解 説

サブクローラを持つレスキューロボット

Rescue Robot with Active Sub Crawlers

小 柳 栄 次* *千葉工業大学未来ロボット技術研究センター

Eiji Koyanagi* *Chiba Institute of Technology

1. は じ め に

ロボット開発は目的指向の問題解決型で行われることが多く、レスキューロボットも例外ではない。レスキューロボット開発として、大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特)が示した指針は、その後の研究開発に大きな影響を与えた。Kenafと名付けられたロボットは、NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト被災建造物内移動 RT システム(特殊環境用ロボット分野)閉鎖空間内高速走行探査群ロボット(戦略PJ)において、実用化に向けたプラットフォームとして開発されている。Kenafは、大都市の地下街、地下駅構内で想定されるCBRNテロ、ガス漏れ事故やプラント事故などの災害現場において、その初動調査を目的に開発されている。

レスキューロボット開発が困難なのは、被災現場環境の複雑さにある。大大特では要救助者の捜査活動に対し、上空から、瓦礫上から、瓦礫内からに大別し、それぞれのミッションに対応したロボット開発の必要性を示した。これはロボットの物理的な大きさが、機能として有効に作用する場合と逆に障害となる状況を示した。

戦略PJで想定している災害現場は、地震災害と比較すると環境へのダメージは少ないと思われる。一方でテロ活動は、爆発物との併用や規模、救助のためのインフラへの破壊工作は、救助活動を著しく遅延させ困難になることが想定される。このため人命救助活動、被害状況の把握、原因物質の特定などを迅速に行うことが求められる。

2. レスキューロボット Kenaf

迅速な人命救助活動を支援するため、Kenafの移動速度は平坦地を1.2[m/s]で走行、階段の昇降および階段途中での方向転換機能、コンクリートおよび木材瓦礫上での走破能力、高さ30[cm]の段差踏破。また、1回の充電でおよそ2時間の稼働能力を有し、軽量で狭隘環境にて使用可能、

図1 瓦礫上を走行するレスキューロボット Kenaf

かつ、防爆機能を有することが求められている。これらの要求仕様を満たすため、本体は軽量なラダーフレーム構造、ゴム製クローラの開発、前後左右に独立して操作できるサブクローラを装備した。

2.1 Kenafの特徴

Kenafの外観上の特徴を図1に示す。

(1) メインクローラ

ロボットのボディ全体を覆うように装着される。これは、ロボット本体の鉛直方向投影面積のうち、クローラ部分が95%以上を占める。広い接地面積を持つメインクローラは、有効な駆動力を伝達し、瓦礫上でスタックすることは極めて少ない。

クローラの素材は図2に示すように、台形歯形ベルト(H:ベルトピッチ12.7[mm])をベースに、幅をおよそ147[mm]に延長、厚みを8[mm]とした。接地面のトレッドパターンは、高さや幅が異なる単純な凹凸で削り出しにより成型した。構造上、歯付きベルトのテンションメンバーはそのまま機能しており軽量、強靱、しなやかでフリクションロスが少ない走行システムの構築を可能にした。

メインクローラを駆動するプーリは、幅およそ120[mm]で歯数22枚である。このプーリには、蛇行防止のフランジはなく、クローラのためのテンショナーも装備していない。前後のプーリにはクラウンもないが、精密な加工と組

原稿受付 2009年12月21日

キーワード: Rescue Robot, Disaster, Crawler Vehicle, Sub Crawler

*〒275-0016 習志野市津田沼 2-17-1

*Narashino-shi, Chiba

み込みを施した結果、その場旋回や曲線追従走行時でもクローラは蛇行しない。

(2) サブクローラ

前後左右、合わせて4本装備されているサブクローラは、4本がそれぞれ独立して制御され、無限回転が可能である。サブクローラを支持するアームの回転方向は、ロボットの走行状態と走行路面の状況により、操作員が適宜判断するが、走行機能：2自由度、サブクローラ：4自由度とかなり複雑な操作が要求される。このため、PSD センサにより路面の段差を検出し、半自律制御による走行制御方式[1]が、また、図3に示すように、左右のロボット側面に、レーザレンジファインダを取りつけ、瓦礫の高さの変化を連続的にセンシングしながらサブクローラの位置を制御し、ロボット本体の姿勢を制御しながら走行する方式[2][3]がそれぞれ研究されている。

