

土砂災害対応小型UGVの開発

DEVELOPMENT OF ANTI-DISASTER SMALL UGV FOR LANDSLIDE

徳田 献一¹・福山 航²

Kenichi TOKUDA and Wataru FUKUYAMA

¹システム工学部助教, ²システム工学研究科博士前期課程

自然災害対応ロボットの主目的は, 安全な場所からの遠隔操作により発生した災害の状況をカメラなどにより探査することである。しかし, 自然災害の中でも土砂災害はその原因となる集中豪雨と平時の大雨との区切りがあいまいなため, 災害用に備えたロボットを使用するタイミングをはかることが難しい。そのため, 土砂災害対応ロボットは平時に近い大雨の段階から簡便に利用できるシステムとすることが望ましい。本稿では, 平時から利用可能な小型UGVとして開発を進めている土砂災害対応自律探索小型車両ロボットのコンセプトを紹介し, 実現するための課題のうち目的地指示システムと泥濘地走行システムについて報告する。

キーワード: レスキューロボット, 土砂災害, 小型UGV, ロボット誘導技術, 周期操舵

1. はじめに

日本における自然災害に対応するためのさまざまな救助ロボットシステムの提案がされている¹⁾。自然災害のうち土砂災害は和歌山県下においては頻繁に発生しており, 我々は土砂災害に対応するための救助ロボットについての調査研究を行ってきた²⁾。自然災害の中でも土砂災害は, その原因となる集中豪雨と平時の大雨との区切りがあいまいなため, 災害用に備えたロボットを使用するタイミングをはかることが困難である。そのため, 平時から簡便に使用することのできるシステムとすることが望ましい。

災害用ロボットには, 空中を飛翔するドローンと呼ばれるUAV(Unmanned Aerial Vehicle)や地上を走行するUGV (unmanned ground vehicle)があるが, 土砂災害が発生する危険性が高い暴風下では空中を飛翔することは困難である上, 訓練を受けた操作者の確保が容易ではない。一方, 地上を走行する車両であれば暴風下での運用が可能であり操作も容易である。

平時の大雨強風の状況から土砂災害発生の原因となる暴風雨の状況は連続しているため, 土砂災害に対応するロボット機器は平時から利用可能なものとし, 災害発生時には平時から連続して運用されることが望ましい。このような平時から災害発生時まで連続的に運用する機器

システムを構成するために, 提案する小型UGVにおいては平時における運用と災害時における運用の2つの状況に対して次のように想定する。まず, 平時においては, 田畑の見回りや暗い夜道での道案内を目的とするロボットとして手軽に利用できるものとし, そして暴風雨時には土砂災害発生危険性の高い地点のカメラによる探索に用いることを考える。このような利用シーンにおいては, 災害発生時に小型UGVが備えなければならない機能は次の2つに絞られる。その機能は, (1) 人間操作者が指示した災害発生の危険性の高い箇所を小型UGVの移動・観測目的地として設定できることと, (2) 人間操作者によって指示された目的地までの悪路を踏破することである。

この2つの機能実現に対して, 我々は(1) レーザポイントによる目的地指示システムの実装と(2) 泥濘地踏破のための周期操舵システムの有効性の確認を行ってきた。本稿では, 土砂災害に対応するための小型UGVの提案を行い, 開発コンセプトの紹介およびその課題であるレーザポイントによる誘導方法と泥濘地踏破のための周期操舵システムの検討について報告する。

2. レーザポイントによる誘導手法

自動運転車である小型UGVはレーダー, LIDAR, GPS, カメラなどにより周囲の環境を認識して, 指定さ

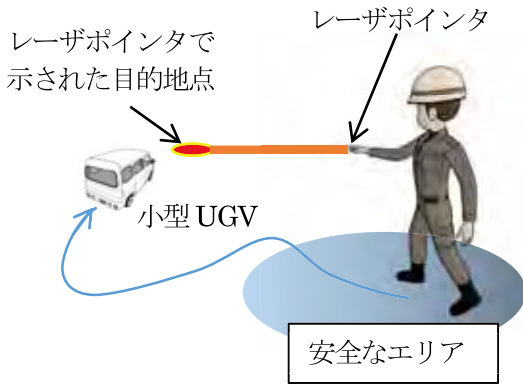


図-1 レーザポインタによる目的地指示システム

れた行き先までの経路を自律的に探索し走行する性能が期待される。整備された道路や予め与えられた地図に従って走行するUGVとは異なり、災害時に運用されるUGVでは目的地を人間が指定するための技術を実装しなければならない。そこで、平時から連続的に利用できる簡便なシステムとして図-1の概念図のようなレーザーポインタによる目的地指示システムの導入を行った。

