

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

-Development and Control of Six-Wheel Type Robot with Rocker Structure-

吉田 和哉, 永谷 圭司, 山崎 文仁 (東北大)
足立 忠司, (IHIエアロスペース)

Kazuya YOSHIDA, Keiji NAGATANI, Ayato YAMASAKI
Tohoku University, yamasaki@astro.mech.tohoku.ac.jp
Tadashi ADACHI
IHI Aerospace

In our research group, the project, named "networked robotic system for disaster mitigation", has been carried out. In the project, multiple robots are coordinately operated via wireless communication network. The robot system consists of a large-mobile-robot and small-mobile-robots. The small robots are aimed to be conveyed by the large robot and to be distributed inside collapsed buildings. Therefore, the large robot should surmount some debris and bumpy terrain to approach the target buildings. To enable such motion, it has six wheels to form into rocker structure. In this research, we aim to propose a suitable remote control method for navigation of the large robot. Our developing "robot-dynamics simulator" is used to discuss a performance of the robot's control.

Key Words : Rocker structure, rough terrain

1 はじめに

地震などの災害では、迅速な救助活動が多くの人命を救うことになる。しかし、そうした災害現場では、余震や二次災害のおこる恐れがあるため、高度な訓練を受けたレスキュー隊員でも救助活動が容易ではない。このような災害現場での救助活動において、現在期待が高まっているのがレスキューロボットである。ロボットを人間の代わりに危険な現場へ投入することによって、人命探索活動が円滑に運ぶように支援することができる。阪神淡路大震災をきっかけに、さまざまな大学や研究機関においてこのようなレスキューロボットの研究開発が進められるようになった[1]。

本研究グループにおいても、産学官の連携プロジェクトの下で、情報技術の観点から、遠隔操縦用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の研究開発を行っている[2]。このプロジェクトでは、災害現場における親子型移動探索ロボットの開発と遠隔操縦技術の確立を目指している。この親子型移動探索ロボットは、親ロボットに取り付けられた梯子を用いて、搭載した複数台の小型ロボットを上層階から被災ビル内に投入し、倒壊建物内部の人命探索を行うロボットシステムである。このロボットシステムを用いて、広域自然災害の被災地における初動情報収集活動を行うことを第一の目的とし、以下に示す手順で、災害時における情報収集活動をおこなうことを想定する。

1. ヘリコプター空輸により、親ロボットとそれに搭載された子ロボットからなる探索システムを被災現場へ投入
2. 親ロボットが屋外不整地環境を走破し倒壊建物へ接近
3. 親ロボットに搭載した梯子を利用し子ロボットを建物の上層階へ投入
4. 子ロボットを遠隔操作し建物内の情報を獲得
5. 衛星通信を経て環境情報をオペレーションセンターへ送信

本研究では、この中でも特に親ロボットに注目し、大型不整地移動ロボットの開発および走行・姿勢制御の研究を進めている。本稿では、その現状と今後の課題について述べる。

2 大型不整地移動ロボットの開発

2.1 要求仕様と現状

本研究プロジェクトでは、屋外を移動探索する大型不整地移動ロボット(以下、親ロボット)は、複数台の小型人命探索ロボットを乗せた状態で、瓦礫を乗り越え、倒壊建物へ接近し、梯

子を使って建物内部へ小型探索ロボットを投入する役割を担う。そのため、同ロボットは、瓦礫上を移動する高い踏破性能を持たなければならない。一方で、災害現場にヘリコプターを用いた移動を想定しているため、一般的なヘリコプターの運搬重量をこえないという条件がある。以上を考慮し、大型移動ロボットの仕様を以下に示すように決定した。

1. 重量500kg, 最大速度4km/h
2. ステアリングおよび車輪は独立駆動
3. 不整地移動機構としてロッカー機構を採用
4. 車輪とロッカーリンクをつなぐアームにロードセルを内蔵
5. 三次元距離センサユニットを搭載
6. 子ロボットを高層階へ投入するための進展式梯子を搭載

以上の仕様を元に、本研究プロジェクトでは、梯子付き親ロボットのプロトタイプをアイ・エイチ・アイ・エアロスペース社で製作した。この親ロボットの概観および子ロボットを梯子に搭載した様子を図1および図2に示す。



