

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

Running Stability Visualization with Dynamic Simulator for Robot Teleoperation

学 栗島 靖之 (東大) ○正 藤井 浩光 (千葉工大/東大) 正 田村 雄介 (東大)
正 永谷 圭司 (東大) 正 山下 淳 (東大) 正 浅間 一 (東大)

Yasuyuki AWASHIMA, The Univ. of Tokyo, awashima@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hiromitsu FUJII, Chiba I.T./The Univ. of Tokyo, fujii@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Yusuke TAMURA, The Univ. of Tokyo, tamura@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Keiji NAGATANI, The Univ. of Tokyo, keiji@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Atsushi YAMASHITA, The Univ. of Tokyo, yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hajime ASAMA, The Univ. of Tokyo, asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

This paper proposes a method to visualize running stability of robots in its surrounding terrain. The stability should be evaluated by taking account of the physical interaction between a robot and terrain. In this study, the dynamics of the robot behavior in the terrain is calculated in advance with a dynamic simulator, and the stability is assessed by our proposed criterion that can evaluate the tumble risk in a term. The calculated stability is visualized to the teleoperation operator, and therefore, a safe path can be chosen to move. In experiments, the validity of the proposed method was performed by testing additionally in an actual environment after the simulation.

Key Words: Teleoperation, Assessment of Running Stability, Rough Terrain, Dynamic Simulation

1 序論

災害対応の現場において二次災害の発生を避けるため、遠隔操作ロボットの活用が期待されている。プラントなどの施設奥部の調査や、瓦礫の撤去作業など、ロボットに期待される作業は多岐に亘るが、いずれにおいてもロボットを安全に移動させることが極めて重要となる。移動の際には安全な経路を選択することでロボットを現場まで到達させる必要があり、作業の際には安定した足場を選択し作業を行う必要がある。特に災害現場においては、平時であれば危険と判断されるような状況においてもロボットの姿勢や形態を変化させ重心位置を変えるなどして、走行可能な条件などを見出すことで現場を走破する必要に迫られる状況が想定される。しかし、遠隔操作のオペレータには、それら安全性を正確に判断するための情報が十分に提供されておらず、移動中にロボットがスタックし回収できなくなる、または坂道を不安定な姿勢で走行することで転倒するなどの事故が生じている。

遠隔地にいるロボット周囲の状況をオペレータに伝えるために、ロボットにカメラや測距センサなど様々なセンサを搭載し、それらの情報をオペレータに提示することが行われている。しかし、操作中のオペレータにとって多くのセンサ情報を把握し、瞬時に適切な対応を判断することは困難である。さらに、例えば急な斜面など起伏の激しい地形をロボットが転倒せずに走行できるかなど、周囲の地形におけるロボットの動的な挙動をセンサ情報のみから判断することは極めて困難である。状況に応じて正確にロボットの走行安定性を判断するためには、地形の評価と同時に、その地形上におけるロボットの姿勢・形態や、速度・加減速などロボットのコンフィギュレーションの違いによる挙動の変化、すなわちダイナミクスを考慮する必要がある。不整地における走行安定性の評価に関する研究 [1, 2] では、センシングに基づく地形の評価やロボットごとの機体特性を考慮した経路計画は行われているが、地形とロボットの間のダイナミクスを考慮した評価は十分になされていない。

我々は、そのような動的な挙動の変化を評価するために動力学シミュレーションを用いてロボットの走行安定性を評価する手法を提案してきた [3]。本研究では、走行安定性の低い環境での遠隔操作において、ロボットのコンフィギュレーションを変化させ

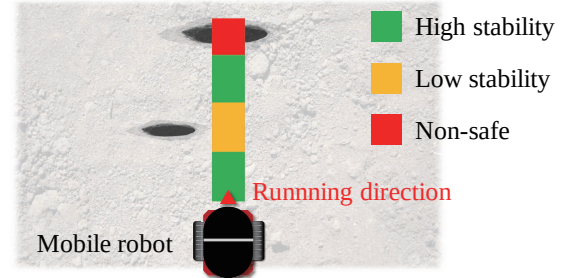


Fig.1 Schematics of the proposed system for visualizing stability in surrounding terrain

