

遠隔操作ロボット走行時における機体の姿勢変化による転倒回避

○水野 秀哉（東京大学），筑紫 彰太（東京大学），藤井 浩光（千葉工業大学），
田村 雄介（東京大学），永谷 圭司（東京大学），山下 淳（東京大学），浅間 一（東京大学）

Tumble Avoidance of Teleoperated Robots Considering Arm Configuration

○Shuya MIZUNO (The University of Tokyo), Shota CHIKUSHI (The University of Tokyo),
Hiromitsu FUJII (Chiba Institute of Technology), Yusuke TAMURA (The University of Tokyo),
Keiji NAGATANI (The University of Tokyo), Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo),
and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : When teleoperating a robot, there is a danger that the robot tumble due to uneven terrain. Therefore, this study proposes a method to avoid tumble during running in uneven terrain. This method enables to avoid tumble by deciding the robot's stability with dynamic simulator and changing the robot's configuration.

1. 序論

地震や台風などによる自然災害が発生した際、復旧作業や調査を迅速に行い、被害を最小限に抑えることは極めて重要である。しかし、二次災害発生などの危険性から、人の立ち入りが困難な災害現場も存在する。そのため、遠隔操作のロボットや建設機械を用いた復旧作業や調査が必要とされている [1][2]。災害現場では、地面の傾斜や凹凸など不整地が多数存在することが想定され、搭乗操作よりも安全性を判断する情報が少ない遠隔操作では、不整地の影響で機体が転倒する危険がある。転倒が発生した場合、現場における作業の停滞や機体の破損を招くため、不整地上でのロボットの遠隔操作の際には、機体の転倒を回避することが重要となる。

不整地上での遠隔操作時の転倒回避に関する研究として、重松ら [3] は油圧ショベルのアームなど作業装置が動作するときの転倒防止制御の方法を考案した。この研究では機体重心と作業装置動作時の ZMP (Zero Moment Point) を考慮することで静的及び動的に転倒を回避している。ロボットの作業装置の位置姿勢（以降では、アームなど作業装置の位置姿勢によって定まるロボットの形態のことを単に「ロボットの姿勢」と呼ぶこととする）とその動作によって生じる加速度を考慮し転倒回避を行っているが、機体の走行時の転倒については対象としていない。復旧作業や調査を円滑に行うためには、安定して作業を行うことだけでなく、安全に機体を走行させることが必要不可欠である。

ロボット走行時の安定性の研究として、栗島ら [4] は動力学シミュレーションを用いて走行時の安定性評価値を算出し、その値から転倒の有無を判断する手法を提案した。

さらに転倒の有無や安定性の評価を遠隔操作の画面上に提示することで、オペレータが安定性に関する情報を視覚的に得ることができるシステムを考案した。動力学シミュレーションを用いることで、ロボットの姿勢と動的な転倒を考慮した走行安定性を評価している。

しかし、[4] の手法では、ロボットの姿勢を変化させずに走行した場合の安定性の評価や転倒の有無の判定のみを行っている。転倒すると判定された場合であっても、経路途中で姿勢を変化させることで転倒を回避できる可能性があるが、[4] は経路途中で姿勢を変化させる場合については対象としていない。

そこで、本研究では、ロボットが転倒する可能性のある地形において、転倒を回避できる状態へロボットの姿勢を変化させ、走行時の転倒を未然に防止するシステムの構築を目指す。

2. 提案手法

2.1 概要

本研究における提案手法のアルゴリズムを Fig. 1 に示す。まず、ロボットに搭載したアームなど作業装置の位置姿勢を変動させることで、機体の重心位置が異なるロボットの姿勢のパターンを用意する。次に、ロボットの進行の目標地点を定め、あるロボットの姿勢パターンで、その経路間を直進するものとして動力学シミュレーションを行う。この間、ロボットの転倒判定を [4] の手法により行う。走行区間中に転倒があると判定された場合は、転倒の起こった地点の直前からシミュレーションを再開し、ロボットの

