

路面の逐次三次元計測に基づいた クローラ型ロボットの不整地走行支援システムの構築*

岡田佳都, 永谷圭司, 吉田和哉

Traversing Assist System for Tracked Vehicles on Rough Terrain Based on Continuous Three-Dimensional Terrain-Scanning

Yoshito OKADA, Keiji NAGATANI and Kazuya YOSHIDA

Department of Aerospace Engineering, Tohoku University
6-6-01 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Japan

Tracked vehicles are frequently used as Search and Rescue robots. To enhance their traversability on rough terrain, some of them equip “active flippers.” However, such flippers also increase the operator’s workload in case of tele-operation.

To eliminate this problem, we have developed a traversing assist system using an autonomous controller for flippers based on continuous three-dimensional terrain-scanning. In our system, real-time terrain slices are obtained using 3 laser range sensors and integrated to generate terrain surface information. In this paper, we introduce the autonomous controller for flippers and validate the traversing assist system through experimental results on actual rough terrain.

Key Words : Tracked vehicle, Autonomous operation, Range sensing

はじめに

テロや地震などの直後に、二次災害の恐れのある被災地に人間の救助隊員に代えて投入され、被災者の位置の把握や被災地の環境情報の獲得などを行うレスキューロボットの開発が、さまざまな研究機関で進められている⁽¹⁾。レスキュー用途の移動ロボットには、瓦礫などが散在する被災地における高い走破性能が求められる。そのため、これを実現するクローラを移動機構として採用するレスキューロボットが主流となっている⁽²⁾⁽³⁾。

クローラ型レスキューロボットには、不整地における走破性能ならびに安定性を向上させるための、可動式の補助クローラを有するものが多い。この補助クローラはフリッパーと呼ばれ、アクチュエータによりその取付角度を走行路面に対して適切に調整することで、ロボットの走破性能および安定性の向上を実現する。筆者らが研究のテストベッドとして利用しているクローラ型レスキューロボット”Kenaf”(図1)も、本体の四隅にフリッパーを搭載しており、RoboCupRescue⁽⁴⁾において二度の Best-mobility award を受賞するなど、その不整地における走破性能は高く評価されている。一方

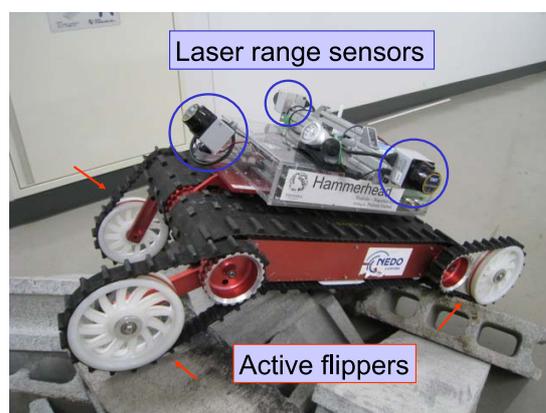


Fig. 1 Tracked vehicle testbed Kenaf equipped with 3 laser range sensors

Table 1 Basic specifications of Kenaf

Dimensions	W400 [mm] × L500 [mm]
Weight	20 [kg]
Length of flippers	235 [mm]
Degrees of freedom	6 (2 main tracks and 4 flippers)

で、ロボットに搭載した限られたカメラ映像などをもとに、フリッパーを適切に遠隔操作することが、ロボットの操作者にとって困難かつ大きな負担となることもわかってきた。

* 原稿受付平成21年10月23日
東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻
宮城県仙台市青葉区字青葉 6-6-01
Email: yoshito@astro.mech.tohoku.ac.jp

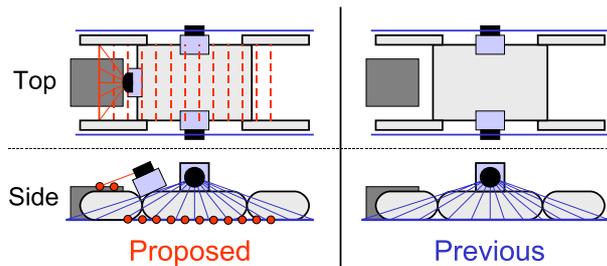


Fig. 2 A comparison of the proposed controller with the previous one

このような背景のもと、遠隔操縦時の操作者の負担軽減およびフリッパの適切な動作の実現を目的として、筆者らは過去に、測域センサ（レーザー距離センサ）によって獲得したフリッパ付近の路面形状に基づくフリッパの自律制御手法を提案した⁽⁵⁾。この手法は、先述の Kenaf を対象としており、フリッパが取り付けられたロボット本体側面付近の路面形状に基づいて、フリッパの自律動作により不整地上での安定な走行を実現するものであった。しかし、この手法では、測域センサを用いてロボット本体側面付近の路面形状のみを獲得していたため、左右のフリッパ間の段差や隆起に対応できないという問題点があった。