図2に示すように、サブクローラ先端部の直径が駆動部分より大きいのは、瓦礫の隙間に先端部が挟まることを減少させるのに有効である。特に段差から降りた直後、サブクローラの先端部分が瓦礫の隙間に「刺さる」と、その状況からの脱出が困難である。

サブクローラの素材はメインクローラと同じであるが、地部分（ゴム）の成型パターンは異なる。また、先端部のプーリにはフランジが設けられているが、歯形は成型されていない。

図2 メインクローラと先端径の大きいサブクローラ

図3 左右のレーザレンジファインダにより連続して段差を検出。操作者は、ロボットの数値と方向を指示する。ロボットは段差の高さに応じてサブクローラを制御する

(3) 低重心設計

不整地を走行するレスキューロボットでは、横転の危険が伴う。横転を防ぐには、トレッドを広げるか、ロボット構造全体の低重心化が求められる。Kenafでは、密度の大きいモータ・ギアヘッド、バッテリーなどを可能な限り低い位置に装備し、走行時の重量22[kg]、バンク角82[deg]を実現している。

3. サブクローラの機能

サブクローラを装備することにより、階段昇降時には接地部分の全長を伸ばすことができる。これにより、階段のエッジ部分の2～3点が連続して接地し、有効な駆動力を伝達しスムーズに階段を昇降することができる。また、狭隘地では、サブクローラを内側にたたみ込むことにより全長を短くする。このとき、サブクローラの先端部が接地する見かけ上のホイールベースはかなり短く、旋回性能を向上することができる。図4、5にサブクローラのポジションとロボットの走行状態を示す。

図4 70[cm/s]で走行するKenaf

図5 階段途中での方向転換。低重心、ワイドなメインクローラ、サブクローラの相乗効果

図6 サブクローラを持たないロボットのイメージ

図7 前方にサブクローラを持つロボットのイメージ

図8 後方にサブクローラを持つロボットのイメージ

段差踏破時には、サブクローラの取り付け位置、本数、長さ、無限回転の可否によりその機能が大きく異なる。また、メカニズムの複雑化と重量の増加というデメリットもあるが、瓦礫上の走行には、左右のサブクローラが独立して制御できることが重要である。

3.1 サブクローラを持たないロボットの段差踏破

クローラ駆動のロボットは、図6に示すように垂直な壁面でも水平面からの駆動力により、壁方向の接地圧が得られる。この接地圧により上方への駆動力が発生しロボット本体は壁面を昇る方向に移動する。一方で、段差の高さとロボットの全長、重心位置の関係からこのままでは後方に転倒する。

3.2 前方にサブクローラを持つロボットの段差踏破

図7に示すように、高い段差のエッジ部分にサブクローラを掛け、段差踏破を行う。一見可能に見えるが、後方に転倒する。

3.3 後方にサブクローラを持つロボットの段差踏破

図8に示すように、サブクローラを床面に押しつけ、本体をスイングアップさせる。さらにスイングアップしながら前進し、本体の前部クローラを段差上のエッジ部分に掛ける。次に、サブクローラアームを上方から旋回させ、ロボット本体を押し上げる。ここでさらに前方に走行すると、段差上にロボット本体を移動させることができる。

図9 サブクローラ先端部高速回転機構（左）とサブクローラベルト高速周回機構（右）

このように、サブクローラを後方に装備することにより段差踏破が可能になる。しかし、実際の現場では、昇ることと降りる行為が必要であり、前後にもサブクローラを装備しないと、安定した昇降を実現することができない。また、サブクローラを用いて本体をスイングアップさせるには、サブクローラのアーム長さが十分に長いことが必要となる。Kenafでは、サブクローラが短く、本体をスイングアップすることはできない。

4. サブクローラによる高速走行メカニズム

クローラによる移動方式は車輪型と比べ高速走行には適さない。一方、戦略PJでは迅速な人命救助活動のため、平坦地での移動速度は 1.2 [m/s] 以上の速度が要求されている。このため、サブクローラによる高速移動方式[4]を基に、メインクローラの周速度とは異なる周速度で高速移動させる二つの方式を開発した。

