

情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究(第4報)

田畑 克彦 稲葉 昭夫 今井 智彦 天野 久徳*

鈴木 隆司* 光井輝彰

Development of Mobile Robot to Gather Information for Relief Activities (IV)

Katsuhiko TABATA Akio INABA Tomohiko IMAI Hisanori AMANO*
Takashi SUZUKI* Teruaki MITSUI

あらまし 大震災等の大規模災害後の救助活動において、被災者やその周囲の情報を収集する情報収集ロボットの活用が期待されている。これらのロボットの情報収集範囲を拡大するためには、ガレキ上を移動でき、ガレキ内にも進入できるように、高い走行能力を持たせる必要がある。この要求を実現するため、形状変化機能をもたせたクローラ型の全方向移動システムCUBIC-Rを開発している。本年度は、機構的な改良を加えた部分的な試作機を用いた走行実験により、その機構の妥当性を確認したのち、課題として残されているロボット上部の防塵化のためのトップカバーを含めた試作機全体を製作した。本報告では、上記内容について報告する。

キーワード 情報収集ロボット、移動機構、形状変化機能、大規模災害

1. はじめに

大地震などの大規模災害後に、救助隊員などの救助者による捜索が困難な場面において情報収集ロボットの運用が期待されている。救助者による捜索が困難な場面とは、捜索対象区域の空間が人間では捜索できないほど狭い、もしくは二次災害の危険が伴う場面である。前者は想像に難くないが、後者は捜索対象区域に人間に危険なガス(一酸化炭素、二酸化炭素、もしくは可燃性ガスなど)が充満している、あるいは地震や火災による構造物の弱体化により二次倒壊の危険性がある、などが考えられる。また、二次災害の可能性のある環境下では、崩壊した構造物のガレキだけでなく、崩壊を免れた構造物、たとえば、階段、段差などが存在する。したがって、ロボットが捜索活動を行うためには、不整地に対して走行能力の高い移動システムが必要となる。

これまでに、我々は二次災害の危険性がある家屋内での情報収集を想定し、移動システム(CUBIC-R+)の研究開発を行ってきた^[1-3]。具体的な構成としては、クローラユニットを変形機構により、十字形に連結した移動システム(図1)であり、その特徴は次の通りである。

- ・機構を状況にあった形状に変形させることでガレキ、階段、段差などの様々な不整地路面上の走行と開

部への進入が可能

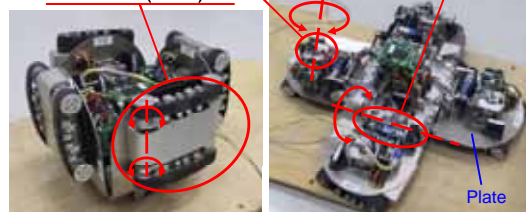
- ・十字形にクローラユニットを連結しているため、それまでの進行方向に対して、垂直の方向に同等の走行能力で移動できるので、狭い空間での進行方向の変更が容易

昨年度は、CUBIC-R+の走行実験により判明した機構面における幾つかの課題を解決するため、機構部に改良を加えた部分試作機を製作した^[4,5]。(図2)

本年度は部分試作機の性能評価と、それに基づき改良した完全試作機(CUBIC-R2)の製作と評価を行った。

最初に、本研究が参画している大都市大震災軽減化特別プロジェクト(以下、大大特)の統括機関の一つであり、研究協力機関である非特定営利法人 国際レスキューシステム研究機構(以降、IRSと記す)の川崎ラボラトリで行われた走行会に参加し、部分試作機において改良された機構部の妥当性と走行能力を確認した。

Uniting mechanism (1DOF) × 5 Transformational Mechanism (1DOF) × 4
Crawler unit (2DOF) × 5



(a)格納時

(b)展開時

図1 CUBIC-R+の概要

* 独立行政法人 消防研究所 基盤研究部
消防機械研究グループ



図2 改良した部分試作機

さらに、課題として残されていたロボット上部の防塵化検討のため、トップカバーを設計・製作し、このトップカバーを含めた完全試作機を製作し、走行能力の評価試験を行った。なお、この評価試験は、本ロボット運用形態で想定している無線通信化を行った後、実施した。