そこで本研究では、この問題を解決する新たなフリッパの自律制御手法を中核とする、クローラ型ロボットの不整地走行支援システムを構築した。新手法と旧手法の比較図を図 2 に示す。提案手法では、ロボット本体前部にも測域センサを増設し、ロボット本体左右側面付近のみならず、ロボット本体が直後に通過する路面の形状を獲得する。さらに、直近の走行に伴って獲得した路面形状を、形状獲得時の自己位置推定結果をもとに統合し、ロボット直下の三次元路面形状を推定する。このロボット直下の路面形状およびフリッパ付近の路面形状情報を勘案し、より安定な不整地走行を実現するフリッパ動作を生成する。

1. 制御対象

本研究では、図 1 に示すクローラ型ロボット“Kenaf”を制御対象とした。Kenaf は、対向型のメインクローラに覆われた本体の四隅に一本ずつのフリッパを有する六自由度のロボットである。

Kenaf には、外界センサとして本体左右と前部に一台ずつの測域センサが、内界センサとして三軸のジャイロセンサと六自由度分の駆動モータにそれぞれエンコーダが搭載されている。これらのセンサのうち、測域センサとフリッパ駆動モータに取り付けたエンコーダより、それぞれ路面形状情報とフリッパ角が獲得で

きる。また、Kenaf には、三軸ジャイロセンサおよびメインクローラ駆動モータに取り付けたエンコーダを用いた、三次元ジャイロオドメトリ機能⁽⁶⁾が実装されている。提案するフリッパの自律制御手法の実装にあたっては、このオドメトリによるロボット本体の推定位置、姿勢および移動速度を用いることとした。なお、不整地上において、オドメトリにより高精度な位置推定を長距離にわたって実現することは、非常に困難であることが知られている。しかし、提案手法ではロボットの全長に等しい 90[cm] 程度の短距離の移動において精度が期待できれば十分であるため、自己位置推定手法として三次元ジャイロオドメトリを採用した。

2. 制御戦略

本研究では、フリッパの自律制御とメインクローラのマニュアル操作を組み合わせた不整地走行支援システムにより、未熟な操作者でも熟練した操作者と同様の安定した不整地走行を実現できることを目的とした。そこで、提案するフリッパの自律制御手法では、過去に提案した手法と同様に、熟練操作者によるフリッパ動作にならった制御戦略⁽⁵⁾を採用した。文献⁽⁵⁾中で、著者らは熟練した操作者によるフリッパの操作方針として、次の三点を挙げている。

- (1) 不整地上での滑らかな移動を実現するために、路面の傾斜に合わせてロボット本体の姿勢を保つ
- (2) 駆動力を効率よく路面に伝達するために、フリッパを含めたクローラ部をなるべく多く接地させる
- (3) 転倒の危険がある場合、フリッパの動作によりロボット本体の姿勢を水平に近づけ、転倒を回避する

これらの操作方針より、フリッパの自律制御手法の制御戦略は次のように定められる。

- (1) 三次元路面形状の最小二乗平面に平行で、かつ本体が接地する姿勢を一次的な目標姿勢とする
- (2) 目標姿勢を実現する目標フリッパ角を幾何学的に算出する
- (3) 目標とする体勢の安定性を評価し、不安定な場合は目標体勢を修正する

3. 制御アルゴリズム

本章では、2 章で言及した制御戦略に基づいて構築した、提案手法の制御アルゴリズムについて述べる。提案する制御アルゴリズムは、旧手法の制御アルゴリズムを拡張したものであり、基本的には旧手法を踏襲している。本章では、旧アルゴリズムからの拡張点について触れたあと、新たなアルゴリズムの概要ならびにそれを構成する各手順の詳細を述べる。

