

不整地走行機構を有する移動ロボットの自律走行の実現

山崎 文仁^{*1} , 永谷 圭司^{*2} , 吉田 和哉^{*3}

Autonomous Traversing Functions on Rough Terrain for Mobile Robots that Equips Additional Actuators in Locomotion

Ayato Yamasaki^{*3}, Keiji NAGATANI, and Kazuya YOSHIDA

Abstract : In our research group, the project, named “networked robotic system for disaster mitigation”, has been carried out. In a scenario of the project, a large robot surmounts debris and rough terrain to convey small robots into half-broken buildings by using extendable ramp. Then the small robots search victims inside of the buildings. To enable such scenario, both robots have additional actuators (additional sub-crawlers or active rocker-link) in locomotion mechanism to traverse debris environment. In this research, we propose strategies of autonomous (or semi-autonomous) step climbing (or descending) for such special robots to reduce remote-operation costs with consideration of stability. These strategies were successfully implemented on our large and small robots, and experimental results validated this approach.

Key Words: Tracked vehicle, Wheeled Robots, Autonomous

1. はじめに

都市型大地震の被災地において、倒壊現場における人手による要救助者の探索は、大きな危険を伴う。そのため、人の代わりに倒壊現場に侵入し、内部の状況や要救助者探索を行う遠隔操作型「レスキューロボット」の開発が、大きな注目を集めている。

このような背景において、筆者らは、産学官の連携プロジェクトの下「遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集システム」を提案し、その研究開発を進めている。この中でも、筆者らの研究グループでは「災害現場における親子型移動探査ロボットの開発とその遠隔操縦技術の確立」というサブテーマを担当し、不整地走行を可能とする親子型ロボットの研究開発を進めてきた¹⁾。図1に、開発した親子型ロボットを示す。これは、2006年に本プロジェクトの中間報告として、ロボットシステムのデモンストレーションを行った際の1カットであり、親ロボットが子ロボットを梯子で二階に投入するシーンである。

この種のロボットは、目標とする倒壊家屋にアプローチするため、または倒壊家屋内を探索するため、不整地移動機構を搭載することが望ましい。そこで、本研究では、小型のクローラ型ロボット(子ロボット)に、走破性を大きく向上させる可動サブクローラを、また、車輪で走行する大型の六輪駆動ロボット(親ロボット)に、角度の能動制御が可能なロッカーリンクを搭載することとした。

筆者らは、これらのロボットを利用して、これまで、親子型レスキューロボットの遠隔操作に関する研究を進めてきたが、これらのロボットは、通常のロボット



Fig.1 Slide ramp of large robot to lift-up small robots

と比較し、走破性が大きく向上した反面、遠隔操作が非常に困難であるという問題が生じた。そこで本研究では、センサを利用して環境情報を獲得し、その情報に応じて不整地踏破機構を自律的に制御することで遠隔操作の負担を軽減する「半自律不整地走行」の実現を目指すこととした。

本研究の大きな特徴は、地形計測を行うためにレーザ距離センサを利用する点である。六輪駆動ロボットには、三次元レーザ距離センサを設置し、予め地形情報を獲得することで、不整地走行を目指すこととした。また、クローラ型ロボットには、縦置きにしたレーザ距離センサを利用し、計測範囲を限定することで、地形に応じた実時間でのサブクローラの制御を目指すこととした。本研究のもう一つの特徴は、生成した動作に対して、ロボットの転倒危険性を考慮するという点

