, making the overall removal task very inefficient. In this research, in cooperation with the National Demining Institute (INAD) of Angola, we conducted field experiments to gather spatially represented metal mine-detector signals (SRMMDs) of different types of landmines and metal fragments. We deployed a high-precision robotic manipulator to assure high position/posture accuracy and repeatability of the MMD sensor head. This work demonstrated that having a database of such SRMMDs can lead to a methodology for successful discrimination of landmines and metal fragments, increasing the efficiency of the detection and removal tasks.

研究分野：知能機械学・機械システム

キーワード：人道的地雷探査 地雷・金属片判別技術 ロボット 海外調査

### 1. 研究開始当初の背景

(1)紛争や戦争中に軍事目的で埋設された対人地雷は爆発するまで効力は半永久的に残るため、平和を取り戻した後も汚染された地雷原は人々に脅威であり続け、農地や森林開発にも使用できず、国の復興・開発上の大きな障害となっている。そして地雷埋設国の殆どが開発途上国であるため自国の技術力のみでは地雷問題の早期解決は極めて困難である。

(2)地雷原で使われている地雷探知機のほとんどは電磁誘導方式(いわゆる金属探知機)であるが、金属探知機では地雷と金属片の判別ができないのが通常である。また地雷原では数千回の金属反応の内、わずか1個程度の本当の地雷しかみつからないという統計が各国で報告されているが、両者の区別ができないため全てのセンサ反応に対して慎重に除去作業を行わなければならない。地雷と金属片の判別ができれば全体の作業の効率化が図れるのは自明であり、人道的対人地雷探知・除去技術研究開発推進事業でも判別ができるセンシング技術に着目し、爆薬を直接判別する技術(放電型中性子源による地雷探知、高度化即発ガンマ線分析システム、SQUID-NQR地雷化学物質探知)や地中レーダー(Ground Penetrating Radar:GPR)の開発が行われた。特に金属を微量しか含まないプラスチック地雷の探知に期待されているが、爆薬を直接判別する技術は実用化に至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究は、世界で最も地雷の埋設量と種類が多いとされているアンゴラ共和国における地雷試験場と地雷原でフィールド調査を実施し、地雷や金属片の埋設深さ、姿勢、種類や隣接状態等の観測、およびロボットシステムに搭載された金属探知機を用いた高精度空間位置・姿勢制御された自動走査による信号収集・データベース化そして信号解析の研究開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

写真1に示すロボットシステムでは、遠隔操作可能なバギー車両に搭載した長いリーチのロボットマニピュレータ先端に装備された地雷センサの空間的位置・姿勢が正確に把握できる。このため、本研究では本ロボットシステムのマニピュレータの自動走査によ



写真1 遠隔操作アーム搭載バギー車両

って地雷センサの信号を収集する。アンゴラ共和国ルアンダ郊外 VIANA 市のアンゴラ国家地雷除去院 (INAD) 本部と訓練所にて、ロボットシステムを用いて試験用地雷や金属片の金属探知機による信号収集・データベース化を行う。また、地雷原でも装置を運用するために安全措置等を十分考慮した標準実施要領 (SOP) の策定についても現地協力者と議論する。なお、本研究はロボットシステムの開発を主目的としていないが、2005年に完成した写真1のロボットシステムは老朽化が進んでいたため、アンゴラに輸送する前準備として全体の改修を行った。

### 4. 研究成果

本研究では、計5回の海外学術調査旅行を実施した。各回の主な内容と成果を示す。

(1) 第1回海外学術調査旅行(平成26年3月10日~3月22日)(写真2): 初年度はロボットマニピュレータの改修作業を優先し、バギー車両本体は改修後2年度目に海上輸送するよう計画した。写真2に示すアルミフレームで構成したXYマニピュレータと地雷探査ロボットアームを現地に航空輸送し、現地で組立てて動作を確認した。特に屋内でXYマニピュレータを用いてデータ収集の予備実験を行った後、移動座台にロボットアームを搭載して屋外でも問題なくデータ収集を進められることを確認した。また関係者への実演も行い、現地作業者の意見を伺いながら、地雷原での運用のための安全措置等を考慮した標準実施要領 (SOP) について議論し、INAD との協力関係を深めた。初年度の調査チームには大学院生と学部生が計3名参加しそれぞれ有意義な調査作業を実施した。