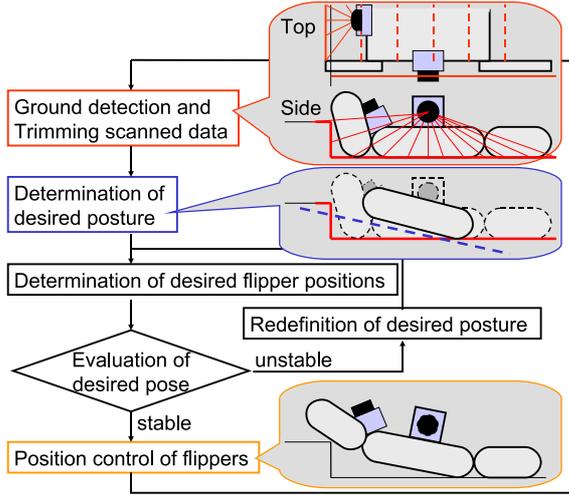


Fig. 3 Algorithm for autonomous controller for flippers

3.1 旧アルゴリズムからの拡張点 旧アルゴリズムからの最も大きな拡張は、ロボット本体前部に取り付けられた測域センサによって、メインローラが直後に通過する路面形状を新たに獲得し、それを制御に用いる点である。この路面形状は、形状獲得時のロボット本体の推定位置とともに記録される。走行に伴って獲得した路面形状を、3.4節で述べる手順に従って統合することにより、ロボット直下の三次元路面形状情報が生成され、3.5節で述べる手順で利用される。

3.2 概要 提案手法の制御アルゴリズムを、図3に示す。新たな制御アルゴリズムは、旧手法と同様に六つの手順から構成される。まず、(1) 本体に固定された三台の測域センサを用いて、ロボット周囲の路面形状を獲得する。次に、(2) 獲得した路面形状情報に基づき、ロボット本体の目標姿勢を決定する。続いて、(3) 本体の目標姿勢を実現するフリッパー角を算出し、(4) 目標姿勢およびフリッパー角の安定性を評価する。もし目標とする姿勢が不安定であれば、(5) 安定な目標姿勢が得られるまで修正を行う。最後に、(6) 生成された安定な目標姿勢を実現するフリッパー角を目標とし、フリッパーの位置制御を実行する。

3.3 座標系 ロボットに埋め込んだ機体座標系を、機体中心を原点とし、正面に直交する向きに x 軸、上面に直交する向きに z 軸、右手系をなすように y 軸となるように定める。ロボットの位置および姿勢は、グローバル座標系との相対関係により表現する。

なお、本研究ではこれらをクォータニオンとして取り扱う。例えば、位置ベクトル $(x_{pos}, y_{pos}, z_{pos})^T$ に対応するクォータニオンを p 、単位ベクトル $(x_{rot}, y_{rot}, z_{rot})^T$ を軸とする θ_{rot} の姿勢変化に対応するクォータニオン

を q とすると、機体座標系 $\{p, q\}$ からグローバル座標系への変換は次式で与えられる。

$$p_{global} = q \times p_{local} \times q^{-1} + p \quad (1)$$

$$p = [0, x_{pos}, y_{pos}, z_{pos}]^T \quad (2)$$

$$q = [\cos(\theta_{rot}/2), x_{rot} \sin(\theta_{rot}/2), y_{rot} \sin(\theta_{rot}/2), z_{rot} \sin(\theta_{rot}/2)]^T \quad (3)$$

3.4 路面形状の獲得および演算対象路面範囲の決定 まず、ロボットに搭載された測域センサより、スキャン時の機体座標系で記述された測距点群 U を獲得する。これとスキャン時の推定位置 p および姿勢 q を合わせて、路面形状情報 $S = \{U, p, q\}$ とする。本体左右および前部の測域センサをそれぞれ添え字 l, r, f で、制御開始からのスキャン回数を添え字 n で表すと、 n 回目の制御ループで新たに獲得される路面形状情報は、 $S_{l,n}, S_{r,n}$ および $S_{f,n}$ と書ける。提案手法では、これらに直前に前部の測域センサで獲得した情報に加え、路面情報 S_n として以降の手順で用いることとする。

$$S_n = \{S_{l,n}, S_{r,n}, S_{f,m}, S_{f,m+1}, \dots, S_{f,n}\} \quad (4)$$

$$m = \min\{i \in \mathbb{Z} \mid \sum_{j=i}^{n-1} |p_{j+1} - p_j| < L_{threshold}\} \quad (5)$$

