

知能化技術を用いたフリッパを有するクローラロボットの遠隔操縦支援 —分布的接触センサを用いた転倒回避戦略—

AI Based Remote Control Support for Tracked Robots with Flippers —Rollover Protection Strategy using Distributed Touch Sensors—

井上大輔^{1*} 大野和則¹ 中村信介¹ 田所諭¹

Daisuke Inoue¹, Kazunori Ohno¹, Shinsuke Nakamura¹, Satoshi Tadokoro¹

¹ 東北大学

¹ Tohoku University

Abstract: The authors aim at development of a rescue crawler robot to search for victims in rubble environment. Crawler robot with flippers "Sinbad" was built for the purpose. The robot has 6 degrees of freedom (DOF) for getting over the rubble. However, it is too hard for an operator at the remote place to control these multi degrees of freedom. In this paper, the authors will explain our approach of AI based control support for the crawler robot with flippers. Especially, the authors will explain about our developed distributed touch sensors for the crawler robot, and propose a method of rollover avoidance based on the distributed touch sensor.

1 背景と目的

自然災害やテロの現場において被災者を発見するレスキューロボットの開発が進められている。レスキューロボットは瓦礫のような未知の不整地上を素早く安全に移動することを要求される。その要求を満たすため、レスキューロボットの移動機構には脚とクローラの特徴を合わせもった可変型のクローラ機構がよく用いられる。

図1に我々の研究グループで開発した可変クローラ Sinbad を示す。Sinbad は4つのフリッククローラを有し、それを地形に合わせて適切に回転させることで、段差踏破や転倒回避が可能である。しかし、可変クローラのような多自由度の機構を人間の操作で適切に遠隔操縦することは極めて困難であり、現状ではその能力を十分に発揮できていない。この問題の解決策のひとつとして、AIなどの知能化技術を用いた遠隔操縦サポートが考えられる [1][2]。我々はこの考えに基づき、可変クローラの遠隔操縦をサポートするためのAI技術を応用した遠隔操縦システムを開発した [3]。

このシステムでは、フリッパは環境に合わせて条件反射的に制御され、操縦者は移動方向と速度のみを指示すればよい。我々はこのシステムの実装により操縦者の負担が著しく軽減され、より迅速で効率的な探査が可能となることを確認した。しかし、このシステム

ではロール方向の転倒が起こりやすく、しばしば探査の妨げとなっていた。転倒の例を図2に示す。Sinbad は地下街探査の際に改札のような狭い場所を通過できるように横幅を細く設計してあるため、ロール方向に転倒しやすい。ロール方向に転倒すると復帰できないため、その対策が必要となる。

本研究では、分布接触センサを用いたフリック型クローラロボットの自律的な転倒防止を目的とする。脚型ロボットの転倒を予測するためには、足裏の接触力を計測すればよいことが知られている。それに対して本研究で用いるロボットは全身のクローラで接地するため、クローラ表面の接触力分布を計測する必要がある。しかしクローラは連続的に回転するため、接触センサの取り付け方法が課題となる。著者らはこの課題を解決し、クローラ表面の接触力分布を計測するセンサを開発する。このセンサを用いて転倒を予測することで、図2のような転倒を自律的に防止できる(図3)。

本稿の構成は以下の通りである。2章では、転倒予測および分布接触センサに関する既存の研究をまとめ、3章でそれらに対する本研究の特色について述べる。4章では、提案する転倒防止戦略について説明する。5章では、開発したクローラ用分布接触センサの構造を紹介し、6章でその基礎的な評価を行う。

*連絡先： 東北大学情報科学研究科応用情報科学専攻
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01
E-mail: inoue@rm.is.tohoku.ad.jp