Fig. 1 Large mobile robot



Fig. 2 Small robots carried on the ladder

2.2 大型移動ロボットの機構

車輪は、一般に乗り越えることが可能な段差が車輪半径以下であるため、段差や不整地における踏破性能を高めるためには、大

Table 1 Motor data

最大連続トルク時の回転数	4520 rpm
最大連続トルク	310 mNm
最大連続電流	7.47 A
停動トルク	2420 mNm
トルク定数	43.3 mNm/A
回転数定数	221 rpm/V

きな径の車輪が必要となる．しかし，重量制限やヘリでの空輪が可能な大きさという条件があるため，車輪径を大きくすることには限界がある．そこで，小さな車輪径で大きな段差を乗り越えられる機構として，本研究ではロッカー機構を取り入れた．親口ボットの構造を図3に示す．前輪と中輪はロッカーリンクによってつながれておりこれが左右に2組存在する．それぞれのロッカーリンクはアクチュエータによってアクティブに駆動できるため，車輪直径よりも大きな段差を乗り越えることが可能となる．また，この機構により左右で異なる高さの段差を乗り越えることもできる．

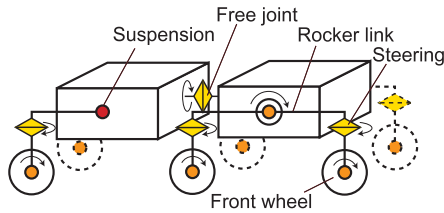


Fig. 3 Structure of large robot for rough terrain

車輪およびロッカーリンクの駆動系には，Maxon製モータ（maxon EC45 motor）を用いた．250W，24V仕様のモータを48Vで駆動する．車輪駆動ギヤ比およびロッカーリンク駆動ギヤ比はそれぞれ213：1および2799.65：1である．表1にモータの特性を示す．

2.3 親口ボットのステアリング角および車輪の回転角速度

対象となるロボットは，ステアリングおよび車輪が独立駆動であるため，並進移動，旋回移動およびその場旋回の3つの走行モードがある．以下に，各モードの解説を述べる．

2.3.1 並進移動

六輪の角速度およびステアリング角をそれぞれ等しくすることで，並進移動が可能である．これにより，方向を一定に固定したまま，縦・横・斜めの並進を行う全方向移動が可能であるという特徴をもつ．

2.3.2 旋回移動

旋回する場合のステアリングの角および回転半径を図4に示す．左右の前輪の間に仮想車輪を考えると，この車輪と進行方向のなす角がステアリング角 α である．このステアリング角から前輪および後輪のステアリング角が次のように求まる．

$$\alpha_{Fl} = \tan^{-1} \left(\frac{2L \tan \alpha}{2L - T \tan \alpha} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_{Fr} = \tan^{-1} \left(\frac{2L \tan \alpha}{2L + T \tan \alpha} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_{Rl} = -\alpha_{Fl} \quad (3)$$

$$\alpha_{Rr} = -\alpha_{Fr} \quad (4)$$

ここで，Rは回転半径，添え字のl，r，F，MおよびRは，それぞれ左車輪，右車輪，前輪，中輪および後輪を表す．

それぞれの車輪の回転角速度は仮想車輪の回転角速度 ω を用いて，以下のように表せる．

$$\omega_{Fl} = \omega_{Rl} = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{Fl}} \omega \quad (5)$$

$$\omega_{Fr} = \omega_{Rr} = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{Fr}} \omega \quad (6)$$