ただし、オドメトリによる移動に伴う位置推定の累積誤差を考慮し、統合する路面情報を直近の長さ $L_{threshold}$ の走行間に獲得したものに限定する。

次に、 S_n に含まれる測距点から、次節で演算対象とするものを選出する。目標とするロボットの姿勢が実現されるまでの予想時間を Δt とすると、 Δt 後のロボットの位置 p' は次式のように予想される。

$$p' = p_{cur} + q_{cur} \times [0, V_{cur} \Delta t, 0, 0]^T \times q_{cur}^{-1} \quad (6)$$

ここで、 V はロボットの並進速度、添え字 cur は現在の値を意味する。この位置を基準に、次のように測距点の選出を行う。機体座標系 $\{p, q\}$ において得られた測距点 u に対する、機体座標系 $\{p', q_{cur}\}$ への変換は次式で記述される。

$$u' = q_{cur}^{-1} \times (q \times u \times q^{-1} + p - p') \times q_{cur} \quad (7)$$

この変換を全ての $S = \{U, p, q\} \in S_n$ に施し、座標系を統一した三次元路面情報 U'_n を得る。

$$U'_n = \{U'_{l,n}, U'_{r,n}, U'_{f,m}, U'_{f,m+1}, \dots, U'_{f,n}\} \quad (8)$$

この U'_n に含まれる測距点の中から、次式で記述される集合 U_{target} を、次節の手順で演算対象とする。

$$U_{target} = \{u \in U'_n \mid -L_{max}/2 \leq x \leq L_{max}/2 \text{ and } -W/2 \leq y \leq W/2\} \quad (9)$$

ここで、 L_{max} はフリッパを含めたロボットの全長、 W はロボットの幅を示す。

3.5 本体目標姿勢の決定 本節以降の手順は、前部の測域センサより獲得した測距点を演算対象に含む点以外は旧手法⁽⁵⁾とほぼ同一の手順であるため、詳細は文献⁽⁵⁾に譲るものとし、要点のみに留める。

2章で制御戦略として述べたように、提案手法では、三次元路面形状の最小二乗平面に平行で、かつ本体が接地する姿勢を一次的な目標姿勢とする。まず、前節で定めた U_{target} の最小二乗平面に平行な姿勢を示すクォータニオン q_{target} を算出する。次に、この姿勢をロボット本体がとったときの機体座標系への変換を三次元路面情報 U_{target} に施し、これを U'_{target} とおく。最後に、ロボット本体が路面に接地する状態に再び機体座標系を移動し、これを U''_{target} とする。以上の座標系変換を、 $u \in U_{target}, u' \in U'_{target}$ および $u'' \in U''_{target}$ についてまとめると、次のようになる。

$$u' = q_{target} \times u \times q_{target}^{-1} \quad (10)$$

$$u'' = u' - [0, 0, 0, \max(z' \in U'_{target})]^T \quad (11)$$

この変換を施した路面形状情報 U''_{target} を後続の手順において対象とすることで、制御戦略 (1) が実現される。

3.6 目標フリッパ角の算出 旧手法をほぼ踏襲し、目標姿勢を実現するフリッパ角を算出する。この目標フリッパ角を求めるには、前節で算出した、目標とする機体座標系で記述された三次元路面情報 U''_{target} に接地するフリッパ角を計算すればよい。

具体的な方法としては、左右の測域センサより獲得した対象測距点 $u'' \in (\{U''_{l,n}, U''_{r,n}\} \cap U''_{target})$ について、いずれかのフリッパが接地しうるかを検証し、接地する場合、そのフリッパ角を算出する。そして、各フリッパごとの最大接地角度をそのフリッパの目標角とする。

なお、本研究で対象とした Kenaf のフリッパは直線と円弧を組み合わせた形状をしているため、接地部に応じて接地角を算出する幾何学計算を使い分ける。この手順により、制御戦略 (2) が実現される。

3.7 目標姿勢の安定性評価 前節までの手順により生成されたロボットの目標姿勢(姿勢およびフリッパ角)の安定性を評価する。提案手法では、旧手法に引き続き、広瀬らの考案した「正規化エネルギー安定余裕 (NE 安定余裕)⁽⁷⁾」を安定性の評価基準として採用する。

