消防防災用ロボットベース FRIGO-M の開発と試験配備による評価

Development and Trial Deployment of Track Robotic Unit "FRIGO-M" for Fire Fighting and Rescue

○正 天野 久徳 (消防研) 岡田 隆光 (三菱電機特機シス)
福島 徹 (三菱電機特機シス) 矢野 寛 (三菱電機特機シス)

Hisanori AMANO, National Research Institute of Fire and Disaster, amano@fri.go.jp
Takamitsu OKADA, Mitsubishi Electric TOKKI Systems Corporation, takamitsu.okada@east.melos.co.jp
Toru FUKUSHIMA, Mitsubishi Electric TOKKI Systems Corporation, toru.fukushima@east.melos.co.jp
Hiroshi YANO, Mitsubishi Electric TOKKI Systems Corporation, hi-yano@east1.melos.co.jp

We had developed FRIGO-D as a basic track robotic unit for research and development, especially for fire fighting and rescue robots. Some fire departments interested in our development, and requested that they needed to use FRIGO-D in an actual activity. However, FRIGO-D doesn't have enough performance for actual activities. Then, we developed FRIGO-M of heavy-duty FRIGO-D for actual fire fighting and rescue activities. After that, we had trial deployments of FRIGO-M for some fire departments. The fire departments checked FRIGO-M performance from the point of view that they use FRIGO-M in actual activities. We improved FRIGO-M's weak points based on their reports. Now, FRIGO-M is one of the useful track robotic units for actual fire fighting and rescue activities.

Key Words: Disaster Response Robotics, Mobile Robotic Unit, Actual Use, Fire Fighting, Rescue

1. はじめに

消防防災用ロボットの研究開発に利用する移動体ベースとして、著者らは小型クローラロボットベース FRIGO シリーズを開発した。FRIGO シリーズのうち R 型はシステムの拡張性を重視し、研究重視の仕様となっている。一方 D 型については、開発指向を重視したパッケージングとしている。この D 型に対して、いくつかの消防本部から実戦配備への要望が寄せられた。そこで、現場での利用を想定し、D 型に搭載できる検知機ユニットの試作も行った。その一例として、ガンマ線、燃焼性ガス、および神経ガス検知機をユニット化し、D 型に搭載したタイプの試作も行った。

しかし、消防防災用として実戦で使用するためには、耐環境性の点において十分といえない。あくまでも、D 型は開発用のテストベースとなる移動体として開発されたからである。そこで、実用機として使用可能な、耐環境性能を高めた実用化機のプロトタイプを試作した。さらに、これを試験的に消防本部に配備し、運用の可能性の検討を行い、改良の試作を進めた。この結果、一定の知見および成果が得られたので報告する。

2. 実用型の試作

2.1 FRIGO-D の概要

研究開発用として開発した移動ロボットベース FRIGO-D^[1]の概観を Fig.1 に、諸元を Table 1 に示す。FRIGO-D は移動体であるので、これに機能を加えることにより、各種の遠隔操作型ロボットとして使用することができる。たとえば、Fig.2 に示すように、各種検知機が着脱可能なユニットを取り付けることにより、ガス噴霧災害時の情報収集ロボットとして利用することができる。ここでは、複合災害を想定して、ガンマ線、燃焼性ガス、および神経ガスの 3 種類の検知機をユニットに取り付けている。

2.2 実用型試作と条件の検討

前項で紹介した FRIGO-D を基に、実戦使用に耐えうる移動ロボットベースの開発を行った。FRIGO-D を基としているの

で、小型軽量、単純な操縦、安価^[2]を最も重要な仕様と考え、寸法効果の大きい階段の昇降については積極的には考慮しないこととして開発を進めた。

ここでは、実戦に耐えうる条件として、防水性、防塵性、耐衝撃性を考慮した。さらに、実戦で使用するにあたり、操縦の容易性、単純化に努めた。また、実戦配備においては維持管理の簡便性も重要であり、維持管理の交換部品を極力少