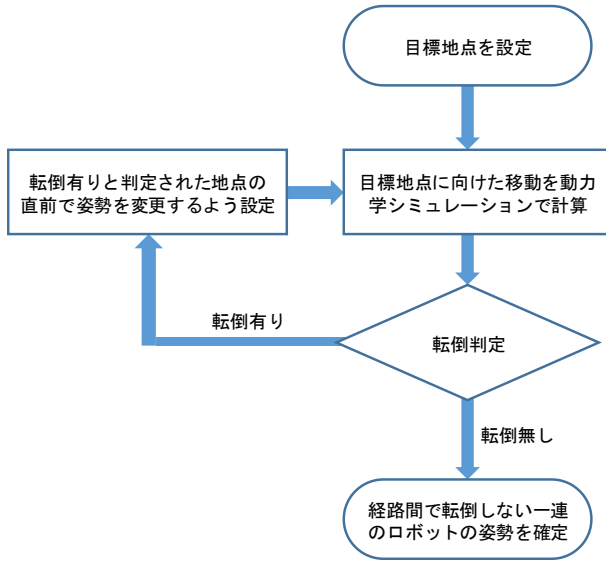


Fig. 1: Algorithm of proposed method

姿勢を変更，転倒判定を行う。このループを，転倒判定がなくなるまで繰り返し，経路間で転倒が生じないロボットの姿勢を確定する。

2.2 転倒判定

ロボット走行時の転倒の判定には [4] と同様に，米田ら [5] によって提案された転倒安定性余裕 (Δ_+) の値を利用する。この値はある瞬間におけるロボットの接地状況や，地面との接触点の位置と各接触点においてロボットが地面から受ける力とモーメントから算出される。Fig. 2 にロボットの一例を示す。図のロボットは片側 k 個の合計 $2k$ 個の接地点を有する。ある慣性座標系を Σ_a とし，その原点を O とおく。各接地点の位置ベクトルを $\mathbf{p}_j$ ，各接地点が地面から受ける力を $\mathbf{f}_j$ とおくと，ロボットが地面から受ける力とモーメント $\mathbf{F}$ ， $\mathbf{M}$ は以下の式で表される。

$$\mathbf{F} = \Sigma \mathbf{f}_j \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \Sigma \mathbf{p}_j \times \mathbf{f}_j \quad (2)$$

ここで，座標系は慣性座標系であれば原点の位置などは任意に設定できる。これらの値を用いて Δ_+ を計算する。ロボットの総質量を m ，重力加速度の大きさを g とおく。ある 2 つの接地点の位置ベクトルを $\mathbf{p}_a$ ， $\mathbf{p}_b$ とすると， Δ_+ は以下の式で表される。

$$\Delta_+ = \frac{\min |\mathbf{M} \cdot \frac{\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b}{|\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b|} + \mathbf{F} \cdot \frac{\mathbf{p}_a \times \mathbf{p}_b}{|\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b|}|}{mg} \quad (3)$$

Δ_+ の分子はロボットを外力によって転倒させるのに必要な最小のモーメントであり，その値を総重量 mg で割っているため， Δ_+ の単位はメートルである。

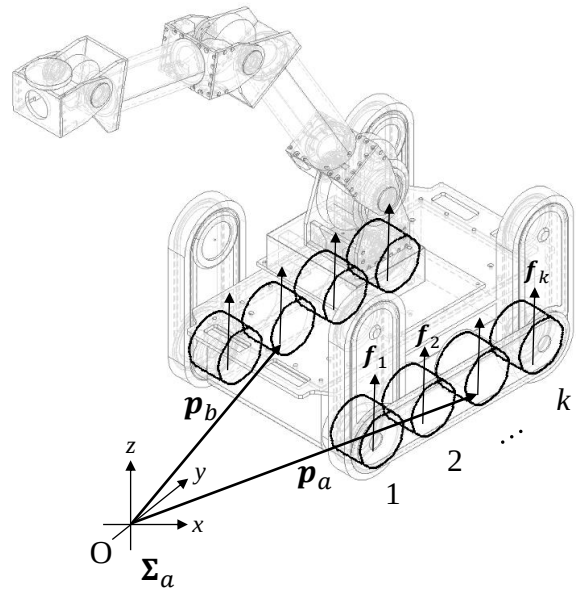


Fig. 2: Example of force from ground and position vector of the robot

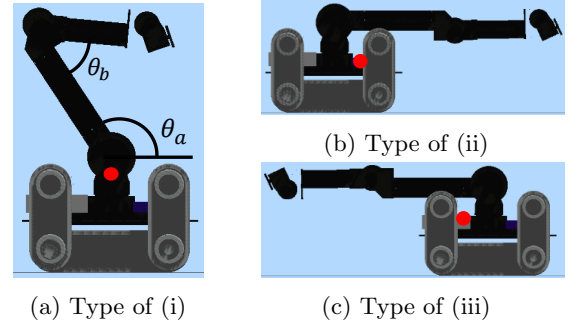


Fig. 3: The robot's configuration type (the red circle is the position of the robot's center of gravity), and rotation angle of 2nd axis (θ_a) and 3rd axis (θ_b)

この値を利用して [4] によって提案された安定性の指標の値を算出する。安定性の指標の値はロボットの支持機構が全て接地しているときは Δ_+ ，それ以外の場合は 0 と定義する。この評価値によりロボットの加減速を伴う運動など不整地における動的な挙動を考慮した安定性の評価を行う。

