

レスキューロボット UMRS2010 搭載消防探査用システムの開発

八島裕紀 * 極樂地恭平 * 小林滋 ** 藤長大祐 *** 高森年 ***

Development of Search System on Rescue Robot UMRS2010

Yuki YASHIMA* Kyohei GOKURAKUJI* Shigeru KOBAYASHI**
Daisuke FUJINAGA*** Toshi TAKAMORI***

ABSTRACT

A rescue robot is used in order to ensure the safety of the rescue team member who works in a disaster site, and search for disaster victims efficiently. However, since a disaster site has the possibility of fire, explosion, and an outflow of a harmful substance, the site is in an unknown environment. In this study, we aim at developing rescue robot “UMRS2010” which can work under adverse environment and can get the information on the site. We decided to make the robot which was based on rescue robot “UMRS2009” developed mainly by IRS, and took in explosion-proof structure. Now, we have finished making the robot body and the prototype of the system which can check the combustible sensor etc. that are carried on the deck of the robot by remote control. For the future, we will conduct the performance evaluation test of the robot equipped with the sensor system jointly with Kobe City fire department.

Keywords: UMRS, rescue robot, anti-explosive, ambient measurement, ambient monitoring

1. はじめに

阪神淡路大震災や東日本大震災をはじめ、我が国は非常に地震の多い国といえる。海外でも、中国・四川大地震やインドネシア・スマトラ島沖地震などが発生しており、地震による被害は人々の生活に大きな影響を及ぼす。地震以外の災害では近年、異常気象によるゲリラ豪雨やそれらに伴う土砂災害、ハリケーンなどによる自然災害が多発している。一方で、人為的な災害（テロリズムなど）も多く発生している。このような天災や人災によって発生した災害現場は瓦礫の崩壊などの危険性のほか、可燃性ガスの漏えいによる火災や爆発、人体に有害な物質の流出といった外部からは予測が困難な環境下にあることも十分に想定できる。これらの状況下で二次災害によるレスキュー隊員の事故防止、効率的な被災者の探索等のために、レスキュー隊員の侵入に先行してレスキューロボットを現場に送り込むことが有効である。しかし仮に現場が、可燃性ガスと空気が混合し、爆発限界内の雰囲気（以下、爆発性雰囲気という）が形成された状態となっている場合、安全対策を取っていないロボットでは自らが着

火源となって爆発を引き起こす可能性がある。またレスキュー隊員が侵入可能な環境か、または人体に有害な環境かどうかの判断を下すセンシングが必要となる。

本研究室では、国際レスキューシステム研究機構（IRS）におけるレスキューロボット UMRS（Utility Mobile Robot for Search）シリーズ^{(1),(2)}の開発に参画しており、既に開発されている2009型が2010年9月から2011年2月まで神戸市消防局にて試験運用され、このロボットにおいて消防局から、災害現場での活用を前提とした改善すべき点が指摘されている。そこで本研究では、指摘された項目に対する対策として、2009型の走破性を維持しながら爆発しにくい性能を持つロボット「UMRS2010」を開発することを目的とした。また消防局からの要望により、レスキュー隊員の代わりに現場の環境センシングを行えるようなシステムを開発し、UMRS2010への搭載を目指した。

2. 防爆について

2.1 防爆の基本概念 防爆で対象とする爆発は、可燃性ガスと空気が混合して生成される爆発性雰囲気と、アーク放電・火花放電といった着火源が同時点共存することで引き起こされる。すなわち両者のうちの一方が単独で存在しても爆発は誘発されない。したが

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

*** 国際レスキューシステム研究機構

って爆発性雰囲気形成を排除するか、あるいは着火源となりうる電気エネルギーの発生を抑制することで爆発の発生を防ぐというのが防爆の基本概念である⁽³⁾。

2. 2 開発するロボットの基本条件 本研究で開発するロボットは、爆発性雰囲気内で活動しても爆発を誘発しない、防爆仕様を備えることを目的としており、ロボット自らが着火源とならないような構造とする必要がある。そのため以下に示す項目を開発上の基本条件とした。

- (1) 通常時ロボット自らはできるだけ火花を出さない
 ロボットは駆動するために電気エネルギーを用いるため、これに起因して火花が発生する可能性がある。したがってできる限り火花の発生を抑制するか、ロボット内部に爆発性雰囲気が形成されないように外部気体が侵入するのを防ぐ必要がある。
- (2) 静電気による火花をできるだけ出さない
 ロボットのボディは走行している間に周囲の物体と接触することが想定される。接触時にボディに電荷が帯電し静電気が発生するが、この静電気が放電する際に火花を生じると着火源となって爆発を引き起こす可能性があるため、できる限り静電気による火花の発生を抑える必要がある。

