

Kenafの半自律操縦支援システムと

3次元操縦インタフェースのDisasterCityでの実証実験

大野 和則* 鈴木 志穂子* 田所 諭 * 永谷 圭司* 吉田 智章† 小柳 栄次†

Evaluation of Semiautonomous Control System and 3D Bird's Eye-view Interface in Disaster City

Kazunori OHNO*, Shihoko Suzuki*, Satoshi Tadokoro*, Keiji Nagatani*, Tomoaki Yoshida†, and Eiji Koyanagi†

東北大学 (Tohoku Univ.)* 千葉工業大学 (furo)†

Abstract: Here we explain the control support system of our crawler robot, Kenaf. For supporting an operator who controls a crawler robot remotely, we developed the semi-autonomous control system. We also developed the 3-D control interface that enables for an operator to see the robot from bird's-eye views. The technique of 3-D map construction based on the data from 3-D laser scanner was used for the 3-D control interface. In November, 2008, field experiments were conducted in DisasterCity, which is the training facilities of FEMA members in the United States. The utility of the semi-autonomous control system and the 3-D bird's-eye control interface was confirmed by the questionnaire collected from the FEMA members. This paper is a field report to share useful findings obtained from the experiments with many readers. It will contribute to the progress of robot researches in the future.

1 緒言

著者のグループでは、閉鎖空間を高速に探査するレスキューロボットの研究開発を行っている。図1に著者らが開発中のレスキューロボット Kenaf と遠隔操縦システムの概要を示す。Kenaf は全身を覆ったクローラベルトにより不整地を安定して踏破することができ、4本のサブクローラを用いることで0.3m程度の段差を容易に乗り越えることができる[1]。しかし、遠隔操縦でロボットを安全に操縦しつつ探査を行う作業は、操縦者にとって大きな労力となっている。操縦者の労力を減らし、効果的な探査を実現するためにロボット技術を用いることが有効である。

著者らは、遠隔地からロボットを簡単かつ安全に操縦し探査を行うために、1. 簡単な操作で瓦礫を踏破するロボットの自律性の開発(半自律操縦支援システム)、2. ロボットの周辺情報や認識結果を操縦者に分かりやすい形で提示する方法の開発(3次元操縦インタフェース)、3. 探査の際の膨大なセンサ情報を統合して広範囲の正確な地図を構築する手法の開発(3次元地図構築)に重点を置き、研究開発を行ってきた。

本稿では、1. 半自律操縦支援システムと、2. 3次元操縦インタフェースに関して概要と、アメリカのFEMA隊員の訓練施設(Disaster City)[2]で行った探査実験に関して説明する。実験の際、FEMA隊員からは1., 2.の技術が有効であるとのコメントを多数もらった。また、我々研究者も多くの知見を得ることができた。本論文は、遠隔操縦システムのフィールドレポートとしてまとめる。我々の定量的ではないが、経験的な知見が今後の他の研究の参考になれば幸いである。

2 半自律操縦支援システム

2.1 関連研究

不整地を踏破するクローラロボットの自律/半自律に関する研究が、近年国内外で増えてきた。英語で書かれた文献に限定して一部を紹介すると、[4, 5, 6]らの研究がある。クローラロボットの自律/半自律の不整地踏破研究の特徴は、

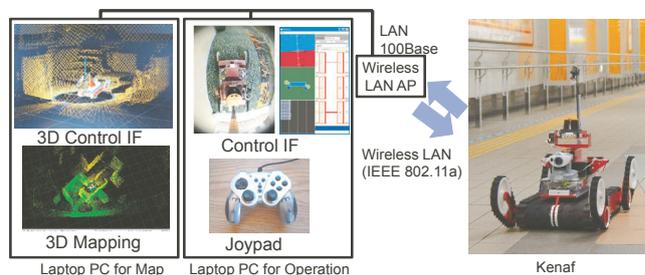


Fig. 1: Tele-operation system of Kenaf: This system consists of Kenaf, a laptop PC for control, a laptop PC for mapping and a wireless LAN access point.

