

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	大型地雷処理車両に着脱可能とする対戦車地雷探査用アームの開発
Title	Development of Detachable Mine Detection Manipulator for Demining Heavy Machinery
著者	石田 悠朗, 雨宮 清, 福島 文彦, 広瀬 茂男
Author	Hiroaki Ishida, EDUARDO FUMIHIKO FUKUSHIMA, SHIGEO HIROSE
掲載誌/書名	ロボティクス・メカトロニクス講演会, , ,
Journal/Book name	, , ,
発行日 / Issue date	2011, 5
URL	<a href="http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html">http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html</a>
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

# 大型地雷処理車両に着脱可能とする 対戦車地雷探査用アームの開発

## Development of Detachable Mine Detection Manipulator for Demining Heavy Machinery

○ 石田 悠朗 (東工大), 雨宮 清 (山梨日立建機), 正 福島 E. 文彦, 正 広瀬 茂男 (東工大)

○ Hiroaki ISHIDA, Tokyo Tech, ishida@robotics.mes.titech.ac.jp  
Kiyoshi AMEMIYA, Yamanashi Hitachi Construction Machinery  
Edwardo F.FUKUSHIMA, Tokyo Tech  
Shigeo HIROSE, Tokyo Tech

This paper describes the design of the attachment for Demining Heavy Machinery, BM307-V23 and the mine detection arm, Field Arm. We propose the concept of demining tasks by collaboration of BM307-V23 and Field Arm with this attachment in order to detect anti-tank mines. Required elements of the attachment are safety for deminers, easy detachability, simple structure and enough strength for long-term use in the mine fields. This paper addresses details of mechanism and structural analysis of the attachment, and some basic experiments for confirming the effectiveness of this concept, strength of the attachment and movement of Field Arm on other platform.

**Key Words:** Demining, Manipulation, Heavy Machinery, Attachment

### 1. 緒言

世界には未だに一億個以上もの地雷が埋められていて、完全に除去を終えるには数百年もの時間がかかると言われている(文献[1])。地雷除去作業に人道的な側面から取り組む人道的地雷除去では、現在でも人手による除去作業が大半を占めている。一方、安全で効率的な除去作業を実現させるために、重機を改造した大型地雷処理車両も数多く開発され、世界中の地雷原で実用化されている。しかし、地雷処理車両を用いた除去率が70~80%と、地雷原で完全に除去を終了したと認められるには未だ大きな差があることが問題とされている。また、事前の探査作業を行わないため、対戦車地雷に接触してしまった場合には地雷処理車両が相当な被害を受けてしまうことも問題となっている。このような背景から、重機を用いた地雷処理においても地雷探知の技術が必要とされている。

本研究室では、Gryphon という市販のバギー車両に自重補償型アーム Field Arm を搭載したロボットを開発し、金属探知機による地雷探知作業の自動化を目指している(図1, 文献[2], [3])。また、山梨日立建機では、市販のショベルカーやダンプカーを改造した BM307 系統の地雷処理車両で既に実際の地雷除去活動を行っている。本研究では、最初に地雷処理車両の BM307-V23 の概要と現状での地雷除去の手順について説明し、次に Field Arm と共同作業を行って地雷探査を取り入れた手法を提案する。さらに Field Arm を地雷処理車両で使用するためのアタッチメントの開発と実際に地雷処理車両で行った実験について説明する。



Fig. 1 Gryphon

### 2. 重機による地雷除去

#### 2.1 BM307-V23 の概要

図2の BM307-V23 は、山梨日立建機により開発された地雷処理車両である。地雷処理車両がスイングタイプとプッシュタイプに分類される中で、こちらの車両は前者に該当する。スイングタイプとはショベルカーを改造したタイプで、アームの先端に地雷の爆破処理用のロータリーカッターを装備し、操縦者は地雷原の外から安全に地雷処理を行えることを特徴としている。対するプッシュタイプはブルドーザーを改造し、大きなロータリーカッターを装備しているため効率の良い処理を可能としているが、車両自体が地雷原に侵入するためにスイングタイプよりも危険度が高い。BM307-V23 のアーム先端にはロータリーカッター以外にも、地雷の処理前に行う植生除去で地面に散乱した植生や不発弾を把持するためのグリップや爆破処理後に散乱した金属片を集めるための大型磁石を備えている。最近では対戦車地雷に接触した際に車両や操縦者に多大な被害が出ることから、現在のアームに更にアームを一本追加して金属探知機を装備したモデルも開発され、今後の実用化が期待されている。