た場合に、選択した経路上を走行可能であるかを事前に評価しオペレータに提示することを目的とする。特に災害対応現場に広く導入されているバックホウなどの建機に代表されるアームを有するロボットが、アームの屈伸状態を変化させることで斜面の昇降における走行安定性を維持していることに注目し、実験において提案手法の有効性を検証する。

2 提案手法

2.1 システムの概要

本研究の提案手法により、遠隔操作の際にオペレータには図1のような映像が提示される。この映像は、現場における実際の移動の前に動力学シミュレーションにより経路上でのロボットの安定性を評価した結果を可視化したものであり、ロボットの周囲環境とともに、オペレータが選択した経路上における走行安定性が示されている。図1では、矢印の方向に進行する経路が選択されており、安定性が高い領域は緑色で、安定性が低い領域は黄色で、転倒が生じると判定された領域は赤色で色分けされている。オペレータはシミュレータ内でのロボットの姿勢や速度などのコ

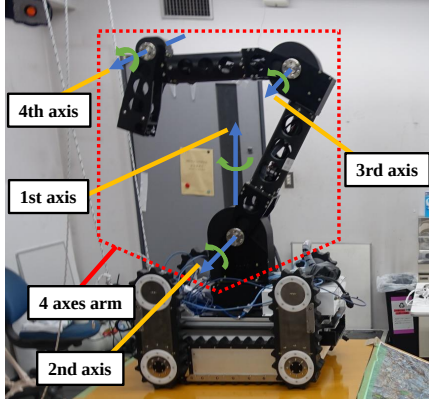


Fig.2 The robot with an arm used in the experiment



Fig.3 Experimental environment equipped with a slope

ンフィグレーションを設定し、その条件の下で行った物理シミュレーションから得られる地形との接触状態や反力・反モーメントなどの接触情報を評価することで、その状況における経路上での安定性を確認することが可能である。

2.2 動的安定性余裕を用いた安定性指標

ロボットの安定性に関する研究は数多くなされており、特に不整地上におけるロボットの移動において、地形とロボットとの物理的な相互作用を考慮した安定性の指標として動的安定性余裕 [4] が提案されている。この手法では、ある瞬間におけるロボットと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やモーメントを用いており、ロボット各部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評価が可能である。しかし、移動に伴って地面との接触点の組み合わせが時々刻々と変化していく場合には、この手法のみで走行安定性を判定することは困難である。特に、災害対応で用いられるタイヤやクローラ等を支持機構として有するロボットでは、ある瞬間において特定の軸周りの転倒判定が下された場合であっても、その直後にロボットを支持する新たな接触点が現れ、実際にはロボットは転倒しないといった状況が考えられる。このように災害対応への適応を考慮すると、ある瞬間の時刻における安定性評価結果が必ずしも適当であるとは限らない。

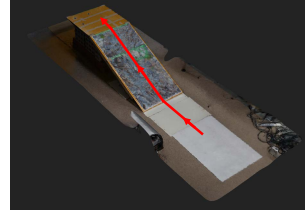
本研究では、ロボットの走行に伴い変化する接触状態や反力・反モーメントをサンプリングし、時系列で瞬間ごとの動的安定性余裕を求め、単位時間ごとに走行安定性を評価する。具体的には、サンプリングごとに算出される瞬間の安定性の指標 S_{SV} を以下の様に定義する。

$$S_{SV} = \begin{cases} S_C, & \text{全ての支持機構が設置している場合。} \\ 0, & \text{上記以外の場合。} \end{cases}, \quad (1)$$