3. ロボット車体の設計変更

本研究の対象となるロボット UMRS2010 は、既に開発されている実用化プロトタイプモデルである UMRS2009 を基に開発が進められている。ここでは、UMRS2010 のフリッパーアームおよびフリッパー駆動系の設計変更、また車体表面の改良について述べる。図 1 に UMRS2009 の外観を示す。

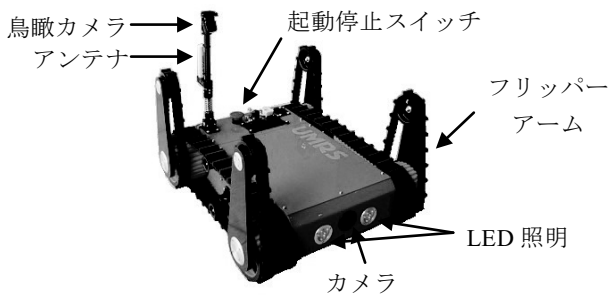


図 1 UMRS2009

3. 1 フリッパーアームの設計変更 階段の段差や瓦礫などを上る際に必要なフリッパーアームについて、2009 型では収納性の高さからアームの先端が細い形のものを使用している。しかし先端が細い形状のアームの場合、瓦礫等の上を走行する際にアームの先端が瓦礫等の隙間に引っかかりやすくなるという欠点がある。そこで 2010 型のアームでは、先端の車輪(従輪)の径を根元のプーリの径と等しくなるように大きくすることとした。

また、ロボットの特性として、ロボットが階段を昇

降する際は、ロボットの前方・後方アームのベルト下面、ロボット本体のベルト下面が、常に段鼻(階段の蹴上と踏板が交差したところ)の 3 点に接触した状態であれば、ロボットは安定して階段を昇降できる。そのため短いアームよりも長いアームの方がより安定して走行できると考えられるが、アームが長すぎるとロボット全体の重さが増加して走行時にロボットに掛かる負荷も増大してしまう。これを考慮し、アームには、従輪とプーリとの軸間距離が短いものと長いものの 2 種類を用意することにした。短いものはアームに取り付けるクローラベルトを 2009 型のものと同長さにして互換性を持たせることで、アームのベルトが破損しても 2009 型のベルトが代用可能となる。一方、長い方のアームはベルト表面の歯数を一つ増やし、そのベルト延長量に合わせてアームの長さも延長した。設計変更前と変更後のアームを図 2 に示す。また設計変更後のアームの仕様を表 1 に示す。

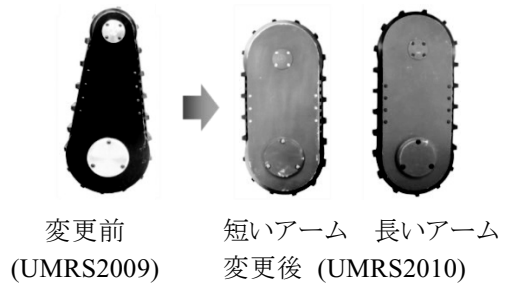


図 2 フリッパーアームの比較

表 1 設計変更後のフリッパーアームの仕様

| | 短いアーム | 長いアーム |
|--------------------|------------|------------|
| 大きさ(W×H×L) [mm] | 42×140×314 | 42×140×333 |
| 軸間距離 [mm] | 172 | 191 |
| 重量 [kg] | 1.0 | 1.2 |
| クローラベルトの歯数 | 20 | 21 |

3. 2 フリッパー駆動系の設計変更 2009 型では、フリッパー駆動用モータに DC モータを使用しているが、DC モータは構造上、回転時に整流子とブラシが接触するため接触火花が発生し着火源となりうる。このことから 2010 型では気密性の高いボディとするが、仮に可燃性ガスがロボット内部に侵入してきても発火しないように、駆動用モータにはブラシを必要としないブラシレス DC モータを使用することにした。なおフリッパーアームはロボットの前方と後方の左右両側にあり、前後をそれぞれ独立して動かすためモータとその伝達系を 2 セット使用した。