原稿受付 2008年1月17日

*1 東北大学(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

*2 正員, 東北大学

*3 正員, 東北大学

E-mail:yamasaki@astro.mech.tohoku.ac.jp

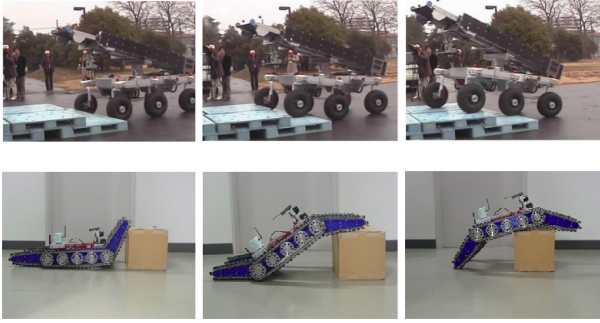


Fig.2 Obstacle climbing of large and small robot

である．本研究では，塚越らが提案した「静的安定性評価基準」²⁾を利用した動作の安定性解析を行う．以上より，操作者による移動方向の指示のみで，その方向の不整地に応じた不整地移動機構の安全な動作を自動的に生成することが可能となると期待できる．これを実現し，遠隔操作による不整地走行を容易にすることが，本研究の目的である．

本稿では，能動ロッカーリンクを搭載した大型の六輪駆動ロボットならびに，可動サブクローラを搭載した小型のクローラ型ロボットを対象とした，段差踏破戦略の紹介ならびに，安定性解析について述べる．また，実機を用いた動作実験について報告する．

2. 段差踏破戦略

本研究では，不整地走行機構を有する移動ロボットとして，能動ロッカーリンクを搭載した六輪駆動ロボットならびに，可動サブクローラを搭載したクローラ型ロボットの自律的な段差踏破動作の実現を目指す．本章では，これらのロボットの機構の説明ならびに，段差踏破動作戦略を述べる．

なお，図2の上段に，六輪駆動ロボットの段差踏破の様子を示す．この動作時のロッカー機構は，制御を行わないフリーの状態で作動させたため，車輪半径より大きな段差を登ることは不可能である．また，図2の下段には，マニュアル操作による可動サブクローラを利用した段差踏破の様子を示す．

2.1 対象とする六輪駆動ロボットの機構

一般に車輪は，乗り越えることが可能な段差が車輪半径以下であり，段差や不整地における踏破性能を高めるためには，車輪径を大きくする必要となる．しかしながら，ロボットのサイズや重量を抑えるため，車輪径を際限なく大きくすることはできない．そこで本研究では，全長 2.6[m]，幅 0.8[m]，重量約 300[kg] の六輪駆動ロボットに，段差踏破や不整地走行を行うことを可能とするロッカー機構を採用することとした．

パッシブな不整地走破機構をもつロボットには，NASA/JPL の Mars Exploration Rover³⁾ や EPFL の Shrimp⁴⁾ があり，NASA JPL の火星探査ローバーには，ロッカーボギー機構が採用されている．本ロボットには，子ロボットを建物上層階へ投入するため，梯子を搭載可能とする単純な機構が求められるが，これらのパッシブな機構では，梯子を搭載することが困難

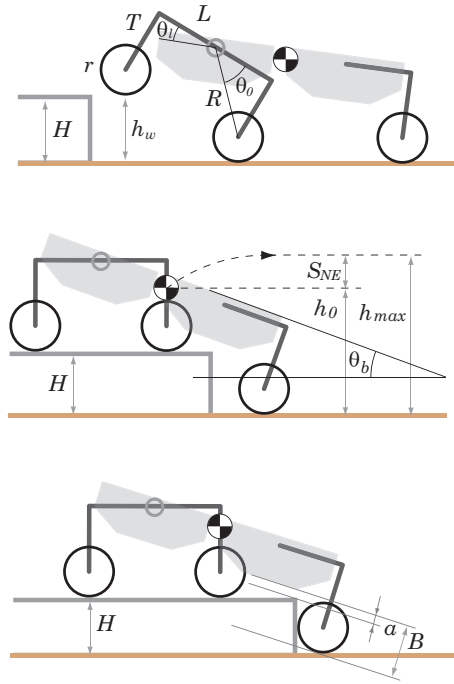


Fig.3 Strategy of obstacle climbing (6-wheels robot)

