

6脚作業移動ロボットによる段差乗り越え

Step Climbing of Working Six-Legged Robots

○大江寛次郎, 井上健司, 李秀雄

○Kanjiro Ooe, Kenji Inoue, Suwoong Lee

山形大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

キーワード: 6脚ロボット(Six-legged Robot), 段差登りロボット(Climbing Robot),
動力学シミュレーション(Dynamic Simulation)

連絡先: 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学大学院理工学研究科応用システム工学専攻
井上健司, Tel & Fax: 0238-26-3335, E-mail: inoue@yz.yamagata-u.ac.jp

1 はじめに

災害現場でのレスキュー活動, 橋やトンネルの点検保守などに用いられるロボットは, 1台で高い移動能力と作業能力をあわせ持つ必要がある。また, エネルギー効率や活動時間の点から, ロボットの小型軽量化も重要となる。そこで, 腕と脚の機能をあわせ持つリムを複数備えた腕脚統合型ロボットが提案されている¹⁾。腕脚統合型ロボットは, 各リムが状況に応じて腕機能と脚機能を切り替えるため, ロボットを小型軽量化でき, 作業移動能力が高い。我々は, 腕脚統合型ロボットの一形態として, 高速安定な移動を行う6脚モード, 低所での腕作業が可能な水平4脚2腕モード, 高所での腕作業が可能な垂直4脚2腕モードを切り替えることで, 高い作業移動能力を発揮する6脚ロボットを開発した²⁾。

本論文では, このロボットの移動能力向上を目的として, 動力学シミュレータODEを用い, 段差乗り越え能力を解析する。ここで, 段差乗り越えとは, 単独の段差に登って降りることを指す。はじめに, ロボットの基本姿勢より高い段差を乗り越える歩容を複数提案する。次に, ODEで段差の乗り越えをシミュレーションし, 踏破可能な段差の高さと脚の踏み変え回数を解析して, 最適な段差乗り越え歩容を求める。最後に, 実機による段差の登り降り実験を行い, 段差乗り越え可能であることを実証する。

2 ロボットの構造

開発したロボットの設計をFig.1に示す。各脚には図のように番号をつける。ボディは直方体の隅を切り取ったような形状で, 広い面の四隅に脚3~6を, 小さい面の四隅に脚1~4を配置する。脚の自由度を3, よってロボットの自由度は18である。脚先にはゴムボールを埋め込み, 接地時の衝撃を緩和するとともに, 摩擦力を向上させている。ロ

ボットの全重量は2.73[kg]である。ロボットの詳細は文献^{2,3)}に記す。なお, 本論文ではロボットのボディの長い方向を縦, 短い方向を横とする。

3 縦方向の段差乗り越え歩容

ロボットの基準姿勢よりも高い段差を乗り越えるためには, 段差乗り越えに適した歩容が必要である。また, 複雑な環境での不整地移動を考えた場合, 脚が接地する領域は狭いほうがよい。そこで, 文献³⁾では, 縦方向に段差を登る歩容を提案している。前提条件として, 段差の高さはセンサ情報などで得られているとし, ロボットは段差に十分近づいているものとする。

この歩容では, できるだけ左右対称に脚を動かし, 常に4脚以上でボディを支持することで, 安定性を保つ。また, ボディは水平に保ったまま移動する。動作の流れを以下に示す。なお, 説明の(A)~(H)はFig.2に対応している。

1. 脚 1,2 をあげ, 脚 3,4,5,6 で4脚支持状態になる(A)
2. 脚 1,2 を同時に段差にのせる(B)
3. ボディを進行方向に移動して重心を移す
4. ボディを脚 1,2,5,6 で支持しながら, 脚 3,4