2章に部分試作機の改良点についての概要と、本試作機における走行試験の結果について述べ、3章にトップカバーの設計/製作および無線通信化等の完全試作機の製作と評価について述べる。最後に、4章で報告をまとめる。

2. 部分試作機の開発と評価

2.1 部分試作機の改良点

これまで開発したCUBIC-R+においては、幾つかの改良すべき課題が判明したため、昨年度、図2に示す3面からなる部分試作機を製作した。試作機的主要改良点を以下に示す。なお、詳細については文献[4][5]を参照されたい。

結合機構ブレーキ部の改良

電磁クラッチ方式から、ピンロック方式の新規ブレーキユニットを設計製作することにより、クローラユニットの方向を保持する結合機構ブレーキ部の制動力向上と省消費電力化を実現した。

クローラユニットの改良

簡易的な防塵カバーを付加することにより、被災現場に散乱すると予想されるコード類や布類などの比較的大きな異物がクローラベルトなどの動力部に挟まり、スタックする可能性を低減した。

さらに、クローラユニット単体の走行能力(段差走行能力および出力)を向上させることにより、ロボット全体の走行能力の向上を図った。

接地検出機構の開発

将来的に開発予定の遠隔操縦システムに必要と考えるクローラユニットの接地有無を判断するための機構を設計製作した。

2.2 走行試験と結果

(1) ロボット走行会

部分試作機の走行能力と、その機構的な改良点である前述のと の妥当性を確認するため、平成17年11月27日にIRSの川崎ラボラトリで行われた「瓦礫上移動体を用いた情報収集ミッションユニット(以下、瓦礫上MU)」走行会に参加した。

この走行会は、大大特もしくは瓦礫上MUに参画している研究機関の開発ロボットの基礎的な走行能力および遠隔操縦システムの確認と、ロボット評価地形の検討のためにIRS主催にて実施された。当日は、計16台のレスキューロボットが参加し、目視操縦と遠隔操縦によるロボットの走行実験が行われた。なお、当研究所からは、CUBIC-R+と部分試作機の2台のロボットが参加し、目視のみの走行実験を行った。

(2) 走行会における実験項目

本走行会でIRSが用意した評価項目は以下の5つである。なお、路面の材質はすべて木材としている。

段差上り

ステップ状の段差に対してロボットが垂直にアプローチして上ることができる高さを確認する。調整可能な高さ間隔は約2cmである。

斜め段差上り

図3(a)のように斜め45°に設置されたステップ状の段差を幅90cmの足場から脱落しないで、ロボットが上れる高さh(cm)を確認する。調整可能な高さ間隔は約2cmである。

斜面上り

図3(b)のように、ロボットが登坂できる斜度 $\theta(^{\circ})$ を確認する。調整可能な角度間隔は約5°である。なお、同図内のロボットは部分試作機である。

斜面横断

図3(c)のように、斜面を紙面に垂直の方向に横断する。同図の右側の赤線より20cm上方に白線があり、白線に合わせてスタートした後、赤線を踏まないように3m程度横断し、横断可能な斜度 $\theta(^{\circ})$ を確認する。調整可能な角度間隔は約5°である。なお、同図内のロボットはCUBIC-R+である。

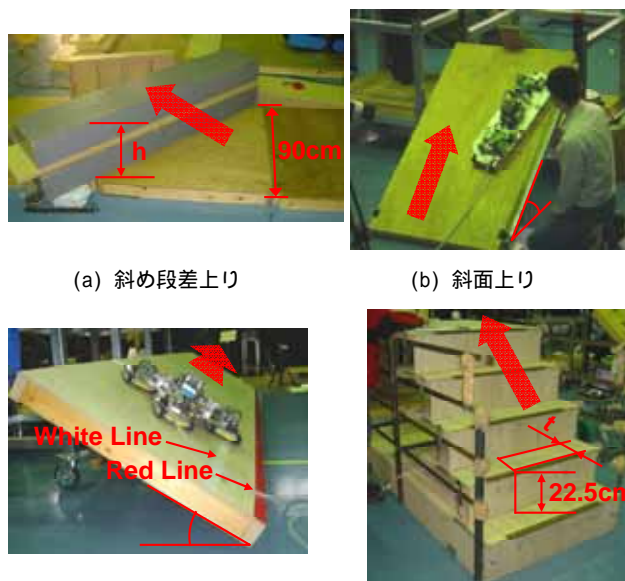


図3 走行会における評価機材の一例

階段上り

図3(d)のように、蹴上げ22.5cm一定とし、踏み面*t*を調整して、ロボットが走行可能な踏み面*t*を確認する。設定した蹴上げの高さは、建築基準法で定められた最大値である。