安定性の指標の値が小さいほど安定性が低く，値が 0 のときに転倒と判定される。しかし，転倒にはある程度時間がかかるため，評価指標が 0 となった場合でも，直後に別の接地点が現れるなど，実際には転倒が生じない状況が発生する場合がある。そこで，[4] では単位時間内（1 秒間）で継続して安定性の指標の値が 0 である場合をもって転倒と判定している。本研究における転倒判定もこれに従うものとする。

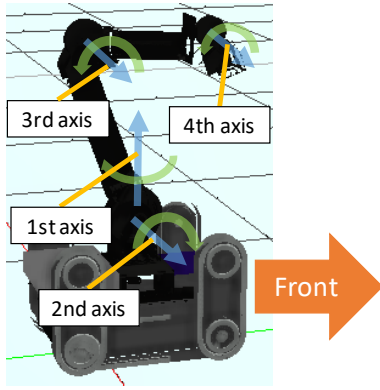


Fig. 4: 3D model of the robot used in experiment

2.3 ロボットの姿勢のパターン

安定であるロボットの姿勢は地形によって異なる．そのため，地形ごとに転倒を回避できるロボットの姿勢をとらなければならない．そこで本研究では，ロボットに搭載したアームなど作業装置の位置姿勢を変動させ，機体重心が異なるロボットの姿勢パターンをいくつか考えることで対応することとした．

本研究では，Fig. 3 に示すような，次の 3 種類のロボットの姿勢を考える．なお，Fig. 3 ではいずれも図右側を機体の前方としており，図中の赤点は機体重心を示す．

- (i) 機体重心の鉛直床投影点が支持多角形の中心となるロボットの姿勢
- (ii) 機体重心が機体の前方に位置するロボットの姿勢
- (iii) 機体重心が機体の後方に位置するロボットの姿勢

(i) のロボットの姿勢は，平地上にロボットが位置しているときに，この 3 つのロボットの姿勢の中で静的に最も安定である．(i) の姿勢では転倒してしまうような傾斜や加速度が存在する状況において機体重心を移動させることで対応することができる．

以上より本研究では，3 つのロボットの姿勢のうち平地上で静的に最も安定である (i) をロボットの姿勢の初期状態とし，(i), (ii), (iii) の順番で転倒しないロボットの姿勢を探索することとする．また，ロボットの姿勢を変化は，ロボットの走行を停止してから行うこととする．

Table 1: Rotation angle of each configuration type

Configuration type	θ_a	θ_b
(i)	110°	72°
(ii)	0°	180°
(iii)	180°	180°

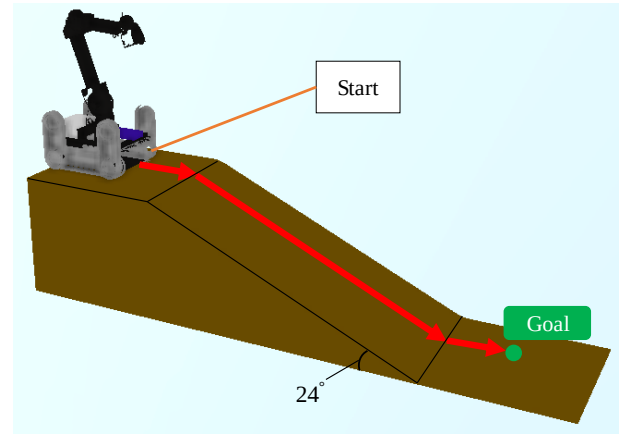


Fig. 5: Experimental environment that includes a slope

3. 実験

3.1 実験環境

提案した手法を検証するため，動力学シミュレーションを用いて実験を行った．

本実験では Fig. 4 に示す多軸アーム型クローラロボットの三次元モデルを対象とする．これはトピー工業株式会社の多軸アーム搭載型クローラロボットの三次元モデルである．このロボットは，Fig. 4 に示す通り 4 つの回転軸を持つアームを有しているが，本実験では，簡単のためこのロボットの 2 軸と 3 軸の回転のみを考慮する．具体的には，Fig. 3 のように 2 軸，3 軸の回転角を θ_a ， θ_b とおき，Table 1 のように定める．

転倒判定を行う動力学シミュレーションには CM Labs Simulation 社の Vortex Studio を利用する．Vortex Studio は，複数の物体間における接触状態に関する計算を 60 fps で行うことが可能である．ロボットが走行する地形として，Fig. 5 のような斜面（傾斜角 24°，高さ 80cm）を用意した．対象とするロボットの動作は，この斜面の下方向への走行である．