モータ選定のため、モータに必要なトルクの計算を行った。フリッパー駆動部に最大のトルクがかかるのは、ロボットがフリッパーアームを用いて自らの車体を持ち上げる時である。フリッパーアームを用いてロ

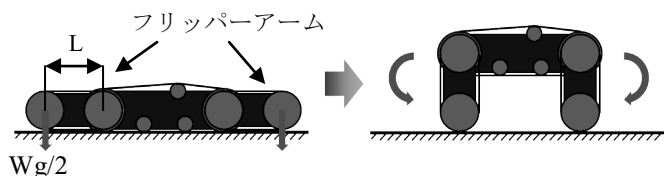


図3 フリッパーアームによりロボット車体を持ち上げる様子

ロボット車体を持ち上げる様子を図3に示す。

この時、フリッパー駆動軸1本あたりに発生するトルク T_F は、

$$T_F = \frac{W}{2} \times g \times L \quad (1)$$

で求められる。ここで、 W はロボットの自重、 g は重力加速度、 L はフリッパーアームの長さ（軸間距離）である。

フリッパー駆動軸は歯車を用いて、モータと組み合わせた減速機に繋げる。モータとフリッパー駆動軸との減速比を γ とするとモータに必要なトルク T_M は、

$$T_M = \frac{1}{\gamma} \times T_F \quad (2)$$

となる。

2009 型がオプション機器を搭載した場合の重さを参考に、ロボットの自重 W を 36 kg とした。またフリッパーアームの長さ L については、必要トルクが大きくなる長いタイプのアームを用いて 0.191 m とした。減速比については、2009 型のフリッパー駆動部で用いられている実績のある値と同じ $\gamma = 120$ となるように設定した。これらの数値を用いて式(1)を計算すると、 $T_F = 33.6924 \text{ Nm}$ となり、これを式(2)に代入すると、 $T_M = 0.28 \text{ Nm}$ となった。

算出されたモータに必要なトルク T_M ならびに、ロボット車体内部のスペースを考慮して今回は、マッスル株式会社の CM2-□-60A10A というモータ（定格トルク：0.32Nm）を選定した。また、このモータに組み合わせる減速機として減速比が 60 のものを選定した。トルク計算時に減速比 $\gamma = 120$ と設定したため、これに合うように減速機とフリッパー駆動軸を繋げる歯車の選定も行った。なお、使用モータや減速機の変更に伴い、フリッパー駆動部の設計変更も行った。

3.3 ボディ表面の塗装 2009 型では行っていなかった静電気対策として、2010 型のボディ表面には導電塗料による塗装を施した。これは本体外部に電荷が帯電して静電気による火花が発生するのを防ぐため、このボディにアースをとり地面との電位差をなくすることで静電気の発生を防ぐことができるとわかっている。そのため、導電性のワイヤーをボディに取り付けて地面に垂らして運用する。

4. UMRS2010 の概要

先に述べたようなロボット車体各部の設計変更を経

て、本研究のベースとなるロボット車体の製作を行った。製作したロボット UMRS2010 の外観を図4に示す。また 2009 型と 2010 型の仕様を表2に示す。

2010 型は 2009 型を基に設計製作したロボットであり、2009 型が消防局での試験運用を通して指摘された改善すべき項目に対する対策として、ロボット車体に防爆性能を持たせた。これに伴い、主にロボットの駆動用モータが大型化したことで 2010 型の車体重量は 2009 型よりも 9kg 増加した。しかし、ロボットの最高速度と登坂能力は 2009 型と同等であり、2010 型は 2009 型の走破性を維持しながら防爆性能を持つロボットであるといえる。