(1) レーザポインタによる指示取得

レーザーポインタの位置の取得はカメラを用いて行う。カメラを用いた移動ロボットの制御は近年盛んにおこなわれており、その手法は、位置にもとづく方法と画像にもとづく方法の2つに大別することができる。このうち、画像にもとづく方法は状態変数や制御目的を画面上に直接定義するため、周囲環境の3次元モデルを必要とせず、動的な災害環境下で有効な手法であると考えられる。その反面、一般にシステムの状態方程式は非線形性が強く、制御モデルの構築は困難がともなう。従来研究ではファジィ制御を用いることで、複雑な制御モデルを考慮することなく、モデルフリーで車輪型ロボットの画像にもとづく制御を実現した。だが、この手法は地面に描かれた軌道への追従が目的であったため、カメラの視界は前方のみに限定され、ロボットの速度も正の値（前進方向）のみとされていた。

しかし、ロボットを誘導しようとしたときに、カメラの視界が前方のみであると不都合が多い。周囲のどこを目標地点として指定されても対応するためには、より画角の広いカメラを用いる必要がある。また、目標地点が後方や最小旋回半径よりも内側にある場合、前進のみでは移動することは困難であり、後退・切り返し動作を適宜駆使する必要があると考えられる。

そこで本研究では、従来研究の手法を拡張し、より画角の広い全方位カメラを用いることで、目標地点が周囲360度のどの方向であっても画面内にとらえられるようにした(図-2)。また、目標地点が最小旋回半径よりも内



図-2 全方位カメラを搭載した小型UGV

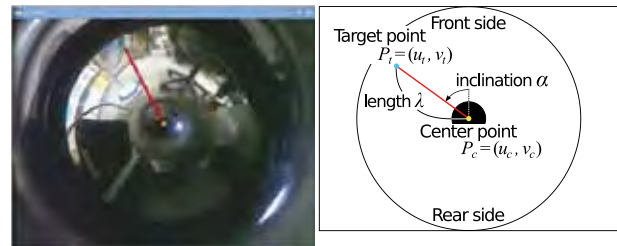


図-3 全方位カメラ画像上でのレーザーポインタ像

側であるなど前進動作のみで移動できないような場所に存在したとしても、後退や切り返し動作を必要に応じておこなうことで、目標地点へ車輪型移動ロボットを移動させられるような制御法を構築することを目的とし、制御システムの構築をおこなった。

この制御システムにおいて、制御対象である小型UGVを前輪操舵型の車輪型移動ロボットモデルとして定義し、全方位画像中においてレーザーポインタで指示した目標点を画像中心点に一致させる制御則を設計することとした。しかし、前述の通りモデルベースの制御をおこなうことは困難であるため、ファジィ制御器の開発をおこなった。

(2) 全方位画像にもとづくファジィ制御手法

実際に取得した全方位画像を図-3に示す。全方位画像にもとづくファジィ制御器を開発するために、まず予備実験として数名に実際にロボットを操作してもらった。そのときの画像上の目標点とロボットの挙動を記録し、その結果をもとに大まかなファジィルールを作成した。入出力の変数は、 $(\alpha, \lambda, s, \varphi)$ の4種類とし、これらの変数は図-4に示すメンバシップ関数によって、実数の適合度を有する言語表現(ファジィ集合)へと変換される。

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha} &= \{NB, NS, ZO, PS, PB\} \\ \tilde{\lambda} &= \{ZO, PS, PB\} \\ \tilde{s} &= \{N, ZO, P\} \\ \tilde{\varphi} &= \{N, ZO, P\} \end{aligned}$$