写真2 第1回海外学術調査旅行の様子



写真3 第2回海外学術調査旅行の様子

(2) 第2回海外学術調査旅行（平成27年3月22日～3月29日）（写真3）：2014年内に改修が終了したバギー車を2015年1月初旬にアンゴラに向けて海上輸送し、3月7日に予定通りルアンダ港に到着した。しかしながら当初3月23日までにINAD側で受け取りを完了する予定であったが、アンゴラでの通関手続きが通常より時間がかかり、訪問期間中に地雷探査バギー車を受け取れないということが現地到着後に判明した。このため、計画していた地雷探査バギー車とロボットアームの統合試験は次回訪問時に延期することになった。このため、今回はロボットアームの調整と動作確認に注力した。主なメンテナンス作業として、カウンターウェイト内蔵のバッテリーの劣化が認められたため現地でのシールドバッテリーの購入と交換作業、さらにはバッテリー駆動のための充電回路の改修作業が発生した。移動座台にロボットアームを搭載して屋内でデータ収集試験を実施した。他、在アンゴラ日本大使館、JICA(独立行政法人国際協力機構)、そしてAgostinho Neto 大学を訪問し、関係者に本事業について説明し今後の協力関係の構築について話し合った。

(3) 第3回海外学術調査旅行（平成28年3月12日～平成28年3月20日）（写真4）：日本から海上輸送した地雷探査バギー車は2015年（平成27年）3月末に無事INAD側で受け取りが完了し、施設内のコンテナに1年間保管されていた。バギー車のエンジンを長期間始動していなかったため、キャブレターの分解清掃とスパークプラグ調整等の大掛かりなメンテナンス作業が発生した。これらの作業はすべて屋外の木陰で行う必要があった。バギー車にロボットアームを搭載



写真4 第3回海外学術調査旅行の様子

した後、初期姿勢のキャリブレーション、遠隔制御ボックスのリチウムポリマー電池の劣化状態確認（その後、廃棄）等、多くのメンテナンスと調整作業を行った。そして全体システムの正常動作を確認した後、屋外でロボットアームの遠隔操作によるデータ収集試験を実施した。他、INAD 本部敷地内に設置された機械ワークショップ（当時は外部委託業者の管轄であったため、本研究の機材のメンテナンスには使用できなかった）を訪問し、現地派遣技術者と今後の機材のメンテナンス体制等について意見交換を行った。

(4) 第4回海外学術調査旅行（平成29年3月6日～平成29年3月19日）（写真5）：主なメンテナンス作業として、バギー車のエンジン始動が悪かったためスパークプラグを清掃した、制御用コンピュータの CMOS バックアップ用ボタン電池の消耗により BIOS の日付と時刻がリセットされる問題が確認されたので電池を交換した。また、カウンターウェイト内蔵のシールドバッテリーが劣化していたため交換が必要だった。劣化したバッテリーは第2回海外学術調査旅行時に現地で購入して交換した物だったが、今回は同型または類似のシールドバッテリーが入手できなかった。代替として自動車用の12V35Ah バッテリーを2台購入したが、寸法的にカウンターウェイトに収まらないことと、横向きでの使用に適さないためバギー車のドライバーの足元スペースに設置した。これに伴い、新たに電源線をロボットアームの旋回軸中心に配線して運用した。地雷探査ロボットアームの組立と動作確認後、爆薬は取り除いているが信管の金属部を残した状態の実際の地雷を用いて、作業場近くで探査試験を行った。

