

情報収集(被災者搜索)ロボットの移動機構に関する研究-第3報-

田畑 克彦 稲葉 昭夫 今井 智彦 天野 久徳* 鈴木 隆司*

Development of Mobile Robot to Gather Information for Relief Activities -3rd report-

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

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躍が期待されている。これらのロボットの情報収集範囲は、一般的に移動システムの移動能力に依存するため、情報収集ロボットはガレキ上を移動でき、ガレキ内にも進入できる高い移動能力を必要とする。これまでに、情報収集型ロボットの移動システムとして、形状変化機能をもったクローラ型全方向移動システムCUBIC-Rを提案してきた。この移動ロボットは、六面体からその展開形状に変形することができるため、段差・階段・ギャップ等の不整地路面を走行することができる。さらに前後左右方向に移動体であるクローラユニットが連結されているため、ロボットを旋回させることなく前後左右方向に移動できることを特徴としている。この特徴により、前後方向に移動困難なガレキ路面があったとしても、左右方向への移動が可能な状況であれば、走行不能に陥る可能性を低減でき、情報収集範囲を拡大することが期待できる。しかしながら、CUBIC-Rは、幾つかの問題点(重量が重い、構造が複雑、移動時のバランスの悪さ)があるため、これらの問題点に改良を加えたCUBIC-R+を開発したので報告する。

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, 救助作業

1. はじめに

阪神淡路大震災やアメリカ同時多発テロを契機に、防災システム、救助システムのあり方が議論されている^[1, 2]。人間が要救助者を救助するためには、二次災害の危険性の有無を調査し、救助手法を決定する必要がある。多くの災害情報(例えば、要救助者の存在の有無、その位置、また危険な建物の内部および外部の状況)を必要とする。これらの情報収集は、余震等による二次倒壊の可能性がある建物内外部での活動となるため危険が多い。このため、情報収集ロボットの利用が期待されている。

近年、これら災害地で活動する情報収集用ロボットの活動領域を拡大するため、高い踏破性能を有する移動システムの研究開発が行われ、幾つかの有効なクローラタイプのロボットが提案されている^[3-12]。クローラ(無限軌道または無限軌条, キャタピラは登録商標)は、車輪、多足歩行などの他の移動手法に比べ、接地面積が大きいため、ガレキなどの不確かな路面に対しても単純な制御で比較的確実に動力を伝達でき、また接地圧を分散できるため、2次倒壊を引き起こす可能性を抑えることができるというメリットがある。一方、不整地の移動システ

ムがもつ一般的な課題として、段差や階段などの大きなガレキ構造上を走行するためには大きなボディを必要とし、狭所に進入するためには小さなボディを必要とするので、このような物理的に相反する課題を解決する必要があった。そこで、小型のクローラを直線状に連結させることにより、ロボットの前後進方向の走行能力を向上させる移動システムが開発されている^[3-7]。このタイプのロボットはその形状から前後進行方向の断面積が単一のクローラと同程度であるため、ガレキで構成された小さい開口への進入能力はこれと同程度である。

また、クローラにアームを装備し、このアームの運動とクローラの運動を協調動作させることにより、クローラのみでの走行能力以上の能力や、アームで複数台のロボットを連結することにより、前述の直線連結型のクローラロボットと同様の機能(階段走行機能など)を付加しているものもある^[8, 9]。

単一のクローラのみでは、図1(a)に示すように、前後進行方向に対しては、高い走行能力を有するが、旋回方向に対しては、ほとんど走行能力を持たない。

そこで、図1(b)のようにクローラを直線状に連結させて、連結部に自由度を持たせることで、クローラを円弧型に変形させ、進行方向を転換させる手法を取るものがある^[4, 5, 7]。