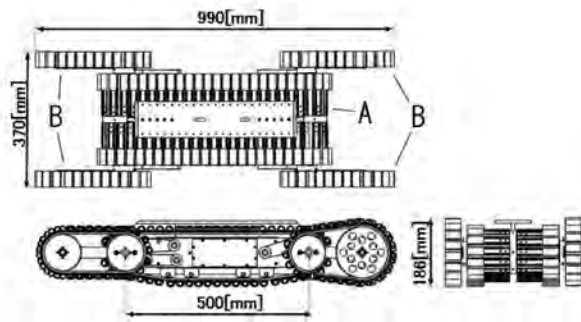


図 1: Tracked mobile robot having 4 flippers: Sinbad

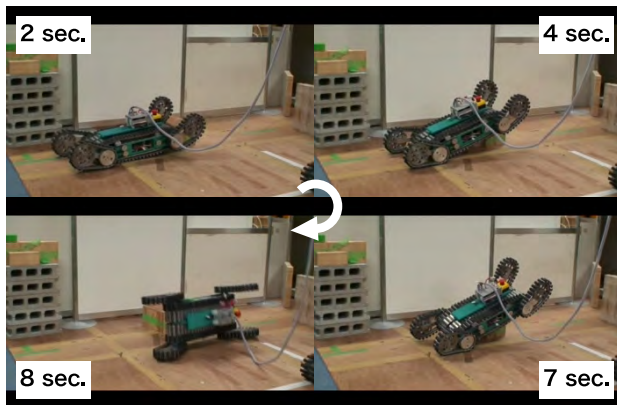


図 2: The robot is rollover without control of flippers

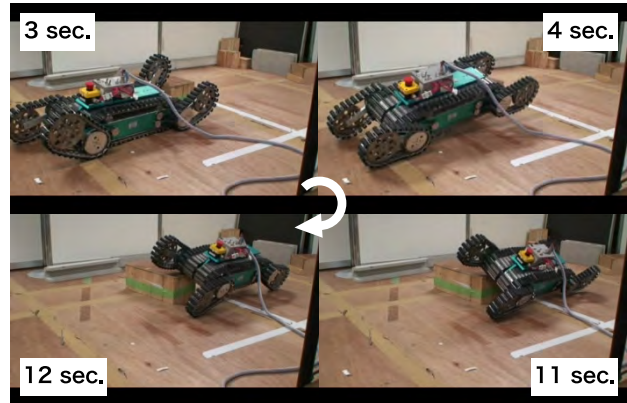


図 3: The robot gets over a step by autonomous control of flippers

2 関連研究に対する本研究の特色

2.1 可変クローラ機構

これまでに開発された可変型のクローラは、大きく次の3つに分類できる。1つめは、クローラ自体を変形できる形状可変クローラである。岩本らが開発したロボットがこれに相当する [4][5]。2つめは、クローラ付きのアームを備えるフリッパ型クローラである。iRobot社の軍事ロボット Packbot などがこれに分類される [6]。3つめは、複数のクローラを連結した連結型クローラである。広瀬らの開発した群竜 [7] や蒼竜 [8] などがこれに相当する。

フリッパ型クローラは形状可変型や連結型に比べてシンプルな構造である。このためメンテナンス性に優れ、フリッパやクローラベルトの換装が容易である。この理由から、本研究ではフリッパ型を用いる。

2.2 移動ロボットの転倒予測

転倒を自律的に防止するためには、転倒を予測する手法が必要となる。転倒を予測する手法は、脚型ロボットの分野において多数提案されている。McGhee らは

幾何学的な転倒予測指標である安定余裕の概念を提案した [9]。その後、安定余裕を動力学的に拡張する ZMP の概念が Vukobratovi らにより提案された [10]。これらの概念は水平面上で定義されるため、斜面や不整地上では正確な転倒予測ができない。

それに対し、Dominic らは転倒に要するエネルギーの大きさで安定性を評価するエネルギー安定余裕を提案した [11]。これを自重で割った正規化エネルギー安定余裕 [13] が広瀬らにより提案された。また、転倒軸まわりのモーメントで安定性を評価する転倒安定余裕が米田らにより提案された [12]。これらの手法は斜面や不整地上でも成り立つよう考慮されている。