従来の対向二輪やローバーなどと異なり、ロボットを点ではなく多面体で近似して走行可能性を判定することである。また、段差や階段などを踏破する際、クローラ変形も含めた多点での接地を考慮して動作を生成する研究が主流である。著者らの手法の特徴は、不安定な地面の上を段差を確かめながら踏破し、踏破中に地形が変化しても即座に対応できる点である。

2.2 半自律操縦支援システム概要

提案手法では、フリッパーの動作とクローラの進行速度を地形に合わせて自律的に調整を行う。操縦者は進行方向を入力するだけで、段差や階段の踏破を自律で行うことが可能になった。図2にロボットのモデルを示す。著者らは、不整地を図3, 4に示す上り段差と下り段差の組み合わせで近似し、踏破動作を構築した。地面とサブクローラの接触をモータートルク T_f, T_r で、地面とメインクローラの接触を前後のPSDセンサの距離 l_f, l_r で、本体の姿勢 $\theta_{roll}, \theta_{pitch}$ は加速度センサとジャイロセンサで、サブクローラの角度 θ_f, θ_r をエンコーダで計測した。クローラ部分の接触をトルク T で計測しているのは、確実に力がかかっていることを計測したかったが、クローラベルトの内側にセンサーを取り付けることが困難であったためである。間接的ではあるが、力が加わったときに生じるトルクを用いて判定することにした。各種センサ情報を元に、図3, 4に示す動作を

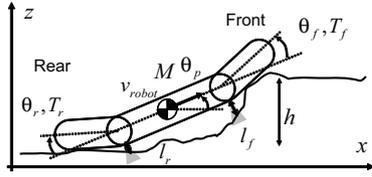


Fig. 2: 2D model of crawler robot having flippers and unknown step (Upward step)

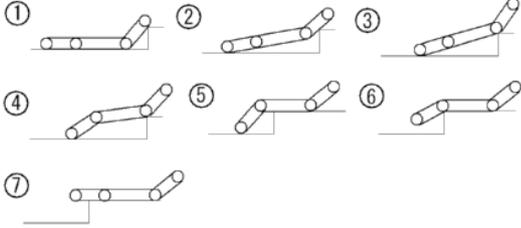


Fig. 3: Our designed sequence of motions for getting over an upward step

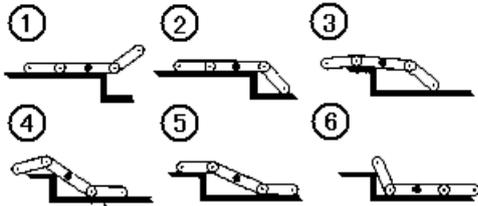


Fig. 4: Our designed sequence of motion for getting over downward step

実現するルールを構築し、各種センサ状態に応じて動作を即座に決めている。表 1, 2 に前後のサブクロアの制御則を示す。詳細説明は、文面の都合上 [5] に譲る。

課題としてフリッパーが引っかかるケースがあり、3次元の地形に基づき回避を行う手法も開発している [7]。センサを搭載するスペースの都合上、Disaster City の実験では使用しなかった。

3 3次元操縦インタフェース

3.1 関連研究

俯瞰視点をを用いることでロボットの遠隔操縦を容易にする研究が近年多く行われている。カメラを使った過去画像履歴など、実装面も容易で非常に有効な手法が提案されている [8]。また、俯瞰視点をを用いることで操縦がしやすくなるといったことも報告されている [9]。著者らの研究の特徴は、小型の3次元レーザー距離計で計測した地形点群とロボットワイヤフレームモデルをもちいて俯瞰視点を合成する点である。レーザーを用いることで、輝度の変化が激しくカメラ映像から周囲の認識が困難な場合や、暗闇でも周辺を状況を確認できる。また、狭い場所を通り抜ける場合も視点を換えることで、対象物までの距離を正確に把握して通り抜けることができる。

Table 1: Control Rules of Front Flipper

l_f	A_{f-t} θ_p θ_f	Contact		Non-contact	
		$\theta_f \geq 0$	$\theta_f < 0$	$\theta_f \geq 0$	$\theta_f < 0$
$l_f \geq l_{\text{thresh}}$	Positive	A. $\theta_{f\text{-ref}}$ lowers	C. $\theta_{f\text{-ref}}$ rises	B. $\theta_{f\text{-ref}}$ rises.	
$l_f \geq l_{\text{thresh}}$	Negative			D. $\theta_{f\text{-ref}}$ lowers.	
$l_f < l_{\text{thresh}}$	Positive			B. $\theta_{f\text{-ref}}$ rises.	
$l_f < l_{\text{thresh}}$	Negative				

A: For climbing upward step. B: For preparation of next unknown step. C,D: For close contact.

Table 2: Control Rules of Rear Flipper

l_r	A_{r-t} θ_p A_{f-t}	Contact		Non-contact	
		Contact	Non-contact	Contact	Non-contact
$l_r \geq l_{\text{thresh}}$	Positive	A. $\theta_{r\text{-ref}}$ rises	D. $\theta_{r\text{-ref}}$ rises	B. $\theta_{r\text{-ref}}$ lowers	
$l_r \geq l_{\text{thresh}}$	Negative			C. $\theta_{r\text{-ref}}$ lowers	
$l_r < l_{\text{thresh}}$	Positive				
$l_r < l_{\text{thresh}}$	Negative				

A: For increasing traction during climbing. B: For prevention from a forward fall. C,D: For close contact.