である．そこで本研究では，単純な機構で踏破性を高めるため，このロッカー機構を能動的に制御可能なロボットを開発した．

2.2 六輪駆動ロボットの段差踏破戦略

次に，六輪駆動ロボットについて，段差踏破を実現するための動作戦略を示す．

まず，ロッカー機構を制御することで，段差高さに合わせて前輪を持ち上げ，車体を前進させる（図3の上段）．なお，段差高さや段差までの距離については，予め，レーザ距離センサ等で取得する．次に，前輪が段差のエッジにかかったところで，ロッカー機構を制御することで，前輪と中輪を同じ高さに合わせ，さらに前進することで，中輪を段差上に乗せる（図3の中段）．最後に，後輪が段差側面に接触後（図3の下段），ロッカー機構を初期位置に戻すことにより，後輪を持ち上げることができ，段差踏破が完了する．

2.3 六輪駆動ロボットの段差踏破条件

六輪駆動ロボットが段差を乗越るための条件は，前車輪が段差のエッジ部分にアプローチできることと，ロボットの本体が段差に乗り上げないこと，の二点が挙げられる．前者の前車輪が段差エッジにかかる高さ h_w とロッカーリンクの角度 θ_l の関係ならびに，ロボットの本体と段差エッジの隙間 a とロボット本体のピッチ角度 θ_b の関係は，幾何学的に次式より求まる．

$$h_w = L \sin(\theta_l + \tan^{-1}(\frac{R \sin(\theta_0 + \theta_l) - T}{1.5L - R \cos(\theta_0 + \theta_l)})) \quad (1)$$

$$a = B - (H - r(1 + \tan \theta_b)) \cos \theta_b \quad (2)$$

$$H = \frac{3L \sin \theta_b}{2} + T(\cos \theta_b - 1) \quad (3)$$

ただし，各定数 / 変数については，図3内に示した．

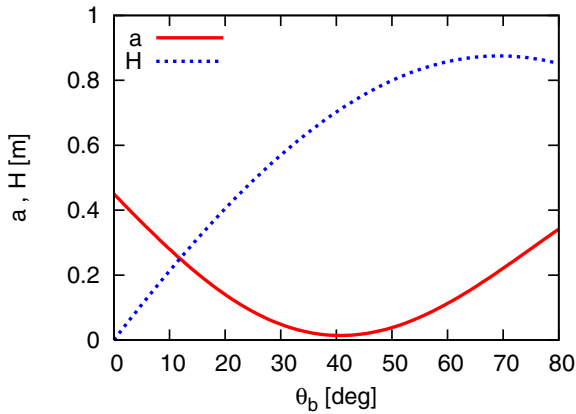


Fig.4 Change of step height and ground clearance according to pitch angle of large robot body

上式に、本研究で対象とした六輪駆動ロボットのパラメータを代入し、ロボット本体の角度 θ_b と段差踏破可能高さ H ならびに、 θ_b とロボットの本体と段差の間隙 a の関係を図 4 に示す。

この図より、 $\theta_b = 70[\text{deg}]$ 付近のとき、段差踏破高さが最大となり、その時の段差高さは、およそ $90[\text{cm}]$ となった。また、その動作の間、常に $a > 0$ となるため、ロボット本体の底面は、段差エッジに接触することはない。

2.4 対象とするクローラ型ロボットの機構

本研究で対象とするクローラ型ロボットは、全長 $1.0[\text{m}]$ 、幅 $0.5[\text{m}]$ 、重量約 $30[\text{kg}]$ であり、ロボット本体の両側に設置されたメインクローラの他に、本体両側の前後に可動サブクローラを有する。左右のサブクローラの角度は同期して駆動され、また、前後のサブクローラの角度は独立に駆動可能である。また、メインクローラ、前後のサブクローラの動作は、片側全てが同期しており、これらを左右独立に制御することで、走行/旋回動作を可能とする。