一方、クローラの転倒予測に関する研究はほとんどなされていない。クローラは不整地上を移動することを前提に作られているため、エネルギー安定余裕や転倒安定余裕を用いた転倒予測が有効である。本稿では、エネルギー安定余裕を用いた脚型ロボットの転倒予測をクローラロボットに拡張する。

2.3 移動ロボットの分布接触センサ

移動ロボットの接触位置を検出する手法はいくつか報告されている。車輪型ロボットにおいては、低圧タイヤの変形を計測することで接触位置を検出する手法 [14] が提案されている。クローラロボットにおいては、シューの傾きから接触位置を検出する手法が提案されている [15]。

また、ヒューマノイドの全身の接触力分布を計測する手法が稲葉らにより開発されている [16]。しかし、クローラの接触力分布を計測する手法は報告されていない。本稿では、クローラの接触位置と接触力分布を計測する手法を提案する。

表 1: Basic specification of "Sinbad"

DOF	2 for running, 4 for arms
Max. speed	1.1 (m/s)
Max. size	900 x 370 x 186 (mm)
Total weight	27 (kg)
battery	Li-Po 22.4 (V), 4000 (mAh)

3 クローラロボットの転倒防止戦略

3.1 ロボットの構造

図 1 に本研究で対象とするフリッパを有するクローラロボット Sinbad を示す．表 1 にその主な仕様を示す．Sinbad は不整地において車輪型に比べて高い安定性を持ち，脚型のロボットに比べて速い移動速度をもつ．このため，レスキューロボットに適している．このロボットは移動 2 自由度，フリッパ回転 4 自由度の合計 6 自由度をもつ．この機構により，車輪型ロボットに比べて高い不整地移動能力をもつ．また最大移動速度はヒトの歩行速度程度の 1.1 (m/s) であり，脚型ロボットに比べて速い．ロボットの横幅は改札のような狭い場所を通過できるように狭く設計しており，370 (mm) である．このため比較的ロール方向に対して転倒しやすい．ロール方向に転倒すると復帰できないため，転倒防止のための戦略が必要となる．

3.2 戦略の概要

脚型でもクローラでも，転倒する瞬間は線接地になり，そこを軸に転倒する．従って脚型ロボットの転倒予測指標はクローラに拡張することができる．

提案手法のフローチャートを図 4 に示す．このフローチャートは 1 制御周期あたりの処理を示している．まず分布接触センサを用いて，クローラの接触力分布 \vec{F} を計測する．同時に姿勢角 $\vec{\Psi}$ とフリッパ関節角 $\vec{\Theta}$ も計測する．これらの計測に基づき，次節に示す方法で安定余裕 S_i を計算する．計算された S_i に基づき，転倒する可能性の高い方向を予測する．転倒が予測された場合には，転倒防止のためのフリッパ動作を決定する．転倒が予測されない場合には，段差踏破のためのフリッパ動作を決定する．最後にフリッパ動作を実行するため，4 本のフリッパの目標角度 $\vec{\Theta}$ を出力する．