Fig.1 Overview of FRIGO-D

Table 1 Specifications of FRIGO-D

Dimensions	375(L) x 320(W) x 120(H) ^{*)} [mm] (*)Excepting antenna
Mass	9.6[kg]
Track width	94[mm] (standard), 140[mm] (wide)
Motor	27.5[W] x 2, Reduce ratio 42:1
Battery	Lithium-Ion, 28.4[Wh] x 4
Camera	Color, 250[kpixel] with LED light

(a) Overview

(b) Sensors on board

Fig.2 FRIGO-D equipped with sensing unit

なくする事としている。なお、実用化を進めるためには、性能に応じた市場性も必要であり、導入コストとして、200~300万円^[2]を一つの目安とした。

消防防災用としては耐熱性も重要な仕様であるが今回は、実用機開発の第一段階として、考慮しないこととした。防爆性は最終的な段階では何らかの考慮が必要と考えられるが、現時点では積極的には考慮しないこととした。

2.3 本体の概要

試作したクローラ移動機構 FRIGO-M^[3]の外観を Fig.3 に、諸元を Table2 に示す。大きさは、長さ 437[mm]、幅 350[mm]、アンテナを除いた高さ 152[mm]、最低地上高 37[mm]、重量は 12[kg]である。本体後方に 2 本あるアンテナは、1 本がカメラ画像の送信用、残りの 1 本が操縦用のデータの送受信となっている。カメラ画像用には 1.2GHz 帯の SS 無線を、操縦用には IEEE802.11g 無線 LAN を利用している。

耐環境性能としては、防塵・防水性能が IP67^[4]相当、耐衝撃性能は、NDS C 110E に規定されている地上用の電子機器の最高性能 A 区分^[5]相当を有している。防爆性能は、既存の性能基準を満たすに至っていないが、防水・防塵性能が IP67 という高度な密閉性を確保しているため、これに相当する防爆性能があると考えている。

制御用として、組み込みコンピュータ H8S を採用した。操縦装置からの無線 LAN 経由で受信し、RS232C 形式の信号に変換してコンピュータに入力している。モータは速度制御とし、コンピュータからの出力信号を H ブリッジ回路にて増幅し、モータを制御している。なお、起動時のモータ電流が大きくなることを避けるために、モータ電流を A/D 変換器を通してコンピュータにフィードバックし、緩起動する制御も取り入れている。

本体側面中央、両側にある蓋を開閉し、バッテリーを挿入する構造となっている。電源には模型用として一般的に市販されている Ni-MH を用いることによってコストダウンを図っている。連続稼働時間は、標準的な使用法において、1 時間以上である。モータには 43:1 の減速比のギア付き、27.5[W] の DC モータを採用している。右側のクローラは前方のスプロケットにより、左側のクローラは後方のスプロケットにより駆動している。モータおよびギアが、前後対称の配置となっている。このようなバッテリー、モータの配置をとることによって、重心と寸法中心とが一致し、良好な移動性能を実現できている。しかしながら、左右の履帯の機械的駆動方法が異なるので、組立を工夫し直視性を担保している。なお、モータ制御には専用に製作した回路を使用している。履帯にはゴムベルトを採用し、ベルトのパターンは独自の設計としている。

主な基本性能は、最高移動速度 1.0[m/s](3.6[km/h])、乗り越え段差 85[mm]、斜面の最大登坂角は $\pi/4$ [rad]以上、横転角は $\pi/3$ [rad]以上である。階段を登ることはできないが、蹴上げ 175[mm]の階段、段差を降りることは可能である。本体内部には操縦用のカメラ 1 台と前照灯として高輝度 LED が 4 灯備えられている。この LED は電源投入の表示、及び、操縦装置との通信確立を表示する機能を兼ねている。最大搭載可能重量は 8.0[kgf]であり、最大積載時においても最高移動速度で移動可能である。