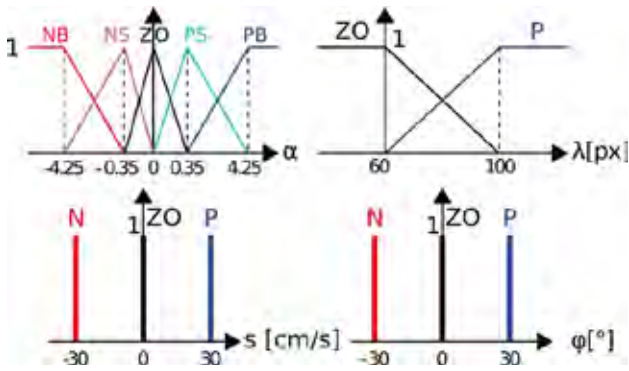


図-4 作成したメンバシップ関数

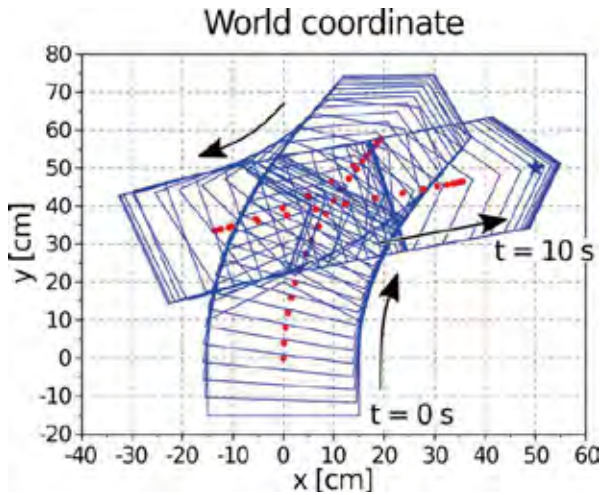


図-5 シミュレーション例

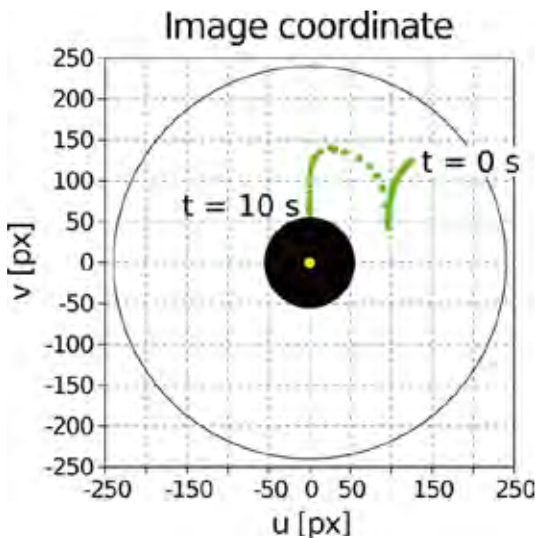


図-6 全方位カメラ画像上のレーザーポインタ

ただし、NB, NS, ZO, PS, PB はそれぞれ Negative Big, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Big を意味するラベルである。提案した制御則によって正しく目標位置へロボットを制御できるかシミュレーションによって確かめた。次に、図-5にシミュレーション結果の一つを示す。このシミュレーションでは、目標地点がロボットの最小旋回半径よりも内側の場合 $(x_t, y_t) = (50 \text{ cm}, 50 \text{ cm})$ としている。この時の画像座標の動きは図-6

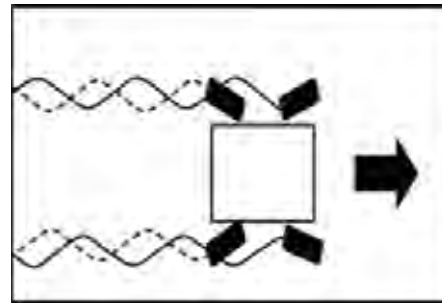


図-7 周期操舵走行の概念図



図-8 周期操舵時の車輪の動き



図-9 周期操舵単輪実験装置

のようになり、ロボットが後退・切り返し動作をおこなわずに目標地点付近へ移動していることが分かる。この結果からロボットは目標地点へ到達しており、本手法の有効性を示すことができたと考えられる。