3.3 クローラロボットのエネルギー安定余裕

本稿では，エネルギー安定余裕 [11] を用いてクローラの転倒を予測する手法を提案する．エネルギー安定

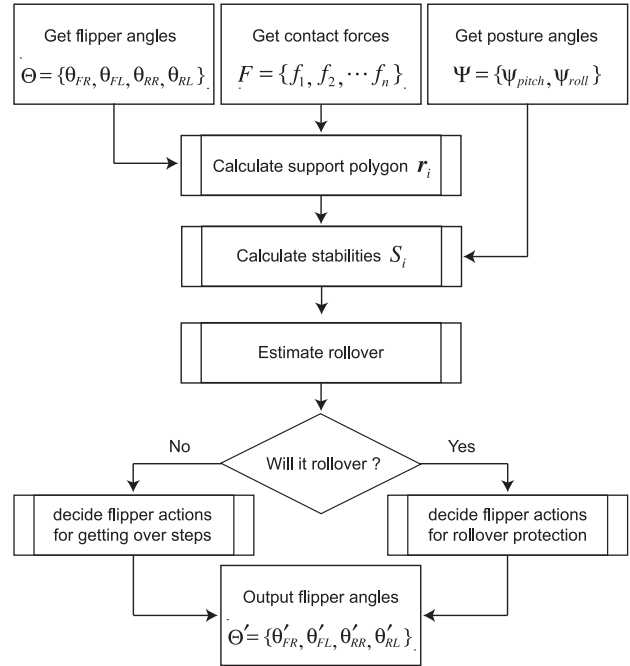


図 4: Flowchart of rollover protection strategy

余裕とは，物体が転倒するために必要なエネルギーである．これが小さいほど，その転倒軸を中心に転倒を起こしやすい．その計算は，転倒する瞬間の位置エネルギーを推定し，現在の位置エネルギーとの差分をとることで行われる．

図 5 に提案するクローラのエネルギー安定余裕の計算イメージを示す．まず，センサから得られた接触点を繋ぎ合わせて凸多面体を作成する．この凸多面体をロボット底面に水平な 2 次元極座標に投影することで，仮想的な支持多角形を作成する．その支持多角形のすべての辺を転倒軸の候補 r_i とみなし，それらについて式 1 を用いてエネルギー安定余裕 S_i を計算する．

$$S_i = mgh_i(1 - \cos \alpha_i) \quad (1)$$

ここで， m はロボットの質量， g は重力加速度， h_i は i 番目の辺 r_i からその軸を中心に転倒する瞬間のロボット重心までの距離， α_i は現在のロボット重心と r_i を結んだ直線が重力方向となす角である．

4 クローラ用の分布接触力センサ

4.1 戦略に必要な分布接触センサの仕様

上述の提案手法を実現するためには，ロボットのロール角，ピッチ角，フリッパ角，クローラと地面との接触位置を計測する必要がある．ロール角とピッチ角は Sinbad に搭載されている 3 軸加速度計 (Crossbow 製，

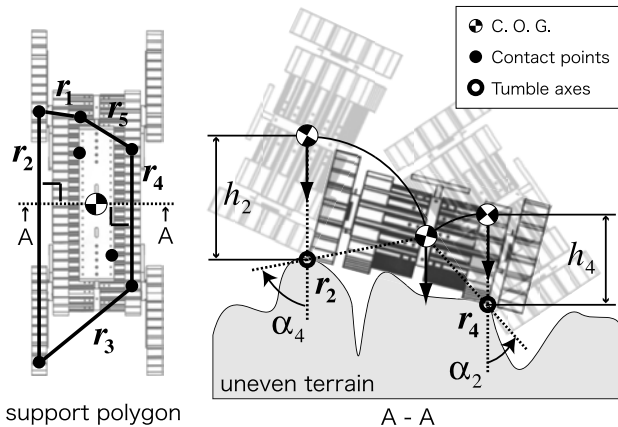


図 5: Energy stability margin of tracked robots

型番：CXL04LP3) を用いて計測される。フリッカ角はモータに取り付けられたロータリーエンコーダを用いて計測される。クローラと地面との接触位置を計測するセンサがあれば提案手法を実現できる。クローラに分布接触センサを実装するためには、以下の点について考慮する必要がある。

1. センサの取り付け範囲
ロボットの底面は広い面積をもつため接触しやすい。このため、特にロボット底面のクローラへの分布接触センサの取り付けは重要である。またフリッカクローラの接触分布の計測は、段差の高さ推定や踏破のために重要である。クローラはスプロケットにより駆動され回転するため、クローラ表面へのセンサの取り付けには工夫が必要である。
2. センサの分布密度（空間分解能）
限られた空間にたくさんのセンサを分布させるため、できるだけ小さい素子を用いる必要がある。また素子数の上限はサンプリング速度によって決まる。少なくとも制御周期 30 ms より速いサンプリングが必要である。
3. 耐荷重性チェーン張力や自重や地面との衝突に耐える必要がある。計測したい最大荷重は、3点接地のときの自重による荷重 9 kgf である。
4. 耐摩擦性
チェーンの駆動による摩擦力を考慮する必要がある。