$$\omega_{Ml} = \frac{\sin \alpha}{\tan \alpha_{Fl}} \omega \quad (7)$$

$$\omega_{Mr} = \frac{\sin \alpha}{\tan \alpha_{Fr}} \omega \quad (8)$$

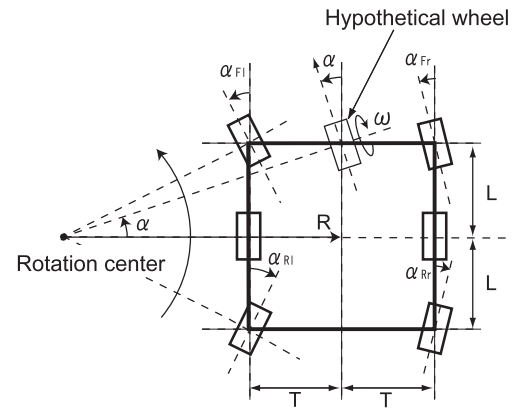


Fig. 4 Steering angle and radius during rotation

2.3.3 その場旋回

図5に示すようにステアリング操作すると，その場旋回をすることができる．ステアリング角は次のように表せる．

$$\alpha_{Fl} = \alpha_{Rr} = -\tan^{-1} \left(\frac{L}{T} \right) \quad (9)$$

$$\alpha_{Fr} = \alpha_{Rl} = -\alpha_{Fl} \quad (10)$$

$$(11)$$

車輪の回転角速度は，次のように表せる．

$$\omega_{Fl} = \omega_{Rl} = -\frac{\omega}{\sin \alpha_{Fl}} \quad (12)$$

$$\omega_{Fr} = \omega_{Rr} = -\omega_{Fl} \quad (13)$$

$$\omega_{Ml} = -\omega_{Mr} = -\frac{T\omega}{L} \quad (14)$$

2.4 公開デモンストレーション

2006年3月10日に，アイ・エイチ・アイ・エアロスペース川越事業所内で，プロジェクトの公開デモンストレーションが行われた．この実験のシナリオは，2台の小型ロボットを梯子の上に搭載した状態で，建物に接近し2階に梯子を伸ばして小型ロボットを投入し，子ロボットによる内部探索を目的としたもので，その想定シナリオは，ほぼ完遂することができた[3]．この中で，実際に親口ボットの制御については，ロッカーリンクの制御をせずにジョイントはフリーの状態では，段差乗り越えおよび不整地走行を行った．この時はオペレータが近くに立ち，目視により操縦したが，本来は遠隔地から操縦をするため，ロボットが自律的に不整地や段差を安定して走行する制御が必要となる．

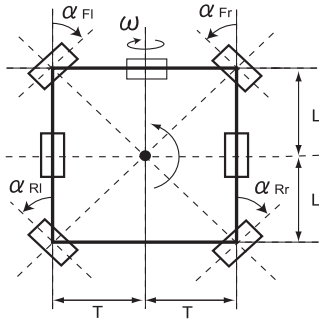


Fig. 5 Rotation around the axis of center body

3 ロボットシミュレータ

不整地や瓦礫上を走行移動するロボットが実際にどのような挙動を示すかを知るためには、実機を用いて走行試験を行う必要がある。しかし、はじめから、大型の移動ロボットを用いて走行・姿勢制御の実験をすることは、転倒の恐れもあり危険である。また、試験回数の制限もあり現実的ではない。そこで、本研究では、大型移動ロボットの基本性能の評価および走行・姿勢制御法の検証のため、ロボットの動力学シミュレータを構築した。このロボットシミュレータとは、仮想空間でロボットを動かすことによって、実機の動作を検証するものである。なお、このシミュレーションには、動力学計算用ライブラリODE (open dynamics engine) を用いた。

3.1 大型移動ロボットのモデル

六輪車両モデルを図6に示す。モデルの寸法、各部分の重量および駆動系はプロトタイプである大型ロボットと同じであり、総重量420kg、車体前部および後部各80kg、各車輪37kgである。車輪およびロッカーリンクの最大駆動トルクはそれぞれ500Nm、6.5kNmである。また、車輪とロッカーリンクをつなぐアームには、ロードセルを実装した。実機の後輪サスペンションは非常に硬いので、モデルでは固定ジョイントとした。なお、本研究では、大型移動ロボットの挙動や基本性能を知りたいことを目的としているため、モデルを簡略化するために梯子を取り除いたモデルを構築した。その他の条件・特徴を以下に示す。

1. 地面との摩擦係数は0.5、反発係数は0.1
2. 移動速度は0.3m/s
3. 車輪の回転角速度はPI制御
4. ステアリング角およびロッカーリンク角はPID制御
5. ロッカーリンクの制御には、マニュアルモードとロボットが自律で制御するオートモードを搭載

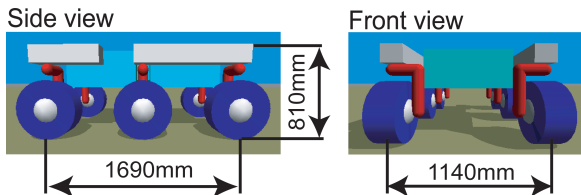


Fig. 6 Mobile robot model

3.2 基本性能の評価

実機の段差踏破性能を評価するために、ロッカーリンクのマニュアルモードを用いて、左右輪および片輪での段差乗り越えのシミュレーションを行った(図7および図8)。

ロッカーリンクのジョイントをフリーにした場合、左右輪で乗り越え可能な段差の最大高さは21cm、片輪で乗り越え可能な最大高さは13cmであった。これは、車輪直径50cmの1/3に相当する。