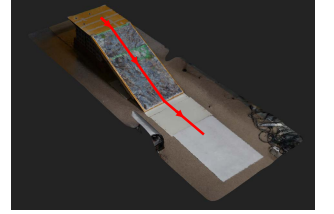
安定性の指標 S_{SV} としては、タイヤやクローラなどのロボットの支持機構が全て接地している場合は次式 (2) で評価される値 S_C を与え、それ以外の場合は既にロボットが転倒する危険性の高い

Table 1 Running patterns (running directions and arm configurations)

Running pattern	Running direction	Arm configuration
(i)	Up	Folded up
(ii)	Down	Folded up
(iii)	Down	Stretched ahead



(a) Up



(b) Down

Fig.4 Running directions

状態であると判断して 0 を与える。全ての支持機構が接地状態にある場合の安定性の指標 S_C は、Yoneda ら [4] の提案する転倒安定性の判別式および動的安定性余裕 Δ^+ を用いて、以下の様に定義する。

$$S_C = \begin{cases} \Delta^+ [4] & \text{全ての接触点の組み合わせに} \\ & \text{対して転倒安定性の判別式 [4]} \\ & \text{が満たされる場合。} \\ 0 & \text{上記以外の場合。} \end{cases}. \quad (2)$$

以上のようにサンプリングごとに評価した安定性の指標 S_{SV} を、単位時間ごとに統合し、以下の様に走行安定性を評価する。

$$\text{走行安定性} = \begin{cases} \text{転倒,} & n_h + n_l = 0 \text{ の場合。} \\ \text{低安定,} & n_l \geq \frac{n_t}{2} \text{ の場合。} \\ \text{高安定,} & \text{上記以外の場合。} \end{cases}, \quad (3)$$

ここで、式 (3) における n_t は、単位時間において算出される安定性の指標 S_{SV} の個数を表した値であり、 n_h , n_l はそれぞれ、単位時間において $\theta \leq S_{SV}$ および $0 < S_{SV} < \theta$ を満たす安定性の指標 S_{SV} の個数を表している。また、 θ は、平地のような整地上をロボットが走行した際の安定性の指標 S_{SV} の値をもとに決定される閾値であり、例えば θ の値を平地上をロボットが走行した際の安定性の指標 S_{SV} の半分の値として定義する方法などが挙げられる。

以上のように、本研究における走行安定性は単位時間ごとに評価される。そのため、評価結果は最小でも単位時間分遅れて提示されることになるが、本研究では現場での周囲地形上で転倒することなく走行可能な経路を選択する目的で、事前に安定性を評価するため、この評価に要する遅れは問題とはならない。

3 走行安定性の提示実験

アームを有する移動ロボットを用いた遠隔操作実験を行い、本提案手法を用いた際のアームの屈伸状態の違いにおける走行安定性の提示結果の検証を行った。

3.1 実験装置および環境

実験には、動力学シミュレータ CM Labs Simulations 社の Vortex Studio および図 2 に示した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を用いた。Vortex Studio は、リアルタイムでの動力学シミュレーションを実行可能な物理エンジンを搭載しており、複数の物体間における接触状態に関する計算を毎秒 60 回行うことが可能である。移動ロボットは図 2 に示す 4 軸のアームを搭載しており、各リンクを回転させアームの姿勢