2.5 クローラ型ロボットの段差踏破戦略

サブクローラを有するロボットの自律段差踏破に関する研究は、近年幾つかの研究機関において行われているが、その多くは事前に動作計画を行うものであり⁵⁾、状況の変化に柔軟に対応できない可能性がある。そこで本研究では、より環境に適応的な動作を実現することを目指し、センサベースな動作戦略を用いることとした。このような動作戦略の関連研究としては、田所らの「サブクローラと地面との接触をベースとした半自律不整地走行の研究」⁶⁾が挙げられる。本研究では、レーザ距離センサという非接触なセンサを利用して地形情報を獲得し、単純なルールで不整地走破動作を実現する点が特徴である。以下に、その動作手順を説明する。

まず、前方のサブクローラの動作について説明する。走査面が地面と垂直となるように設置したレーザ距離センサにより、前方の障害物までの距離計測を行う。この際に着目するのは、サブクローラの動作範囲内にお

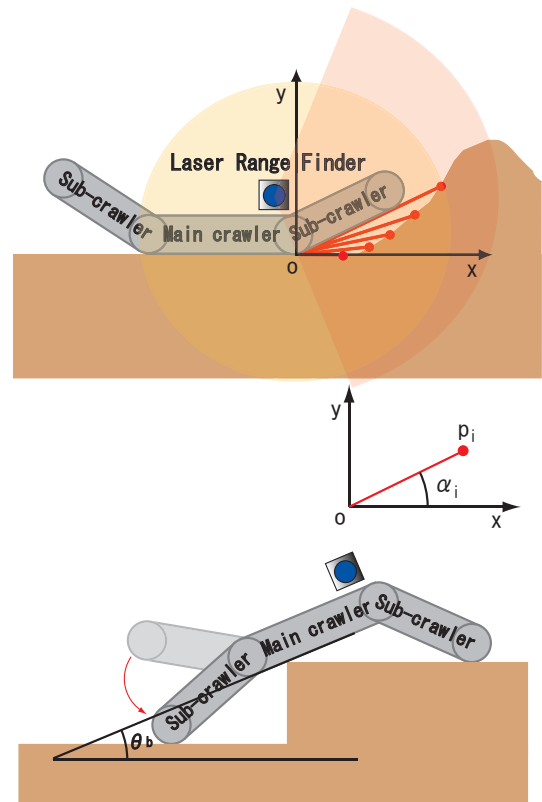


Fig.5 Strategy of sub-crawler control (tracked vehicle)

ける、サブクローラの動作中心と測距点を結ぶ線分が地面となす角度を最大とする測距点である。その測距点にサブクローラが接触する角度を目標角として、サブクローラの角度制御を行う。これにより、サブクローラの動作範囲内において、常に、サブクローラが障害物に接地するような動作を行い、地形に合わせたサブクローラの駆動が実現される。図 5 上段は、これを図示したものである。サブクローラの動作範囲内の測定点 p_i の中で最大の α_i を目標制御角としている。

後方のサブクローラについては、内界センサを用いて取得したロボット本体のピッチ角が上限を超えないようにサブクローラの角度を制御することとした。具体的には、ロボット本体のピッチ角が上限角 θ_{max} に達しない場合には、後方のサブクローラの目標角を初期位置に固定する。上限角 θ_{max} を超えた場合には、サブクローラを下方に押し付け、ロボット本体のピッチ角を、上限角に保つような制御を行う。図 5 下段は、これを図示したものである。メインクローラ（本体）が水平面となす角度 θ_b が、一定角以上となると、後方のサブクローラを下方に押し付けて、本体が水平面となす角度を一定以内に抑えようとする働きを持たせる。

2.6 クローラ型ロボットの段差踏破条件

クローラ型ロボットが段差を乗り越えるための条件は、クローラ型ロボットの重心の底面高 h （重心位置から鉛直下向きに伸ばした直線上の、ロボット底面と地面との間の距離、図 6 を参照）が、乗り越え対象となる段差高さ H に対して、 $h > H$ を満たすことである。

