

脚車輪型移動ロボットの不整地適応自己計画システム —大きな段差移動のための軌道計画—

Self-Planning System of Leg-Wheel Robot for Rough Terrain —Path Planning for Getting over a High Step—

○坂下 琢則, 大久保 宏樹, 高橋 隆行, 戴 宇傑, 中野 栄二

○Takunori Sakashita, Hiroki Ookubo, Takayuki Takahashi, Yu-Jie Dai, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード: 脚車輪分離型ロボット (Leg-Wheel Robot), 不整地 (Rough Terrain), コンプライアンス (Compliance), 自己計画 (Self-Planning System), 段差乗り越え動作 (Motion of Getting over a Step)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学大学院 情報科学研究科 中野研究室(青葉山キャンパス機械系) 坂下 琢則, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023, E-mail: sakashita@robotics.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年ロボットは、製造業分野をはじめ、さまざまな分野で研究が行われ、それぞれの移動方式の長所を生かしたロボットが開発されている¹⁾⁻¹¹⁾。林業、建設業などの分野でも、ロボットの開発が行われており、それらの分野では、未知の不整地を移動できることが必須である。

筆者らは、林地などの未知の不整地を対象とし、脚と車輪の両機構の利点を生かした脚車輪分離型ロボットを提案し、その研究開発を行ってきた。これまで、未知の不整地を路面のモデルなしで移動することを実現し、脚車輪分離型ロボットの不整地への高い適応性を示した⁸⁾⁻¹¹⁾。そこで提案された方法では脚先に一定のコンプライアンスを生成し、このコンプライアンスと車輪のパッシブサスペンションにより路面の凹凸を吸収している。

しかし、上記の方法では脚車輪型ロボットの移動軌跡があらかじめ与えられていて、コンプライアンス一定としているため、大きな障害物の凹凸を吸収することはできない。

そこで、上記の方法で進行中に大きな障害物に遭遇したとき、これを踏破するための手法として操縦者が指令を与えることによってこれを実現する方法を提案する。このような操縦者が移動ロボットを直接指示する制御方法は移動中の障害物回避や移動、実際の作業時に必要になる。そして、操縦型の移動は6脚移動ロボット、4脚移動ロボットで試みられているが¹²⁾⁻¹⁴⁾、脚車輪型移動ロボットでは見られない。

本報告では、移動中の障害物として大きな段差を考える。操縦方法は、ケースによるが、できるだけ簡単な指示となる方が望ましいので、今回は、1脚を操縦する方法を用いる。したがって、脚車輪

型ロボットにおいて、操縦者が1脚を操縦することを前提として、大きな段差を移動するためのアルゴリズムを提案する。脚車輪型ロボットが大きな段差を移動するためには、各脚の接地点とコンプライアンス、胴体の姿勢を決定しなければならない。本アルゴリズムでは、

- 各脚の接地点とコンプライアンスについては自重をできるだけ車輪で支えるために、車輪の鉛直方向の反力
- 胴体の姿勢についてはアクチュエータの出力の分散化、消費エネルギーの最小化をはかるために、トルクの2乗和

を評価指標として決定する。

2. 脚車輪型ロボットの構造

本報告で対象とする脚車輪型ロボット(Chariot II)を図1に示す。胴体の左右に半径30cmの車輪を平行に配置し、前後に4本の脚を持っている。各脚は、3自由度の回転関節を持つ。車輪軸部には、パッシブサスペンションであるばね機構が取り付けられている。脚車輪型ロボットはコンプライアンスによってある程度の路面の外乱を吸収し、脚と車輪を同期させて移動する。

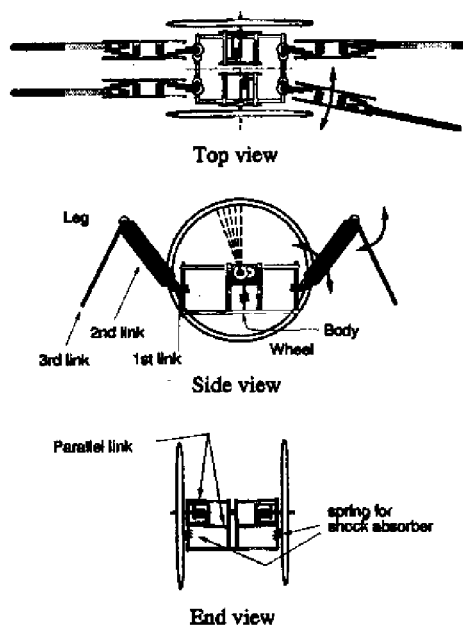


図1 脚車輪型ロボットの構造

3. 段差乗り越え動作のアルゴリズム

今回、対象とする左右の段差の高さは等しいと仮定する。操縦者が前1脚を操縦し、接地点を決定した後の段差乗り越え動作のアルゴリズムはロボットが次のような動作(図2)を逐次遂行するものである。