(3) 走行会の結果と考察

表1に当日の実験結果を、表2にロボットの仕様を示す。また、図4に各実験項目に参加したロボットの結果平均値で正規化したレーダーチャートを示す。ここで、表1および図4の丸で囲った番号は、前述の試験項目の番号と統一している。

ここで、図4のレーダーチャートはIRSの集計データをもとに作成したもので、点線が参加ロボットの結果平均値であり、実線が当研究所ロボットの実験結果である。

表1から、部分試作機のほうがCUBIC-R+よりも段差の走行能力が向上していることがわかる。これは、表2のようにロボット長が長くなったためである。

次に同表において、CUBIC-R+では、段差の走行実験とでほとんど差がないのに比べ、部分試作機においては差があるのは、90cmの足場内であれば、どのように上っても良いことを知らなかったためである。実際には、垂直アプローチが可能であるため、CUBIC-R+と同様に実験

とに差がないと思われる。

したがって、図4のレーダーチャートにおいて、実験が実験とほぼ同じと考えると、すべての実験において平均値の1程度となり、本実験結果を見る限りでは、バランスの取れた機体であることが分かる。逆にCUBIC-R+は、段差上りの実験とにおいて平均値を下回っている。

また同図の結果は、CUBIC-Rが凡庸な能力しか持たないように見えるが、ロボットのサイズや重量もさまざまであるため、単純に比較することはできないと考える。

その他の参加ロボットとの比較論については、IRSの研究であるため、本報告書では考察しない。

2.3 部分試作機の改良点について

2.1節で述べた改良点のブレーキ制動力の向上は、前述の走行会にて、ブレーキ部の動作が良好なことから、ほぼ問題なく改良できたと考える。消費電力については、大幅に低下させることができた^[6]。

クローラユニット単体の走行能力向上については、走行会の階段上り実験において、CUBIC-R+では過負荷によりクローラモータが加熱してしまい冷却が必要であったのに対し、部分試作機ではそのような問題が発生しなかった。このことから、出力向上は有効であったと考える。

また、クローラホイール径を大きくすることによる段差走行能力の向上については、ホイール径を大きくするとクローラの厚みが増すため、階段などの足場の狭い場所の走行^[1, 2]では不利になることが判明した。しかしながら、瓦礫のようなランダムな地形においては、クローラユニット単体の段差走行能力が高いため、CUBIC-R+よりも形状変化機構を操作する頻度が少なくなり、操作性は向上した。この問題は相反する課題であるが、遠隔操縦を想定した場合、操作頻度が少ないほうが現実的と考えており、その狙いは達成されたと考える。

なお、改良点については、運動性能に関係した改良ではないため、ここでは省略する。

3. 完全試作機(CUBIC-R2)の製作

前述の部分試作機の評価によって、おおむね機構的な課題は解決されたため、本年度はこの部分試作機を改造し、図5に示す完全試作機CUBIC-R2を製作した。CUBIC-R2の緒元を表3に示す。本章では、完全試作機の概要について述べた後、その基本的な不整地走行実験の評価結果について述べる。

3.1 CUBIC-R2の概要

本節では、部分試作機からの変更点に焦点をあてて述べる。このため、その他の機構部についての詳細は、文献^[1-5]を参照されたい。

(1) ロボットカバー

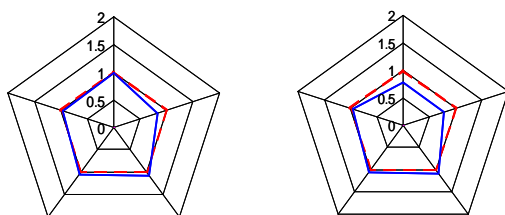
これまで開発したロボット(CUBIC-R, CUBIC-R+および部分試作機)において、図1(b)および図2に示すように、ロボット展開時の面上部の電子部品を保護するカバーは