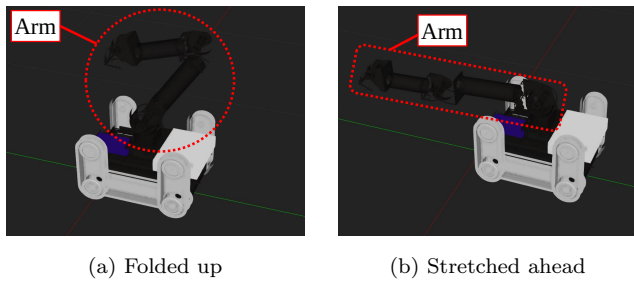
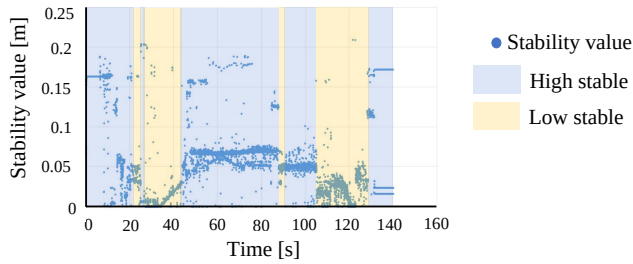
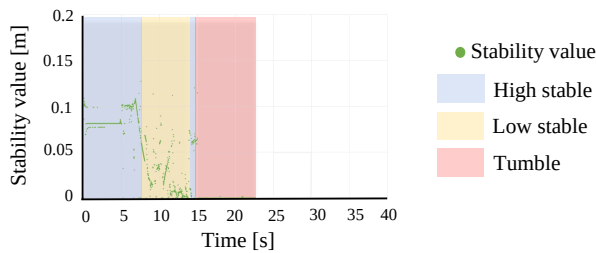


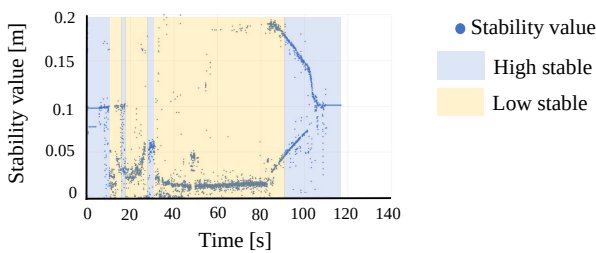
Fig.5 Configurations of the arm



(a) Running type (i)



(b) Running type (ii)



(c) Running type (iii)

Fig.6 Stability values in case of the running type (i)~(iii)

を変化させることで重心を位置を変化させた走行を行うことが可能である。アームを含むロボットの総重量は約 82 kg である。本実験を行った環境を図 3 に示す。不整地における坂道などの傾斜を想定して、ロボットの前方に坂道を設置した屋内環境で実験を行った。坂道の傾斜角および高さはそれぞれ 24 deg, および 732 mm である。また、動力学シミュレーションで用いる 3 次元環境地図は、災害対応現場などにおけるドローンによる航空測量などを想定して、事前に撮影した複数枚の多視点画像を用いた Structure from Motion により生成した。

実験では、表 1 に示す 3 通りの走行パターンに関するシミュレーションを行い、提案手法に基づいて各走行パターンにおける走行安定性の評価を行った。ここで、図 4 はシミュレーション環境であり、表 1 における走行方向の「上り」および「下り」は、

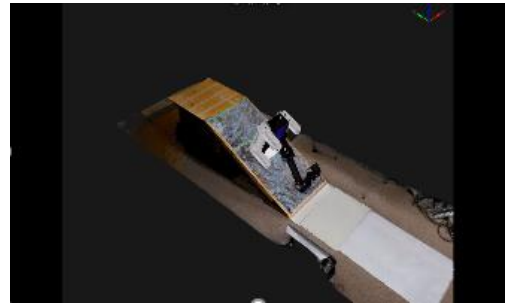


Fig.7 Simulation result of the running type (ii) that resulted in tumbling

それぞれ図 4(a) および図 4(b) に示す経路である。アームのコンフィギュレーションは、アームがロボット本体の中央部に折り畳まれている屈曲状態 (Folded up: 図 5(a)), および前方にせり出している伸展状態 (Stretched ahead: 図 5(b)) の 2 通りに変化した。安定性評価のための単位時間は 1 sec とし、60 サンプル分の安定性の指標 S_{SV} を用いて安定性を評価した。また、アームを屈曲させた状態で平坦な環境で静止している場合の安定性の指標 S_{SV} の値は約 0.1 m であったため、本実験では 2.2 節で述べた安定性の判定基準に関する閾値 θ の値を、その値の半分である 0.05 m と設定した。