- 1) 操縦者により操縦された前脚の位置から段差高さを認識する。
- 2) 残りの前脚の接地点を決定する。
- 3) 胴体を車輪が障害物に接触するまで移動する。
- 4) 自重をできるだけ車輪で負担するために、車輪の鉛直方向の反力を評価指標として、後脚の接地点、前後脚のコンプライアンスを決定する。
- 5) 4の方法では胴体の姿勢を決定できない。そこで、アクチュエータの出力の分散化、消費エネルギーの最小化を図るために、トルクの2乗和を評価指標として胴体の姿勢を決定する。
- 6) 自重をできるだけ車輪で負担するために、車輪が障害物と常に接触するようにして胴体が段差を乗り越える。
- 7) 脚車輪型ロボットが平坦地直進歩容を行うときには対称歩容が最も静的に安定となる。したがって、胴体が障害物を乗り越えた後、対称歩容が行えるように各脚の接地点を変更する。
- 8) 対称歩容を行う。

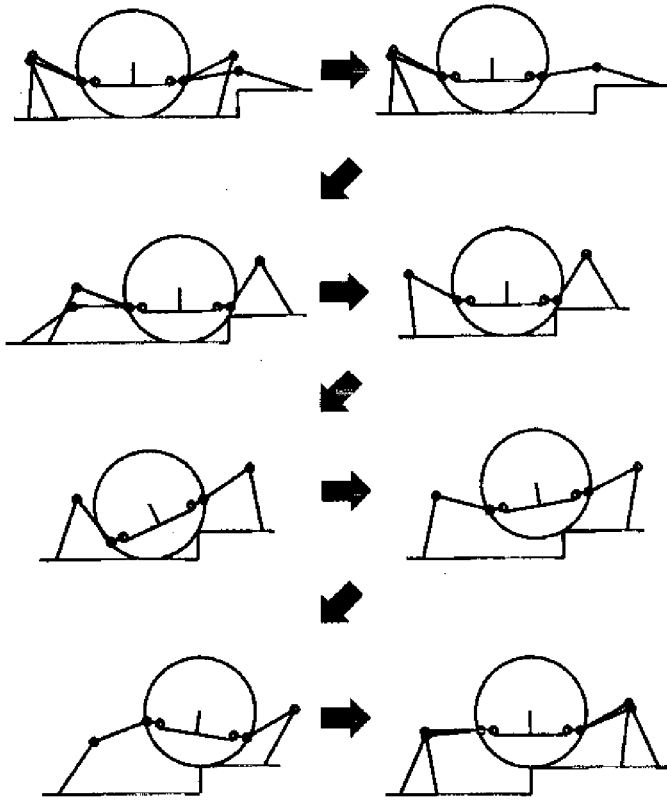


図2 段差乗り越え動作

3.1 後脚の接地点, 前後脚のコンプライアンスの決定

自重をできるだけ車輪で負担するために, 車輪の鉛直方向の反力が最大となるように後脚の接地点, 前後脚のコンプライアンスを決定する. 後脚の接地点は後2脚それぞれが xy 平面内から選択するので, 4つのパラメータとなる. また, 前後脚のコンプライアンスは4脚それぞれに x, y, z 方向のコンプライアンスがあるので, 12個のパラメータとなる. 原則的には, 合わせて16個のパラメータを選択することができる範囲内全てについて調べなければならないが, 問題を単純化するために次のような仮定を置くことにする.

- 1) 左右脚 z 方向のコンプライアンスは等しい.
- 2) 各脚の x 方向, y 方向のコンプライアンスは等しい.
- 3) 各脚は左右対称の位置に着く.

このような仮定により, 車輪の鉛直方向の反力は5つのパラメータにより決定されることになる. そのパラメータは脚の x, y 方向のコンプライアンス, 前脚の z 方向のコンプライアンス, 後脚の z 方向のコンプライアンス, 後脚の x 方向の接地点, 後脚の y 方向の接地点である. 検討を重ねた結果, 脚の x, y 方向のコンプライアンスと後脚の y 方向の接地点とが車輪の鉛直方向の反力に及ぼす影響は小さいので, これらを固定して考察する. したがって, パラメータは前脚の z 方向のコンプライアンス, 後脚の z 方向のコンプライアンス, 後脚の x 方向の接地点の3つとなる.