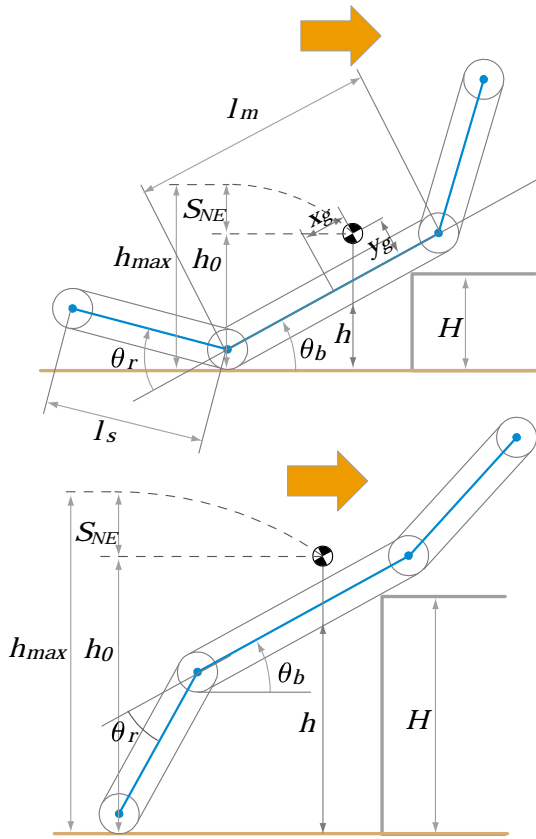


Fig.6 Obstacle climbing of tracked vehicle

この条件を満たすとき重心がクローラと段差の接触点を越えることができるため、接触点において右回りのモーメントが発生し、段差を登ることができる。この h は、幾何学的にメインクローラが接地する場合（図 6 上段）と、後サブクローラが接地する場合（図 6 下段）の 2 つの場合が存在する。

$$h = (l_m - x_g - y_g \tan \theta_b) \sin \theta_b + r \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_b}\right) \quad (4)$$

$$h = (l_m - x_g - y_g \tan \theta_b) \sin \theta_b + r \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_b}\right) + l_s \sin(\theta_b - \theta_r) \quad (5)$$

ここで、(4) 式は、メインクローラが接地する場合、(5) 式は、後サブクローラが接地する場合である。なお、各パラメータは、図 6 内で定義されるものとする。仮に (4) 式において、段差踏破が不可能となっても、後サブクローラを制御することで (5) 式に移行することが可能となるため、段差踏破の議論は、(5) 式のみ注目すればよい。(5) 式の第 3 項を最大とするのは、 $\theta_b - \theta_r = 90[\text{deg}]$ となるときであり、これは、後サブクローラが地面と垂直となる場合である。この $\theta_b = \theta_{max}$ となるとき、 h を最大とする条件であるため、 θ_{max} が定まると、クローラ型ロボットの踏破可能な段差の高さが計算できる。

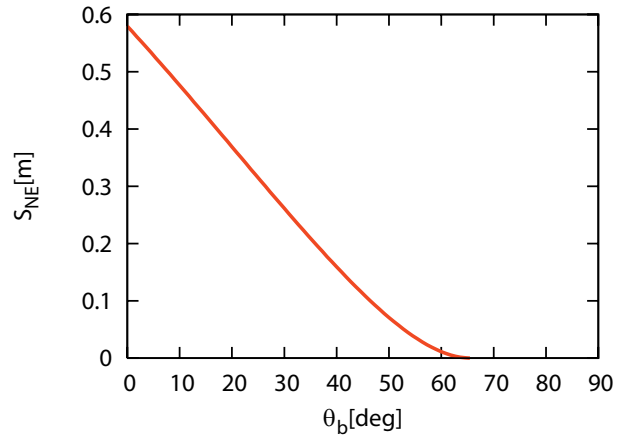


Fig.7 NE-stability of large robot surmounting a step

3. 安定性解析

六輪駆動ロボット、クローラ型ロボット共に、段差踏破における最大の問題は、後方への転倒である。そこで、本研究では、後方への転倒の安定性を評価することとした。

本研究では、移動ロボットの安定性評価基準として、塚越らが提案した正規化エネルギー安定余裕（以下、NE 安定余裕）と呼ばれる評価基準²⁾を用いることとした。この評価方法は、移動ロボットが転倒した場合に描く重心の軌道の最高点 h_{max} と初期位置 h_0 との鉛直方向距離の差 S_{NE} で安定性を表すもので、次式で求められる。