3. 泥濘地踏破のための周期操舵の試み

砂漠などの乾燥した砂地では泥濘地と同様に車輪の沈下が大きな問題となる。この沈下を低減するための手法として、周期操舵走行がある。周期操舵とは車両が周期的に操舵しながら走行する方法でスタックを解決する手法の一つとして注目されている(図-7, 図-8)。この手法では、砂地上での周期操舵走行が直進走行に比べて車輪の沈下を低減することが報告されている³⁾。そこで、砂地での効果が確認された周期操舵走行を泥濘地に適用し、新たに製作した単輪実験装置を用いて車輪の沈下低減に対する有効性の確認と検証を行った。

(1) 単輪実験装置

図-9に単輪実験装置全体像を示す。実験装置は車輪部

分とセンサ部分に分かれており、上下方向のスライダのみで接続されているため前進することはできない。車輪部分は直径140[mm]のタイヤ、タイヤを回転させるためのDCサーボモータ、タイヤの向きを変えて操舵を模擬するRCサーボモータとArduino Unoで構成し、センサ部分は超音波センサモジュールとArduino Unoで構成した。超音波センサモジュールは車輪部分に水平に取り付けられた板に超音波を当てることで沈下量を計測している。

(2) 沈下実験

まず、乾燥した砂地において周期操舵の操舵角ごとにそれぞれ10回ずつ計測を行った。図-10に計測結果の平均値のグラフを示す。このグラフにより、操舵角が増加することにより乾燥した砂地において沈下が低減できることを確認した。次に、泥濘地における周期操舵の有効性の確認するために含水率15%の泥濘地を作製し、操舵の有無による車輪の沈下量を計測した。振幅を0[deg]～50[deg]まで変化させ、角周波数を $\omega=1$ に固定し、それぞれの振幅で10回ずつ計測を行った。車輪の周速度は201.6[mm/s]である。その結果の平均値のグラフを図-11に示す。

実験の結果、周期が0[deg]の時に比べ10[deg]、20[deg]、30[deg]、40[deg]、50[deg]全ての場合において周期操舵した場合の方が沈下を低減できるという結果を得た。また、振幅を大きくするにつれ、沈下量も減少するという結果が得られた。

(3) 轍による評価

周期操舵の有効性検証のため、沈下実験後の轍を比較した。各周期の沈下実験終了時の轍を撮影し、0[deg]～50[deg]の轍の後ろを赤線で囲い比較を行った(図-12)。検証のため0[deg]と50[deg]の轍の画像を得た(図-13)。

検証の結果、周期が大きくなるにつれて轍は扇型に近づくことが分かった。この結果から、周期操舵は車輪の前方から砂を掻き集め、車輪の後方へ砂を排土することで沈下を低減しており、周期が大きくなるにつれ砂を掻き集める範囲が大きくなるため、より沈下が低減できたと考えられる。

(4) PIV計測による評価

轍の比較による検証で得た考察が正しいかを確認するため、PIV計測により車輪周りの流れの解析を行った。実験は、水を含ませた吸水性ポリマーが入ったポリカーボネートの容器の中に単輪実験装置を入れ、車輪を回転させ、その様子を容器の底から撮影した。そして、MATLAB toolboxとして提供されているPIVlabを用いて、撮影した画像の解析を行った。

車輪をそのまま回転させた場合(0[deg])と30[deg]で周期操舵しながら回転させた場合の車輪下の流れをビデオカメラで撮影し、PIV計測による解析を行った結果を