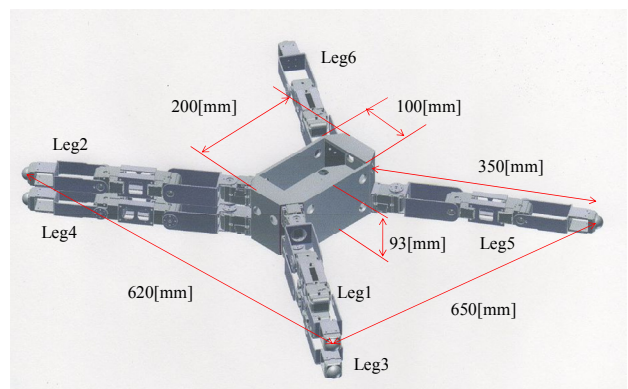


Fig.1 Design of developed six-legged robot

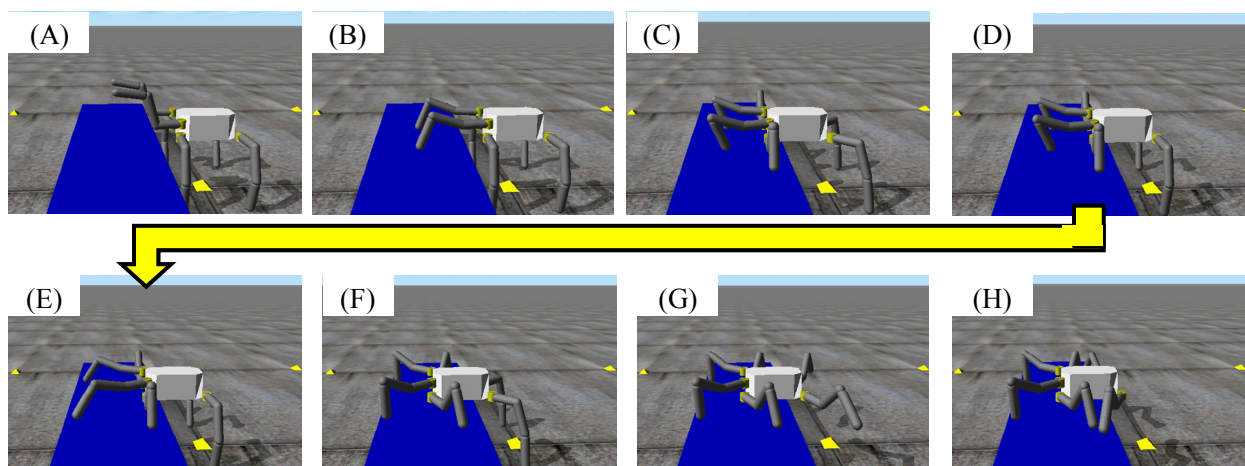


Fig.2 Longitudinal gait for high-step climbing

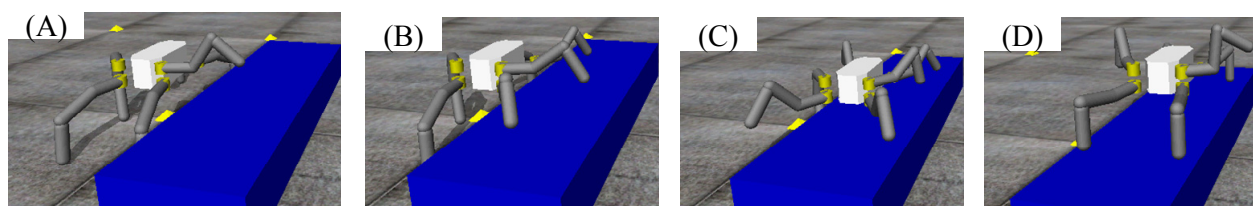


Fig.3 Sideways gait with body horizontal for high-step climbing

- を同時に段差にのせる(C)
5. 脚 1,2,3,4 だけではボディを支持できないので、脚 5 と 6 を一本ずつ、重心移動分だけ進行方向へ移動する(D)
6. 脚 1,2 を重心移動分だけ進行方向へ移動する(E)
7. ボディを進行方向に移動して重心を移す(F)
8. ボディを脚 1,2,3,4 で支持しながら、脚 5,6 を同時に段差にのせる(H)

ロボットは、縦方向に对称ではないので、段差を登った後、進行方向に降りるには、上記の歩容とは異なるプロセスをたどる。

階段のように段差が連続している場合、一段を登り終えた後、次の段を登るために、歩容の初期状態に戻る必要がある。この歩容では、Fig.2(H) からから Fig.2(A)に戻るために、さらに数回、脚を踏み変えなければならないという問題がある。

4 横方向の段差乗り越え歩容

前章に述べた歩容の問題点を解決するため、横方向に段差を乗り越える歩容を提案する。前提条件として、段差の高さはセンサ情報などで得られているとし、ロボットは段差に十分近づいているものとする。

4.1 ボディを水平にした段差乗り越え歩容

トライポッド歩容を参考に、常に 3 脚以上でボディを支持することで安定性を保ち、ボディを水平に保ったまま段差を登ることを考える。動作の流れを以下に示す。なお、説明の(A)~(D)は Fig.3 に対応している。

1. 初期状態(A)から脚 1 を段差にのせ、脚 2 を挙げ、脚 1,3,4,5,6 で 5 脚支持状態になる
2. ボディを進行方向に移動して重心を移す
3. 脚 3,5 を段差にのせ、脚 2 を接地する
4. 脚 1,4,6 を進行方向へ移動する(B)
5. 脚 3,4,5,6 による 4 脚支持状態で重心を進行方向へ移動する
6. 脚 1 を段差にのせ、脚 3,5 を進行方向へ移動し、脚 2 を接地
7. 脚 1,4,6 を挙げ(C)、脚 4,6 を段差にのせる
8. 脚 3,4,5,6 による 4 脚支持状態で重心を進行方向へ移動し、登り初期姿勢に移行する(D)