$$S_{NE} = h_{max} - h_0 \quad (6)$$

ここで、 S_{NE} の値が大きことは、その姿勢が安定であることを示す。この NE 安定余裕を用いて、本研究のロボットが段差踏破を行う際の安定性を考える。

3.1 六輪駆動ロボットの安定性解析

六輪駆動ロボットは、ロッカーリンクを制御することで、前輪を持ち上げることができるが、この動作によって、本体のピッチ角は大きくなる。そこで、このピッチ角に対する NE 安定余裕を計算した。その計算結果をグラフにしたものを、図 7 に示す。

前章において、六輪移動ロボットの段差踏破条件を計算した際、 $\theta_b = 70[\text{deg}]$ 付近のとき、段差踏破可能な高さが最大（80cm 強）となったが、 $\theta_b > 65[\text{deg}]$ のとき、このグラフより NE 安定余裕は $0[\text{m}]$ となり、ロボットが転倒してしまう。例えば、平地における NE 安定余裕に対し、30 パーセントの余裕を考慮することを考えると、NE 安定余裕は約 $0.18[\text{m}]$ となるため、図 7 より、本体角度は $\theta_b = 40[\text{deg}]$ に抑えることが望ましい。この際、図 4 より、踏破できる最大の高さは、約 $65[\text{cm}]$ となる。

3.2 クローラ型ロボットの安定性

クローラ型ロボットは、前後のサブクローラの角度を制御することが可能であるため、後サブクローラの角度 θ_r と本体のピッチ角 θ_b の二変数による NE 安定

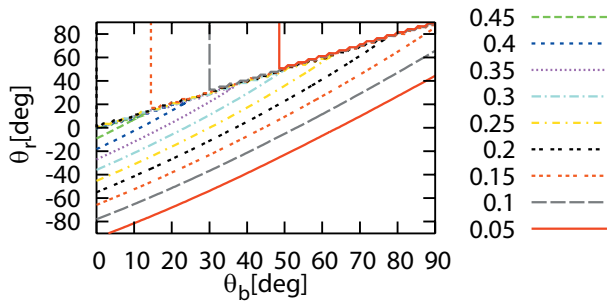


Fig.8 NE-stability of tracked vehicle surmounting a step

余裕が計算できる．その計算結果をグラフにしたものを、図 8 に示す．縦軸は、本体のピッチ角 θ_b 、横軸が後サブクローラの角度 θ_r 、各色が NE 安定余裕を表しており、黄色に近いほど安定余裕が大きくなる．

後サブクローラが地面に接地しない場合と、地面に接地する場合とで h の計算式が異なるため(式 (4), 式 (5) 参照), NE 安定余裕にも不連続面が生ずる．本研究では、ロボット本体のピッチ角の上限角を $\theta_{max} = 30[\text{deg}]$ と設定したので、 $\theta_b = 30[\text{deg}]$ となる軸上で下に行くほど(つまり後サブクローラが垂直に近くなるほど), NE 安定余裕が小さくなる．例えば、平地における NE 安定余裕に対し、30 パーセントの余裕を考慮することを考えると、NE 安定余裕は $0.15[\text{m}]$ となるため、このグラフより、後サブクローラの角度 θ_r は、 $-20[\text{deg}]$ 程度に抑えることが望ましい．

