レスキューロボットとソフトマテリアル

松 野 文 俊^{*1}・桑 原 裕 之^{*2}・伊 能 崇 雄^{*3}
広 瀬 茂 男^{*4}・津久井 慎 吾^{*5}

The Rescue Robot and the Soft Material

Fumitoshi MATSUNO¹(¹The University of Electro-Communications), Hiroyuki KUWAHARA², Takao INOH²,
(²NPO International Rescue System Institute), Shigeo HIROSE³, (³Tokyo Institute of Technology), Shingo TSUKUI⁴,
(⁴TOPY INDUSTRIES, LIMITED)

In this paper, we introduce the newest rescue robots which we have been developing and some applications of soft material for rescue robots.

Rescue robots are expected in the field of searching victims as the first application. The mobility on rubble is in one of the technology required in order to attain development. In order to make robots possible to run over rubbles, we adopted track crawlers using soft material as mobile mechanism for rescue robots. Using soft material is very effective to get traction on an edge of the stair to climb up the stairs. Improvement of the quality of the soft material will be expected from now on.

Key Words : Rescue robot, Deliverer search, Rubble, Rubber-Crawler, Stairs Climbing

1. は じ め に

1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災は6000人以上の尊い命を奪った。また、最近では新潟中越地震やスマトラ沖地震の津波による災害も大きな犠牲を伴った。これらの自然災害だけではなく、チェリノブイリ原発事故やJCOの事故、サリンなど化学物質によるテロ、ニューヨーク世界貿易センタービルの旅客機を用いたテロなど人為的災害も後を絶たない。被害の未然防止には限界があり、発災直後のレスキューは、直接人命を左右し極めて重要である。

また、阪神淡路大震災でのデータでは瓦礫の中に埋もれた要救助者を72時間以内に救出しないと、その生存確率は5%以下になってしまうことが報告されており、迅速な人命救助が望まれる。そこで、人が近づくには危険な場所の情報収集や人命救助のためのレスキューロボット・システムの研究開発が注目を浴びている。

このような背景から、文部科学省は2002年度より5年間のプロジェクトとして大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特プロジェクト)を開始した。国際レスキューシステム研究機構は被災者救助等の災害対応戦略の最適化における「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」

プロジェクトを受託し、研究開発を推進している。国際レスキューシステム研究機構(IRS)は産官学民の英知を集結して、大規模災害から人を救い出すレスキューシステムを構築することを目的に2002年4月18日に設立された特定非営利活動法人(NPO)である。

本稿では、IRSが開発しているレスキューロボットのうちクローラ型のロボットを紹介し、ロボットの走破性を高めるためのソフトマテリアルの活用事例について述べる。

2. IRSにおける研究開発課題と想定シナリオ

IRSは神戸市と川崎市にラボラトリーを設置し、研究協力者も合わせると200名以上の研究者が

- 1) 情報収集ロボット：移動技術、情報マッピング
- 2) インテリジェントセンサーと携帯端末：情報収集技術、分散統合センシング技術
- 3) ヒューマンインターフェイス：遠隔操作技術、情報提示技術
- 4) 総合システム

の4つのテーマを中心に、レスキューロボット・情報システムの開発研究を行っている。

IRSが大大特プロジェクトで推進しているレスキューロボット・システム開発研究では、まず2002年からの5年間で、人間が近寄れない災害現場等において情報を収集す

るロボットを開発することを目的としている。2005年度からは、実災害でのレスキューロボットシステム運用シナリオを考え、以下の4つのミッションユニット(MU)のもと研究開発を進めている。

1. 上空移動体を用いた情報収集MU(上空MU)
2. 瓦礫上移動体を用いた情報収集MU(瓦礫上MU)
3. 瓦礫内移動体を用いた情報収集MU(瓦礫内MU)
4. 広域災害情報収集のための社会インフラMU(インフラMU)

