

## 解 説

## 作業移動における脚の役割

Functions of Leg for Locomotion &amp; Manipulation

佐野 明 人\* \*名古屋工業大学機械工学科

Akihito Sano\* \*Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology

## 1. は じ め に

筆者は、1984年から2足、4足歩行ロボットの動的制御の研究に携わってきた。動歩行は非常に難しく、研究室のフラットな面を直線的に歩かせるだけでも、メカやその制御にかなりの工夫がいる。たとえば、2足歩行に対して角運動量規範形制御方式を提案し、より人間に近い自然な歩行を実現した(図1)[1]。

動物の脳を中心とする制御系が、いかにして自然な歩行を可能にしているかを解明することは大変興味深い問題であり、制御工学的に歩行を捉えることは重要な意義がある。しかし、人々は、単に歩くだけでは物足りないと感じるであろうし、もっと言えば、移動するだけではなく作業もこなせて初めて役立つロボットと見なしてくれるであろう。ロボットが真に人間社会に貢献すべき時期が現在来ている。

近年、建設土木、農林業、あるいは消火・防災などロボ

ットが研究室あるいは工場を出ることが前提となる分野で、積極的にロボットを導入する必要性が指摘されている。このようなロボットに要求されることは、移動とマニピュレーションの機能を併せ持ち、未整備環境で効率的に作業が行えることである。本稿では、作業を視野に入れた上で脚をどう生かすかについて考察する。ただし、一部筆者の独善的な見解が含まれていることをお許し頂き、より実的な作業移動型ロボットに関しては、他の解説にお任せしたい。

## 2. 着地点選択と機動性

## 2.1 脚式と動歩行

移動形態は、車輪式、クローラ式、脚式の三つに大別できる。車輪式は、機構および制御が簡単であり、エネルギー効率が良く高速移動が可能である。クローラ式は、円環状の無限軌道履帯と車輪が組み合わされてできている。履帯の形状を工夫すれば路面のグリップ力が強くなり、不整地や軟弱な路面を走行できる。一方、脚式は着地点が選択できるという点で、車輪式やクローラ式に比べて対地適応性が高い[2][3]。

歩行は静歩行および動歩行の二つに分けることができ、その制御方法が大きく異なってくる。全重心の水平面への垂直投影点が支持多角形の内部を通過する場合、静的安定性が保たれているといい、静的安定性の保持できない時期を持つ歩行が動歩行と呼ばれている。人間や動物が通常行っている歩行は、ほとんどすべて動歩行である。また、歩行ロボットをある程度の速さで移動させようとするときも動歩行を行う必要がある。

たとえば、4足歩行において、1脚だけを逐次遊脚とする静歩行は、1歩行周期における支持脚相の比率(デューティ比)が3/4となる。この歩行では、遊脚を速度 $V$ (胴体部に対する相対的な速度)で復帰させた場合、 $V/3$ の歩行速度が理論的には実現できる。一方、デューティ比をわずかに下げて1/2とした場合、動歩行に移行し3倍の歩行速度が可能となる。

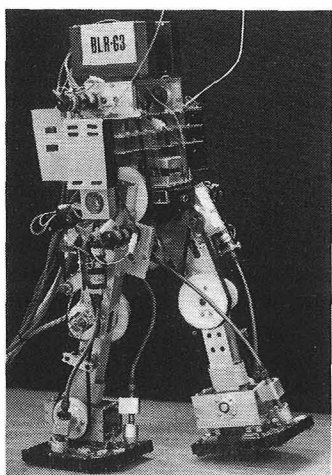


図1 2足歩行ロボット BLR-G3

原稿受付 1995年7月11日

キーワード: Locomotion &amp; Manipulation, Legs, Dynamic Walking, Cooperation, Compliance Control

\*〒466 名古屋市昭和区御器所町

\*Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi



#### 4. コンプライアンス制御機能

歩行において、ロボットの運動状態を常に正確に把握することは困難であり、適切な目標値をあらかじめ準備しておくことは不可能となる。したがって、胴体部の傾斜によって、遊脚が所定の位置まで振り出される前に着地してしまうなどの現象が起き、その結果、床面との激しい衝突や歩幅の乱れなどの問題を生ずる。こうした運動状況下で、より滑らかな動作を実現するためには、胴体部からみた脚爪先の剛性および粘性を適切に調整し、着地時の衝撃を和らげる方法が考えられる[6]。