4. 自律段差踏破実験

本研究では、前章までに紹介した段差踏破戦略ならびに安定性解析を利用し、不整地踏破機構を有するロボットの自律/半自律段差踏破制御を実現した．ここで、半自律とは、オペレータが入力デバイスを用いて走行方向ならびに走行速度を指令するだけで、ロボットが不整地走行機構を自律的に制御し、段差踏破を行うものである．本研究では、この半自律制御をクローラ型ロボットに実装した．また、六輪駆動ロボットについては、レーザ距離センサを用いて段差高さや段差までの距離を予め獲得できたと仮定し、動作を行った．

4.1 六輪駆動ロボットの動力学シミュレーション

対象とする六輪駆動ロボットは、大型で重量があり(およそ $300[\text{kg}]$)、繰り返しの実験が危険/困難であるため、本研究では、予めロボットシミュレータ⁷⁾を用いて動作検証を行った．このシミュレータは、ODE(Open Dynamics Engine)を利用した動力学シミュレータであり、ロボットのサイズや重量、車輪と路面との間の摩擦係数等を設定することで、挙動結果を三次元グラフィックで表示するものである．このシミュレータに、動作戦略に基づいてオフラインで生成したロボットのモーションを実行するプログラムを入力し、段差の高さを変更して動作を行ったところ、本研究で提案した動作戦略により、最大で $80[\text{cm}]$ 程度の段差を踏破可能であることが分かった．図 9 に、このシミュレータが動作している様子を示す．なお、シミュレータに関する詳細については、本稿では、紙面の都合上割愛する．

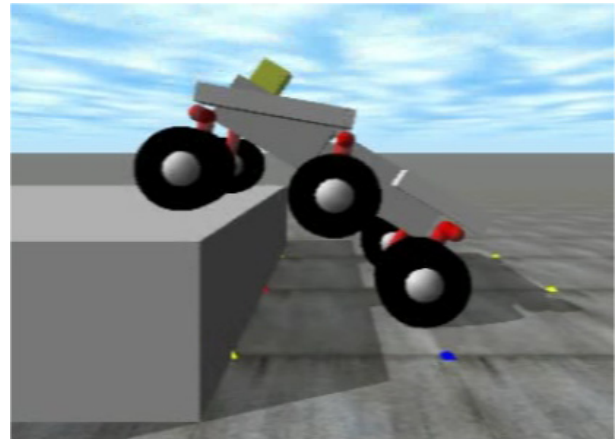


Fig.9 Dynamic simulation of large robot

4.2 六輪駆動ロボットの自律段差踏破実験

シミュレータ上で確認した動作を六輪駆動ロボットに実装し、実験を行った．対象とする環境は、屋外においてパレット(フォークリフトで物資を搬送するための土台)を複数枚積み上げた段差とした．また、対象とする六輪駆動ロボットには、子ロボットを 2 台搭載するための梯子が搭載されていたが、今回は、その梯子を外して実験を行った．

図 10 に、ロボットが段差踏破を行っている連続写真を示す．この実験より、 $60[\text{cm}]$ の段差踏破が可能であることを確認し、本稿で提案した動作戦略の有用性が確認できた．

なお、同様の実験を高さを変更して行ったところ、段差踏破条件解析ならびにシミュレーション結果から踏破可能と考えていた $75[\text{cm}]$ の段差は、ロボット後部の底面がエッジに接触し、踏破することができなかった．これは、解析やシミュレーションを行う際、タイヤを完全な剛体として考えていたが、実際には、タイヤの変形により、ロボット本体の沈み込む分量が大きかったためであると考えられる．