レスキューロボットシステム運用シナリオとして以下のように考えている。

・平時

平時にはインフラMUの航空機、分散センサ、ネットワーク家電、PDAにより収集された情報とシミュレーショングループ(大大特プロジェクトの他のグループ)によって開発されている包括的災害救助シミュレータによってGIS(地理情報システム: Geographic Information System)上に防災マップが整備される。また、災害現場を模したテストフィールドでロボット活用の現場訓練がなされる。また、平時の3次元GISデータを基にシミュレーションにより仮想的な災害空間を構築し、仮想避難訓練や仮想空間におけるレスキューロボットの遠隔操作訓練に活用する。

・発災直後

発災直後には上空MUのインテリジェントヘリが出動し、カメラやレーザーレンジファインダーなどの搭載センサを用いて、被災地の大域的な情報を収集する。これらの情報を集約し、被害の大域的な状況をGISを用いて提示し、状況の正確な把握と、どの地域にどのMUを向かわせるかの対応戦略策定、意思決定の支援を行う。

・発災数時間後

上空MUの飛行船やバルーンは情報タグ、携帯アンテナ、赤外線カメラなどで被災者情報を収集するとともに、カメラやレーザーレンジファインダーなどを用いて詳細な環境マップを作成し、さらに救助隊・瓦礫上のレスキューロボットや瓦礫内のレスキューロボットの位置同定や通信中継などの行動支援を行う。瓦礫上MUでは救助隊により倒壊現場に投入されたロボットが瓦礫の上の比較的局所的な範囲を移動し、カメラなどで被災者情報を収集するとともに、構造破壊の状況やガスや危険物の状況を調査する。瓦礫内MUでは救助隊により倒壊現場に搬入されたロボットが瓦礫の上や横の開口部から瓦礫内に投入され、遠隔操作により移動し、赤外線カメラ、温度センサーなどのセンサーを用いて瓦礫内の被災者情報を収集する。インフラMU・上空MUにより収集された情報はグローバルマップ上に、瓦礫上MU・瓦礫内MUによって収集された情報はローカルマップ上(グローバルマップ上では点となり、ローカルマップはその点にリンクされる)にマッピングされる。マッ

ピングされた情報に基づいて、救助隊がアドバンスツール(瓦礫内MUで開発)をもって救助を行う。また、マッピングされた情報のうち日常生活に必要なものをインフラMUの情報インフラや上空MUの気球を用いて住民に配信する。

IRSではこのような想定シナリオを実現でき、想定外の事態にもロバストに対応できるシステムを実現するために研究開発を推進している。

Figure 1 Employment of a rescue robot

3. 最新レスキューロボットの紹介

3.1 探査用ヘビ型ロボット「IRS蒼龍」

「IRS蒼龍」は東京工業大学広瀬茂男教授とIRSとの共同で開発されたレスキューロボットである。広瀬研ではこれまでに非常に荒地走破能力の高い「蒼龍」^{1), 2)} というロボットを研究してきており、その3作目である蒼龍3号機を元に実作業現場の環境に対応できるよう防水防塵構造を取り入れ、各種センサの搭載などの改良を行ったものがIRS蒼龍である。

3.1.1 開発コンセプト

大大特プロジェクトの研究開発の中で、倒壊した家屋や倒壊の危険のある建物のなかに閉じ込められるなど救助を求めている被災者を探し出すためのロボットとしてIRS蒼龍は位置付けられている。蛇型であるIRS蒼龍はその細さによって瓦礫の狭い隙間などから建物内部に侵入することができ、その長さによって倒れた机などの高い障害物を乗

Figure 2 IRS Souryu

全長1200mm, 全幅130mm, 全高120mm

Figure 3 Souryu I
全長1200mm, 全幅180mm, 全高150mm

Figure 4 Souryu II
全長1200mm, 全幅130mm, 全高120mm

り越え、前進していくことができる。そして、これまでよりも早く被災者を発見し、さらにこれまでは不可能だった場所へ探索の範囲を広げることで、より多くの生命を救うことができると考えられる。