表1 走行会の結果

No.	Item	Results		
			Partial new model	CUBIC-R+
	Traversing a step	Height	318 mm	255mm
	Traversing a step diagonally	Height	273mm	252mm
	Going up a slope	Inclination	35degrees	same as left
	Traversing across a slope	Inclination	35degrees	same as left
	Traversing the stairs	Angle of flight (rise 225 mm, tread 250 mm)	42 degrees	same as left

表2 当研究所の参加ロボットの諸元

Item	Specifications	
	Partial new model	CUBIC-R+
Total Weight	15 Kg	22 Kg
Robot Size (At Home Mode)	420 x 260 x 331mm	348 x 348 x 270mm
(At Full Spreading Mode)	758 x 260 x 220mm	681 x 681 x 210mm



(a)部分試作機 (b)CUBIC-R+

図4 走行会結果のレーダーチャート

装着されていなかった。実際に製作/検討することにより、将来的な耐環境(防塵, 防水等)付加のための知見が得られることは、このような実作業ロボット開発においては、非常に有意義である。このため、完全試作機においては、面上部の電子部品を保護するためのロボットカバーを製作した。

ロボットカバーを図6(a)に示す。ロボットカバーは、面上に固定されたABS製のカバーベースとカバーベースから脱着可能なFRP製のトップカバーからなる。

また、カバーベースとトップカバーの接合部は、図6(b)のように2箇所のスナップ錠によりワンタッチで外せるように工夫した。

さらに、周囲面のカバー外周については、一部透明な樹脂を用いており、可視光カメラなどで外界を観察できるようにしている。

(2) 無線化

これまでの技術調査により、情報収集を目的としている開発中のロボットは、通信ラインは無線もしくは有線、電源ラインはバッテリーを搭載した方式が採用されていることが多いことがわかった^[6]。

通信ラインは、ロボットへのコマンドやロボットが取得した情報をオペレータに伝達する役割を持つ。無線式の場合、電波強度の低下やノイズなどの周囲環境によっては、ロボットの誤作動や、ロボットの可視光画像が乱れて操縦が困難になるなどの通信障害を起こす可能性がある。一方、有線式においては、このような問題は起きないが、ケーブルの障害物への接触などの抵抗により、ロボットの移動能力を低下させてしまい、情報収集領域を狭めてしまう可能性がある。このため、このようなケーブルの取り扱い機構についても研究されている^[7]。

電力ラインは、どのロボットもほとんどがバッテリー駆動式である。これは、災害後の状況によっては外部電源が確保できない可能性があること、電源ケーブル外皮がロボットの移動中に摩擦によって擦り切れてしまい短絡してしまう可能性があること、上述のケーブルの接触による移動能力の低下などが理由と考えられる。

これまで開発してきたロボットは、通信ラインは有線、電源ラインは外部電源入力(CUBIC-Rはバッテリー)としていた。CUBIC-R2開発における通信および電源を検討した結果、電源については上述の理由からバッテリー方式とし、通信ラインは無線式を想定することにした。通信ラインを無線式とした理由は、これまでの走行実験により、全方向移動時にケーブルが絡まる可能性が極めて高いことが判明したからである。

その結果、通信ラインは小型軽量のSS式無線機であるFRH-SD07T(双葉電子工業株)を、バッテリーは24V, 3.0Ahの容量を持つニッケル水素バッテリーを搭載した。なお、バッテリー容量はロボットが約30分間動作できることを想定した容量である。