この歩容は、縦方向歩容のように初期姿勢に移行するための動作を必要としない上、ステップ 1 ~ 8 の動作を逆順に行うだけで、段差を降りることも可能である。

4.2 ボディを傾けた段差乗り越え歩容

ロボットが段差を乗り越える際に、ロボットのボディが地面と水平になっていると、障害物や段差にボディが接触してしまい、乗り越えの妨げと

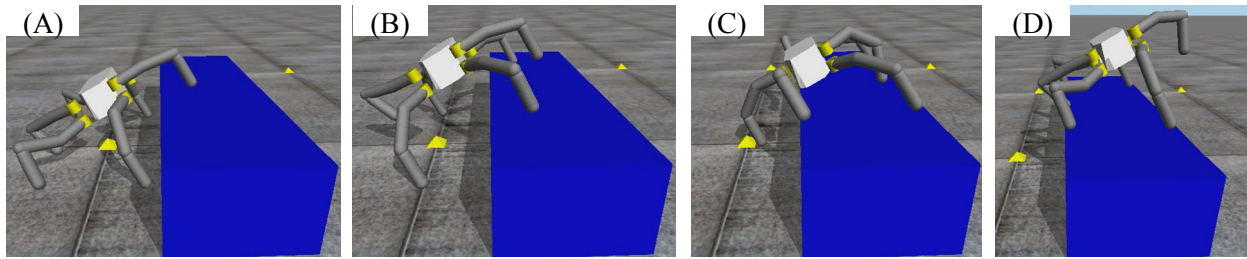


Fig.4 Sideways gait with body inclined for high-step climbing

なる可能性がある．本節では，前節の歩容の開始前に，ボディを地面に対して 25~40[deg]傾けた状態にしてから段差を登る歩容を考える．動作の流れを以下に示す．なお，説明の(A)~(D)は Fig.4 に対応している．

1. 脚 2,3,4,5,6 による 5 脚支持状態からボディを傾ける(A)
2. 脚 4,6 を進行方向へ移動し，脚 1 を段差にのせる
3. 脚 3,5 を段差にのせる
4. ボディを上方向へ持ち上げ(B)，進行方向へ重心を移動し，脚 2 を接地する
5. 脚 1,4,6 を段差にのせる(C)
6. 脚 3,5 を進行方向へ移動する
7. 脚 3,4,5,6 による 4 脚支持状態で重心を進行方向へ移動する
8. 初期姿勢の高さに移行し，脚 2 を段差にのせて，登り初期姿勢へ移行する(D)

この歩容も，前節の歩容と同じく，初期姿勢に移行するための動作を必要としない上，ステップ 1~8 の動作を逆順に行うことで，段差を降りることが可能である．

5 シミュレーション

第 3 章と第 4 章で提案した 3 通りの段差乗り越え歩容を ODE でシミュレーションし，乗り越え可能な段差の高さ，乗り越えに必要な脚の踏み変え回数を比較する．第 4.2 節で提案したボディを傾けた歩容に関しては，傾け角度 25[deg], 30[deg], 35[deg], 40[deg]について行った．第 3 章と第 4 章に示した動作の流れに対して踏み変え回数が増加するのは，段差が高くなると，一度で適切な位置に脚を接地できず，数回に分けて少しずつ移動する必要があるためである．

5.1 縦方向の段差乗り越え歩容

シミュレーションの結果，乗り越え可能な最大の段差の高さは 194[mm]，登りの踏み変え可数は

Table 1 Simulation result of sideways climbing with body inclined

Angle [deg]	25	30	35	40
Max. step height [mm]	205	208	210	190
Number of steps in climbing up	7	7	7	11
Number of steps in climbing down	8	8	11	15

10 回，降りの踏み変え回数は 17 回であった．これ以上段差を高くした場合，第 3 章のステップ 3 の重心移動の時点で，脚 5,6 が伸びきってしまった．6 脚基準姿勢時のロボット上面までの高さが 188[mm]なので，この結果は，通常時のロボットの高さ以上の段差を踏破できることを示している．この歩容は，多くの踏み換えや重心移動を必要としており，高速移動には適さない．これは，本研究が段差登り用ロボットの開発ではなく，1 台のロボットに様々な環境を移動する能力を与えること目指しているためである．