NE 安定余裕は、ロボットの任意の二つの接地点を結ぶ軸周りに転倒が生じると考えた際、転倒の過程でロボットの重心が持ち上げられる高さによってその姿勢の安定性を評価するものである。不整地上の歩行ロ

ボットの安定性評価基準として知られているが、概念的にフリッパを搭載したロボットに適用しても問題はない。

提案手法では、前節の過程において、目標姿勢を実現した場合の四つのフリッパの接地点を知ることができる。Kenaf の転倒軸と想定できるのは、右前-左前、右前-右後、左前-左後、右後-左後の接地点をつないだ四つの軸であり、これらに関して計算した NE 安定余裕のうち最小のものを Kenaf の安定性の評価値として採用する。

3.8 本体目標姿勢の修正 前節の手順で、ロボット本体の目標姿勢の安定性が閾値を下回ると評価された場合、制御戦略 (3) に基づき、目標姿勢に対して旧手法と同様の修正を行う。具体的な手順を以下に示す。

- 1a. 前後方向に関する NE 安定余裕が採用されている場合、目標姿勢のピッチ角を水平に近づける
- 1b. 左右方向に関する NE 安定余裕が採用されている場合、目標姿勢のロール角を水平に近づける
2. 修正した目標姿勢を実現するフリッパ角を求め、新たな目標フリッパ角とする
3. 修正した目標姿勢の安定性を計算する

以上の手順を、安定した目標姿勢が得られるまで繰り返す。

3.9 フリッパ位置制御の実行 前節までの手順で生成された安定な目標姿勢を実現するべく、最後にフリッパの位置制御を実行する。提案手法では、旧手法と同様に一般的な PID 位置制御を用いることとする。このとき、3.4 節で想定した Δt 後に目標フリッパ角 θ_{ref} を実現するため、各フリッパの最高回転速度 ω_{max} を次式に従って設定する。

$$\omega_{max} = C \frac{|\theta_{cur} - \theta_{ref}|}{\Delta t} \quad (12)$$

なお、 θ_{cur} は現在のフリッパ角、 C は任意の比例定数である。

4. 実 験

提案手法の有効性を検証するため、第3章で述べたアルゴリズムを Kenaf に実装し、コンクリートブロックで構築した二種類の不整地環境で走行実験を行った。不整地環境として幅の狭い障害物 (図4) および被災地を模した複雑な環境 (図5) を用意し、それぞれの環境において提案手法による走行と他手法による走行を比較した。また、全ての走行において、Kenaf 本体の姿勢履歴を三軸ジャイロセンサを用いて検出し、これらの比較も行った。

なお、いずれの実験においても、直近の走行にさかのぼって路面情報を統合する範囲 $L_{threshold}$ を $100[cm]$ 、

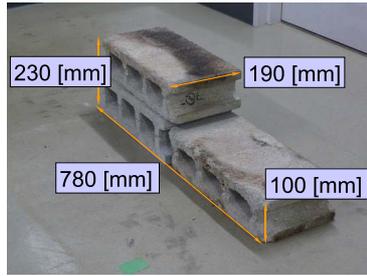


Fig. 4 A bump comprising concrete blocks



Fig. 5 A complex field comprising randomly positioned concrete blocks

目標姿勢実現までの想定時間 Δt を $0.5[\text{sec}]$, Kenaf の安定性の閾値を水平面上における値の約半分の $10[\text{cm}]$, フリッパの最高回転速度を決定する定数 C を 1.3 とした .

4.1 旧手法との比較実験

4.1.1 概要 まず、コンクリートブロック 3 個で構築した幅の狭い単純な障害物 (図 4) を用意し、旧手法⁽⁵⁾との比較を行った . それぞれの手法でフリッパの自律制御を行いながら、Kenaf のメインローラをマニュアル操作して段差の長手方向に平行に段差に進ませ、段差踏破の成否を検証した .

4.1.2 結果および考察 まず、提案手法を用いた不整地走行支援システムによる走行時のピッチ角履歴を図 6 に、走行の様子を図 7 に示す . これらからみてとれるように、提案する不整地走行支援システムの生成した自律フリッパ動作により、ロボット本体の姿勢を路面に接する高さで安定に保ったまま、段差を乗り越える挙動が実現された .