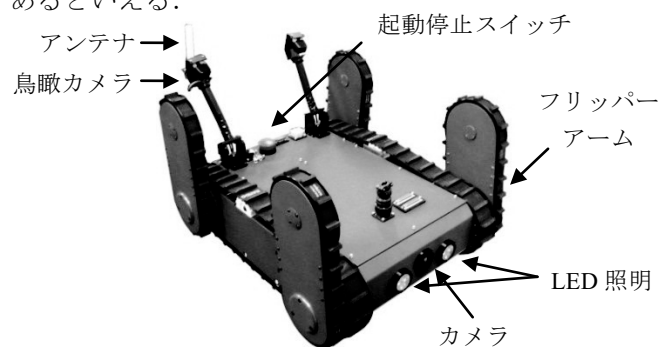


図4 UMRS2010

表2 UMRS2009 と UMRS2010 の仕様

| | UMRS2009 | UMRS2010 |
|---------------------|------------------------|------------------------|
| 大きさ (W×H×L) [mm] | 500×250×590 | 512×450×585 |
| 重量 [kg] | 23 | 32 (長いアーム着用時) |
| 最高速度 [km/h] | 5 | 5 |
| 登坂能力 [°] | 45 | 45 |
| 電源供給 | Li-Fe バッテリ | Li-Fe バッテリ |
| 制御方式 | 無線遠隔操作 | 無線遠隔操作 |
| カメラ | 3 (前後各 1 台、 鳥瞰 1 台) | 4 (前後各 1 台、 鳥瞰 2 台) |

5. 消防探査用システム

消防局のレスキュー隊員が出動要請を受けるのは、人命に関わる事件や事故が発生した場合である。特に地震災害やテロリズムが発生したときに、初めから救出すべき被災者の位置や、その場所の環境状況が完全に把握できていることは稀であるため、災害現場において環境センシングを行いながら探索する必要がある。そのため、レスキュー隊員は可燃物センサなどのセンサを常時携帯しながら探索活動を行う。ここではロボットにその任務を行わせるために、レスキュー隊員が携帯する各種消防探査センサをそのままロボットに搭載してセンサが取得した情報の確認や、センサを遠隔操作するシステムの開発を行った。また被災者を発見した際にその被災者との連絡を取るための双方向音声通信システムを搭載した。

5. 1 搭載センサ・機器 消防局のレスキュー隊員からの要望を基にロボットへの搭載を検討しているセンサ・機器を以下に記す。なお、(1)~(3)の各センサは消防局が所有しているものである。

(1) 可燃物センサ

このセンサは炭化水素系の可燃性ガスや硫化水素などの有毒ガス濃度を検知することができる。ガス濃度はリアルタイムでセンサの液晶画面に表示される。

(2) 特殊ガスセンサ

このセンサは、可燃物センサにおいて検知することができない、サリンガスやマスタードガスといった化学兵器や幅広い有毒有害化学物質の検知・識別をすることができる。センサの液晶画面には、検知された化学剤の種類・濃度が表示される。

(3) 気体収集装置

図5に気体収集装置 (GasID Pump, Smith Detection 製) を示す。この装置は、上述のセンサで検知・識別できない未知のガスを専用のガス分析装置により分析するためにガスを収集するものである。装置上のボタン2つ (図5中の○印部分) を同時に押すことで、ポンプを作動・停止させることができる。

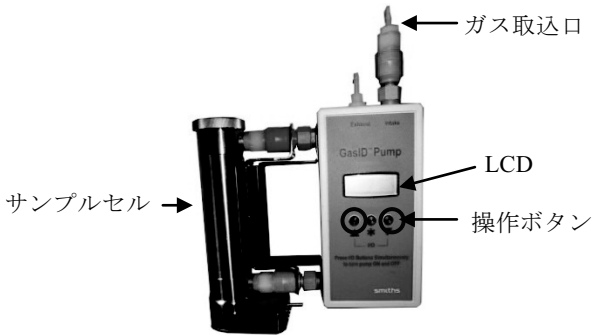


図5 気体収集装置 (GasID Pump)

(4) 音声通信システム

災害現場での探索中に被災者を発見した際、レスキュー隊員がその被災者と直接連絡を取ることができれば詳しい被災状況・周辺環境の把握が可能となる。このとき、電話機のように被災者と対話できればより迅速な対応が可能になると考えられる。そのため、双方向での音声通信ができるように、送信機および受信機各1個を1組として2組用意し、1組はロボットに搭載して、もう1組はロボット操作側に用いることにした。またロボットに搭載する送信機側にはマイクとアンプ、受信機側にはスピーカーとアンプをそれぞれ設ける。

無線 LAN (2.4GHz 帯) に使用されるような波長の短い電波は波長の長いものに比べ直進性が高いため回折しづらく、障害物が多く存在すると通信が困難になると考えられる。また、2010型ロボットの通信に 2.4GHz 帯の電波を使用しているため、その帯域の電波を使用すると干渉する可能性がある。これ