4.2 チェーンガイドを用いたセンサ構造

これらの要求を満たすため、著者らはチェーンガイドおよび複数の薄型感圧センサを用いた分布接触セン

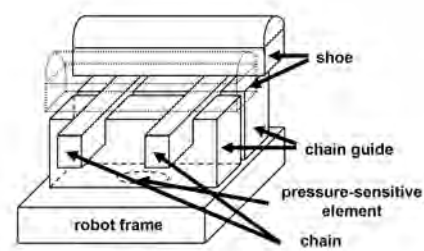


図 6: Conceptual design of our sensor

サを提案する。図 6 に提案する接触センサの概念図を示す。クローラを駆動するチェーンと本体の間にチェーンガイドを設置し、チェーンガイドの内部に感圧センサを複数取り付けすることで、クローラシューやチェーンに加わる力を間接的に計測した。チェーンガイドを介して接触することで、センサに加わるせん断応力を極力小さくできる。チェーンガイドの磨耗を軽減するため、動摩擦係数の小さい材料をチェーンガイドに用いた。感圧センサにはニッタ株式会社製の FlexiForce(厚さ 0.208 mm) を使用した。

この手法の利点は、チェーンを回転させる駆動スプロケット以外の全ての位置に接触センサを設置できることである。一方この手法の欠点は、チェーンガイドの摩擦により駆動トルクが大きくなることと、チェーンガイドが磨耗することである。これらの欠点を解消するため、チェーンガイドの材質として動摩擦係数が小さい高分子素材 U-PE100 を採用した。

4.3 感圧抵抗要素子

素子の感圧部に垂直荷重が加わると導電性が向上し、ピン間の抵抗値が次式に示されるように変化する。

$$R = CF^r \quad (2)$$

式中の F は素子に掛けられた力 (kg), R はそのときに素子が示す抵抗値 (Ω), C と r はそれぞれ特性を決定する定数で、素子ごとに異なる。計測すべき最大荷重については、ロボットの総重量 27 (kg) が素子 3 個にかかった場合の 88.2 (N) とする。このため 110 (N) の耐荷重をもつセンサ素子を使用した。

4.4 底面のセンサ構造

図 7 にロボット底面のセンサを構造を示す。サンプリング周期が制御周期以下にならないよう考慮し、合計 32 個配置した。チェーンガイドを 8 個を配置し、各チェーンガイドの溝の直下に 4 つずつ素子を配置した。この配置は、4 つのセンサ値のバランスからチェーン