一方、左右の測域センサのみを利用する旧手法を用いた場合は、左右のスキャン面の範囲外にある段差を検出できず、段差を踏破することができなかった . 段差を検出できなかったために、提案手法でみられたような、前フリッパの押し下げによりロボット本体を持ち上げる段差へのアプローチ動作も生成されなかった .

この結果は、ロボット本体前部に増設した測域センサを用いる提案手法の優位性を明確に示すものである

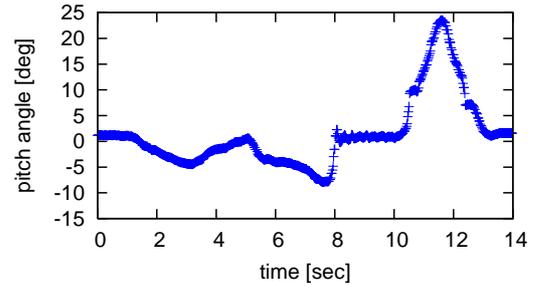


Fig. 6 change in pitch angle on the bump

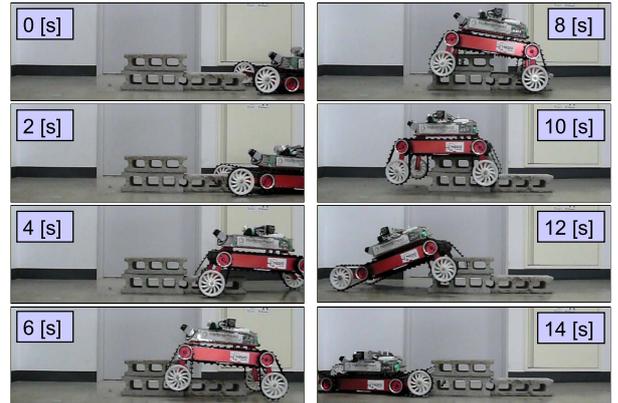


Fig. 7 snapshots while traversing the bump

と考えられる .

4.2 熟練操作者との比較実験

4.2.1 概要 次に、コンクリートブロック 20 個で構築した被災地を模した複雑な不整地環境 (図 5) を用意し、熟練操作者によるフリッパ操作との比較を行った . なお、条件を可能な限り同一とするため、いずれの走行においても Kenaf のメインローラの外周速度を $10[\text{cm}/\text{s}]$ に固定し、熟練操作者にはフリッパ操作のみを担当させた .

4.2.2 結果および考察 まず、走行時のピッチ角ならびにロール角履歴の比較をそれぞれ図 8 , 図 9 に、提案する不整地走行支援システムによる走行の様子を図 10 に示す . 走行に要した時間は、不整地走行システムを用いた場合は $22[\text{sec}]$, 熟練操作者が行った場合は $23[\text{sec}]$ であった . なお、図 8 および図 9 においては、両者の比較を容易にするため、横軸を経過時間を走行に要した総時間で無次元化した値とした .

図 10 に示されるように、提案する不整地走行支援システムにより、複雑な地形上においても安定な走行が実現された . また、図 8 および図 9 より、走行の進行に伴うフリッパ動作によるロボット本体の姿勢保持の傾向が、熟練操作者と提案手法で極めて似通っていることがみてとれる . 特にピッチ角に関しては、提案手法の方が走行全般にわたってロボット本体の傾きを

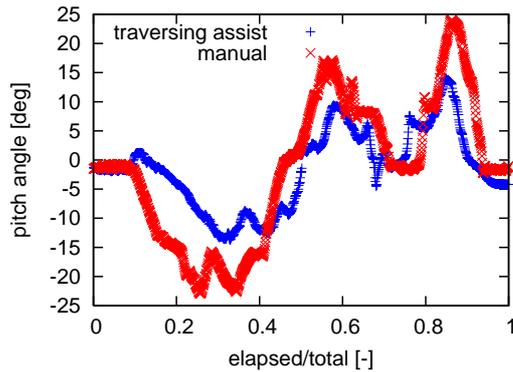


Fig. 8 change in pitch angle on the complex field

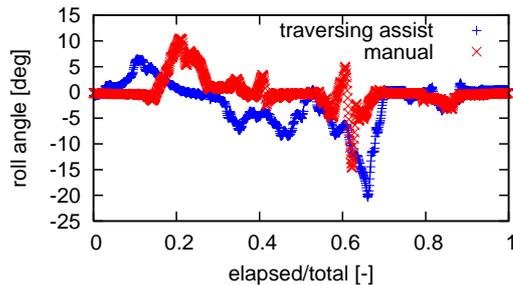


Fig. 9 change in roll angle on the complex field

少なく保っていることがわかる。ただし、Kenaf の場合はフリッパを含めた全長が横幅の二倍ほどあるため、姿勢の安定性はピッチ方向よりもロール方向に依存しやすい。それを踏まえると、走行の安定度に関しては熟練操作者と同程度を達成したものと考えられる。