上述した移動システムは基本的には直線状に連結し

* 独立行政法人 消防研究所 基盤研究部

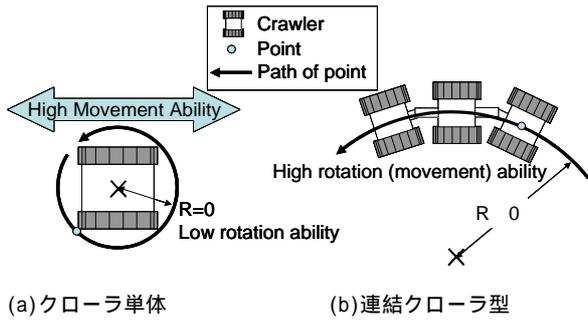


図1 ガレキ上における方向転換の方法

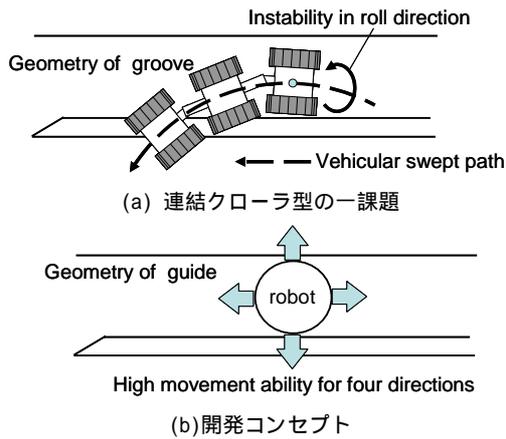


図2 移動システムの開発コンセプト

た形態をとるため、例えば、図2(a)のようなガイド地形の底面を走行中、このガイドから脱出する場合にはロール方向に不安定になる。このため、時にはロールしてしまっただけで脱出できない場合がある。ガレキ路面はこのほかにも予期できない様々な状況が考えられるので、前後方向だけでなく、図2(b)のように左右方向にも走行能力を有することが望ましいと考え、筆者らは、情報収集の活動領域を拡大するための一手法として、前後左右方向に連結型クローラと同程度の走行能力を有するクローラタイプの移動システムCUBIC-Rを開発してきた^[10-12]。

本報告では、走行実験によりCUBIC-Rに幾つかの問題点が判明したので、これらの解決内容について述べる。

第2章にこれまで開発してきたCUBIC-Rの概略について述べ、第3章では、基本的な走行試験の際に判明した問題点とその解決方法について述べる。第4章では、これらの問題点を改良するために製作したCUBIC-R+について述べて、第5章に本報告をまとめる。

2. CUBIC-Rの開発

2.1 基本構造

図3に提案しているCUBIC-Rの構造を示す。図3(a)に示すように、プラットフォームは、六面体形状であり、各面の外側に1対のクローラをもつクローラユニットが1基取り付けられている。また、1自由度の面開閉機構により、路面状況に形状に変形し、ガレキ上を走行したり、ガレ

キ内へ進入することができる。

また、各面にクローラユニットと面を連結する結合機構が備わっている。この結合機構は、受動的1自由度の軸とブレーキ機構を有している。この機構により、接地しているクローラユニットを超信地旋回(その場転回)することで、プラットフォームに対して任意の相対角をとることができ、ブレーキによりその方向を保持させることができる。

2.2 移動戦略

CUBIC-Rの活動エリアは、2次倒壊の危険性のある半壊家屋内としている。また、このような現場に限られるというのではなく、人間がアクセスできない現場までガレキ上を走行し、情報を収集することも想定している。

比較的平坦な路面や下り坂においては、CUBIC-Rは格納モードで走行する。このモードは接地しているクローラユニットを超信地旋回することにより、ロボットの旋回半径を小さくすることができるので、小回りが利く。

段差、階段または登り坂などの大きなガレキ構造の不整地路面では、面開閉機構を用いて、ガレキの路面状態に対応してプラットフォームを変形させ、走行する。これらの不整地に対する移動戦略については、すでに他の文献に記述しているので^[10-12]、ここでは省略する。

CUBIC-Rのメカニズムは、いわゆるヘビ型と呼ばれる直線連結型のクローラタイプの移動システムと類似しているが、前後左右に連結しているため、プラットフォームの方向転換動作を必要とせず、このための空間を必要としないということが大きな特徴である。その代わりに、前後進行方向へのロボット断面積はヘビ型よりも大きくなるため、ガレキ内への進入能力を若干犠牲にしている。