らを考慮して音声通信用の送受信機には、無線 LAN で使用するものより波長の長い電波を利用することにした。表3に送受信機の仕様を示す。

表3 送信機・受信機の仕様

| | |
|--------|-----------------------------------|
| 送受信周波数 | 807.750 [MHz] |
| 到達距離 | 50 [m] (見通し) |
| 周波数特性 | 50 [Hz] ~ 15 [kHz] |
| 動作電圧 | 送信機: 3 ~ 9 [V] 受信機: 3 ~ 12 [V] |
| 消費電流 | 送信機: 25 [mA] 受信機: 30 [mA] |

5. 2 センサの確認

消防探査センサが取得した情報はセンサの液晶画面に表示されるので、これをロボット上のカメラで確認する。なお、設置スペースの問題からセンサの確認に使用するカメラは小型のものとし、各センサに1台ずつカメラを用いることにした。

センサ確認用の小型カメラを選定するために、ロボット車体に使用しているものと同等の性能を持つ車載バックカメラ A と、それより画角の狭い小型 CCD カメラ B を候補に挙げ、両者の視認性比較実験を行った。その結果、B による画像の方が被写体の歪曲が小さいことがわかった。センサ確認は、センサの液晶画面に表示される文字情報をカメラ映像から読み取ることで行う。そのため文字を認識しやすい映像を撮影できるカメラ、すなわち被写体の歪曲が小さいカメラを用いた方が良く考え、センサ確認カメラには B のカメラを用いることにした。また災害現場が建物内の場合、ロボットは暗闇の中で活動する可能性があるため、センサの液晶画面を確認する際は LED 照明を用いることにした。

5. 3 センサの制御

各消防探査センサのうち、気体収集装置についてはロボットへ搭載した後に、装置のボタン (図5中の○印部分) を操作する必要がある。そのため、DC ソレノイドを用いてボタンを押下することにした。図6にボタン押下機構の概略図 (側面図) を示す。DC ソレノイドに電流を流すと可動鉄心がソレノイドから引力を受け、それにより鉄心に結合されたレバーが降下して装置のボタンを押す。ソレノイドに電流を流すのを止めると可動鉄心は引力を受けなくなるので、装置のボタンの自己復帰力によりレバーは初期位置 (図中の位置) に戻る。

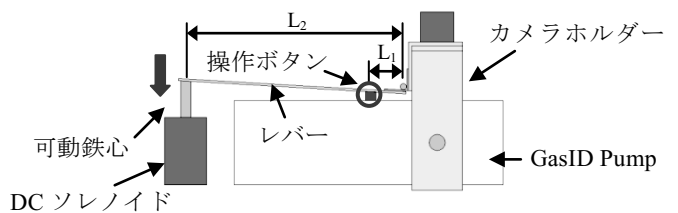


図6 操作ボタン押下機構

図6に示したように、レバーの支点から装置のボタンまでの距離を L_1 、支点からソレノイドの鉄心までの距離を L_2 とすると、装置のボタンを押す力 F_1 と鉄心の受ける引力 F_2 との間には、

$$L_1 \times F_1 = L_2 \times F_2 \quad (3)$$

という関係が成り立つ。

装置のボタン1つを押すのに必要な力は2.2Nであるため、ボタン2つを同時に押す力は $F_1 = 4.4N$ となる。また装置の設置スペースを考慮して設計した結果 $L_1 = 10mm$ 、 $L_2 = 103mm$ となった。これらの数値を式(3)に代入して F_2 を計算した結果 $F_2 = 0.427N$ となった。

なお設計より、ボタンを押下する際に必要なソレノイドのストロークは約 8.5mm であることがわかった。よって最大ストロークが 8.5mm 以上、且つストローク 8.5mm 時の引力が 0.427N 以上のプル型 DC ソレノイドを使用することにした。製作したボタン押下機構の外観図を図7に示す。

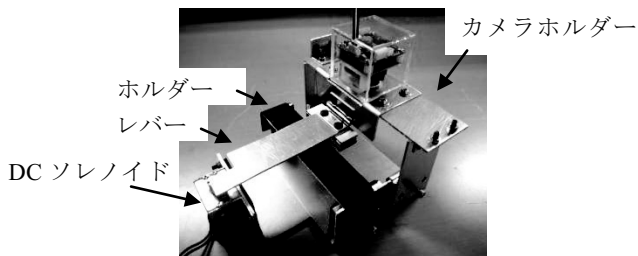


図7 操作ボタン押下機構の外観図

5.4 センサ確認・制御 ロボットデッキに搭載するセンサシステムの概要図を図8に示す。UMRS2010には鳥瞰カメラが2台設置されているが、1台を無くしてその分の信号線をセンサ確認用カメラの出力信号に使用する。ただしセンサ確認カメラは合計3台あるため、それらの出力信号から1台分の信号を選択する必要がある。そこで無線コントローラを用