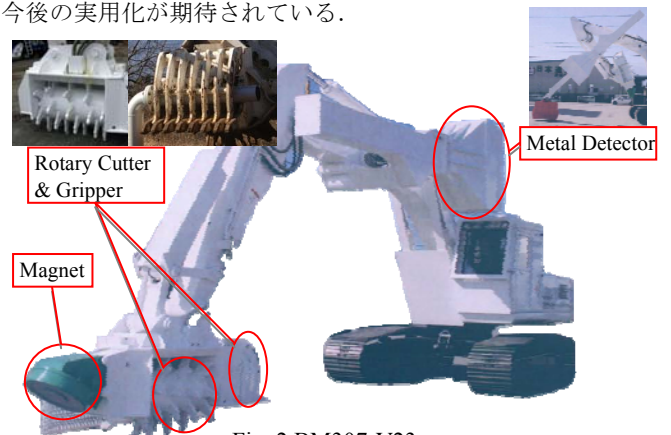


Fig. 2 BM307-V23

#### 2.2 従来の地雷除去方法の問題点

BM307-V23 では、現在、地雷処理において図3のような手順(Standard Operation Procedure : SOP)で地雷除去を行っている。BM307-V23 を地雷原の外側の安全な領域に止めた後、ロータリーカッターで繁殖する植生を除去する。除去した植生

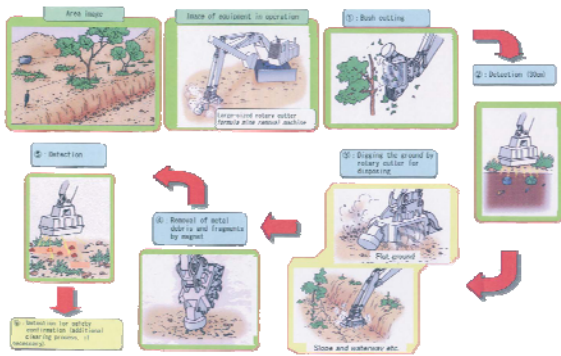


Fig. 3 Standard Operation Procedure

は作業の邪魔にならないように、グリップで把持して地雷原の外側に廃棄する。次に高速回転したロータリーカッターを地面に沿って移動させることで、地雷を爆破処理する。最後に爆破処理された地雷の金属片を大型磁石で回収し、BM307-V23は次の地雷原まで移動する。

現在の方法では対人地雷と対戦車地雷を区別なく爆破処理していくため、対戦車地雷に触れてしまった場合にはアーム全体が損傷し、操縦者を危険にさらす可能性が高い。現在開発中の金属探知機を装備したモデルは以上のことを回避すると共に、爆破処理終了後の残存地雷の探知作業を目的としているが、金属探知機による地雷の判別技術が未搭載であることや大型のアームを取り付けるためのコスト、未発見の対戦車地雷に接触してしまった場合に追加したアーム、金属探知機も損傷を受ける可能性があるなど様々な問題が残っている。

### 3. Field Armとの共同作業

#### 3.1 Field Armの概要

Field Armはカウンターウェイトにより自重補償を実現した3自由度マニピュレータであり、その先端には金属探知機が取り付けられている。この金属探知機からの信号をもとに、信号処理により地中に埋まった金属片と地雷の判別を行う(文献[4])。また、対戦車地雷においては金属探知機による判別をほぼ実現している。