3.2 シミュレーション結果

本実験で使用した地形では，本手法を用いた結果，3 回のループによってロボットの姿勢が決定した．1 ループ目は (i) のロボットの姿勢で走行しロボットが斜面を移動し始めたところで転倒判定が生じた．そのため，2 ループ目は，ロボットが斜面に差し掛かる直前にロボットを戻し，ロボットの姿勢を (i) から (ii) へと変更した後，走行を再開した．しかしながら，2 ループ目においても 1 ループ目と同じく，ロボットが斜面を移動し始めたところで転倒判定が生じた．そのため，3 ループ目も，ロボットが斜面に差し掛かる直前にロボットを戻し，ロボットの姿勢を (i)

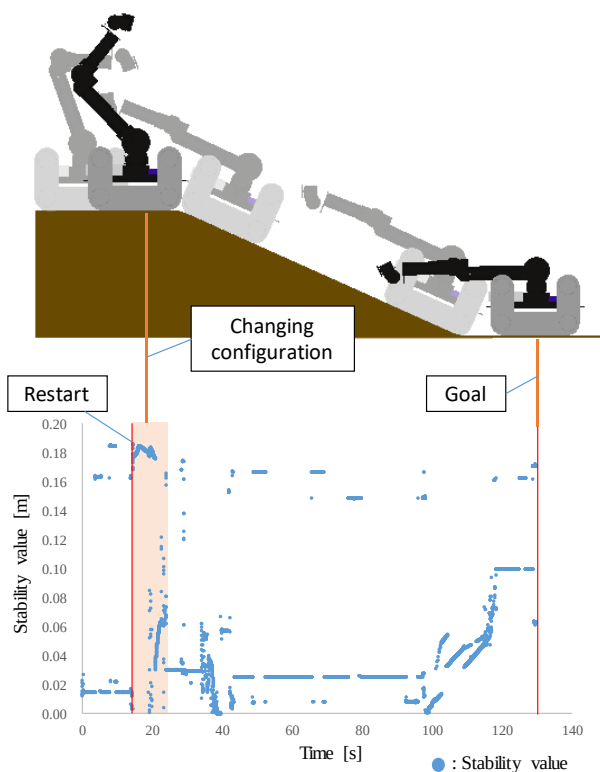


Fig. 6: Stability value

から (iii) へと変更した後、走行を再開した。ロボットの姿勢を (i) から (iii) へと変更し走行した結果、ロボットの転倒は生じず、転倒を回避できるロボットの姿勢を得た。

アルゴリズム終了時に出力された、[4] の手法で評価された走行時の安定性のグラフと地形の対応を Fig. 6 に示す。横軸は移動開始からの時間である。グラフの縦軸は安定性の指標の値を示しており、値が大きいほど安定性は高い。安定性の指標は点で示している。図中の Restart は 3 ループ目のシミュレーションの再開時点を、Changing configuration はロボットの姿勢を変化させている時間帯を、Goal はロボットが目標地点に到達した時点をそれぞれ表す。

4. 考察

本実験のシミュレーションでは、斜面を下る走行をするときには、本実験で用意したロボットの姿勢のうち重心が機体後方に位置している (iii) のロボットの姿勢が最も適していると判断された。これにより、本実験で使用した地形において、(i) のロボットの姿勢で走行を開始し斜面の直前で (iii) のロボットの姿勢へ移行するようにロボットの姿勢を変化させることで転倒を回避できることがわかる。

このように、動力学シミュレーションを用いて転倒判定を行い、転倒の可能性のある地形においてロボットの姿勢を変化させることにより転倒を回避することができる。

5. 結論

本研究では、ロボットの走行時に発生しうる転倒を判定し姿勢を変化させることで回避する手法を考案し検証した。具体的には、動力学シミュレーションから得られるロボットの接地状態から転倒判別を行い、転倒すると判定された地点の直前でロボットの姿勢を変化させることで機体重心を移動させ転倒を回避する手法を提案した。

本研究では 3 種類のためのロボットの姿勢を考慮したが、今後は別のロボットの姿勢の導入を検討していく。また、2 つの回転軸を持つアームを設定したが、より多くの回転軸を持つアームを有するロボットへの適用も検討する。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18K13810 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 浅間一, “災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築”, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 1, pp.37–41, 2014.
- [2] Fumitoshi Matsuno and Satoshi Tadokoro, “Rescue Robots and Systems in Japan”, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 12–20, 2004.
- [3] 重松康祐, 坪内孝司, 皿田滋, “重心及び ZMP 予測に基づく遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止制御”, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 850, pp. 1–15, 2017.
- [4] 粟島靖之, 藤井浩光, 田村雄介, 永谷圭司, 山下淳, 浅間一, “ロボット遠隔操作のための動力学シミュレーションを用いた走行安定性の提示”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '18 講演論文集, 2A1-K06, pp. 1–4, 2018.
- [5] 米田完, 広瀬茂男, “歩行機械の転倒安定性”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 517–522, 1996.