この結果により、熟練操作者のフリッパ操作方針に基づいた制御戦略の妥当性および、その制御戦略を実現する制御アルゴリズムの有効性が確かめられた。

おわりに

本研究では、三台の測域センサによる路面形状の逐次計測に基づいた、フリッパを有するクローラ型ロボットのための不整地走行支援システムを構築した。獲得した路面形状は自己位置推定結果をもとに統合され、フリッパの自律制御に利用される。自律制御アルゴリズムは、熟練操作者のフリッパ操作を参考に構成されており、ロボットが不整地上で安定を失わない範囲で、フリッパの動作により路面の平均的な傾きに合わせてロボット本体の姿勢を制御する。提案する不整地走行支援システムを実装したロボットを用いた複数環境における走行実験により、ロボットに進行方向に関する指示を与えるのみで、本システムが熟練操作者によるフリッパを含めたマニュアル走行と遜色ない不整地走行を実現できることを確認した。

なお、本研究は、NEDO 戦略的先端ロボット要素

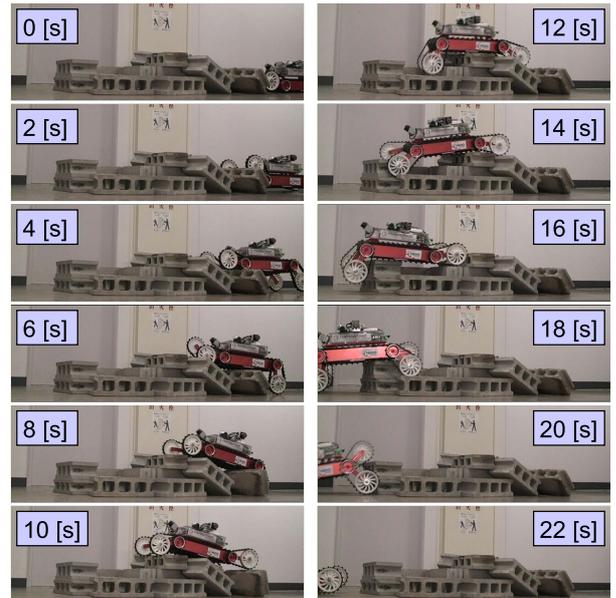


Fig. 10 snapshots while traversing the complex field

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。

文献

- (1) S.Tadokoro, F.Matsuno and A.Jacoff, *Special Issues on Rescue Robotics, Advanced Robotics Vol.19 No.3, No.8*, (2004)
- (2) H.Miyataka, N.Wada, T.Kamegawa, N.Sato, S.Tsukui, H.Igarashi and F.Matsuno, *Development of a unit type robot "KOHGA2" with stuck avoidance ability*, the IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2007), pp.3877–3882
- (3) Y.Tanaka, M.Arai, S.Hirose and S.Tsukui, *Development of "Souryu-V" with Mono-Tread-Crawlers and Elastic-Rods Joint*, the IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics, (2006)
- (4) A.Jacoff, E.Messina, B.A.Weiss, S.Tadokoro and Y.Nakagawa, *Test Arenas and Performance Metrics for Urban Search and Rescue Robots*, the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2003), pp.3396–3403
- (5) Y.Okada, K.Nagatani and K.Yoshida, *Semi-Autonomous Operation of Tracked Vehicles on Rough Terrain using Autonomous Control of Active Flippers*, the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2009)
- (6) K.Nagatani, N.Tokunaga, Y.Okada and K.Yoshida, *Continuous Acquisition of Three-dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain*, the IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics, (2008), pp.25–30
- (7) S.Hirose, H.Tsukagoshi and K.Yoneda, *Normalized Energy Stability Margin: Generalized Stability Criterion for Walking Vehicles*, the International Conference on Climbing and Walking Robots, (1998), pp.71–76