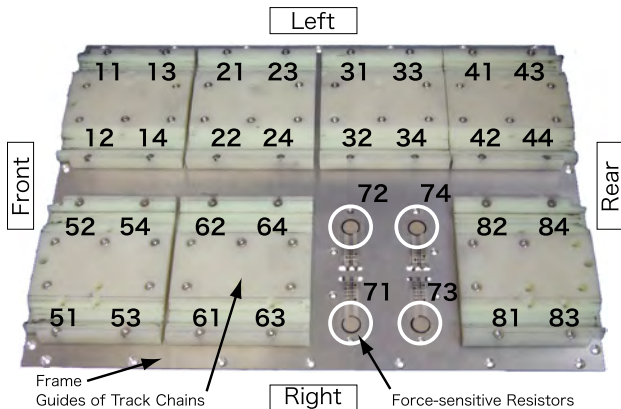


図 7: Distributed touch sensor for main crawler

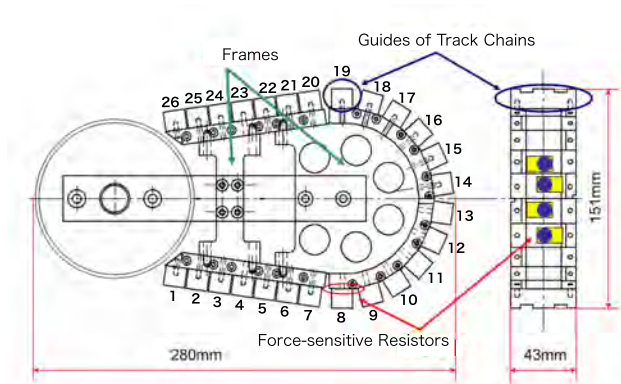


図 8: Distributed touch sensor for flipper crawlers

ガイドにかかる荷重中心を計測することを想定している。センサの番号は、十の位にチェーンガイドごとに1~8の異なる番号を、一の位に各チェーンガイド内のセンサ位置に対応する1~4の番号を割り振った。また、センサの奇数番をロボットの外側に、偶数番をロボットの内側に配置した。

4.5 フリッパのセンサ構造

図8のように、従動スプロケットをチェーンガイドに置き換えることで、感圧センサの配置を可能にした。チェーン駆動用のスプロケット以外の場所に合計26個の素子を取り付けた。感圧抵抗素子はせん断応力によって破損しやすいため、テフロンテープをセンサ素子とアルミフレームの間に張ることで滑りやすくした。センサの番号については、駆動用スプロケット下部から上部に向かって1~26の番号を割り振った。

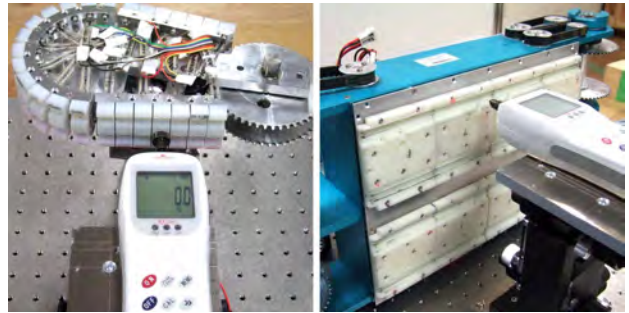


図 9: Experimental setup for evaluation of the sensors

5 センサの静的性能評価

5.1 実験条件

接触力は次のように計算する。まず非接触時のセンサから得られた電圧値を Lookup テーブルで力に変換する。次に接触時のセンサから得られた電圧値を Lookup テーブルで力に変換する。これらの差分を接触力とする。センサ評価実験の様子を図9に示す。図の左側はフリッパの、右側は底面のセンサに対する実験の様子である。これらの実験は、プッシュプルセンサ(アイコーエンジニアリング株式会社製 RX-50)をXYZステージ(中央精機 LT-214-2)を用いて分布接触センサに対して垂直に押し付けることで行なった。実験においては、それぞれの計測点につき5回ずつ計測し平均をとった。またヒステリシスの影響を除外するため、計測のたびに毎回荷重をかけない状態に戻してから、荷重をかけなおした。

5.2 応答特性

図10に、底面のセンサの静的な応答特性の例を示す。この図はチェーンを外した状態でチェーンガイド上から一定の力を静的に加える実験により得られた。縦軸は計測荷重と初期荷重との差であり、横軸はかけた荷重の大きさである。凡例に示された番号がセンサ番号に対応する。

図10から、各センサの感度に個体差があることがわかる。腹部およびフリッパの全てのセンサについて実験した結果、同様の性質があることがわかった。したがって、接触力分布をより正確に計測するためにはキャリブレーションが重要である。

本稿で転倒予測のために用いるエネルギー安定余裕は、接触力を必要とせず、接触位置のみが計測できればよい。接触位置の計測は、接触力がある閾値を超えたかどうかを判定することで行うことができる。