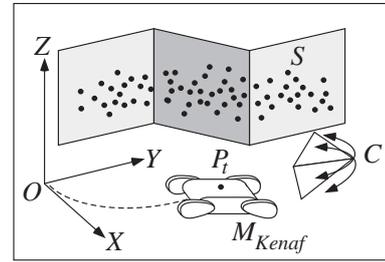


Fig. 5: Model of 3-D Bird's eye view control interface

3.2 3次元操縦インタフェースの概要

図 5 に 3 次元操縦インタフェースのモデルを示す。提案手法では、ロボットに搭載可能な小型 3 次元レーザーキャナ (TK Scanner [10]) を用いてロボットの全周囲の 3 次元形状 S を点群として計測する。得られた点群上に、ロボットワイヤフレームモデル M_{Kenaf} をロボットの移動量 $P_t = (x, y, z, \theta_{\text{roll}}, \theta_{\text{pitch}}, \theta_{\text{yaw}})$ に合わせて描画することで俯瞰視点を合成する。ロボットの移動中の位置姿勢はジャイロベースドオドメトリを用いて行った。メインローラで接地したことを前提としてオドメトリ、ジャイロ、加速度センサを用いて位置を推定する [11]。マウスを用いてカメラ C の位置姿勢を変更することで、能動的に視点を切り替える。

4 Disaster City での評価実験と課題

4.1 概要

National Institute of Standards and Technology (NIST) が主催するレスキューロボットの能力を評価するイベントが、2008 年 11 月 17 日 ~ 21 日の間、アメリカのテキサス州のカレッジステーションにある Disaster City で開催された。2008 年度のレポートは [3] で確認することができる。著者らは 2 台の Kenaf を持って行き、Mobility や Mapping の能力を評価した。図 6 に Disaster City の中で実験に使用したフィールドを示す。DisasterCity では、1.Pancake House, 2.

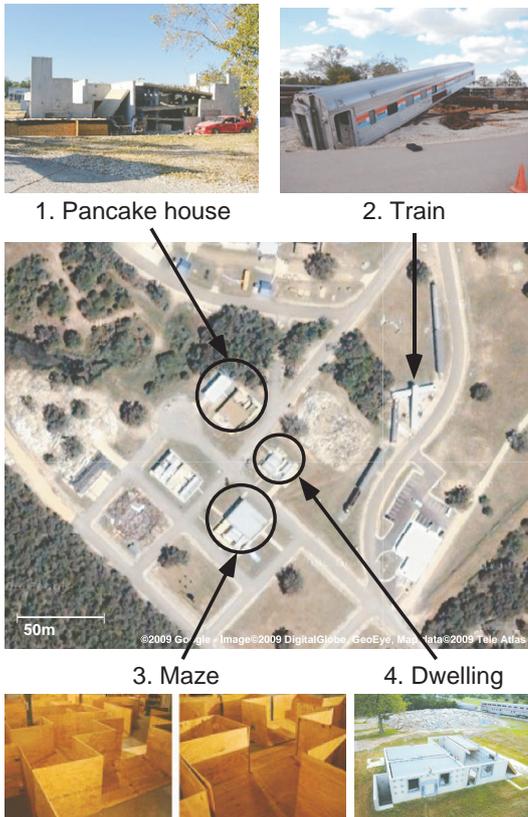


Fig. 6: Google map of Disaster City: We constructed a 3-D map using Kenaf in these four test fields (1) pancake house, (2) train, (3) maze and pipe field, and (4) dwelling.

Train. 3. Maze, 4. Dwelling のフィールドで主に評価実験を行った。本稿では、2. Maze 内の Tube Maze Test Field の実験結果を 4.2 節で、1. Pancake House の実験結果を 4.3 節で説明する。

4.2 Tube Maze Test Field

Tube maze test field は、上りと下りの坂を交互につなぎ合わせた床の所々に円柱のポールが立てられている。ロボットはポールの間隙を抜けながら探査を行う(図 7 A)。天井があるものの隙間から強烈な太陽光が入ってくるため、図 7 B に示すように明るいところと暗いところの輝度差が非常に大きい。遠隔操縦の際、カメラの映像で床面の凹凸やポールの存在を確認することが困難であった。