3.2 胴体の姿勢の決定

アクチュエーターの出力の分散化, 消費エネルギーの最小化を図るためトルクの2乗和が最小となるように胴体のロール角, ピッチ角を決定する. 左右の段差の高さは等しいと仮定しているためロール角はゼロとなる.

4. シミュレーション結果

4.1 後脚の接地点, 前後脚のコンプライアンスの決定

車輪の鉛直方向の反力は段差登り始めの状態が最小となるので, このときについて検討する. 車輪の鉛直方向の反力を F_{wz} , 前脚のコンプライアンスの逆数を K_{flz} , 後脚のコンプライアンスの逆数を K_{hlz} , 後脚の接地点を x_{hl} とする.

段差高さが20cmのときの K_{flz} , K_{hlz} , F_{wz} の関係, x_{hl} , K_{flz} , F_{wz} の関係, x_{hl} , K_{hlz} , F_{wz} の関係をそれぞれ図3~8に示す.

これらの図よりコンプライアンスと接地点が変化するにつれて, 次のような現象が順次生じることがわかる.

- 1) 車輪が滑べる.
- 2) 前脚が滑べる.

3) 前後脚が滑べる.

また, 図6, 8より, 後脚を胴体中心から遠くにつくほど F_{wz} は大きくなるのがわかる. したがって, 後脚の接地点については段差乗り越え動作の可動範囲内で, 胴体中心からできるだけ遠くにとる. 前後脚のコンプライアンスについては図3の前後脚, 車輪とも滑べらない範囲または脚が滑べらない範囲から選択する.