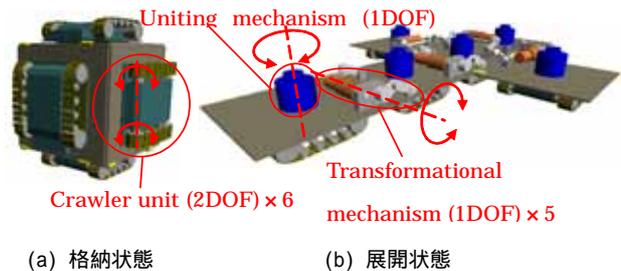


図3 CUBIC-Rの概観



図4 CUBIC-R試作機

表1 CUBIC-R試作機の仕様

Total Weight	31.0kg
Cubic Size (Without Crawler unit)	260 × 260 × 260mm
Robot Size (Standard mode)	360 × 360 × 360mm
Robot Size (Full expansion mode)	1040 × 780 × 210mm

2.3 CUBIC-R試作機と走行試験

提案した上述の移動戦略を実証するために 図4に示すCUBIC-Rの試作機を製作した。表1に製作したCUBIC-Rの仕様を示す。

この試作機は、ニッケル水素バッテリー7.2Ahを搭載しており、バッテリーを用いた運用時間は40分程度である。

この試作機を用いて、想定した不整地における基本的な走行能力を確認し、十分な走行能力を有していることを確認した^[12]。さらに、この実験の中でいくつかの解決すべき問題点に関する知見を得た。

3. CUBIC-Rの問題点とその解決方法

本章では、前章の走行実験から判明した問題点とその解決のためのアプローチについて述べる。

3.1 CUBIC-Rの問題点

(1) 重量

表1に示すように、ロボットの重量が31kgとやや重い。ロボットを軽量化することで、踏破能力の向上が期待でき、落下時の衝撃を抑えることができる。なによりも、運用面を考慮すると軽量化が必要である。

(2) バランス

図5のようにLong directionとShort directionが存在するため、展開状態ではロボットの重心位置がややSurface 5側にある。このため、任意の姿勢・形状に対する重心位置の把握が難しい。段差やギャップ上を走行する際には、重心位置が段差上に乗っているか、またぎ走行が可能なギャップ長であるかを判断する必要がある。本ロボットは遠隔操縦を前提としているので、操縦者が把握しやすい重心位置をもつロボット構造にする必要がある。

また、図6のように走行しているガイド地形の底から脱出する場合において、Long directionの走行からShort directionの走行に切り替えるが、この際に重心位置の関係からロール方向への力が常にかかりロールしてしまう。ローリングを避けるためには、Long direction方向の面を格納し、重心をロール軸上に移動させなければならないが、そのための操作が必要になる。この格納動作時にも、ロボット重心の偏りからロールしてしまうために、ガイドの壁にShort directionの面を展開させて把持した状態にしなければならないが、操作がより煩雑になっていた(図6(b))。

さらに、上述の理由から、ロボットのロール方向のバランスをとるために、Short direction方向への走行時には、

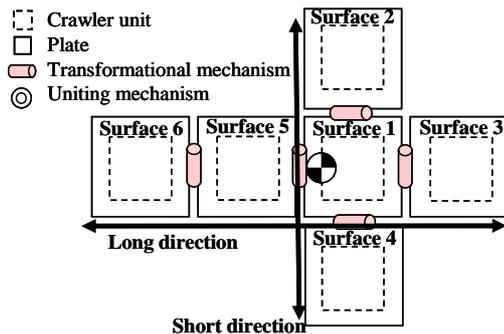
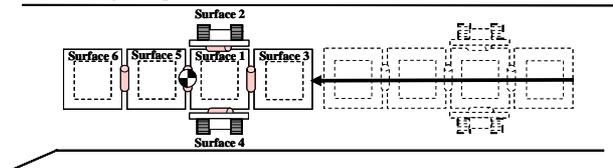
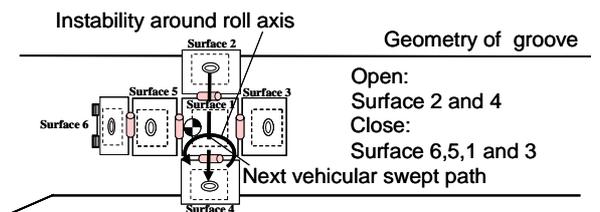


図5 面番号の割振り(上面図)