3.1.2 IRS 蒼龍による効果

このIRS 蒼龍は離れたところから有線でリモコン操縦を行うようになっている。レスキュー隊が被災者探索ツールとして使用することで、レスキュー隊員が自分自身の安全を確保しつつ探索作業を行うことができ、さらにこれまで危険なため探索活動ができなかったエリアへの探索範囲を広げることができると考えられる。

また、探索活動のためにあらかじめ行うレスキュー隊員の安全確保や障害物撤去作業などの付帯作業は、探索の結果被災者が見つからなかった場合には無駄な作業となってしまう。しかしIRS 蒼龍を用いることでそれら付帯作業なしに探索活動が行える可能性があり、探索作業における作業時間、労力ともに大幅な節約がみこめる。そのため、より広範囲の探索活動をより迅速に行うことができると考えられる。

3.1.3 IRS 蒼龍の構造

IRS 蒼龍は構造や寸法などは蒼龍3号に準じており、全長1200mm, 全幅130mm, 全高120mm, 重量約12kg, 最大段差乗り越え400mmと、その高い走破性能を継承して

いる。

本体は前節、中節、後節の3節に分離した構造をとっており、それぞれに1対の走行用クローラを装備している。また、それぞれの節と節の間は3本のリンクにより接合されており、そのうち2本のリンクの長さをそれぞれ変化させられるようになっている。これらを制御することで節間の角度を操作できるようになっている。

Figure 5 Body bending

3.1.4 IRS 蒼龍の操作性

IRS 蒼龍は走行のため、3つの節それぞれに1対のクローラが搭載されているが、対となるクローラは機械的に接続され同時に動くようになっている。さらに、それぞれのクローラを駆動する走行用モータには同じ速度指令値が与えられるようになっている。つまり、1つの指令値で3対6本のクローラが一度に回転する。

節間はリンクの長さを変更することでその角度を変化させるが、前節と中節、中節と後節にあるリンクは機械的に接合されており、その長さも連動して変わるようになっている。よって、前節と中節の角度を変えたと中節と後節の角度も等しく変わることになる。これらの機構によって、IRS 蒼龍は推進速度、節間上下角、節間左右角の3つの指令値で動作するよう構成されており、操縦者に直感的な操縦ができるようになっている。

3.1.5 IRS 蒼龍の搭載センサー

IRS 蒼龍にはリモコン操縦で被災者の探索を行うためにいくつかのセンサー類を搭載している。後節上部の超広角カメラでは、自分の姿勢も含めた周囲の状況を把握することができるようになっており、操縦者はこの映像をモニターで見ながらIRS 蒼龍を瓦礫内に進めていく。また、前節先端には対象物観察用カラーCCDカメラとサーモビジョンが取り付けられている。サーモビジョンは対象物の温度が高いものほど白く写る長波長赤外線カメラで、暗闇や表面が粉塵で覆われ目視でも被災者が判別できないようなときでも被災者と認識することができるカメラである。また、前節先端部にはステレオマイクとスピーカーが搭載されている。このスピーカーによって、倒壊家屋へ進入しながら「誰かいませんか」というように被災者への呼びかけをおこ

Figure 6 Sensors

ない、マイクによってその返答を聞き取ったり、合図の音を拾ったりすることで搜索を行う。さらに、被災者を発見した場合には周囲の状況や他の被災者について聞きだしたり、救助までのあいだ励ましたりすることに使用できる。他にも、対象までの距離を測るレーザー測距計や本体の姿勢を計る重力センサー、温度センサーなどを搭載する。必要に応じて、酸素濃度計や有毒ガスセンサーの搭載も考えられる。