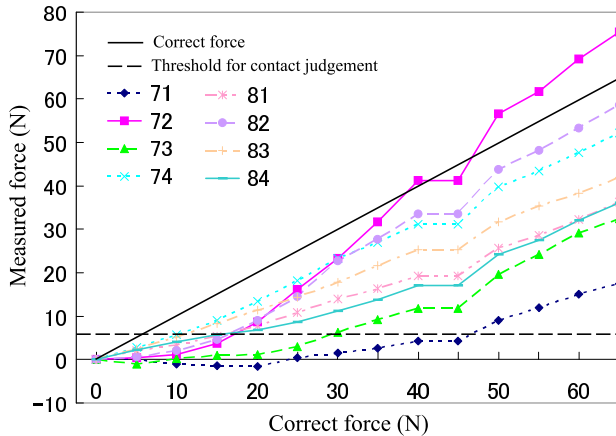


図 10: Response characteristics of the bottom sensors

6 結論と今後の展望

レスキューロボットの操縦支援を目的とし、フリッパを有するクローラ型ロボットのための自律転倒防止手法を提案した。その戦略を実現するために、クローラの接触位置と接触力を分布的に計測するセンサを開発した。開発したセンサの静的評価を行ない、提案手法の有効性を示した。

今後は開発したセンサのキャリブレーションを行う。接触力分布に基づく操縦支援システムの実装と評価を行う。

謝辞

本研究は NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」の一環として行われた。

参考文献

- [1] W. R. Ferrel, T. B. Sheridan, "Supervisory control of remote manipulation," *IEEE Spectrum*, Vol. 4, No.10, pp.81-88, 1967.
- [2] P. T. Boissiere, R. W. Harrigan, "Telerobotic Operation of Conventional Robot Manipulators," In. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.576-583, 1988.
- [3] Kazunori Ohno, Shouchi Morimura, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi, Tomoaki Yoshida, "Semi-autonomous Control System of Rescue Crawler Robot Having Flippers for Getting Over Unknown-Steps," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2007.
- [4] Taro Iwamoto et al., "Transformable crawler mechanism with adaptability to terrain variations," *Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 285-291, 1983.

- [5] Yuji Hosoda, Hiroshi Yamamoto, Makoto Hattori, Hiroshi Sakairi, Taro Iwamoto, Masataka Owada, Akihiro Kanno and Yuji Saito, "'SWAN': a robot for nuclear disaster prevention support," *Advanced Robotics*, Vol.16 No.6, pp.485-488, 2002.
- [6] B. Yamauchi, "PackBot: A versatile platform for. military robotics," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 5422, pp. 228-237, Apr. 2004.
- [7] E. F. Fukushima, Shigeo Hirose, Takaya Shirasu, "Proposal for cooperative. robot 'Gunryu' composed of autonomous segments," *Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier, Vol. 17, pp. 107-118, 1996.
- [8] Toshio Takayama, Shigeo Hirose, "Development of Souryu-I: Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space," *IEEE IECON*, pp. 143-148, 2000.
- [9] R. B. McGhee, A. A. Frank, "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits," *Mathematical Biosciences*, Vol. 3, No. 3/4, pp. 331-351, Oct. 1968.
- [10] M. Vukobratovic, J. Stepanenko, "On the Stability of Anthropomorphic Systems," *Mathematical Biosciences*, vol.15 pp.1-37, 1972.
- [11] Dominic Anthony Messuri, Charles A. Klein, "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-1, No. 3, pp. 132-141, Sep. 1985.
- [12] Kan Yoneda, Shigeo Hirose, "Tumble stability criterion of integrated locomotion and manipulation," in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 870-876, 1996.
- [13] Shigeo Hirose, Hideyuki Tsukagoshi, Kan Yoneda, "Normalized Energy Stability Margin and its Contour of Walking Vehicles on Rough Terrain," *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, pp. 181-186, May 2001.
- [14] Lauria M., Piguet Y., Siegwart R., "Octopus - An Autonomous Wheeled Climbing Robot," *The 5th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots*, 2002.
- [15] Daisuke Inoue, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro, "Distributed Tactile Sensors for Tracked Robots," *IEEE Int. Conf. on Sensors*, C3L-C, p. 362, 2006.
- [16] Yukiko Hoshino, Masayuki Inaba, Hirochika Inoue, "Model and Processing of Whole-body Tactile Sensor Suit for Human-Robot Contact Interaction," *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2281-2286, 1998.