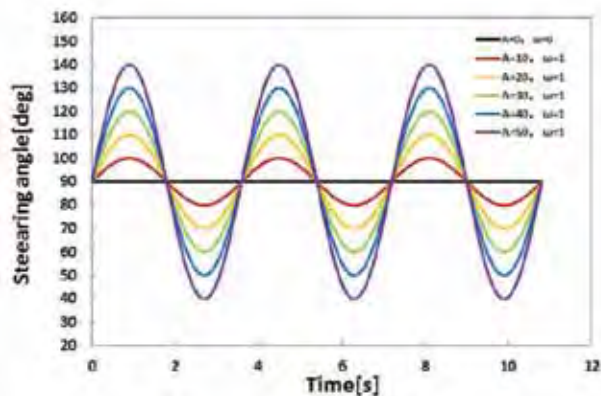


図-10 砂地上における周期操舵実験結果

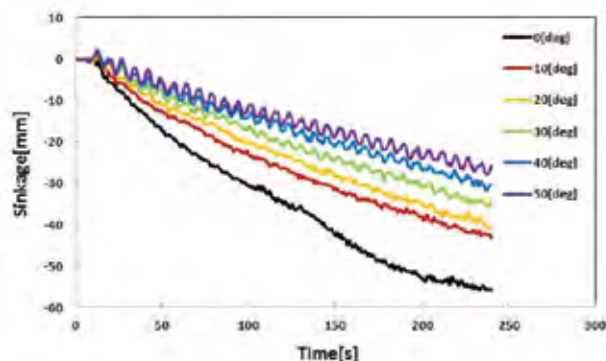


図-11 泥濘地における周期操舵実験結果



図-12 単輪実験時における轍の形成



図-13 単輪実験時における操舵角による轍の違い

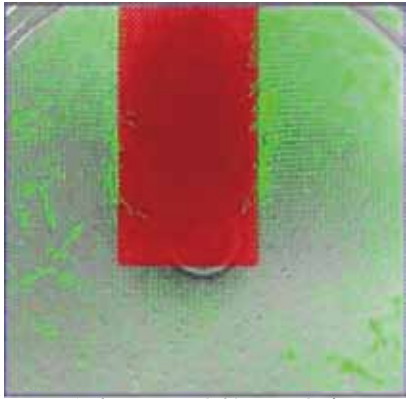


図-14 PIV解析による車輪周辺流速 (0 [deg])

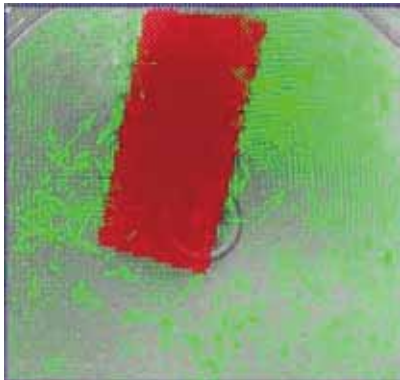


図-15 PIV解析による車輪周辺流速 (30 [deg])

図-14および図-15に示す。緑の線が吸水性ポリマーの流速を表しており、赤いで囲われた範囲が車輪を表している。

PIV計測による解析の結果、0[deg]の場合(図-14)は車輪前方や両側面で流れが強くなっているのに対し、30[deg]の場合(図-15)は周期の弧の外側で流れが強くなっていることが分かる。このことから、轍での検証で考察したように、周期操舵は周期の弧の外側から砂を掻

き集めることで沈下を低減していると言える。

4. おわりに

本稿では、土砂災害に対応する小型UGVの開発について、平時から簡便に利用できるシステムとして、レーザポイントによる目的地指示システムの実装と泥濘地踏破のために周期操舵の有効性の確認を行った研究について報告した。

災害時に初めて利用するロボットシステムのために訓練などを行うと同時にロボットの維持を続けるのではなく、平時においては身近な田畑の見回りや夜道の案内などに利用できるものとするにより集中豪雨の発生の早期から利用できるものとするのが期待できる。そのためには、日常的に利用可能なロボットシステムとしての問題点を整理し、課題解決を今後もつづけていく計画である。

参考文献

- 1) 大須賀公一：災害対応の記録 - 災害関係記録作成分科会からの報告，日本ロボット学会誌，Vol.32，No.1，pp.10-18，2014
- 2) Kenichi Tokuda: *The Application of Robot Technologies to Disasters from Torrential Rains on Japan's Kii Peninsula*, Journal of Robotics and Mechatronics, No. 26, Vol. 4, pp. 449-453, 2014.
- 3) 山川淳也：“周期操舵走行における砂地とタイヤの相互作用に関する研究”，日本機械学会第17会交通・物流部門大会講演論文集，pp.211-212，2008

(2016. 12. 16受付)