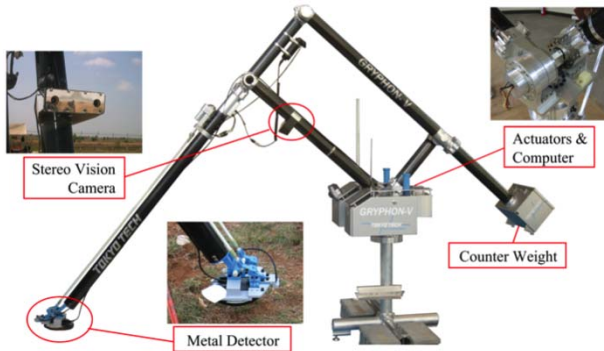


Fig. 4 Field Arm

#### 3.2 Field Armとの共同作業方法に関する考察

BM307-V23と共同作業をする方法としては、既存の金属探知機を装備したタイプのようにFiled Armを車両本体に直接取り付けることが考えられる。この手法ではField Armにより対戦車地雷の探査を実現することができるが、車両本体に直接装着するためのコストや対戦車地雷に接触した場合に両者が損傷する可能性という点で問題が残る。

次にField Armを着脱可能にするアタッチメントを用い、探査作業が必要な時だけ車両に取り付ける方法が考えられる。BM307-V23はアーム先端にグリップを持つため、このグリップでアタッチメントを把持することでField Armによる探査作

業を行うことができる。この方法は探査作業時以外はField Armを地雷原に入れる必要が無いため、地雷に接触した場合の損傷の可能性が無く、さらにアタッチメントのみを製作すれば良いので車両やFiled Armを改造するコストがかからないというメリットもある。またB307-V23に限らず、グリップを持つタイプであれば、他の地雷処理車両にも適応可能である。

以上の考察から、Field ArmとBM307-V23を連結するためのアタッチメントによって地雷探知作業を実現する。

## 4. アタッチメントの開発

### 4.1 設計条件

アタッチメントの設計を行うにあたって、Field Armの稼働範囲との干渉や広い探査範囲を実現するという点を考慮し、アタッチメントの大きな構造は図5のように設定される。アタッチメントに取り付けるField Armには文献[5]で開発したPortable Field Armを用いる。このPortable Field Armは土台を除いた重量が100kg程度で、接続されるアタッチメントは持ち上げられた片持ち梁のような状態でも十分な強度を持つことが求められる。また、実際に運用する際に現場への可搬性や組立のし易さ、メンテナンス性を考慮し、アタッチメントは単純な構造で実現する。さらにField Armが使用されない時には単体で自立できるような構造とする。

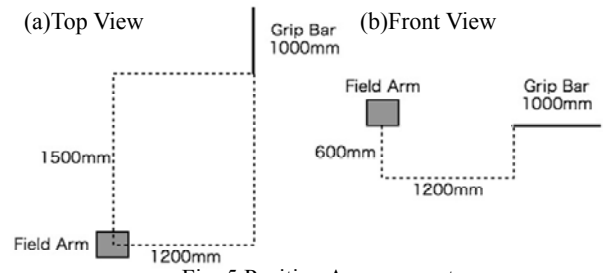


Fig. 5 Position Arrangement

### 4.2 構造材選定

構造材として、アルミフレーム、アルミパイプ、配管用鋼管を選定の対象とした。アルミフレームは細かく分類でき、可搬性や組立のし易さ、フレーム自体は強度的に十分であるものの、ジョイント部分の締結には細いねじを使用するため強度が低下し、多くの補強が必要になって重量増加すると共に後に行うFEMによる強度解析を行いづらいという問題が残る。アルミパイプは軽量で強度も十分であるが、溶接性に大きな問題があるために現地で修理を行う場合に課題が残る。また、パイプ自体がアルミフレームや鋼管に比べて非常に高価であるという点も問題である。最後に配管用鋼管は十分な強度を持ち、非常に安価で溶接もし易いといった特徴を持つ。しかし、重量はこれらの中で最も重くなる可能性があるが、その点は鋼管を分割してユニット化することで十分な可搬性、簡易な組立を実現することとする。

以上の考察をもとに配管用鋼管を用いてアタッチメントの設計を行うこととする。

### 4.3 構造決定

アタッチメントの構造は単純であることが望ましいため、把持部とField Armの設置部を直線で結ぶこととする。また、アタッチメント単体で自立できる必要があるため、転倒防止用の鋼管を別途接続する。この転倒防止用の鋼管は、Field Armの探査範囲が最も近い時に旋回中心から1mの距離であることを考慮して、それより小さな半径0.7mの円の中に収まり、接地点による支持脚多角形が最大となる位置に配置した。