2.4 操縦装置の概要

操縦装置は、市販の耐環境性の高いラップトップコンピュータを利用している。操縦装置の外観を Fig.4(a)に示す。ラッ

Fig.3 Overview of heavy-duty track mobile unit; FRIGO-M

Table 2 Specification of mobile robot base

Dimensions	437(L) x 350(W) x 152(H) ^{*)} [mm]
	*)Excluding antenna
Mass	12.0[kg], Including batteries
Protection	IP67
Track	Material; rubber, Width; 120[mm]
Motor	27.5[W] x 2, Reduce ratio 43:1
Battery	Ni-MH, 25.9[Wh] x 4
Camera	Color ,250[kpixel]
Light	High-luminance LED x 4
Maximum speed	1.0[m/s]
Payload	8.0[kgf]

(a) Overview

(b) Operation keypad

Fig.4 Operation control unit of FRIGO-M

ブトップコンピュータにゲーム用の操作装置を接続し本体の操縦を行うシステムとした。操作装置は、Fig.4.(b)に示すように、片手で扱えるものとした。Fig.4(a)では、操縦者の手の中に収まっているため見えていない。本体に内蔵されているカメラ画像を受信するために、専用の受信装置が必要であり、この装置のために、移動体本体に利用しているバッテリーと同型を 1 本使用している。受信された画像は、キャプチャー装置を介してコンピュータのディスプレイ内に表示される。ゲーム用操作装置およびキャプチャー装置からの入力端子には USB を利用している。ラップトップコンピュータは防水、防塵性能が備わっているが、USB コネクタを接続することにより、接続部分の耐環境性が保証されなくなってしまう。このため、USB コネクタ部分をカバーし、IP33 相当の防水、防塵性能を操縦装置全体で確保できるよう改良している。

操縦は Fig.4(b)に示した操作装置から、速度の切り替えス

ッチ、左右の超信地旋回スイッチ、前後左右の移動は十字スイッチで行う。十字スイッチは、前後方向を押すことにより前後進、左右方向を押すことにより、各方向の信地旋回を行う。なお、斜め方向に押すことにより、滑らかなカーブを描いて移動する操縦も可能である。速度の切り替えスイッチは左スイッチを押すことにより、低速→中速→高速→低速の順で切り替える方式としている。

3. 消防本部における性能評価

開発した移動ロボットベースを、都市部を所管、都市部と工業地帯とを所管、大規模な石油コンビナートを所管する消防本部、計3消防本部に貸与し、実用上の性能評価を依頼した。なお、評価方法については受け入れ消防本部に任せた。ある消防本部では、救助隊に実際に試験配備して隊員からの意見を聴取している。また、ある消防本部では、実際に活用が想定される現場にて使用し評価を行っている。

まず、試作した移動体を試験的に使用して、基本的な移動能力を検証し、この移動能力に応じた事案の想定を行った。その結果、ガス漏れ、工場敷地内における危険物質の漏洩、洞道における災害発生時の情報収集に有効ではないかとの意見があった。これらの災害想定を基に、より細かい性能評価を進めた。

当初の開発目的通り、軽量、コンパクトである点、については、隊員1人での運用が可能となるため、高く評価された。また、通常の屋外ばかりでなく、泥沼地、積雪地、水たまりがある状況下での試験においても機能に支障がなく、防水、防塵性能が十分であることが確認された。走行に履帯を採用しているため、路面があれた状況でも十分な走行性能があることも評価された。試験評価実験中の階段や急斜面などでの転落事故等が発生したが、そのまま走行を継続することができ、耐衝撃性、堅牢性が証明された。

一方で、想定されている災害に対応するためには、各種検知機の搭載、バッテリー残量の表示、音声通話、手袋装着による操縦への対応の要望が挙げられた。これらの指摘事項について改良を進めた。

既に説明したように、開発当初から、小型軽量化することを重視し、階段昇行を対象としない事を前提に開発した。試験配備においても事前に説明しているにもかかわらず、階段昇行能力に対する要望も挙げられた。現場としては強い要望があることが窺える。また、防爆性能については、何らかの性能保証が求められている。