Geometry of guide



(a) long DirectionのSurfaceを用いた走行



(b) Short DirectionのSurfaceを用いた走行への切替え動作

図6 ガイド地形からの脱出動作(上面図)

Long directionの面を格納しなければならないため、重心位置が高くなり、ピッチとロール方向への安定性が悪くなるという問題もあった。

(3) 操作性

CUBIC-Rはアクチュエータを総数にして23個有しており、これまでは、各アクチュエータの動作をキーボードの各キーに割り当ててロボットを操縦していたが、ロボット形状とキーボードのキー配置との関連性がないため、直感性に劣り、その操縦は非常に煩雑になっていた。このため、インタフェースの簡略化が必要である。

また、図5におけるLong directionの存在は、ガレキ走行時のロボットの面の操作においても、複雑にしている。なぜならSurface 6の開閉操縦は、他の面のようにSurface 1との展開角だけでなくSurface 5の展開角にも依存するからである。Surface 6の展開角 θ_6 は(1)式で表される。

$$\theta_6 = \theta_{1-5} + \theta_{5-6} \quad (1)$$

ここで、 θ_{1-5} はSurface 5とSurface 1の相対角、 θ_{5-6} はSurface 5とSurface 6の相対角である。このSurface 6の目標角を人間がリアルタイムに判断し、操作することは困難である。

(4) 駆動力の伝達

ガレキ上の走行や階段走行において、路面へ駆動力を伝えるクローラベルトよりも、プレートが突出していたため

に(図5), プレートが先に障害物に接触してしまい, 進行できなくなる問題が度々発生した. この問題は, ガレキ上における走行であれば, その都度, 面を格納させて前進し, クローラが路面に接触してから, 面を展開させるという動作が必要となるので, 操作が煩雑になった.

また, 階段を上るときはより顕著であり, 前方の突出したプレートが次のステップに引っかかり, 登れない場合があった. この状況を回避するためには, 現在のステップから落下しないように注意しつつ, 前面のプレートが次ステップに接触しないように登らせる必要があるため, 非常に難しい操作となる. このような操作は目視できない遠隔操縦では, 非現実的である.

3.2 問題解決へのアプローチ

このロボットの最大の特徴である前後左右方向への移動能力を確保しつつ, 前節の問題点を解決するために, 図7に示すロボット形態に変更した. 本ロボットの構成とその改良の詳細を以下に示す.

(1) Surfaceの排除

図7に示すように, 図5におけるSurface 6を排除し, Surface 1の中央に重心がある対称的な形状をした5面からなる移動機構とした. この構成は, Surface 6の構成部品であるクローラユニット, 面開閉機構, プレートとアクチュエータを駆動するコントローラ類を取り去った形態である.

これにより, 以下の点が改善される.

- ロボット重量が一面分軽量化されるので, 運動能力を向上させ, 落下による衝撃を緩和できる. 軽量化は運用面を考えた望ましい
- アクチュエータ数が減少するため, インタフェースが簡略になる
- 重心高さが低くなり, より安定した走行が可能になる
- ロボット重心がロボット平面図における幾何学重心に存在するので, 操縦者は重心位置を把握しやすい(図7(b))
- 前後左右の構造が対称になるため, ロール方向に対してより安定になる
- 移動方向(Short directionとLong direction)を区別する必要がない

以上より, Surface 6を排除することにより, 3.1(4)項以外の問題点に対して改善を図ることができる. 特にロボットバランスの問題は改善できていると考える. しかしながら, Surface 6の排除によって, ひっくり返ることによる移動不能状態が回避できないという問題が新たに生じる. この問題の解決方法については後述する.

(2) クローラユニットの突出

3.1(4)項の問題を解決するために, 図7のようにプレートよりもクローラを外側に突出させる構造にした. これにより, 最初にクローラがガレキに接触するため, 路面に駆動力をより確実に伝達することができる.