4.3 クローラ型ロボットの自律段差踏破実験

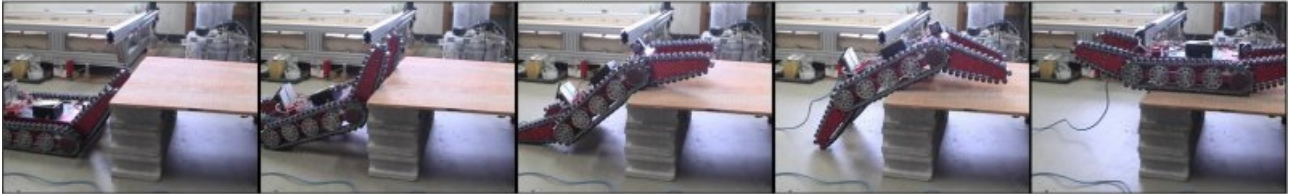
可動サブクローラを有するクローラ型ロボットについても、実機実験を行った．対象とする環境は、屋内において、コンクリートブロックを積むことで高さの変更が可能な段差を利用した．

図 10 中段に、ロボットが $30[\text{cm}]$ の段差を登る際の連続写真を、また下段に、ロボットが $30[\text{cm}]$ の段差を降りる際の連続写真を示す．なお、この実験において、オペレータは、ロボットに速度指令のみを与え、サブクローラの動作は、ロボット自身が自律的に行った．また、段差を降りる際にも、段差を登る際に利用した動作戦略と同じ動作戦略を適用したところ、大きな衝撃を受けずに段差を降りることができた．これらの実験より、半自律的に $30[\text{cm}]$ 程度の段差踏破が可能であることを確認し、本稿で提案した動作戦略の有用性が確認できた．

6-wheeled robot: Autonomous step climbing



Tracked vehicle: Autonomous step climbing



Tracked vehicle: Autonomous step descending



Fig.10 Experiments of step climbing / descending of large and small robots

5. まとめと今後の課題

本稿では、可動サブローラを搭載したクローラ型ロボットならびに、ロッカーリンクを搭載した六輪駆動ロボット対象とした段差踏破戦略を紹介した。また、段差踏破時の安定性解析について述べた。最後に、実機を用いた動作実験により、提案手法の有用性を示した。

本研究では、単純な段差を対象とした不整地走行ロボットの動作戦略を示したが、実環境では、更に複雑な凹凸環境を対象とする必要がある。今後は、提案した手法を拡張し、さらに複雑な地形にも対応可能な動作戦略を構築していく予定である。

謝辞

本研究は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度SCOPE-R プロジェクトとして実施中のものである。

参考文献

- 1) Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, Kiyoshi Kiyokawa, Yasushi Yagi, Tadashi Adachi, Hiroaki Saitoh, Toshiya Suzuki, and Osamu Takizawa. Development of a networked robotic system for disaster mitigation -system description of multi-robot system and report of performance tests-. In *Proceedings of the 6th International Conference on Field and Service Robotics*, page to be appeared, 2007.
- 2) 広瀬茂男, 塚越秀行, 米田 完. 不整地における歩行機械の静的安定性評価基準. *日本ロボット学会誌*, 16(8):48-54, 1998.
- 3) Brian D. Harrington and Chris Voorhees. The challenges of designing the rocker-bogie suspension for the mars exploration rover. In *37th Aerospace Mechanisms Symposium*, 2004.
- 4) T.Estier, Y.Crausaz, B.Merminod, M.Lauria, R.Piguet, and R.Sieglwart. An innovative space rover with extended climbing abilities. In *Proceedings of Space and Robotics 2000*, 2000.
- 5) 高井優介, 藤村甫, 奥川雅之, 橋本周司. サブローラを有するレスキューロボットの自律的段差踏破制御. In *ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 講演論文集*, pages 2P1-J04 (1)-(2), 2007.
- 6) Kazunori Ohno, Shouich Morimura, Satoshi Tadakoro, Eiji Koyanagi, and Tomoaki Yoshida. Semi-autonomous control system of rescue crawler robot having flippers for getting over unknown-steps. In *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3012-3018, 2007.
- 7) 吉田和哉, 永谷圭司, 山崎文仁, 足立忠司. ロッカー機構を有する六輪移動ロボットの開発と走行・姿勢制御. In *ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 講演論文集*, pages 2A1-C08 (1)-(4), 2007.