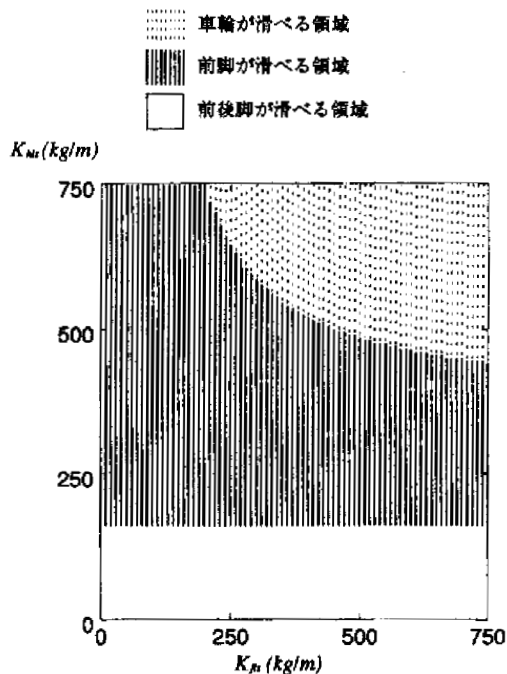


図3 K_{flz}, K_{fhz} を変えたときのロボットの状態

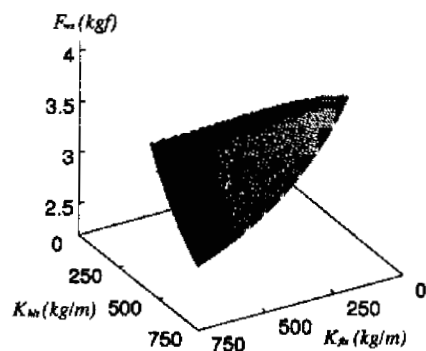


図4 K_{flz}, K_{hlz}, F_{wz} の関係

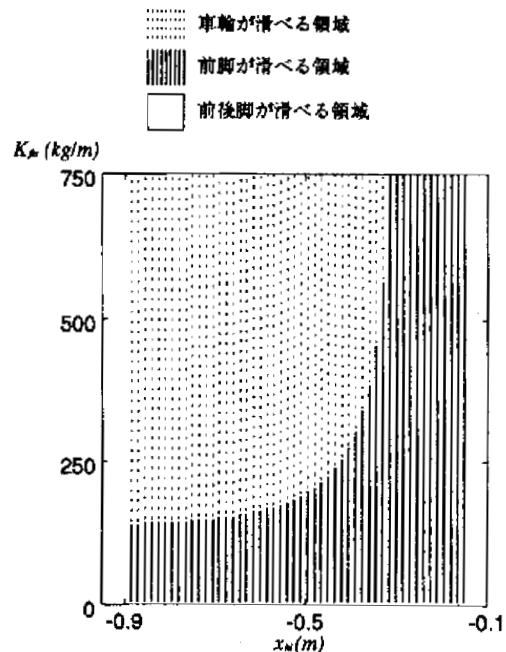


図5 x_{hl}, K_{flz} を変えたときのロボットの状態

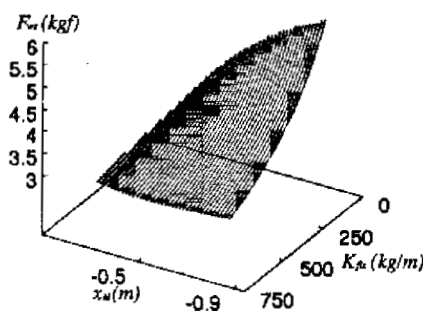


図6 x_{hl}, K_{flz}, F_{wz} の関係

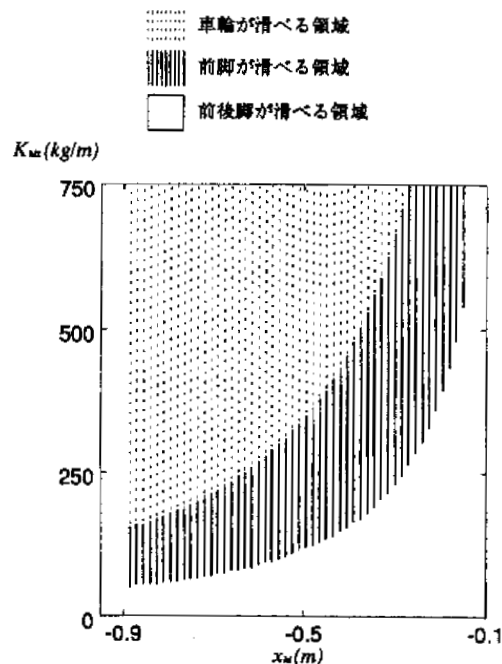


図7 x_{hl}, K_{hlz} を変えたときのロボットの状態

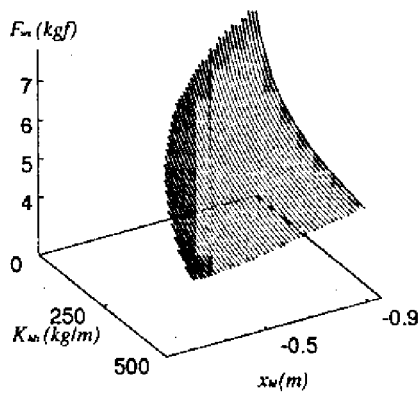


図8 x_{hl}, K_{hlz}, F_{wz} の関係

4.2 胴体の姿勢の決定

車輪の接地角 α を図9に示すようにとる。段差高さ20cm, $\alpha = 19.5, 43.0, 66.5, 90.0(deg)$ のときの胴体のピッチ角 β とトルクの二乗和 U との関係を図10に示す。 α とそのとき U を最小とする β との関係を図11に示す。