#### 4.4 強度計算

設計したアタッチメントに対して、曲げとねじり、軸荷重がかかった場合の剛体にかかる応力の計算式とFEM解析により強度計算を行った。解析に用いた条件はアタッチメントの先端にField Armの重量100kgを静的に負荷し、把持部全体を固定端としてアタッチメントにかかる最大主応力と最大剪断応力、変位を測定した。ここでField Armの重量を静的に負荷しただけで解析を行ったのは、文献[6]でField Armの姿勢の変化に関係なく重心がアームの付け根付近にあると確認されているためである。

曲げとねじり、軸荷重がかかった剛体棒に関する最大主応力 $\sigma_1$ と最大剪断応力 $\tau_1$ については以下のように記述することができる。ここで、P,M,Tはそれぞれ梁先端にかかる軸方向荷重、曲げモーメント、ねじりモーメントであり、Aは断面積、Zは曲げに対する断面係数、Zpはねじりに対する断面係数とする。

$$\sigma_1 = \frac{1}{2Z} \left\{ M + \frac{P}{A}Z + \sqrt{\left( M + \frac{P}{A}Z \right)^2 + T^2} \right\} \quad (1)$$

$$\tau_1 = \frac{1}{Z_p} \sqrt{\left( M + \frac{P}{A}Z \right)^2 + T^2} \quad (2)$$

FEM解析ではCADデータからPro/Mechanicaを用いて、それぞれの主応力 $\sigma$ 、 $\tau$ と変位について解析を行った。溶接部は十分な強度を持つとして、解析では考慮しない。図6に示すような結果を得ることができる。

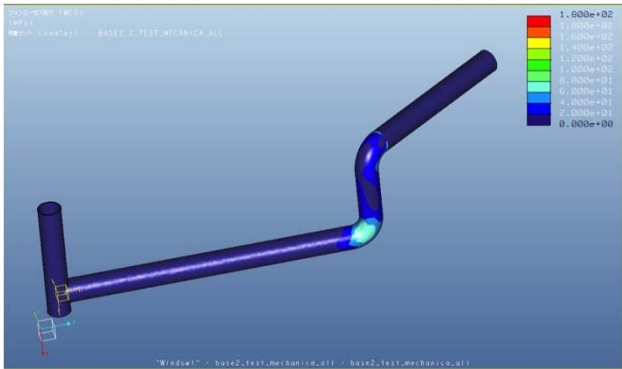


Fig. 6 Structural Analysis by Pro/Mechanica

結果の妥当性を検証するためにアタッチメントのうち2カ所の断面で応力の比較を行った。比較を行った断面は、把持部の付け根の断面(断面1)と把持部から鉛直方向に降りるパイプの断面(断面2)である。この2カ所はアタッチメントの中で大きな応力がかかると考えられる把持部に近い部分でも、パイプの断面が一定で結果の比較が簡単にできるからである。この2カ所のそれぞれの応力の結果を、パイプの呼び径が125A(直径:139.8mm,肉厚:4.5mm)と150A(直径:165.2mm,肉厚:5mm)のものを表1に示す。

計算による結果と解析による結果は、両方の径でほぼ同じ応力を示すことを確認した。その中で断面1は計算結果が解析結果に比べて値が小さく、特に最大剪断応力の結果が大きく異なっている。これは式(1)、(2)や断面1、断面2の位置の違いを考慮すると、ねじりモーメントTの導出が正確にできていなかったこと、さらにエルボの部分の断面形状の変化の影響等が考えられる。しかし、この比較により強度計算によって得られた値は断面1の剪断応力を除き、共におおよそ妥当な結果であると言える。

125A:

	$\sigma_1$ [MPa]	$\tau_1$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]	$\tau$ [MPa]
Section 1	61	17	66~85	51~61
Section 2	67	17	48~66	20~30

150A:

	$\sigma_1$ [MPa]	$\tau_1$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]	$\tau$ [MPa]
Section 1	39	11	40~50	42~53
Section 2	43	11	30~40	10~21

Table 2 Comparison of Structural Strength

次に強度計算で得られた応力と鋼管の引張強度を比較を行った。鋼管の引張強度は290MPaであり、今回計算に用いたモデルは十分な強度を持っていることを確認した。また、変位については最大で2~3cm程度でField Armの探査に影響がない程度のものであることを確認した。

#### 4.5 アタッチメント

以上の考察をもとに製作したアタッチメントの外観を図7に、仕様を表2に示す。アタッチメントは呼び径125Aの鋼管で構成されていて、可搬性を考慮し全体は4つのユニットに分割できる。また、強度計算でも対象となった断面を含むユニットでは、応力を小さくし、さらに疲労に対する強度を向上させるために呼び径150Aのパイプを使用している。



Fig. 7 Attachment

Length[mm]	Width[mm]	Height[mm]	Weight[kg]
3167	1336	850	124

Table 1 Specification of Attachment

#### 4.6 動作実験

まず、製作したアタッチメントのみで組み立てを行った。組み立てはコンクリートで舗装された地面の上で3人で行い、組み立て終了までに必要な時間は10分程度であった。組み上がった状態のアタッチメントは転倒することもなく、転倒防止用のシャフトが機能していることを確認した。

次に組み立てたアタッチメントにField Armを搭載し、Field Armを搭載した状態でもアタッチメントは安定して自立することを確認した。収納姿勢から初期姿勢への移動、ステレオビジョンカメラによる地形情報取得、スキャン、マーキング、初期姿勢から収納姿勢への移動を行い、プラットフォームが異なってもGryphonと同様の地雷探査過程を実現できることを確認した(図8)。また、Gryphonでは地雷探査を行う際にバギーの左側面のみを探査していたが、地雷処理車両で使用するには左右両側に対し探査を行う必要があるため、プログラムを改良することで対応し、Field Armで確認実験を行った。Filed Armはコントロールボックスによる操作で旋回軸周りに任意の角度まで回転し、その位置に対して正面方向の探査が

可能になっていることを確認した。さらに探査範囲もより広範囲とする必要があるため、現在取り入れている探査領域である 1m×2m 以外に 1.5m×1.5m のより広範囲の探査領域を実現できることを確認した。以上の実験により、Filed Arm で任意の方向に対して広範囲な探査を実行できることを確認した。

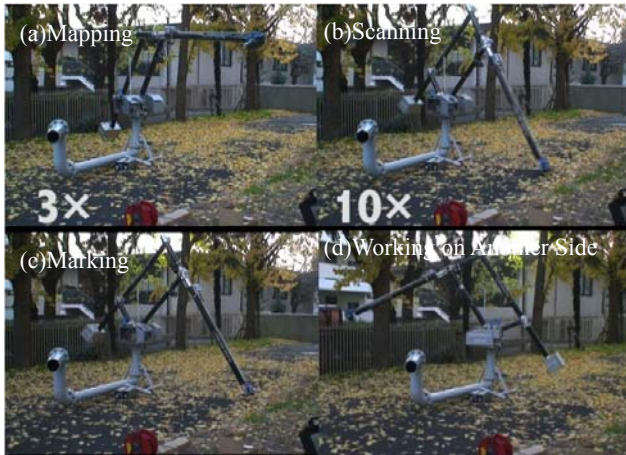


Fig. 8 Experiment

#### 4.7 地雷処理車両との連携実験

Field Arm と製作したアタッチメントを BM307-V23 とほぼ同型機の BM307-V20 を用いて確認実験を行った(図 9)。BM307 の操縦は山梨日立建機の社員 2 名が行い、操縦席からの目視だけでなく車両外からの目視でサポートをしながら実験を進めた。アタッチメントをアーム先端のグリッパで把持し、Filed Arm で地雷探査を行い、作業終了後にアタッチメントをパーズするという共同作業に最低限必要な動作を確認した。持ち上げた状態で把持部がグリッパ内部の余ったスペースで滑りを生じて、徐々にアタッチメントが傾き始めることが見受けられた。特にスキャン過程においてアタッチメントの傾きが顕著に観測された。このスキャン過程で大きく滑りが生じるのは、Field Arm がスキャンの動作で重心の位置が少しではあるが徐々に変化し、把持部に対して動的な荷重がかかるためと考えられる。現時点では滑りが生じることにより操縦者により BM307-V20 のアーム先端の角度を調整して対応している。