3.2 実験結果

提案手法により評価された走行安定性を図 6 に示す。図 6(a), 図 6(b), 図 6(c) は、それぞれ表 1 における走行パターン (i), (ii), (iii) での結果に対応する。いずれの図においても、横軸は移動開始からの時間であり、縦軸は安定性の指標の値を示している。サンプリングごとに得られる安定性の指標の値を点で示しており、それらの値から単位時間ごとに評価した走行安定性を、グラフ背景の網掛けの色で示している。安定性が高いと判定された時間帯を青色で示し、安定性が低いと判定された時間帯を黄色で、転倒状態であると判定された時間帯は赤色で示している。

図 6(a) は、ロボットはアームを屈曲させた状態で斜面を登攀した場合の走行安定性である。時刻約 20 s から約 40 s, および約 110 s から約 140 s の時間帯において、安定性が低下しているが、約 140 s の時点で斜面の頂上まで到達しており、ロボットはこの斜面をアームを屈曲させた状態で登攀可能であることが確認できた。

図 6(b) は、アームを屈曲させた状態で斜面の頂上から降下した場合の走行安定性である。移動開始後は高い安定性を保っているが、約 7 s から安定性が低下しており、約 15 s において転倒している。提案手法においては、単位時間中の全サンプリングデータを用いて判定しており、式 (1) から式 (3) で定義した通り、転倒と判定される場合はそれら全てのサンプリングデータにおいて安定条件が満たされていない状態である。転倒と判定された時刻における、実際のシミュレーションのシーンを図 7 に示す。このように、転倒と判定された状況では実際にロボットは転倒しており、復帰が不可能な状態である。

図 6(c) は、アームを伸展させた状態で斜面の頂上から降下した場合の走行安定性である。図 6(b) と同様に移動開始直後は安定しているが、時刻約 10 s から安定性が低下している。しかし、時刻約 90 s において斜面の麓に到達し、平地における安定な走行へと移行している。

以上の走行安定性の評価結果を、図 1 で示したように映像上に提示した結果が図 8 である。図 8(a) から図 8(c) は、それぞれ表 1 の走行パターン (i) から (iii) の結果に対応している。これらの提示映像を参照することで、オペレータは選択した経路上におけるロボットの走行安定性を直感的に判断することが可能である。

シミュレーションの結果が、実際のロボットの挙動を正確に推定していることを確認する目的で、実機を用いた検証実験を行った。その結果、アームを屈曲させた状態での登攀および降下、アームを伸展させた状態での降下のいずれの場合においても、シミュレーションと同様の結果が得られた。特に斜面の降下におい