3.1.6 IRS 蒼龍の今後

現状でIRS 蒼龍は実用化に極めて近いロボットである。このIRS 蒼龍を用いた震災現場での動作試験を行い、またレスキュー隊員との意見交換を行うなどして開発を進めている。現在は実験等で判明した問題点をもとに改良型の蒼龍を製作中である。製造コストや運用方法などまだまだ問題は多いが、現実にIRS 蒼龍が被災者探索を行うのもそれほど遠い未来ではないと考えている。

3.2 作業型不整地走行クローラ車両「HELIOS VII」

HELIOS VIIも、東京工業大学広瀬茂男教授とIRSとの共同で開発されたレスキューロボットで、レスキュー活動における偵察や要救助者の探査及び作業補助を目的として開発されたクローラ車両である。HELIOS VIIの特徴は、不整地走破に作業アームを使用するというコンセプトを設計に取り入れることによって、多様な運用が可能であるという点にある。

3.2.1 開発コンセプト

都市部での震災など広域災害における救助作業の機械化、効率化は極めて重要な課題であり、近年ではロボット技術の応用も検討されている。救助作業の現場は瓦礫などにより通常の走行手段では移動困難であるため、救助活動を行う機械は作業能力だけでなく高い対地適応性が求められている。HELIOS VIIは、これまで行われた数多くのスタイルのクローラ車両の研究、開発から得られた知見に、作業アームを不整地走破に使用するというコンセプトを付加することで、これまでの開発実績に基づく高い実用性に加え作業能力と更に高い対地適応性を得ることを狙ったも

Figure 7 HELIOS VII
全長700mm, 全幅600mm, 全高250mm

のである。

3.2.2 HELIOS VIIの構造

HELIOS VII以前でも走破性向上のために走行用アームを設けるスタイルは存在したが、HELIOS VIIでは作業用のアームの肘や手先に受動車輪を設け、走行用アームと同様の機能を持たせることで、走破性向上のための付加装備なしで同様の効果を得るだけでなく、作業用アームの高い自由度を生かして様々な局面における高い対地適応性と運用の自由度を得ることに成功した。さらに、アームを連結器として使用することにより複数台で連結して走破性を向上させるこれまでにない運用方法も視野に入れている。

3.2.3 HELIOS VIIの今後

現在、偵察や要救助者の探査用として数々のロボットが試作されておりそれらのサイズと比較するとHELIOS VIIの700mm×600mm×250mm(最小)というサイズは大型の部類に入る(例えば、探査ロボット「蒼龍I」であれば1200mm×180mm×150mm)。しかしながら、人が侵入できない隙間を移動して探査を行う「蒼龍」とは異なり、人が侵入できるサイズの空間を人の代わりに移動し探査を行う、あるいは後続の救助隊の安全を確認、確保するという目的を考えればこの大きさはむしろ手ごろであると言える。

一方、HELIOS VIIは重量が80kg強と重く、運搬車からの積み下ろしなど人手で運搬されることを考慮すると運用面で問題があると考えられる。そのため、全体のサイズを3/4とした軽量化モデルであるHELIOS VIIIの開発がHELIOS VIIの試験と平行して行われている。

Figure 8 HELIOS VII Stairs Climbing, High Step climbing and Connection mode

4. ソフトマテリアルの活用

レスキューロボット実用化のための開発課題の1つとして、ロボットが瓦礫フィールドを安定的に走破するための移動体の不整地走破性、障害物の乗り越え能力を向上させる課題がある。これを実現するため現在移動体の足回りとしてクローラを採用している。このクローラの部分でソフトマテリアルが重要な役割を果たしている。以下にHELIOSシリーズの開発を通して対地適応を目的とした新機軸の紹介を行い、最新レスキューロボットに採用したクローラユニットを紹介する。

4.1 対地適応を目的とした新機軸の紹介

HELIOSは東京工業大学の梅谷・広瀬研究室において、人の生活環境をはじめとする「人が活動する環境」に適応した移動機構を、在来型の車輪やクローラを改良するというアプローチで実現することを目標に製作された一連のロボット群である。そこには、重心移動やクローラの揺動などの新機構から車輪やクローラなどの接地点における工夫など様々なアイデアが盛り込まれている。