(3) 転倒からの起上り動作

クローラがプレートの外側に突出させることのもう一

つの利点として, ひっくり返ったときの起上りが可能になるということがある. 例えば, 完全にひっくり返ったときの状況を図8(a)に示す. 操縦者はロボットがバランスを崩したと判断したときに, 面を格納させる. このとき, ロボットのクローラが進行方向に向いていると考えるとクローラが突出しているために, クローラが接地状態となる. すると, 図8(a)-(b)のようにロボットを移動させるとガレキなどの段差に接触するので, クローラの駆動力によりピッチ方向に回転力が発生する. そのまま, クローラを駆動していると図8(c)-(d)のようにロボットのピッチ角が大きくなり, 接地点よりも重心位置が後方になるので, ロボットは復帰できると考える. これは, CUBIC-Rの段差踏破におけるピッチ方向への回転運動をヒントに発想したものである^[12].

(4) 操作性の向上

これまではPCのキーボードを用いてロボットの操縦を行ってきたが, 操縦をより直感的にするため, 図9に示すゲームコントローラ(プレイステーション, SCE製)を用いたロボットコントローラを開発した. このコントローラを選定した理由は以下の通りである.

- ボタン数が多いので, アクチュエータ数の多いロボットの操縦に向いており, 多くの動作に対応させることができる

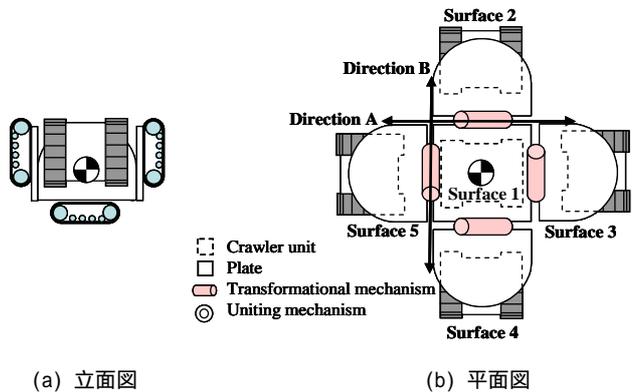


図7 CUBIC-R+の構成

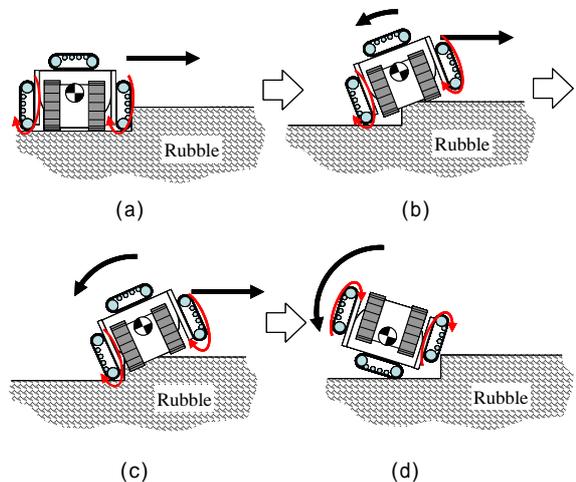


図8 起上り動作(戦略)

- 十字型ボタンがロボットの形態に類似しているので、各surfaceを割り当てることができ、直感的な操縦ができる
- ジョイスティックが2本装備されているので、移動体の操縦を行うラジコンのコントローラと同様の移動操縦が可能である
- 小型軽量なので、立ったまま手に持って操縦できる
- デザインが手になじみやすい

ロボットの方向転換や移動を行うための基本的な操縦の流れは、任意の面を選択しながら、クローラユニットと面開閉機構の動作を選択するという流れとなる。コントローラの動作割り当てを表2(図7,9参照)に示す。

4. CUBIC-R+の製作と評価

前章で述べたCUBIC-Rの課題とその改良方針に従って図10に示すCUBIC-R+を製作した。その主な仕様を表3に示す。また、本ロボットのシステムブロック図を図11に示す。

改良したCUBIC-R+は、CUBIC-Rをそのまま改造したため、実装スペースがなく、バッテリーは搭載されていない。したがって、表1と比較すると約9kg程度の軽量化が達成されているように見えるが、CUBIC-Rでは3kg程度のバッテリーが搭載されていたため、5面形態による純粋な削減重量は、6kg程度である。今後はバッテリー搭載を含めた新たな設計が必要となる。

表4に半壊家屋内で想定される基本的なガレキ上の走行実験をおこなった結果を示す。段差、ギャップは、CUBIC-Rよりも走行能力が低くなっているが、これはクローラ連結数が減り、ロボット長が短くなったためである。