著者らは、半自律操縦支援システムを用いることで、地面の凹凸を気にせずに探査に集中できた。また、3次元操縦インタフェースを用いることで、周囲のポールとロボットの位置関係を把握しながら、ロボットの進行方向を決め探査を行うことができた。FEMA 隊員からは、TK scanner のクロススキャン方式により全周囲の詳細な形状を把握することができる、半自律操縦支援システムを用いることで容易に操縦ができるとコメントをもらった。

図 7 C, D に計測した 3次元形状をオンラインでつなぎ合わせて構築した周辺環境の点群を示す。床面から垂直に上に伸びているのがポールである。3次元点群とロボットモデルはロボット位置 P_t を用いて合成している。しかし、現状のジャイロベースドオドメトリでは Z 方向の大きな誤差が生じ、所々で ICP マッチングを用いて形状を合わせる

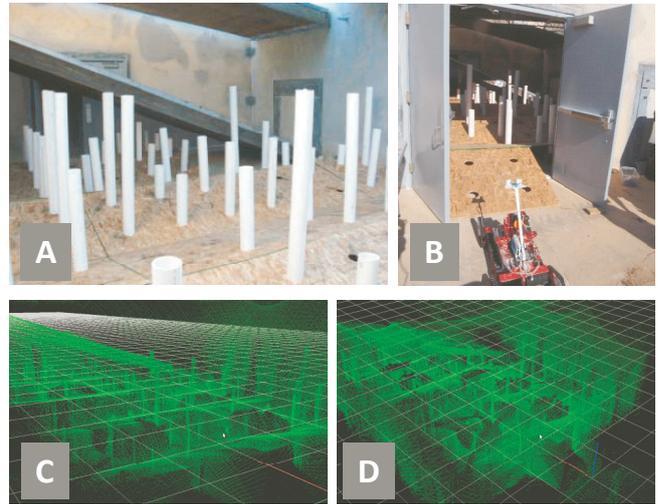


Fig. 7: Tube maze test field: (A) field photo, (B) sunlight condition in daytime, (C)(D) 3-D map constructed by the Kenaf during the exploration

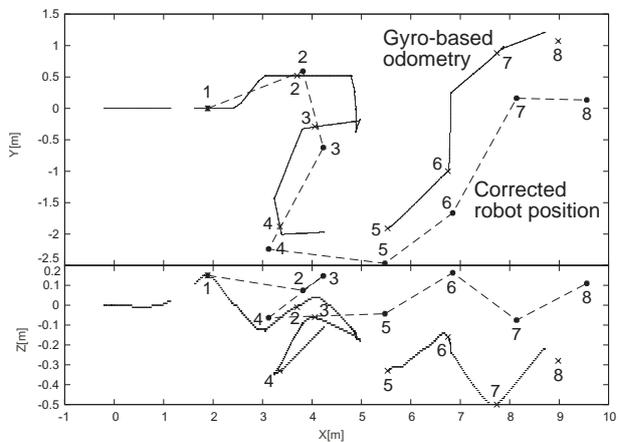


Fig. 8: Robot trajectory during the exploration in tube maze test field

ことで誤差を修正した。図 8 にジャイロベースドオドメトリの推定位置と、マッチングで誤差を修正して得られた推定位置を示す。マッチングはスキャンした場所で行っているため離散的である。見やすさのために点線で各点の間をつないだ。また、ジャイロベースドオドメトリの値が所々とぎれているのは、UDP 通信を用いたことによる情報の欠落である。同じ数字の場所を比較することで、3次元形状を計測した際の、ジャイロオドメトリの推定位置と修正した推定位置を対応づけることができる。6 スキャン目で 0.42m, 7 スキャン目で 0.39m の z 方向の違いが生じた。修正後の位置が必ずしも正しいわけではないが、地図がそれらしい形をしていることから、修正後の位置を基準に Z 方向の誤差の大きさを確認した。誤差が生じる原因は、上り坂から下り坂へ切り替わる際、フリックを用いて衝撃を吸収しつつ進むため、ジャイロベースドオドメトリの前提であるメインローラだけが接地している前提が崩れるためである。位置推定手法の改良が今後の課題である。

4.3 Pancake house test field

図 9 に、Pancake House 内を探査するロボットと FEMA 隊員にロボットの使い方を説明している写真を示す。Pancake



Fig. 9: Experimental setup in pancake house



Fig. 10: Motion of semi-autonomous control in pancake house



Fig. 11: Slip motion during rough terrain traverse

house では様々な実験を行ったが、ここでは狭い場所を通り抜ける実験に関して説明を行う。

図 10 に、崩れたフロアの下の狭い隙間で床には瓦礫が散らばっている場所を、半自律操縦支援システムを用いて探査する様子を示す。天井までの高さは、低いところで 1m 以下であった。床面に散らばった瓦礫を乗り越える動作はロボットが自律的に行うため、操縦者は天井との隙間が大きい場所を探して通り抜けることに集中できた。瓦礫が幾重にも積み重なっているものの、ロボットの傾きが大きくなるほど積み重なってはいなかったため、半自律操縦支援システムの有効性が確認できた。