初代モデルHELIOS Iは、在来のクローラ車両に重心移動機構とクローラ表面に階段昇降用の伸縮スパイクを設けたのが特徴である。一般に車両の重心位置はその高さに応じて登坂や階段昇降時に谷側に移動するため、車両が転倒する危険性が増大する。人の生活環境においては階段のような自然の地形では稀な急勾配がごく普通に存在する。

したがって、転倒防止のため重心の移動機構が必須である。また、用途によっては荷室を水平に保ちたい場合もあることを考えると重心の移動と荷室の水平を保つ2自由度が必要になるがHELIOSでは、車両中央下部を回転中心とするアームで荷室を支える構造を採用することにより1自由度で重心移動と荷室の水平を実現している。また、クローラ表面の伸縮スパイクは、段差や階段におけるエッジに引っ掛けてトラクションを得るためのもので、伸縮方向には柔らかく、横方向(車両の進行方向)には剛くという性質が要求される。そのため板ばねを使用した機構を用いたのが特徴である。

HELIOS IIは揺動するクローラユニットを4つ装備したのが特徴で、これにより段差乗越え能力の向上、車高調整、信地旋回と超信地旋回におけるスリップロスの低減、傾斜地横断を実現した。また、クローラ表面の伸縮スパイクもコイルスプリングを使用したタイプに変更している。

HELIOS IIIは、段差や階段のエッジでトラクションを得る方法として、伸縮スパイクではなくスプリング車輪を採用したのが大きな特徴である。スプリング車輪とは、ゴムタイヤの代わりにコイルスプリングに摩擦係数向上とスプリングの動きをある程度拘束するためのウレタンブロックを組み合わせたもので、機構の単純化と部品点数の低減化を狙ったものである。また、重心移動機構も、車両中央下部に回転中心を持つというこれまでのコンセプトを踏襲しつつ、低トルクで駆動できるように改良したRC(Remote Center)機構を採用した。

Figure 9 HELIOS I

HELIOS IVでは、Ⅲのスプリング車輪をさらに簡略化し、低圧ゴムタイヤでエッジにおけるトラクションを得ることを狙った(Fig.12)。続く HELIOS Vでは、低圧タイヤに輪切り状に切れ込みを入れることによって、伸縮スパイクと同様の効果を得ることを実現した(イカリングタイヤ)(Fig.13)。

HELIOS VI, VIIでは、これまでのようにクローラやタイヤに複雑なギミックを持たせることをやめ、通常のゴムクローラのラグパターンのみを工夫したものを採用した。伸縮スパイクやスプリング車輪は段差乗越えや階段昇降において効果があることは実験によって確認されているが、複雑で部品点数が多く常時メンテナンスが欠かせないというマイナス面があったためである。そのかわりに、段差や階段昇降の際に胴体を持ち上げるためのアームを装備することで階段昇降などを実現した。

このように、HELIOSシリーズにおける対地適応の工夫は大きく分けると重心移動機構と段差エッジにおけるトラクションを得る方法の2つであり、前者に関しては、荷台などの車体重量部を、車体中央下部を回転中心とするリンク機構、あるいはRC機構によって制御する機構設計が可

能となった。

一方、後者に関しては、初期における機械的な仕組みを使ったものから、コイルスプリング、切れ込みを持ったタイヤ(イカリングタイヤ)とメンテナンス上の課題からソフトマテリアルを活用し構造的にシンプルになるよう改良を続け成果を挙げてきた。このことは、段差エッジでも安定したトラクションを得ることと、運用面において手間がかからない(=シンプルな構造)ことを両立させるための有効な手段において、ソフトマテリアルが重要な役割を果たし