操作性においては、Surface 6の排除によるロボットバランスの改善、アクチュエータ数の減少、またロボット形態に近いボタン配置のコントローラを採用したために、方向転換や面開閉機構の操作に関して大きく改善された。

クローラの突出については、若干改善されたように感じるが、クローラユニット厚が小さいことや駆動力が不足しているので、面開閉動作の頻度はあまり変化しないように感じた。今後は、これらのクローラユニット単体の課題を改善することで、ロボット全体の走行能力の向上を目指す。

最後に、3.2項(3)で議論したひっくり返った状態からの復帰を確認する実験のスナップ写真を図12(a)-(j)に示す。本実験により、想定した起上り動作が可能であることを確認した。なお、本実験で用いた障害物の垂直段差の高さは160mmである。

本実験により、5面形態にすると6面形態の場合よりも格納状態におけるロボット重心が下方に移動するので、ガレキ上の走行中にロボットがバランスをくずして転がったとしても、真上から落下しない限り、図12(f)-(j)のように、起上り小法師と同様の動作で、ロボット自体が振動しながら自動的に復帰できる現象を確認できた。

5. おわりに

本報告では、最初に前後左右方向に大きなガレキ構造上の走行だけでなく、狭いスペースへの進入能力を有するCUBIC-Rについての概要を述べた。次に、製作したCUBIC-Rの問題点とその問題を解決するためにロボットの形態とインターフェースを見直した。最後に、CUBIC-Rの改良機である5面型のCUBIC-R+を製作し、その基本能力と、起上り戦略についての確認を行った。

今後の方針としては、操縦者がロボットを目視できない状況での遠隔操作のためのインターフェースについての検討を行う。具体的には、様々な路面状況での基本的な移動戦略を抽出と、半自律移動のための力学的な検討を行う。

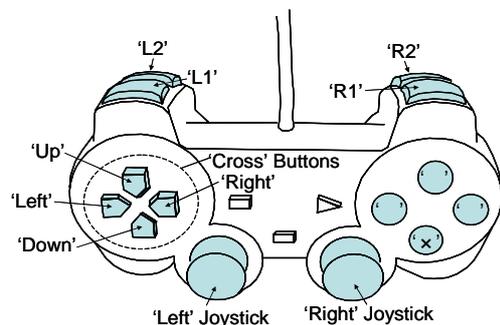
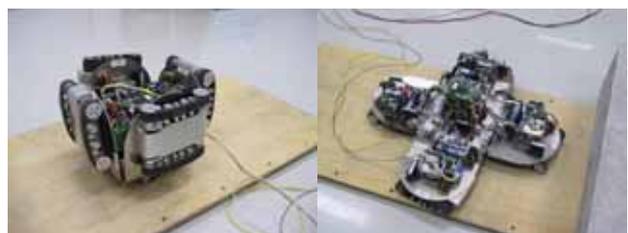


図9 ボタンとジョイスティックの割り当て

表2 ロボット操作の割り当て

Surface(s)	Assigned Button	Motion	Assigned Button or Joystick
Selection of Active Surface(s)		Motion of Surface(s)	
All Surfaces	'R2'	Open	' '
		Close	'x'
Surface1,	'R1'	(direction A)	'Up' or 'Down' and
	'Cross' Buttons	Open	' '
		Close	' '
Surface2,	'Right'	(direction B)	'Left' or 'Right' and
		Open	' '
		Close	' '
Surface3,	'Up'	Direction Control of Crawler Unit(s)	
Surface4,	'Left'	Turn1	'Right' Joystick
		Turn2	'L2' and
		Turn3	'Right' Joystick
Surface5	'Down'		'L1' and 'Right' Joystick
		Movement Control	
		Forward or Backward Movement	'Left' Joystick



(a) 格納状態

(b) 展開状態

図10 CUBIC-R+の試作機

表3 CUBIC-R+試作機の仕様

Total Weight	22.0kg
Cubic Size (Without Crawler unit)	248 × 248 × 220mm
Robot Size (Standard mode)	348 × 348 × 270mm
Robot Size (Full expansion mode)	681 × 681 × 210mm