したがって、段差を登り上がるにつれて、図11のように胴体のピッチ角を連続的に変化させることにより、トルクの二乗和は最小になる。

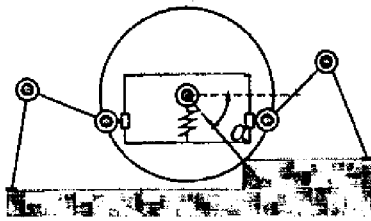


図9 接地角 α

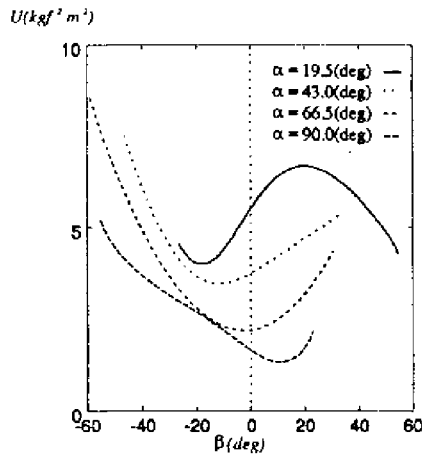


図10 β, U の関係

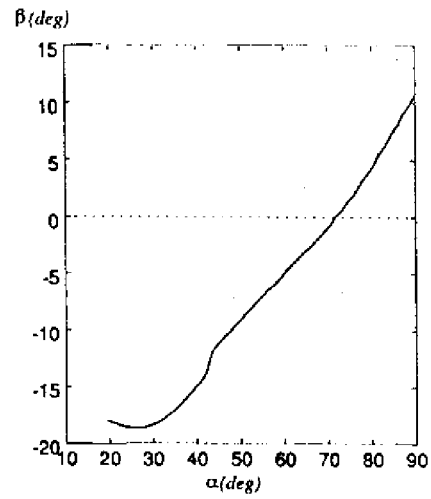


図11 α と U を最小とする β との関係

4.3 実験結果

段差高さが20cmのときの実験を行った。 $K_{flz} = 500(kg/m)$, $K_{hlz} = 700(kg/m)$, $x_{hl} = -0.4(m)$ としたときの実験結果を図12に、 $K_{flz} = 500(kg/m)$, $K_{hlz} = 100(kg/m)$, $x_{hl} = -0.4(m)$ としたときのそれを図13に示す。図12から段差登り上がりに成功していることがわかる。また、図13から段差登り上がりに失敗し、脚が滑べっていることがわかる。この結果はシミュレーション結果と一致する。



図12 $K_{flz} = 500(kg/m)$, $K_{hlz} = 700(kg/m)$, $x_{hl} = -0.4(m)$ のときの実験結果(段差高さ20cm)



図 13 $K_{flz} = 500(kg/m)$, $K_{hlz} = 100(kg/m)$, $x_{hl} = -0.4(m)$ のときの実験結果(段差高さ20cm)

5. おわりに

脚車輪型ロボットにおいて、操縦者が1脚を操縦することを前提として、大きな段差を移動するためのアルゴリズムを提案した。車輪の鉛直方向の反力を評価指標として、後脚の接地点、前後脚のコンプライアンスを決定することができた。トルクの2乗和を評価指標として、胴体の姿勢を決定することができた。実験を行い、シミュレーションと同様の現象が見られることを確認した。

参考文献

- 1) 大道, 井辺: 脚車輪型移動装置の開発, 日本ロボット学会誌, 2-3, 68/75 (1984)
- 2) 広瀬, 竹内: 新しい脚-車輪ハイブリッド移動体の提案, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1197/1198 (1994)
- 3) 安達, 他4名: 脚とクローラを用いたハイブリッド移動機構の試作, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 115/116 (1992)
- 4) 中野, 木村, 野中: 脚車輪分離型ロボットの開発および車輪走行時の胴体揺動抑制, 日本機械学会論文集(C編), 58-551, 2138/2143 (1992)

- 5) 木村, 中野, 野中: 脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作, 日本ロボット学会誌, 10-4, 111/116 (1992)
- 6) 長坂, 中野: 移動ロボットにおける車輪の大きさと受動的対地適応性, 第3回ロボットシンポジウム予稿集, 67/72 (1993)
- 7) E. Nakano, S. Nagasaka: Leg-Wheel Robot : A Futuristic Mobile Platform for Forestry Industry, Proceeding of IEEE International Workshop on Advanced Robotics, 109/112 (1993)
- 8) 中野, 戴, 他2名: 不整地環境における脚車輪分離型ロボットの移動方式とシミュレーション, 第5回ロボットシンポジウム予稿集, 35/40 (1995)
- 9) 戴, 他3名: 不整地における脚車輪分離型ロボットの移動方式と制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 5講演 論文集, A, 243/246 (1995)
- 10) Yu-Jie Dai, et al.: Motion Control of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment, Proceedings of Seventh International Conference on Advanced Robotics ICAR'95, 2, 911/916 (1995)
- 11) Yu-Jie Dai, et al.: Cooperational Motion Control of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment, Proceedings of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, 592/595 (1995)
- 12) D. E. Orin: Super Control of a Multilegged Robot, The International Journal of Robotics Research, 1-1, 79/91 (Spring 1982)
- 13) K. K. Hartikainen, A. J. Halme, H. Lehinan and K. O. Koskinen: Control and Software of a Hydraulic Six-Legged Machine Designed for Locomotion in Natural Environment, International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, 7-10, 590/596 (1992)
- 14) 川瀬, 他5名: 4脚移動ロボットの操縦型歩行制御, 第四回ロボットシンポジウム予稿集, 203/209 (1994)
- 15) 中村, 小谷内, 安達: 歩行ロボットのシミュレーションの評価技術, 機械技術研究所所報, 46-2, 196/211 (1992)