次に、親ロボットの乗り越え可能な段差の最大高さを調べるために、ロッカーリンクをマニュアルでアクティブに動かし、段差を乗り越えるシミュレーションを行った。その様子を図9に示す。図は、左右のロッカーリンクを同時に上げ下げし、左右輪で段差を乗り越えた場合である。この場合の乗り越え可能な最大高さは85cmであった。これは、車輪直径の1.7倍の高さの段差を乗り越えられることを意味する。

次に、片側車輪のみの段差乗り越えのシミュレーションを行った。乗り越え可能な最大高さは60cmであった。車体前部と後部がロール方向に回転する機構のため、前輪と中輪が段差を乗り越えても車体後部が段差と接触しスタックすることが、最大高さ減少の理由である。

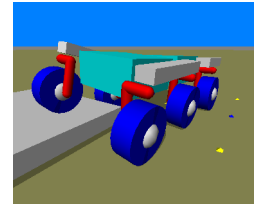
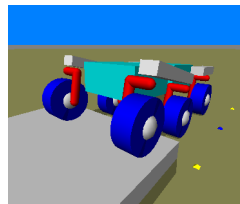


Fig. 7 Surmounting a step by both sides wheels Fig. 8 Surmounting a step by one side wheel

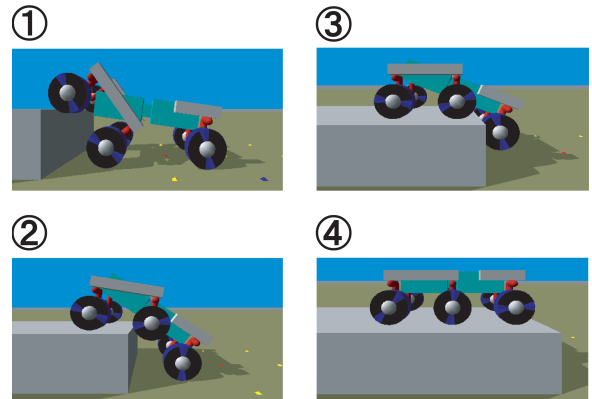


Fig. 9 Surmounting squence

3.3 ロッカーリンクの制御手法の検証

大型移動ロボットは衛星通信を利用して遠隔操縦されるため、時間遅れが存在する。そのため、不整地または段差の走行をすべてマニュアルで行うことは難しい。そこで、安定して不整地と段差を走行可能なロッカーリンクの制御法を検討した。

3.3.1 荷重均等制御

ロッカーリンクの制御法として荷重均等制御を考える。荷重均等制御とは、前輪および中輪にかかる地面からの反力が等しくするようにロッカーリンク角の位置制御を行うことである。この制御により、不整地を安定して走行できると考えられる。シミュレーションでは、平面 段差 平面の路面を走行させ、荷重均等制御の評価を行った。

まず、ロッカーリンクのジョイントをフリーにし、左右輪で段差を乗り越えた場合のシミュレーション結果を図10および図11に示す。図10は前輪と中輪に働く反力を表し、図11はリンク角度を表す。これらの図より、段差乗り越え後の各車輪に働く反力がばらついている様子がわかる。

次に、荷重均等制御を行い、左右輪で段差を乗り越えた場合の結果を図12に示す。この図より、前輪と中輪に働く反力が等しくなるよう制御されていることがわかる。この荷重均等制御により、それぞれの車輪に均等に摩擦力がかかるため、安定した駆動力を得られることが期待できる。一方、荷重均等制御を行い、片輪で段差を乗り越えた場合では、ロッカーリンクのジョイントをフリーにした場合よりも、高い段差を乗り越えることができた。ジョイントをフリーにした場合、前輪が壁に押し付けられロッカーリンクが下がるために中輪が浮き、段差踏破に失敗するところがあるが、荷重均等制御を行うことにより中輪が浮うかなくなり、より大きな段差を登ることができる。