なお、ロボットの制御ソフトウェアの開発時には、通信

ライン/電源ともに有線方式のほうが効率的であるため、有線と無線を両用できるように製作した。

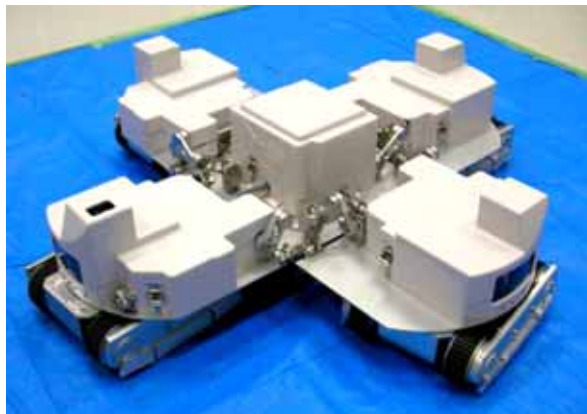
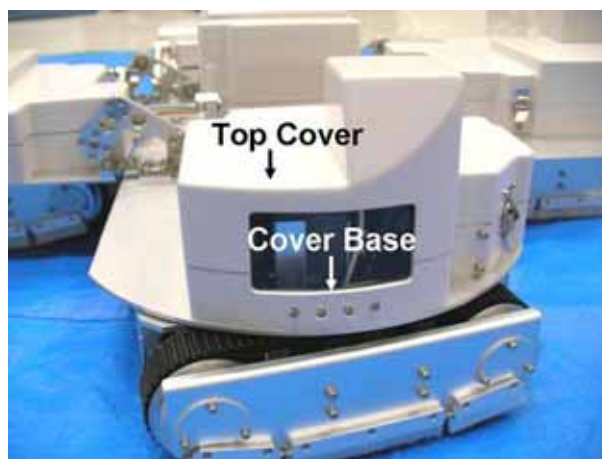


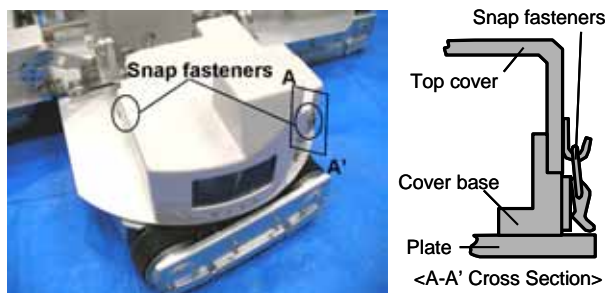
図5 CUBIC-R2

表3 CUBIC-R2の緒元

Item	Specifications	
	CUBIC-R2	CUBIC-R+
Total Weight	30 Kg	22 Kg
Robot Size (At Home Mode)	420 x 420 x 332mm	348 x 348 x 270mm
(At Full Spreading Mode)	840 x 840 x 190mm	681 x 681 x 210mm



(a) トップカバーとカバーベース



(b) 接合部

図6 ロボットカバー

(3) コントロールコマンドの短縮化

上述の無線化に伴い、ロボットとコントローラPC間のコントロールコマンドの見直しを行った。見直しの理由は、無線化に伴う通信速度と信頼性の低下によりコマンド長を短くする必要がでてきたためである。

これまでのコマンド体系は、PC側がコントローラの入力情報を解析し、該当するロボット動作をさせるように、すべてのロボットアクチュエータへの目標位置等をコマンドデータとして生成し、送信していた^[2,3]。このときの送信間隔とコマンド長は、50msec間隔で84バイトである。そして、ロボットの運動制御コントローラが受信したコマンドデータをRS485経由で各モータコントローラに分配し、その情報をもとに各アクチュエータを動作させていた。参考のため、ロボットのシステムブロック図を図7に示す。

搭載したSS無線機の場合、1回のコマンド送信で成功したとしても54msec程度の時間がかかり、物理的に送受信できないことになる^[8]。また、1バイト送受信時にエラーが発生する確率を同程度であると仮定すると、一般的に送受信データ長を短くしたほうが良い。さらに、将来的に遠隔操縦システムを開発するためにも、ロボット情報データ(姿勢、形状等)をPC側で受信できるよう、極力短いコマンドデータにして通信負荷を軽減する必要がある。

このため、コントローラPC側は、コントローラからの入力情報を一定間隔(現状50msec)で取得し、入力情報に変化があった場合のみ、入力情報を圧縮し、14バイトのコマンドデータとして送信する。そして、ロボットの運動制御コントローラは、受信したコマンドデータを解析し、該当するロボット動作をさせるため、各アクチュエータへの目標位置等を生成し、モータコントローラへ分配する方式とした。

その結果、コマンドデータ長14バイトの送信に要する時間は、1回で送受信が成功した場合には約25msecとなり、コマンドデータを従来通り50msec間隔で連続送信したとしても、通信負荷を半分以下に軽減でき、この方式では入力情報に変化があった時のみの送信となるので、さらに負