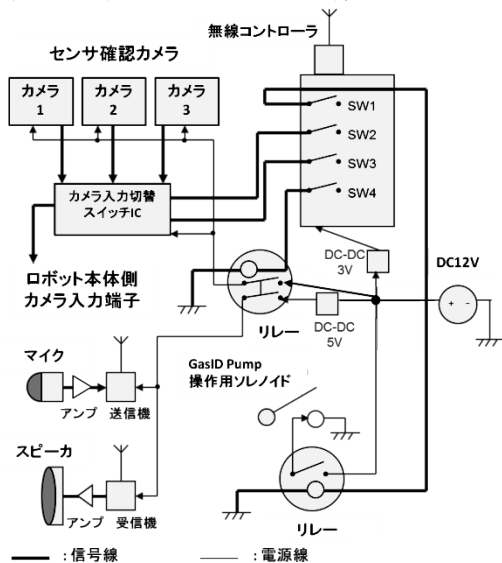


図8 UMRS2010のセンサシステム (ロボット側)

いた無線遠隔操作でICスイッチを切り替え、カメラ信号を選択することとした。

図8中の無線コントローラは受信機とスイッチ回路を有しており、ロボット操作側(送信側)のコントローラから送られてくる信号により、スイッチ1~4を作動させる。例えば、送信側のコントローラにてスイッチ1をONにすると受信側のコントローラのスイッチ1がONとなる。図のシステムにおいてスイッチ1では気体収集装置のボタン操作ソレノイドを作動させる。またスイッチ2,3では、3台分のカメラ信号から1台分の信号を選択する。さらにスイッチ4では3台のカメラと音声通信システムの電源をON-OFFする。

5.5 センサユニットの概要 センサをロボットデッキに固定するホルダーとカメラ固定用ホルダーを試作した。また前節で述べたセンサシステムと、それをロボット操作側から制御するためのコントローラボックスも製作した。ロボットに搭載したセンサユニットの外観を図9に示す。試作したセンサユニットは2段構成で、下段には音声通信システム用のスピーカーとマイクを一体にしたボックス、センサシステム回路基板・音声通信装置(送受信機)・音声用アンプを収納したボックス、ユニット用バッテリーを設置している。上段には試作した各種センサ用ホルダーとセンサ確認用カメラを設置している。

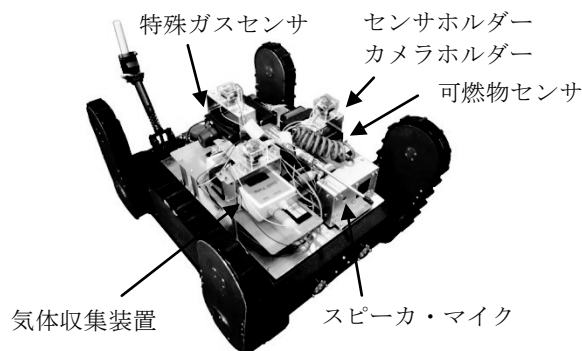


図9 UMRS2010のセンサユニット

6. センサユニットの動作確認

試作したセンサユニットが、コントローラボックスの操作により正常に動作するかどうかを確認した。その結果、センサ確認用カメラの切り替え等、全てにおいて正常に動作した。しかし、センサ確認用のLED照明において問題点が確認された。図10にロボット操作卓の画面に表示された可燃物センサの液晶画面を示す。

図に示すように、LED照明の反射によりセンサ液晶画面の右側がぼやけており、情報の確認が困難であった。この問題を解消するには、LED照明を現状よりも液晶画面から遠ざけた位置に設置するか、LED照明に半透明のカバーを設置して半間接照明とする方法が考えられる。前者の場合、画面への照明の反射を抑えることができたとしても、照明から最も離れた位置では



図10 操作卓上での可燃物センサ液晶画面

照度が低下して、液晶表示の確認が困難となると考えられる。一方後者の場合は、画面への光の反射を抑えることができ、また光を拡散するため現状の直接照明よりも照度を均一にできると考えられる。ただし、LED照明は使用中高温になるため、カバーには耐熱性のある半透明の材料を使用する必要があると考える。これらは今後、検証試験を行って評価する必要がある。