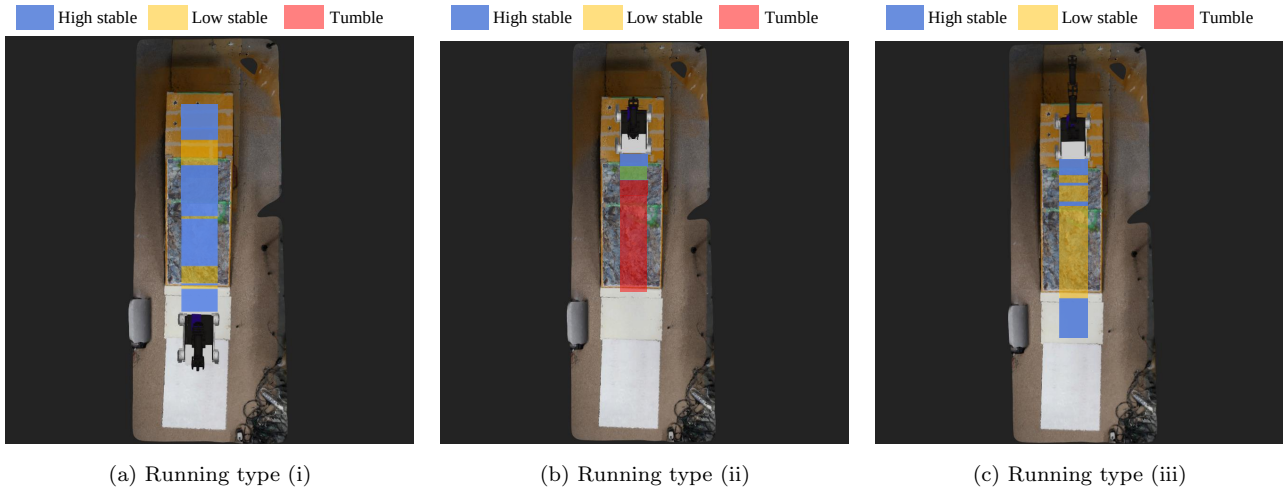


Fig.8 Simulation results that show the stability of the robot in the running type (i) ~ (iii)



Fig.9 Result of the actual experiment for additional test

ては、図 9(a) に示すようにアームを屈曲させた状態では転倒し安全に降下できなかった斜面を、図 9(b) のようにアームを伸展させることで転倒せずに下りることができることを確認した。以上のように、ロボットの遠隔操作に提案手法を適用することで、オペレータは選択した経路上でのロボットの走行安定性を評価することが可能であり、転倒することなく目的地に到達することが可能なロボットのコンフィグレーションと経路の両方を獲得することが可能である。

4 結論

本研究では、走行安定性の低い環境での遠隔操作において、ロボットのコンフィグレーションを変化させた場合に、指定の経路上を走行可能であるかを事前に評価しオペレータに提示する手法を提案した。動力学シミュレーションを行うことで地形とロボットの間のダイナミクスを考慮し、またサンプリングごとの安定性の指標値を単位時間で総合的に評価することで災害対応などにおける不整地上での移動に適用可能な走行安定性を評価可能な手法を提案した。実験では、提案手法により評価した走行安定性が、実際のロボットの挙動を良く推定していることを確認し、提案手法の有効性を検証した。

事前に走行安定性を推定可能な領域の拡張や、俯瞰映像提示システム [5] など移動に有効な操作インターフェイスとの統合が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発促進プログラム (ImPACT) 「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の援助を受けた。また本研究に関し

て有益なご助言を戴いた、東京大学 社会連携講座「インテリジェント施工システム」のメンバー、および株式会社フジタ 山本新吾氏、千葉拓史氏、株式会社高環境エンジニアリング 茶山和博氏に感謝の意を表する。

参考文献

- [1] M. Kondo, K. Sunaga, Y. Kobayashi, T. Kaneko, Y. Hiramatsu, H. Fujii and T. Kamiya: "Path Selection Based on Local Terrain Feature for Unmanned Ground Vehicle in Unknown Rough Terrain Environment," Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1977–1982, 2013.
- [2] Y. Tanaka, Y. Ji, A. Yamashita and H. Asama: "Fuzzy Based Traversability Analysis for a Mobile Robot on Rough Terrain," Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3965–3970, 2015.
- [3] Y. Awashima, H. Fujii, Y. Tamura, K. Nagatani, A. Yamashita and H. Asama: "Safeness Visualization of Terrain for Teleoperation of Mobile Robot Using 3D Environment Map and Dynamic Simulator," Proceedings of the 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2017
- [4] K. Yoneda and S. Hirose: "Tumble Stability Criterion of Integrated Locomotion and Manipulation," Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 870–876, 1996.
- [5] 栗島靖之, 小松廉, 藤井浩光, 田村雄介, 山下淳, 浅間一: "ロボット遠隔操作のための LiDAR を用いた全方位 3 次元測距による俯瞰映像上での障害物提示", 精密工学会誌, Vol. 83, No. 12, pp. 1216–1223, 2017.