荷を軽減できた。

なお、運動制御コントローラは、新しいコマンドデータを受信しない限り、受信した最新のコマンドデータをモータコントローラに分配し続ける。このため、通信状況によりコマンドデータの一部が欠落する、もしくは複数のデータが繋がっている場合にはロボットが異常動作する可能性がある。そこで、運動制御コントローラにデータの有効判定と修復機能を持たせた。本機能により、運動制御コントローラが無効データと判断した場合には、ロボットの異常動作を避けるため、有効データを受信するまでロボットの動作を停止するようにした。

(4) 搭載センサ

ロボットの情報収集活動において、ロボットをより有効に活用するため、主要なセンサを下記のように実装した。

- ・ロボット位置同定用発信機

探索活動中のロボットの位置を同定することにより、被災者の位置や危険区域を推定するシステムを共同研究機関である独立行政法人 消防研究所が開発している^[9]。この位置同定システムに必要な発信機を図8(a)のように実装した。

- ・人体検出センサ

建物倒壊後の粉塵の堆積により、目視では被災者の判別が困難なケースが米国同時多発テロで報告されている。このため、共同研究機関である独立行政法人 消防研究所が、物体の表面硬さをセンシングすることによって、人体である可能性を判断するセンサを研究開発している^[10]。本年度は、本センサをCUBIC-R2に装着できるように設計変更を加えて製作し、実機にて実装可能であることを確認した(図8(b))。

- ・可視光カメラ

これまで、仮に設定した前方面にのみ1基のカメラを暫定的に実装していたが、ロボットの特徴である全方向性を利用し、周囲面に各1基、計4基のカメラを搭載し、全周方向の映像を確認可能とした。これにより、ロボット操作時のオペレータの視認性向上が期待できる。

- ・3軸傾斜センサ

ロボットの重力に対する姿勢を確認するため、中央面にピッチおよびロールの2軸、周囲面には形状変

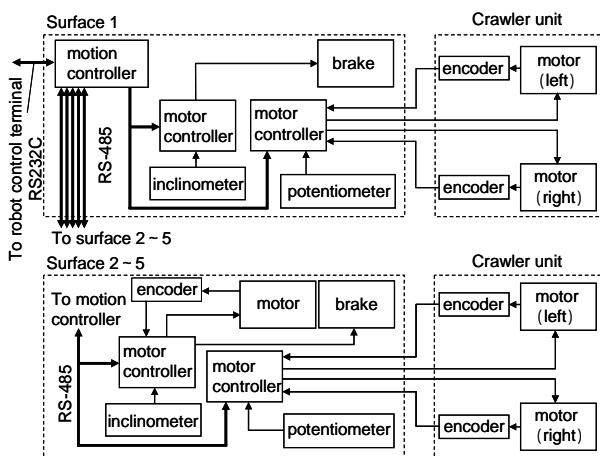


図7 ロボットのシステムブロック図



(a)位置同定用発信機

(b)人体検出センサ機構部

図8 消防研究所開発中センサの実装

化機構の回転方向に1軸の傾斜センサを搭載していた。しかしながら、(5)項の実装検討の結果、空間的制約が非常に厳しいため、超小型の3軸傾斜センサ(HAAM-313B,北陸電気工業株)を中央面に実装した。なお、中央面と周囲面との相対角は、形状変化機構のモータエンコーダ値により算出する。

(5) 実装の見直し

上述のセンサ類、ロボットカバー、およびバッテリーの搭載と、薄型化、機構部強化等のため、実装部品の配置をすべて見直し、3次元CAD等を用いて検討した。この結果、CUBIC-R+の展開時におけるロボット高さ210mmに対し、CUBIC-R2では190mmに薄型化できた。

ロボットを薄型化することは、より低い開口部への進入が可能になることを意味する。

3.2 CUBIC-R2の評価

製作したCUBIC-R2を用いて基本不整地の走行実験^[1-3]を当研究所にて行った。表4にその結果と、比較のため、CUBIC-R+の実験結果を示す。表4は、斜面上り以外はすべてコンクリートブロックを用いている点と、階段の1段の高さが表1と異なる。また、斜面横断は実験機材がないため実施していないが、ギャップの横断を実施している。

表3に示すようにCUBIC-R2のロボットサイズが大きいため、段差やギャップにおいては、CUBIC-R+よりも能力は高い。なお、表1の段差のほりよりも結果が良くないのは、段差がコンクリートブロック製であるため、その粉塵により、木材よりもクローラと路面の摩擦が小さく、すべってしまい、駆動力が路面に伝達しづらいことが一因と考えられる。