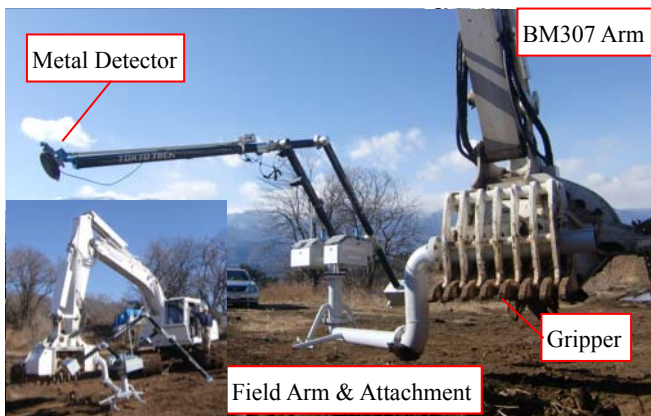


Fig. 9 Experiment with BM307-V20

実験終了後、アタッチメントの強度に関して目視による確認を行った。アタッチメント全体では大きな変形は見られなかったが、グリッパの端部と接触していたと考えられる把持部の表面に 1~2mm の凹みを確認した。これはアタッチメントがグリッパ内部で滑った時に、把持部がグリッパの端部に押し付けられて想定以上の荷重がかかったために塑性変形が生じたと考えられる。



Fig. 10 Dent on the Pipe

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では、地雷処理車両と Field Arm が共同作業を行うためのアタッチメントの開発と実験を行い、コンセプトの有効性を確認した。

今後は実用化に向けて試験を行うと共に、アタッチメントに滑りが生じないようにより大型の把持部を製作することやアタッチメントの実用化に向け、疲労強度を測定すること、車両側から Field Arm への電源供給の方法の検討をすることなどが挙げられる。また、アタッチメントの把持では操縦席からの目視のみでは把持の位置を特定しづらいといったことも確認されたため、安全に作業を進めるためにも操縦者のサポートを行うシステムを追加することも考えられる。

#### 文 献

- [1] 長有紀枝, “地雷問題ハンドブック”, 自由国民社, 1997.
- [2] 福島 E. 文彦, デネベストバウロ, 東條佑紀, フレーゼマーク, 滝田謙介, ラドイッヒヘルムツ, 降旗直太, 津久井慎吾, 玉田守, 三浦有信, 広瀬茂男, “移動型遠隔操作アームによる地雷探査除去支援システムの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 予稿集, pp1P1-N-046, 2005.
- [3] 福島 E. 文彦, 広瀬茂男, “人道的地雷探査システムの実用化に向けて -遠隔操作アーム搭載バギー車両 GRYPHON の開発-”, SICE 「計測と制御」, Vol.45, no.6, pp.529-534, 2006.
- [4] 成田哲也, 福島 E. 文彦, 広瀬茂男, “Study of Discrimination Methods for Metal Fragments and Mines in Humanitarian Demining Tasks”, The 2010 International Symposium on Intelligent Systems (iFAN 2010), Paper No. 542, Sep. 25-26, 2010
- [5] 相原孝俊, 松澤俊明, 福島 E. 文彦, フレーゼマーク, グアラニエリミケレ, 玉田守, 広瀬茂男, 三浦有信, “重力補償型ポータブルフィールドアームの開発” ロボティクス・メカトロニクス講演会 '08 予稿集, pp. 1A1-H01
- [6] Yuki TOJO, Paulo DEBENEST, Edwardo F. FUKUSHIMA, Shigeo HIROSE, “Robotic System for Humanitarian Demining Development of Weight-Compensated Pantograph Manipulator”, Proc. ICRA, New Orleans, pp. 2025-2030, 2004