細かい瓦礫の山の上で動かした際の、ロボットの動きを図 11 に示す。1 から 2 へと瓦礫を上っている際に、右に曲がろうとして後ろのフリッパーが持ち上がった。その際にスリップが生じ 2 から 3 へと下に滑り落ちてしまった。この後、体勢を立て直し瓦礫を上ることはできた。現状の制御則は幾何学的に考えられたものであり、スリップなどを考慮した手法の開発が今後の課題である。

4.4 考察

実際の訓練施設での実験を通して、実際に機器を使用する FEMA 隊員のコメントは非常に有用であることが分かった。また、コメントから提案手法の有効性も確認できた。一方、位置推定手法の改良やスリップを考慮した制御則の開発などの課題も判明した。今後はこれらの項目の研究開発が必要である。

位置推定や地図構築の研究を行う上で、Disaster City ではフィールド形状や、ロボット動作や位置に関する真値の情報を計測することが困難であり、研究者が定量的な評価とそれに基づく手法の開発を行うことが困難であることが分かった。また、人間と機械が協調する遠隔操縦システムの使いやすさを評価するための手法が無いことも分かった。NIST でもレスキューロボットのモビリティや、パッケージングなどの使いやすさといった項目を評価する手法の開発を行っている。しかし、これらの指標では、上述の課題

を解決するための評価には直接結びつかない。評価方法も含めた環境整備にも今後力を入れていく。

5 結言

本稿では、著者らがこれまで構築した閉鎖空間を探索するクローラロボット Kenaf に関して説明を行った。特に、1. 半自律操縦支援システムと、2. 3次元操縦インタフェースに関して、関連研究、構築したシステムの概要、Disaster City での実験結果と課題に関してまとめた。

参考文献

- [1] T. Yoshida, E. Koyanagi, S. Tadokoro, K. Yoshida, K. Nagatani, K. Ohno, T. Tsubouchi, S. Maeyama, I. Noda, O. Takizawa, Y. Hada, "A High Mobility 6-Crawler Mobile Robot 'Kenaf'," SRMED2007, pp. 38, 2007.
- [2] <http://www.teex.com/teex.cfm?pageid=USARprog&area=USAR&templateid=1117>
- [3] http://www.isd.mel.nist.gov/US&R_Robot_Standards/Robotguide2009.pdf
- [4] Munsang Kim Woosub Lee, Sungchul Kang. "rob-hazdt3: Teleoperated mobile platform with passively adaptive double-track for hazardous environment applications," IEEE/RSJ IROS2004.
- [5] K. Ohno, S. Morimura, S. Tadokoro, E. Koyanagi, T. Yoshida, "Semi-autonomous Control System of Rescue Crawler Robot Having Flippers for Getting Over Unknown-Steps," IEEE/RSJ IROS2007, pp.3012-3018, 2007.
- [6] K. Nagatani, A. Yamasaki, K. Yoshida, T. Yoshida, E. Koyanagi, "Semi-autonomous Traversal on Uneven Terrain for a Tracked Vehicle using Autonomous Control of Active Flippers", IEEE/RSJ IROS2008, pp. 2667- 2672, 2008.
- [7] 湯沢友豪, 大野和則, 田所諭, 小柳栄次, 吉田智章. "実時間 3次元地形計測に基づくフリッパーの引っかかり回避を含むクローラロボットのための半自律 3次元未知不整地踏破," 第 13 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2008 年.
- [8] N. Shiroma, H. Nagai, M. Sugimoto, M. Inami and F. Matsuno, "Synthesized Scene Recollection for Robot Teleoperation," FSR2005, pp. 403-414, 2005.
- [9] C.W.Nielsen and M.A.Goodrich: "Comparing the Usefulness of Video and Map Information in Navigation Tasks", HRI 2006, pp.95-101, Mar, 2006.
- [10] Ohno, K., Kawahara, T., and Tadokoro, S., "Development of 3-D Laser Scanner for Measuring Uniform and Dense 3-D Shapes of Static Objects in Dynamic Environment," IEEE ROBOTICS2009, pp. 2161- 2167, 2009.
- [11] NAGATANI, K., TOKUNAGA, N., OKADA, Y., and YOSHIDA, K., "Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain," IEEE SSRR2008, pp. 25-30, 2008