斜面上りの結果は同程度であるが、斜面の幅がロボットサイズに比べて小さいため、CUBIC-R2では実質4面接地で実験を行っている。5面接地で行った場合には、これ以上の斜度も登坂できる可能性がある。

階段上りについては、CUBIC-R2のほうが劣る結果となった。この形態のロボットは、現状では一段ずつ登る戦略をとるため^[1]、ロボットサイズが大きいと相対的に一段の足場(踏み面)が小さくなるためである。したがって、踏み面が約260mm以上の階段でなければ、現在の移動戦略では移動できない。

しかしながら、JRや地下鉄などの階段の標準寸法は、1段の高さが165mm以下、踏み面は300mm以上^[6]であることを考えると公共施設内での階段は移動可能であり、一般的

な家屋のバリアフリーの階段寸法は、高さ180mm、踏み面260mm程度であるため、上記環境であれば移動することは可能である。

最後に、これらの基本不整地の実験結果が、そのまま不整地における走行能力とはならないことに注意すべきである。走行能力は、大地震後に生成されるランダムな不整地に対するロバストな走行能力、方向転換能力などにも大きく依存するからである。我々は、ランダムな瓦礫上の走行実験を行い、CUBIC-R2の移動能力がCUBIC-R+のそれよりも大きく改善されていることを確認した。

4. おわりに

本報告では、これまで開発してきたCUBIC-R+の機構的課題をもつ部位に改良を加えた部分試作機を評価し、それらの課題が解決されたことをおおむね確認した。また、本結果をもとにロボット上部を保護するためのトップカバー等の改良を加えたCUBIC-R2を製作し評価した。

この結果、耐環境性には課題が残されているが、移動メカニズムとしての移動機構は完成したと考える。

今後の方針としては、遠隔操縦のインターフェースの開発を行う。このための接地判定手法、ロボット制御手法、ならびに情報提示手法の検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環としてなされたものである。

文 献

[1] K.Tabata, A.Inaba, Q.Zhang, H.Amano, Development of a Transformational Mobile Robot to Search Victims under Debris and Rubbles, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System (IROS2004), pp.46-51, 2004.

[2] K.Tabata, A.Inaba, H.Amano, Development of a Transformational Mobile Robot to Search Victims under Debris and Rubble-2nd report: Improvement of Mechanism and Interface-, Proc. of IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2005), pp.19-24, 2005.

[3] 田畑, 稲葉, 天野, 不整地走行用全方向移動システムの開発, 計測自動制御学会(SICE)論文集 第41巻, No.12, pp.998-1004, 2005.

[4] 田畑, 稲葉, 天野, 情報収集(被災者搜索)ロボットの移動機構のハードウェアの改良, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告 第6号, pp.41-44, 2005.

[5] 田畑, 稲葉, 今井, 光井, 天野, 鈴木, 形状変化機構を有する多面体移動機構の開発-第4報:機構改良-, 第6回計

表4 基本不整地走行実験の結果

Item	Result	
	CUBIC-R2	CUBIC-R+
Going up a slope	Inclination 37 degrees	37 degrees
Traversing a step	Height 280 mm	240 mm
Traversing the stairs	Angle of flight 32 degrees rise 160 mm tread 260 mm	35 degrees rise 160 mm tread 230 mm
Traversing across a gap	Width 400 mm	350 mm

測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集 (CD-ROM), pp.329-330, 2005.

- [6] 独立行政法人 消防研究所, 検知・探査災害対策用ロボットの性能試験および評価に関する報告書, 平成17年3月.
- [7] 新井, 田中, 広瀬, 球形トレーラの開発-第2報 リール機構への応用とケーブル平行巻機構-, 第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集 (CD-ROM), pp.333-334, 2005.
- [8] 双葉電子工業(株) 取扱説明書 双方向無線データ通信

モデム FRH-SD07T 第4版.

- [9] 天野, 鈴木, 稲葉, 田畑, 電波を利用したロボット位置同定の可能性に関する実験的研究, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (CD-ROM), 3A23, 2004.
- [10] 鈴木, 天野, 稲葉, 田畑, 物体の表面硬さを利用した人体認識センサの開発, 第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集 (CD-ROM), pp.307-308, 2005.