その一つの有力な方式として、コンプライアンス制御が考えられる。コンプライアンス制御を用いたとき、爪先が床面に拘束されているかいないかに関わらず、統一された制御則の適用が可能となる。したがって、着地のタイミングが把握し難いシステムにおいて、その適用は非常に有効である。

脚爪先における目標剛性行列  $K_s$  の対角要素  $K_{s1}$  (前後方向)、 $K_{s2}$  (上下方向) および目標粘性行列  $K_v$  の対角要素  $K_{v1}$ ,  $K_{v2}$  の設計について述べる。まず、目標剛性に関しては、上下方向には高い剛性を設定し、前後方向には低い剛性を設定した。このように剛性を設定したのは、次の理由による。

(1) 上下方向の剛性  $K_{s2}$  が低いと、着地時に膝関節が大きく屈曲してしまい、その結果、対角線まわりでの胴体部の回転角が大きくなり胴体部の水平保持が難しくなるからである。

(2) 前進運動は、局所位置フィードバック制御された対角線上の二つの支持脚によって行われているため、これらの脚の動きを妨げないように、前進方向の剛性  $K_{s1}$  を十分に下げた。

次に、着地時の衝撃を吸収しかつ着地後の胴体部の振動が素早く減衰するように、上下方向のコンプライアンスを設計する。図5は、歩行システムを近似的に表した等価モデルである。ある脚の爪先をばね・ダンパを用いてモデル化している。このとき、システムの減衰比率  $\zeta$  は次のように与えられる。

$$\zeta = \frac{K_{v2}S}{2\sqrt{I(K_{s2}S - mgr \cos \theta_s)}}$$

ここで、 $m$  は全質量であり、 $I$  は等価モデルの回転慣性である。また、 $\theta_s$  はある平衡点を表している。この減衰比率を指標にして、上下方向のコンプライアンスを設計する。実験では  $\zeta$  を 0.56 と設定した。着地時の挙動を調べた実験結果を図6の左側に示す。図6(a)は、左前脚の肩部分に取り付けられた加速度計からの信号データであり、上下方向の加速度を示している。図6(b)は、胴体部の傾斜角速度（ロール軸まわり）の時間変化である。

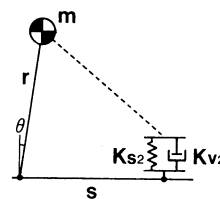
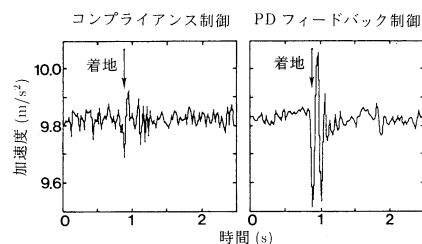
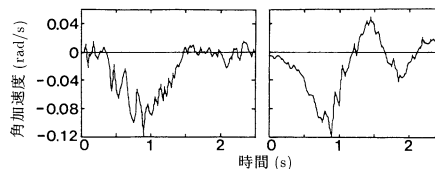


図5 歩行システムの等価モデル



(a) 加速度 (上下方向)



(b) 傾斜角速度 (ロール軸まわり)

図6 コンプライアンス制御 (着地実験)

比較のために高ゲインの局所位置フィードバック制御を適用した場合の結果を図6の右側に示す。高ゲインの局所位置フィードバック制御では、着地後も振動的な挙動を示している。二つの結果の比較から、脚爪先のコンプライアンス制御によって、着地時の衝撃が小さく抑えられ、胴体部の挙動が安定することがわかる。

#### 5. 生存空間の確保

言うまでもなく、災害救助などの危険作業を完全自律型ロボットや遠隔操縦型ロボットで行うことは、最も望まれるところである[7]。しかし、現状では、災害現場に多くの作業員が入っている。そこで、実用的に使用できるロボットができ、少しでも人間に対する危険性を減らすことができるのであれば、どんどん現場に投入して行くべきである。

たとえば、脚ロボットに消防士が搭乗し消火活動を行う3章で述べたような形態を考える。脚ロボットは、消火活動を迅速に行うために素早く動き、かつ散乱するがれきや消火ホースをまたぎ越えて移動する。さらに、移動しながら消火することも含め、消防士の消火活動を支援するような脚動作を行う。

