二足歩行ロボットのしくみ

黒木 義博†

キーワード：二足歩行，ヒューマノイドロボット，ZMP

1. ま え が き

ロボットという言葉をも初めて使ったのは、チェコの作家カレル・チャペックで、1920年に発表した戯曲「R.U.R.」(ロッサム万能ロボット会社)の中で登場する。「ロボット」とはチェコ語で「労働する」あるいは、強制的な労働者である「奴隷」を意味するロボータ(Robota)からの造語と言われている。

日本の歩行ロボット研究は、早稲田大学の故加藤一郎先生による歩行メカニズムの研究からで、以来30年以上にわたって二足歩行ロボットの研究が続けられている。近年、人間形の二足歩行ロボット研究が盛んになり、2000年11月に開催されたパーソナルロボット博覧会ROBODEX2000では、本田技研のASIMOやソニーのSDR-3X(図1)に代表されるヒューマノイドロボットと呼ばれる人間形の二足歩行ロボットが注目を集めた。

2. 二足歩行ロボットの歴史

1966年歩行動作の基本的なメカニズム研究のための歩行下肢モデル(WL-1)が試作され、日本の二足歩行ロボット研究がスタートした。1973年には手足・視覚・音声のシステムを備えた世界初の人間形知能ロボットWABOT-1が開発され、認識機能を利用しながらゆっくりと二足歩行を行った。この時の歩行は静歩行で1歩45秒。

図1 人間形ロボットの例

当時は計算機の処理能力の問題もあって、我々人間が歩くようなダイナミックな歩行(動歩行)を機械システムで実現することは非常に困難であった。

その後、1984年に動歩行可能な二足歩行ロボットWL-10RDを完成させている。この時の歩行速度は1歩1.3秒であった。以来、現在のヒューマノイドロボット開発に至る進化を遂げている。

3. 静歩行と動歩行

静歩行とは重心の路面投影点が片脚立脚時にはその足底面内に、両脚立脚時にはそれぞれの足底で形成する支持多角形内部(安定領域内)に常に維持される歩行で、比較的ゆっくりとした移動が行われる。これに対し動歩行では重心が常に安定領域内にあるとは限らず、往々にして外れて移動する歩行で、人間の通常の歩行がこの動歩行にあたる。

4. 歩行メカニズム

人間の下肢について、足首(Ankle

図2 人間の下肢機構のモデル化
(ロボット工学ハンドブックより)

図3 人間形ロボットの構成例

Joint) から上の部分を歩行機能に注目し、リンク機構としてモデル化を行うと図2のようになる。足首関節にピッチ軸とロール軸、膝関節(Knee Joint)にピッチ軸とヨー軸、そして股関節(Hip Joint)にピッチ軸、ロール軸とヨー軸の計7自由度。左右対称で合計14自由度構成の直列開リンク機構となる。実際の二足歩行ロボットの多くは、

†ソニー株式会社
デジタルクリーチャーズラボラトリー
"A System for Biped Walking Robot" by Yoshihiro Kuroki (Digital Creatures Laboratory, Sony Corporation, Tokyo)

図4 ロボットの二足歩行とZMP

下肢に6自由度構成をとり6自由度×2(両脚)の12自由度とし、図3の例に示すように上肢(上体)を加えて二足歩行可能な人間形ロボットを構成する。

5. 二足歩行とZMP

図4に典型的な二足歩行ロボットの脚部とその足運び(フットプリント)を示す。通常二足歩行ロボットは左右交互に脚を支持脚とし路面と安定した支持状態を維持しながら歩行移動を行っている。ここで二足歩行ロボットに作用する力について考えてみよう。歩行するロボットには常に重力が作用している。さらに、ロボットが加速したり減速したり自ら動くことなどによって生じる慣性力が作用する。この重力と慣性力の合力が路面に作用し、路面からの反力とバランスする点が存在する。これをZMP(ゼロモーメントポイント)という。動的な歩行制御を考える場合、前に述べた「重心」ではなくて、この「ZMP」が足底面内あるいは足底で形成する支持多角形内部(安定領域内)に常に維持されるようにロボットの機体を制御することが、動的安定を得る歩行の基本となる。

6. 歩行制御技術

二足歩行ロボットは、ロボットに使われているアクチュエータ(電動モータなど)を駆動して、脚あるいは全身を動かし、足底が路面を押すことによって得られる圧力(床反力)を利用して移動する機械システムである。多くの歩行ロボットはロボットのモデルにし

たがって運動の目標軌道(動作パターン)を生成し、これを用いた動作制御を行っている。この動作パターン生成時にZMP規範(関節軌道目標値が実現可能かどうかを調べる)を用いる。動作パターン生成には、この他、倒立振り子モデルやリズム生成器を用いる方式のものなどがある。

ここで歩行の動作パターンが生成できたとして、次の課題は歩行時の安定化の問題となる。二足歩行ロボットは常に路面との接触動作の連続となり、路面の凹凸などのように路面が変化した場合にも安定性を維持することが必要となる。まず路面との接触時に衝撃を避けるために、やわらかな動作が必要となる。方法として、脚部もしくは足底部にバネや緩衝材などを用いて機械的にコンプライアンス(適応性のあるやわらかさ)を持たせるものや脚そのものを制御的にコンプライアントにする等の考え方がある。これらの方法に加えて、ロボットに備えた姿勢センサ類を用いて歩行時の安定化制御を行うことになる。

7. 高速安定歩行技術

二足歩行ロボットでの歩行が高速になると、ロボットの足底と路面との間にヨー軸(垂直軸)回りのすべりが生じ、これが歩行の安定性に大きな影響を与える。これは人間の歩行の場合でも同じで、高速になると両腕を振ったり腰を回転させたりして発生するこのヨー軸回りのモーメントの補償動作を自然に行っているのである。ロボットの場

図5 高速安定二足歩行

合も同様に、体幹部のヨー軸を回転させたり、両腕を振ってヨー軸モーメント補償動作を積極的に行って安定歩行を可能にしている。現在の二足歩行ロボットの歩行周期(速度)は速いもので1歩0.5から0.25秒のレベルにある。

8. むすび

近年の人間形二足歩行ロボットの進歩は著しく、ダイナミックな歩行や全身協調動作など、多彩な動作が可能になっている。知能系でも音声認識や画像認識機能の開発・実装が進み、知能系と運動系連動の行動も実現されつつある。今後の展開がますます楽しみである。

(2001年9月27日受付)

〔文 献〕

- 1) 日本ロボット学会編：“ロボット工学ハンドブック”，コロナ社
- 2) 山口仁一：“二足歩行ロボットの現状と事例紹介”，T. IEE Japan, 119-D, 6 (1999)
- 3) 黒木，石田，山口：“小型二足歩行エンターテインメントロボット”，日本ロボット学会学術講演会，3J26 (2001)

1977年，早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年，ソニー(株)入社。生産技術開発，高速組立ロボット開発，インテリジェントロボット開発に従事。1979年～1980年，MIT研究員。その後ソニーコーポレートR&D戦略を経て，1998年より，現デジタルクリエーターズラボラトリー所属。小型二足歩行エンターテインメントロボットSDRの研究開発に従事，日本ロボット学会会員。