4. 改良の検討

前項で種々の要望を受けているが、ここではいくつかの要望に対応する検討を進め、改良を行った。改良した移動機構本体の概観を Fig.5 に示す。改造前のロボットと比較して、高さが260[mm]、質量が15[kg]となっている。本体質量が増えた分、搭載可能重量が5[kg]と減っている。

4.1 検知機の搭載

検知機の搭載については、検知機をロボット本体に組み込む事も一案である。しかしロボット内に組み込むことになると、検知機を専用に用意する必要があり、高コストとなる恐

Fig.5 Overview of improved FRIGO-M

(a) Normal (b) Empty

Fig.6 Battery state monitor LED

Table 3 Buttery voltage and LED signals

LED Color, state	Buttery voltage [V]		Estimated lifetime [min]
	Control	Motor drive	
Green on	> 7.3	> 21.0	> 15
Red, slow blinking	> 7.0	> 20.0	15 >
Red, fast blinking	> 6.8	> 19.5	3 >
Red on	6.8 >	19.5 >	0

れがある。そこで、消防本部が既に配置使用しているものを利用し、必要に応じてロボットに装着することとした。取り付け外しが容易な構造とし、危険性が低ければ隊員が検知機を所持し使用する運用を想定した。Fig.5では、一般的な消防本部で用いられている理研計器製のガス検知機が取り付けられている。ガス検知器は防爆、IP54程度の耐環境性があるが、周囲の気体を吸入し検知するため、吸入部分の防水性は期待できない。架台には、各種の検知機が取り付けられるよう、取り付け穴が全面に開けられている。

検知機の検知データの伝送は、検知機から電気信号として取り出すことができると、比較的少ない情報量によって操縦装置へ伝達できる。一方、各消防本部で使用している各種の検知機に対応するためには、必ずしも検知データを電気信号として出力できないことも考えられる。より多くの消防本部での利用が可能となるように、汎用性を重視し、検知機の表示部をカメラで撮影し、画像によって検知機の計測データを操縦装置へ伝送することとした。これは、データ量の増大によって画像伝送の遅れを引き起こす原因となる。これについては次節で再度検討する。

中央部にアクリルのドームを設置し、ドーム内に3台のカメラを設置した。カメラで検知機表示部を撮影し、映像を操縦装置へ伝送することにより、検知状況を操縦装置で認識する。最大3台の検知機に対応でき、また、検知機の搭載台数が少ない場合、操縦用カメラの補助として、画像を利用できる。Fig.5から分かるように、ドーム周囲には衝撃からドームを守るための柱が設置されている。

この改造で、無線法規の厳密な遵守を意識して、カメラ映像の伝送方式を変更した。本体内の操縦用カメラ、検知機用の3台のカメラの画像伝送を、操縦用と同じ IEEE802.11g 規

格の無線 LAN に変更している。無線装置を 1 台に簡略化することができている。なお、各種画像は、Motion JPEG 規格に基づいて、データを圧縮し操縦装置に伝送している。

4.2 バッテリー残量の表示

電源として汎用の市販品を用いているため、充電済みを表示する機能がバッテリーに備わっていない。そのため、取り付けるバッテリーの充電状態を確認することができない。そこで、本体側にバッテリーの電圧表示機能を取り付けた。

既に防水、防塵性能を実現しているため、新たに外部への表示部を設けることが難しかった。そこで、前項で説明した、カメラを設置したドーム内に表示用の LED を取り付けた。取り付けた表示用 LED を Fig.6 に示す。移動ロボットベース本体に装着する 4 本のバッテリーのうち、1 本を制御用、3 本をモータ駆動用に、それぞれ独立した電源として使用している。そのため、それぞれの電源状態を別々に表示できるよう、2 個の LED を設置している。Fig.6 の右の LED が制御用、左がモータ駆動用のバッテリーの状態を表示する。単に満充電状態を確認するだけでなく、Table3 に示すように充電残量に応じて LED の色と点灯によって表示する。バッテリーが健全な状態では、Fig.6(a)に示すように緑色に点灯する。15[min]稼働可能相当、制御回路用では 7.3 [V]、モータ駆動用では 21.0 [V]を下回ると、0.5[秒]ごとに点滅する。同様に稼働残り時間 3 [min]相当となる電圧を下回ると、0.1 秒の点滅となる。稼働不可能となる電圧では、Fig.6(b)に示すように赤点灯となる。