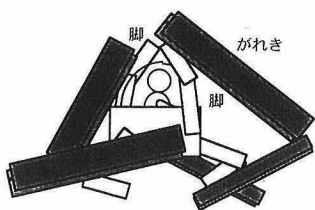


図7 脚による空間確保

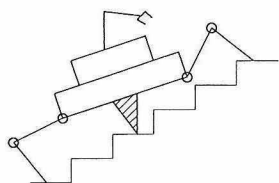


図8 支持装置を用いた階段昇降

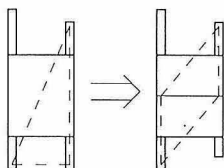


図9 支持パターン

万一、救助活動において危険が迫った場合は、図7に示すように、脚ロボットがシェルターの役割を担い、脚を速やかに張り出させることにより、人間が圧死しないような十分な空間を確保する。一般的に、移動ロボットを開発する上で非常事態にどう対処するかはあまり考えられていない。たとえば、歩行ロボットが転倒した場合の対処法はほとんど検討されておらず、転倒しないためにどう安定性を確保するかが研究の中心である。しかし、実際に作業をするなか、万一の場合に備えて上記のような脚の活用を含め有効な手だてが検討されるべきである。

## 6. 階段昇降

階段の昇降では、安定性を考えると静歩行が望ましい。4足歩行ロボットにおいて静歩行を行うと、支持多角形が三角形となる時期を持ち、安定余裕を常に大きくとるのは困難である。古荘らは、四つの脚のほかに図8のような支持装置を用いた昇降方法を提案している[8]。この支持装置は、固定式もしくは伸縮式であり、単純な機構を採用することでロボットの重量増加を必要最小限に抑えている。図9にこの支持装置を用いた歩容の一例を示す。右側の図からわかるように、支持装置と対角線上の2脚によって本

体を支持すると、その支持多角形は三角形から平行四辺形となり、重心は支持多角形のほぼ中央を移動する。その結果、安定余裕は大きくなる。

昇降方法は、4脚と支持装置によって本体を支持した後、トロット歩行のように対角線上の2脚ずつを動かし、次に4脚で支持し本体および支持装置を次の段まで動かして昇降する。また、作業時には支持装置と四つの脚により本体を支持すれば、低く安定した作業姿勢が確保できる。さらに、支持装置が伸縮式の場合はその高さも変えられる。

## 7. おわりに

本稿では、「作業移動」という視点から脚の役割・機能を模索し、その有用性を指摘した。このように移動のみに限定せず、脚の斬新な活用法が見いだせれば、脚式の作業移動ロボットの未来を大きく切り開くことができる。さらに、作業移動ロボットに対して、自動車と同じようにモデルチェンジを繰り返しながら、コスト・性能を継続的に向上させて行ける研究・開発環境が整えば、いつか必ず真に実用的なロボットが出現するものと確信する。

## 参考文献

- [1] 佐野：“重力場を巧みに利用した動的2足歩行（人間に近い歩行への挑戦）”，日本ロボット学会誌，vol. 11，no. 3，pp. 354-359，1993。
- [2] 広瀬，米田：“実用的4足歩行機械の開発に向けて”，日本ロボット学会誌，vol. 11，no. 3，pp. 360-365，1993。
- [3] S. Song and K. J. Waldron：“Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle,” The MIT Press, 1989。
- [4] M. H. Raibert：“Legged Robots That Balance,” The MIT Press, 1986。
- [5] 鎌田：“ユーザの運動意思を実現するパーソナルアシスタント—マイエージェント—”，計測と制御，vol. 34，no. 4，pp. 299-302，1995。
- [6] 佐野，古荘，橋口：“コンプライアンス制御機能を有する4足歩行システムに関する基礎的研究”，日本機械学会論文集（C編），vol. 57，no. 539，pp. 131-138，1991。
- [7] 大須賀，藤岡，小野：“マスタースレーブ型2足歩行ロボットについて”，第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 447-450，1992。
- [8] 小泉，古荘，佐野，河田：“4足歩行ロボットの各種環境下における移動および作業時の形状”，第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集，no. 3，pp. 825-826，1994。



佐野明人 (Akihito Sano)

1963年2月8日生。1987年岐阜大学大学院精密工学専攻修士課程修了。同年岐阜大学助手，1992年電気通信大学助手，1994年名古屋工業大学講師。現在，テレロボティクス，マイクロマニピュレーション，フォースディスプレイの研究に従事。工学博士。1992年日本機械学会研究奨励賞受賞。1995年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門広報委員会委員長。日本機械学会，計測自動制御学会などの会員。