5.2 ボディを水平にした横方向の段差乗り越え歩容

乗り越えが可能な最大の段差の高さは 143[mm]，登りの踏み変え可数は 6 回，降りの踏み変え回数は 9 回であった．これ以上段差を高くした場合，脚 2 が伸びきってしまうため，歩容が生成できなかった．この結果は，6 脚基準姿勢時のロボット上面までの高さ 188[mm]，縦方向歩容の乗り越え可能な段差の高さ 194[mm]に及ばない．しかし，縦方向歩容と比較すると，乗り越えに必要な脚の踏み変え回数が約半分なので，速度の面では優れている．

5.3 ボディを傾けた横方向の段差乗り越え歩容

各角度における乗り越え可能な段差の高さ，乗り越えに必要な脚の踏み変え回数を Table 1 に示す．表から，35[deg]の時に段差の高さが最高となるが，傾け角度が大きいと重心が降りる方向に寄ってしまうために，段差を降りる際に踏み変え回数が増加している．40[deg]の時は，段差に登る前後で脚の横幅を変更しなくてはならないため，登

りの際も踏み変え回数が増加している．よって、最適なボディの傾け角度は 30[deg]程度であることがわかる．この歩容により乗り越え可能な最大の段差の高さは 208[mm]であり、前述の 2 種類の歩容よりも高い段差を乗り越えることができる．また、ボディを水平にした横方向歩容と同様に踏み変え回数が少なく、速度の面でも優れている．

6 実験

前章のシミュレーション結果から、最も優れた歩容である、ボディを傾けた横方向段差乗り越え歩容をロボット実機に実装し、実験を行った．ただし、脚先と地面の摩擦の問題から接地時に滑りがあり、第 4.2 節のステップ 5 の時に脚 4,6 を段差にのせられない危険性があるため、ステップ 5 の動作を行う直前に全ての脚を挙げ、ボディを一度水平に段差に降ろしてから脚 3,4,5,6 の 4 脚で立ち直す動作に変更した．一般的な階段の高さである 175[mm]よりも高い 180[mm]の段差を用意し、実験を行った様子を Fig.5 に示す．図から、ロボットは一般的な階段の高さに登ることができた．また、動作を逆順に行うことで、段差を降りられることも確認した．

7 おわりに

3 つのモードを切り替え可能な 6 脚作業移動ロボットの移動能力向上を目的として、段差乗り越え歩容を複数提案し、動力学シミュレータ ODE を用いてその能力を解析・比較した．その結果、ボディを傾けた横方向段差登り歩容が優れていることから、実機に実装して実験を行い、一般的な階段の高さを登り降りできることを示した．

今後は、脚の先端にセンサを組み込む、有線から無線接続に変更するといったハードウェア面と、センシングによる段差乗り越え動作の制御、移動しながらのマニピュレーションなどのソフトウェア面の双方における発展を目指す．

参考文献

- 1) Tomohito Takubo, Tatsuo Arai, Kenji Inoue, et al.: “Integrated Limb Mechanism Robot ASTE-RISK”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.2, pp.203-214, 2006.
- 2) 井上健司, 大江寛次郎: “3 つのモードを切り替え可能な 6 脚作業移動ロボットの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 論文集, 1A1-E04, 2007.
- 3) 大江寛次郎, 井上健司: “6 脚作業移動ロボットの段差登り能力の解析”, 第 51 回自動制御連合講演会論文集, PP796-.799, 2008.

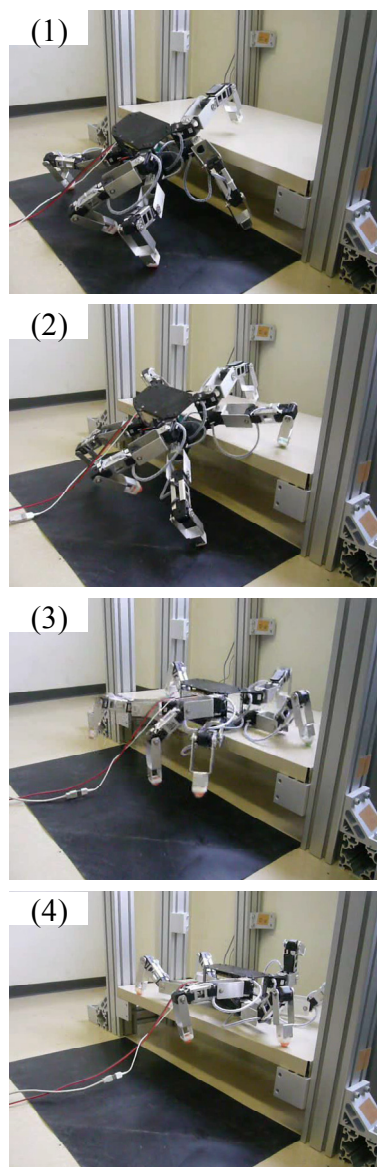


Fig.5 Experiment on sideways gait with body inclined for high-step climbing (step height 175[mm], body angle 30[deg])