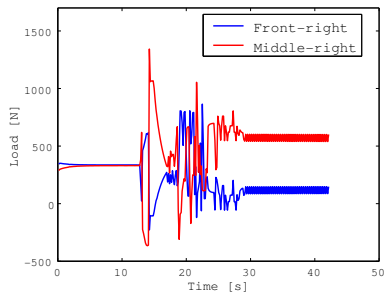


Fig. 10 Reactive force with rocker joint free

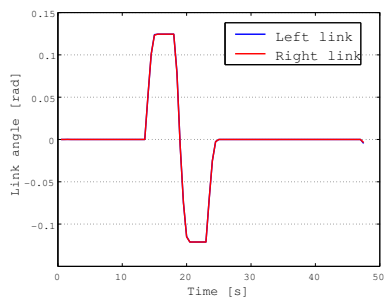


Fig. 11 Rocker link angle

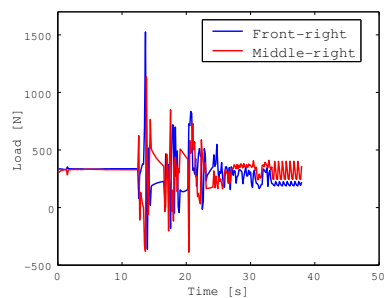


Fig. 12 Reactive force under equaling load control

3.3.2 荷重分配制御

荷重均等制御よりも段差踏破性能を向上させるため、車輪にかかる荷重を分配することで、段差を乗り越えやすくする制御手法（荷重分配制御）を考案した。ロボットのロッカーリンクのジョイントはリンクの中心にあるが、図13に示すように、中心よりも後にジョイントがあるほうが、前輪が段差に接触したさいに、リンクが上がりやすい。そこで、前輪と中輪にかかる反力の比が $a:b$ となるようにロッカーリンクを制御すれば、段差踏破性が向

上すると考えられる。

この制御手法を実装し、左右輪および片輪で段差を乗り越えるシミュレーションを行った。図14は、荷重分布制御を行い左右輪で段差を乗り越えた場合の各車輪にはたらく反力を表している。この図より、前輪反力と中輪反力が一定の比になっていることがわかる。このシミュレーション結果より、左右輪で乗り越え可能な段差は23cm、片輪で乗り越え可能な段差は20cmであることがわかり、これは荷重均等制御を行った場合と比べ、さらに踏破性能が向上したことを意味する。

前輪がより高い段差を乗り越えられるようにするには、 b の値を大きくとればよいが、大きすぎると中輪が段差を乗り越えられなくなる。そのため、荷重分配比には最適値が存在する。本シミュレーションでは、荷重分配比を1:3とした。

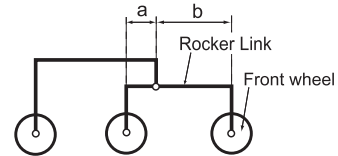


Fig. 13 Position of rocker joint

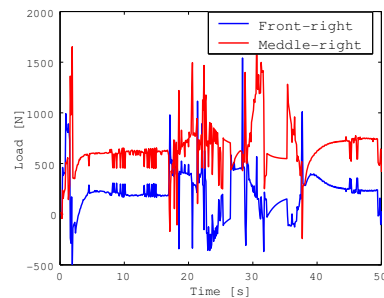


Fig. 14 Reactive force under distributing load control

4 まとめと今後の課題

本研究では、屋外の不整地や瓦礫上を移動する大型ロボット（親ロボット）の開発を行った。また、このロボットの走行・姿勢制御を実現するため、ロボットシミュレータを構築した。さらに、このシミュレータを用いて大型移動ロボットの基本性能およびポギーリンクの位置制御法の評価・検証を行った。

不整地・段差走行の安定性および走破性を高めるため、今後はさらに効率のよい走行・姿勢制御法を考案し、シミュレーションによりその手法を検証する。また、シミュレーションにより検討した制御アルゴリズムを実機に適用し、その有用性を確認する。

5 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。

文献

- [1] 田所他：“大都市大震災軽減化特別プロジェクト レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発”，日本ロボット学会誌 Vol.22, No.5, pp.1-44, 2004.
- [2] 吉田 和哉他：“遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究”，第10回ロボティクスシンポジウム, pp.435-440, 2005
- [3] 遠藤大輔：“遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究 - 親子方複数ローバーを用いた被災環境探索システムの構築 -”，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '06 2006, 2P2-D07, 2006.