謝 辞

本研究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なされたものである。

文 献

- [1] 高森, “レスキューロボット機器研究会報告書”, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス部門研究会, 1997年1月17日.
- [2] Murphy.R.R, Resucue Robots at the World Trade Center”, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, special issue on Disaster Reponse Robotics, vol.102, no.1019, pp.794-802, 2003.
- [3] <http://www.packbot.com/>
- [4] T.Takayama et al. ,Development of “Souryu I & II” –Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space-, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.15, No.1, pp.61-69,2003.
- [5] M.Arai et al. Development of “Souryu-III”:Connected Crawler Vehicle for Inspection inside Narrow and Winding Spaces, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.52-57, 2004.
- [6] W.Lee et al., ”ROBHAZ-DT3 : Teleoperated Mobile Platform with Passively Adaptive Double-Track for Hazardous Environment Applications”, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.33-38, 2004.
- [7] K.Osuka et al., “Development of Mobile Inspection Robot for Rescue Activities: MOIRA”, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.3373-3377, 2003.
- [8] M.Guarnieri et al., “HELIOS VII: a New Tracked Arm-Equipped Vehicle”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15, No.5, 2003.
- [9] M.Guarnieri et al., “Development of Helios VII: an arm-equipped tracked vehicle for search and rescue operations”, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.39-45, 2004.
- [10] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.4, pp.31-36, 2003.
- [11] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.5, pp.13-18, 2004.
- [12] K.Tabata et al., “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, pp.46-51, 2004.

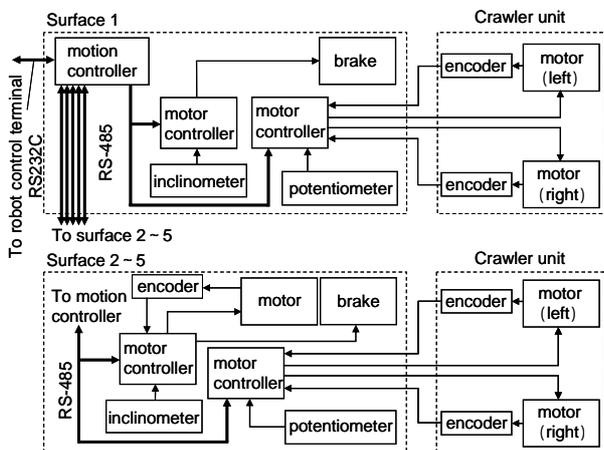


図11 CUBIC-R + 試作機のブロック図

表4 CUBIC-R+およびCUBIC-Rの走行実験結果

Item	Result	
	CUBIC-R+	CUBIC-R
Going up a slope	Inclination 37 degrees	38 degrees
Traversing a step	Height 240 mm	320 mm
Traversing the stairs	Angle of flight 35 degrees (rise 160 mm, tread 230 mm)	Same as the left column
Traversing across a gap	Width 350 mm	400mm
Escaping from a groove	Width 500 mm Depth above 200 mm	Same as the left column

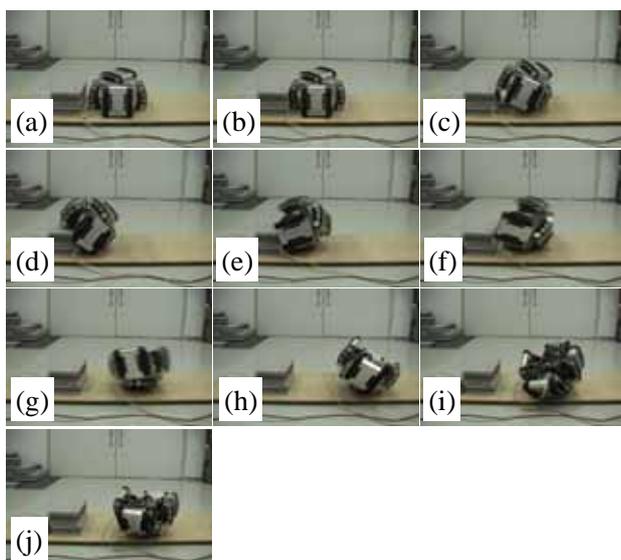


図12 起上り動作(実験結果)