(1) サブクローラ先端部高速回転機構

図9（左）に示す機構は、サブクローラベルトにより先端部のプリーが増速回転する。増速された先端部プリーの中心には別の歯付きベルトが装着され、さらに増速する車輪軸上のプリーに導かれる。この結果、車輪の周速度はサブクローラベルトの3倍以上となり、ロボットは 3 [m/s] という高速度で走行する。

(2) サブクローラベルト高速周回機構

図9（右）に示す機構には、サブクローラ駆動プリー内に増速機として機能する遊星歯車機構が内蔵されている。このため、メインプリーからの入力によりサブクローラ駆動プリーはおおよそ2.5倍に増速され、サブクローラベルトを高速周回させることになる。実際の走行では、遊星歯車装置の伝達効率、サブクローラベルトトレッド部パターンによる振動などにより、2倍弱の高速走行が確認された。

5. 瓦礫走破性能の評価

瓦礫上の走行性能評価は非常に難しい課題である。ロボット本体が大きければ、相対的な段差の高さは低くなり容易に段差踏破が可能である。一方、大きなロボットは重量が大きく、走行するだけで瓦礫環境に大きな影響を与える。災害現場で、大型の建設機械が入り込めないのは、足場の不

図 10 ランダムステップフィールドを利用した実験

図 11 実環境での総合実験, コンクリート瓦礫フィールド(左)と木材瓦礫フィールド(右)

安定さによるところが大きく、救助のための機械装置が二次災害発生の引き金になりかねない。

(1) Random Stepfield

図 10 は DHS/NIST により提案された実験フィールドで、再配置可能な構造になっている。図 1 の瓦礫フィールドでは、1 回ごとに瓦礫の配置が異なり、定量的な評価が得られにくい。

図 10 では、PSD センサを用いた段差の検出と、その情報に基づいたサブクローラ制御実験を行っている。規格化された大きさの木材ブロックは比較的崩れやすいが、ただちに修復可能である。実験では、センサの配置、制御アルゴリズムなど、瓦礫上走行の検証から、走行に要した電力的なコストなど総合的な視点からロボットの性能を検証す

ることができる。

(2) 実環境での実験

図 11 は、テキサス：デザスターシティでの実験風景である。危険を伴う実環境での実験であるが、遠隔操作の限界と環境認識の重要性が再認識された。

6. お わ り に

サブクローラを持つレスキューロボットの可能性について紹介した。災害現場は、限られた時間、資材、複雑な環境など、想像以上の困難さがある。一方で、「人の命を助けることのできる RT 技術開発」。読者の熱いチャレンジに期待する。

謝 辞 本報告の一部は、NEDO 戦略PJ (2006～2010) の助成により行われている。

参 考 文 献

- [1] K. Ohno, S. Tadokoro, E. Koyanagi and T. Yoshida: "Semi-autonomous Control System of Rescue Crawler Robot Having Flippers for Getting Over Unknown-Steps," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3012-3018, 2007.
- [2] K. Nagatani, A. Yamasaki, K. Yoshida, T. Yoshida and E. Koyanagi: "Semi-Autonomous Traversal on Uneven Terrain for a Tracked Vehicle Using Autonomous Control of Active Flippers," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2667-2672, 2008.
- [3] Y. Okada, K. Nagatani and K. Yoshida: "Semi-autonomous Operation of Tracked Vehicles on Rough Terrain using Autonomous Control of Active Flippers," 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2815-2820, 2009.
- [4] 大場義幸, 林原靖男, 吉田智章, 小柳栄次: "変速機構を持つ形状可変型 6 クローラシステムの開発", SI2005, pp.3H4-2, 2005.

小柳栄次 (Eiji Koyanagi)

2003 年筑波大学大学院博士課程工学研究科知能機能工学専攻修了。博士(工学)。神奈川県公立学校教諭。桐蔭横浜大学助教授、教授。現在千葉工業大学未来ロボット技術研究センター副所長。不整地走行メカニズム、レスキューロボット、住宅床下点検ロボット、プラント配管外面腐食点検ロボットの研究に従事。