Figure 12 HELIOS IV

Figure 10 HELIOS II

Figure 13 HELIOS V

Figure 11 HELIOS III

Figure 14 HELIOS VI

Figure 15 HELIOS VII Crawler Unit

ていることを意味しており、今後さらにソフトマテリアルに注目していきたいと考えている。

4.2 最新クローラユニットの紹介

不整地走破性向上やロボット稼動時間の延長等、レスキューロボットを実用化する上では、ロボット全体の軽量化やエネルギー損失低減も重要である。クローラユニットにおいても、ユニット全体の軽量化やゴムクローラベルトのプリロードによる走行抵抗低減によるエネルギー損失低減が必要であるが、クローラのサイズ的には農業機械用以下のものとなり、このニーズを満たす既存製品は存在していなかったが、東京工業大学の広瀬・米田研究室とトピー工業(株)が共同でロボット用の新機軸ゴムクローラを開発した。開発品は超軽量、低走行抵抗、高不整地走破性を兼ね備えることを開発コンセプトとしている。さらにゴムクローラベルトの伸びが少ないことにより、テンションのストローク長が短縮でき、テンション構造を簡略化することでユニット全体の軽量化も実現し、防塵防水構造も取り入れられ、実作業現場の環境に対応できるモデルになっている。また開発品は、HELIOSシリーズの開発における対地適応の知見より、段差エッジでトラクションを得る基本的な考え方は初期の伸縮スパイクから変わっていないが、それを実現する方法として、機械的なカラクリを使用せずソフトマテリアルの弾性変形を積極的に活用することで、非常にシンプルな構造で瓦礫フィールドでの高不整地走破性を実現していることから、「IRS 蒼龍」と「HELIOS VII」(Fig.15)にロボット用の新機軸ゴムクローラを採用している。

5. お わ り に

以上述べてきたように、不整地走破性、障害物の乗り越え能力を開発課題の1つとしているレスキューロボットのクローラ足回りには、現在のところソフトマテリアルを活用することが最も有効であると考えられている。今後レスキューロボットのクローラ足回りへの適用としてソフトマテリアルに期待していきたいことは、寿命や耐熱性等実用上の性能向上と瓦礫フィールドにおけるトラクション向上

である。後者においてはタイヤやクローラの形状だけでなくソフトマテリアルの材質的な工夫、例えば粗密や組成の分布を制御した成型等によって新たな展開を見せることになると考えている。

参 考 文 献

- 1) Takayama, T., Hirose, S.: *Journal of Robotics and Mechatronics*, **15**, 61 (2003)
- 2) Takayama, T., Hirose, S.: *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems September 28 - October 2, 2004, Sendai, Japan*, 52 (2004)

*¹電気通信大学知能機械工学科(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)教授、工博。昭和61年(1986年)大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。専門分野は、ロボティクス、制御工学、レスキュー工学。

*²NPO国際レスキューシステム研究機構(〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-2(NKK旧体育館))研究員。平成8年、東京工業大学理工学研究科修士課程終了。専門分野は、ロボティクス。

*³NPO国際レスキューシステム研究機構(〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-2(NKK旧体育館))研究員。平成6年 東京工業大学理工学研究科修士課程終了。平成6年(株)小松製作所入社。研究本部中央研究所にて勤務の後、平成14年に退社。同年、NPO国際レスキューシステム研究機構の常勤研究員として現在に至る。専門分野は、ロボティクス。

*⁴東京工業大学大学院機械機械宇宙システム専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)教授、工博。昭和51年、東京工業大学博士課程制御工学専攻修了。専門分野は、ロボットの創造設計、災害救助ロボット、人道的地雷除去ロボット他。

*⁵トピー工業(株)技術統括部技術研究所(〒441-8510 豊橋市明海町1番地)。平成5年、神奈川工科大学工学部機械システム工学科卒業。同年、トピー工業(株)入社、現在に至る。専門分野は、機械システム。