7. 音声通信システムの評価

センサユニットに搭載している音声通信システムについて性能評価するため、スピーカーから出力される音の周波数毎の音圧レベルを測定した。

7.1 測定方法 コントローラボックスのマイク端子にファンクションジェネレータ（以降、FG という）の出力信号を入力し、音声通信装置（送受信機）およびアンプを介してスピーカーから音を出力させる。スピーカーの中心軸上に、1m の距離をとって騒音計を設置し、FG で出力信号の周波数を変化させながら周波数毎の音圧レベルを読み取って記録を行った。なお測定周波数範囲は、5.1(4)で示した音声通信装置の仕様から 50Hz～15kHz とした。また音圧レベルは、A 特性により測定した。ここで A 特性は、測定した音圧レベルを人間の聴覚特性に近似させるための特性であり、このフィルタをかけることで測定値を人の耳に聞こえる音の大きさで表すことができる⁽⁴⁾。

7.2 測定結果および考察 図11に測定結果を示す。この結果から、1kHz～4kHz までは音圧レベルがほぼ一定であり、1kHz 以下および 4kHz 以上の周波数帯では音圧レベルが低下していることがわかる。この値は A 特性で測定したものであるため、音圧レベルが低下している周波数帯では人間の耳においても音が小

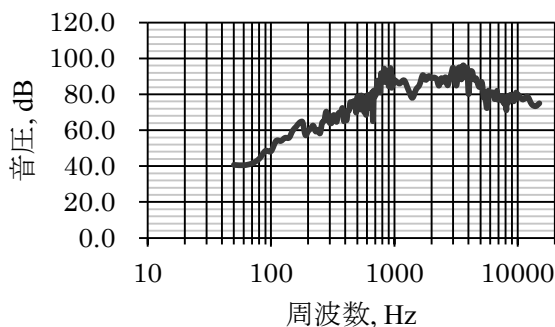


図11 音声通信システムの周波数特性 (A 特性)

さく聞こえているということになる。人間の日常話声の周波数はおおよそ 100Hz～1kHz の間であるが、これは人間の耳の感度が低下している音域である。測定結果から、その音域での最小音圧レベルは約 50dB であることがわかる。一般に、普通の声で話す人間から 1～2m の位置での音圧レベルは 60dB 前後であるから、音圧レベルが 60dB 以下の音域（200Hz 以下）においては音がより小さく聞こえることになる。実際に音声通信システムを使用する際も 100Hz～1kHz 付近の音域を中心に扱うと考えられるため、スピーカーを通して聞こえる音声がよく聞き取れず実用性に欠ける時にはアンプにより全体の音量を上げるか、イコライザにより低音域を増幅させる必要があると考える。

8. おわりに

本研究では、IRS を中心に開発されたレスキューロボット UMRS2009 を基に、新たに爆発しにくい性能を持たせたロボットを開発するため、これまでロボット車体各部の設計変更を行い、本研究のベースとなるロボット UMRS2010 を製作した。また、このロボットに災害現場で環境センシングを行わせるため、各種消防探査センサや音声通信システムをロボットデッキに搭載して、無線遠隔操作でセンサの情報を確認できるセンサユニットのプロトタイプを開発した。しかしセンサユニットにおいて問題点が確認されたため、これに対する改善策を示した。消防局での試験運用に際しては、このプロトタイプを基に焼付け基板等をおこし、信頼性を増したものを消防局で使用してもらうことを考えている。

本研究で開発した 2010 型は爆発しにくい性能を持つため、災害現場での使用に際して、2009 型よりも安全性が高まっていると考えられる。この 2010 型にセンサユニットを搭載することで、実運用配備に向けたロボットにより近づけることができると考える。

参考文献

- (1) Shigeru Kobayashi, et al.: “Development of a Door Opening System on Rescue Robot for Search UMRS-2007”, Proceedings of The Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conference 2008, pp.2062-2065, 2008
- (2) Toshi Takamori, et al.: “Development of a UMRS (Utility Mobile Robot for Search) and a Searching System for Casualties Using a Cellphone”, System and Human Science For Safety, Security and Dependability, ELSEVIER, CHAPTER 26, pp.353-366, 2005
- (3) 鈴木健二:「国際標準に沿った“防爆”事始め(I)」, 電気学会誌, Vol.125, No.8, pp.510-511, 2005
- (4) 社団法人 日本音響学会:「新版 音響用語辞典」, コロナ社, p.165, 2003