4.3 音声通信

音声通信については、特定小電力トランシーバを積載することにより実現した。現時点では、特定小電力 420[MHz]帯の市販されているトランシーバを利用している。トランシーバ自体が IPX7 の防水性能があるものを採用しており、トランシーバの取り付けによって、移動機構本体の耐環境性を低下させないよう考慮している。なお、トランシーバ自体は移動体から独立しており、別途電源投入が必要であり、現在のところ、乾電池で駆動するものを採用している。4.1 で説明した、架台にトランシーバを取り付けた状況を Fig.7 に示す。

4.4 操縦装置

操縦装置については、小型のゲーム用操作装置から、両手で保持する形状のゲーム用操作装置に変更している。操作装置のジョイスティックのストロークが大きくなり、操作量を意識できるようになったので、操作量に応じてスピードを可変的に制御できるよう、操縦装置側の操縦ソフトウェアを改良している。なお、操作装置の操作スイッチが多くなっているが、操縦する機能は増えていないため、機能が割り付けられていない操作スイッチが多くなっている。また、ここで取り付けている操作装置の他に、より大きなジョイスティックタイプへの対応も行っている。

5. 今後の課題

現時点でいくつかの課題が残されており、ここに整理する。まず、第 3 章で移動能力としての階段登坂、防爆性能の保証について指摘を受けている。さらに、第 4 章で行った改良によって、多くのカメラを同一の無線波で操縦装置へ伝送するため、積載カメラの画像遅延が大きくなり、操縦性が低下した。これらの問題点については、順次検討を進めることとし

Fig.7 Voice communication system

ている。危険領域へ近づかずにロボットを活用するためには、より遠距離から操縦できる必要がある。現時点では、より遠距離からの無線操縦に関して可能性を検討しているが現時点では有効な方策が見いだせていない。また、改造前の状態では、本体ボディ全体を履帯が覆う形状となっており、履帯が落下衝撃時クッションの役割も果たしていた。改造後、カメラドームを設けたことや、架台上に種々の機器を取り付けることによって、衝撃に対する堅牢性を再検討する必要があると考えられる。

6. おわりに

開発用として製作したクローラ移動ユニット FRIGO-D を基に、実用に耐える耐環境性能を持った FRIGO-M の開発を行った。さらに、開発した FRIGO-M を消防本部に試験配備し、性能評価を行った。FRIGO-M の移動能力を検証した上で、貢献度合いが高いと思われる災害をいくつか想定し、実運用において評価できる性能および不足している性能に関して指摘を受けた。この性能評価を基に改良を加え、いくつかの問題点について解決することができた。現時点で、全ての問題点について解決できているわけではないが、実際の災害現場で使用でき、かつ何らかの効果を上げることのできるロボットベースを開発できた。

謝辞

FRIGO-M の評価にあたり、札幌市消防局、堺市高石市消防組合消防本部、四日市市消防本部に協力頂いた。ここに記し謝辞とする。

文献

- [1] 天野久徳, “消防防災ロボットの配備促進への一提案”, 消防研究所報告, No.100, pp.265-270, 2006.
- [2] 天野久徳, “移動ロボットベース“FRIGO(フライゴー)”シリーズ”の開発”, 消防研究所報告, No.100, pp.111-117, 2006.
- [3] 岡田隆光, 福島徹, 矢野寛, 天野久徳, “災害現場で二次災害を防ぐ遠隔操作型情報収集器材「小型クローラ」移動ロボット FRIGO-M”, 第55回全国消防技術者会議資料, No.55, pp.83-88, 2007
- [4] JIS C 0920 / IEC60529, 2003
- [5] NDS C 0110E, 2004