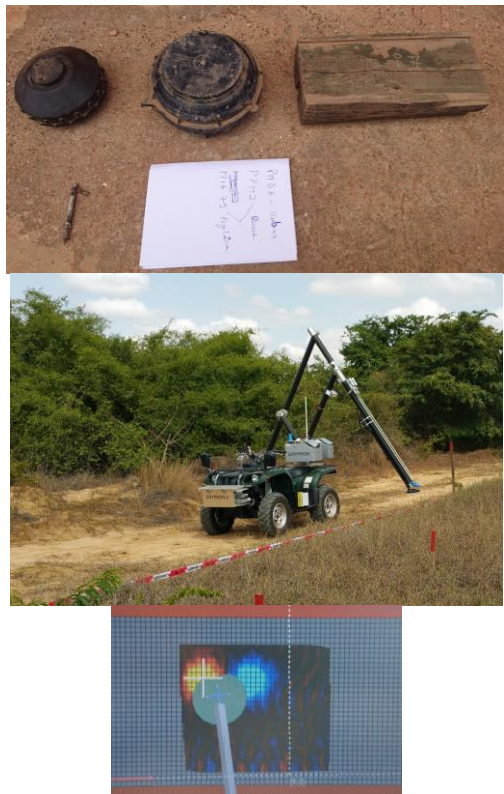


写真5 第4回海外学術調査旅行の様子

(5) 第5回海外学術調査旅行（平成30年3月11日～3月24日）（写真6）：バギー車のエンジンは、キャブレタードレンボルトを緩めてドレンチューブからガソリンが少量流れ出ることを確認した後、ドレンボルトを再度閉めて正常に始動した。ステレオビジョンカメラを使った自動スキャン性能と、金属探知機の姿勢制御性能について確認試験を行った結果、両者に誤差が認められたため、調整作業を行った。カメラのキャリブレーションは比較的水平的な土、セメント、砂利の上で複数回キャリブレーションして結果を比較した。キャリブレーション後、地雷を地面の上に置いた状態で、アームの高さを調整して地雷と金属探知機の距離を変化させながら、作業場近くでデータ収集を行った。また、INADの長官の要請と視察下、INAD敷地内に準備された模擬地雷原（爆薬を抜いた本物の地雷を埋めている）に移動して探知試験を実施し、埋設されていた複数の地雷の探知に成功した。この模擬地雷原で探知した地雷を使い、地面に穴を掘り、埋設深さを変えながらデータ収集を実施した。

#### (6) まとめ

本研究では、ロボットマニピュレータ先端部に金属探知機を装備して自動走査させることによって高精度な空間位置・姿勢情報を含めた信号収集を可能とするシステムを用いて、地雷や金属片の埋設深さ、姿勢、種類や隣接状態を変えながらデータ収集し解析することで金属破片と実際の地雷との判別可



写真6 第5回海外学術調査旅行の様子

能性が高まることを示した。アンゴラ国家地雷除去院（INAD）の長官はじめ関係者は本技術に関心をもっており、今後も協力体制を維持し、データ収集と解析作業を進めていく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 4 件）

- ① Arturo E. Ceron Lopez, Edwardo F. Fukushima, Gen Endo, “Normalizing abstractions of heterogeneous robotic systems by using Roles: usability study in the administration of software and development tools”, *Advanced Robotics*, 査読有, Vol. 30 (9),

2016, pp. 565-584  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01691864.2016.1142896>

- ② Jianhua Li, Gen Endo, Edwardo F. Fukushima, “Hand-Eye Calibration using Stereo Camera through Pure Rotations -Fitting Circular Arc in 3D Space with Joint Angle Constraint”, IEEE Xplore Digital Library (2015 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2015)), 査読有, pp.1-6.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7222499/>
- ③ Jianhua Li, Alex M. Kaneko, Gen Endo and Edwardo F. Fukushima, “In-field self-calibration of robotic manipulator using stereo camera: application to Humanitarian Demining Robot”, Advanced Robotics, 査読有, Vol. 29, 2015 - Issue 16  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01691864.2015.1012555>
- ④ Alex M. Kaneko, E. F. Fukushima, Gen Endo, “A Discrimination Method for Landmines and Metal Fragments Using Metal Detectors”, The Journal of ERW and Mine Action, 査読有, Vol.18, No.1, Article 16, Spring 2014, pp.59-65.  
<http://commons.lib.jmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1094&context=cisr-journal>

[学会発表] (計 5 件)

- ① Jianhua Li, Alex M. Kaneko and Edwardo F. Fukushima, “Proposal of Terrain Mapping under Extreme Light Conditions Using Direct Stereo Matching Methods”, The 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 査読有, Korakuen Campus, Chuo University, Tokyo, Japan, 2014
- ② A. Kaneko, Gen Endo, E. F. Fukushima, “Proposal of Metal Physical Properties Estimation by Curve Characterization of Metal Mine Detector Signals”, The 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), 査読有, Tokyo Big Sight, Tokyo, Japan, 2013
- ③ Arturo Eduardo Ceron Lopez,

Edwardo F. Fukushima, Satoshi Kitano, Gen Endo, “Study of Framework Based on Roles for Application Development of Service Robots”, The 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO2013), 査読有, Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2013

- ④ Jianhua Li, Alex Kaneko, Edwardo F. Fukushima, “Humanitarian Demining Robot Gryphon - Self-Calibration Using Stereo Vision Camera”, 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Tsukuba International Congress Center, Japan, 2013
- ⑤ Alex Masuo Kaneko, Gen Endo, E. Fumihiko Fukushima, “Noise Influence Analysis in Landmine Discrimination by Curve Characterization Method”, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 首都大学東京 南大沢キャンパス, 2013

[その他]

ホームページ等

<http://www.teu.ac.jp/info/lab/project/es/dep.html?id=25>

6. 研究組織

(1)研究代表者

福島 E.文彦 (FUKUSHIMA, Edwardo F.)  
東京工科大学・工学部・教授  
研究者番号：80262301