2足歩行とロボット

○高西淳夫（早大・理工）

Biped walking and Robotics
A. Takanishi (Waseda Univ., Sch.
of Science and Engineering)

1 はじめに

演者らは、機械が人間と同じように歩き回る姿を思い描きながら、2足歩行ロボットの開発研究を行なっている。われわれ人間は、普段何気なく2足歩行を行なっているが、これを機械に行なわせることは容易ではない。

最初の2足歩行ロボットは、1893年にカナダのG.Moorが作った蒸気人間であるといわれている。ただし、これには腰に支持棒がついており、2足歩行の本質ともいえる不安定性の問題をその棒に吸収させていた。

研究レベルで機械による2足歩行を最初に実現したのは、早稲田大学の加藤らである。1971年、WAP (Waseda Automatic Pedipulator)-3とよぶ空気圧駆動式の2足歩行ロボットを用いて、人間の歩行でいえば「抜き足差し足」に当たる、つまり歩行の全期間に渡って重力のみのバランスを取る「静歩行」の実現に成功した。

一方、人間の成人が行なっている歩行、すなわち歩行中常に重力に加えて運動によって生じる力である慣性力のバランスを取る歩行のことを「動歩行」とよぶ。これを初めて実現したのも早稲田大学の加藤と演者らである。油圧駆動式の2足歩行ロボットWL (Waseda Leg)-1 ORD (Refined Dynamic)を用いて1歩1.3秒の動歩行に成功した。静歩行の実現から実に13年たった1984年のことである。

WL-1 ORDは下肢機構部のみを持つ2足歩行ロボットで、人間の様な上体（体幹）を有していなかった。演者らは、ロボットもそのような上体機構部を持てば、より広範な歩行環境における歩行が可能になると考え、上体を有する2足歩行ロボットWL-12を開発した。これに伴い、上体運動を歩行の安定化に有効に利用した新たな2足歩行制御方式を提案し、歩行

に成功した。

本稿では、最後に述べた上体運動を利用した2足歩行のための「歩行系のモデリング」、歩行安定性判別の規範となる物理パラメータである「ZMP (Zero Moment Point)」, ならびに「制御方式」について概要を述べる。

2 歩行系のモデリング

歩行系のモデリングは、次のような仮定と座標系の設定に基づいて行なっている。

- I：歩行系は質点の集合よりなる
- II：路面は十分に硬く水平な平面である
- III：XおよびY軸の作る平面が路面と、またZ軸が鉛直軸と一致する慣性直交座標系Oを設定する
- IV：歩行系と路面とは点（接地点）の集合により接触している
- V：接地点における並進（X・Y軸）方向の摩擦係数は十分に大きくすべることがない
- VI：接地点における回転（X・Y・Z軸まわり）の摩擦係数は十分に小さく無視できる

これらの仮定・設定をもとに、上体を1質点、下肢をn質点系としてモデリングすると図1のようになる。

図1 2足歩行系の力学モデル

3 ZMP

重力加速度および歩行運動に伴って生じる加速度により、歩行系から路面には重力と慣性力ならびにこれらのモーメントが作用する。

グランベールの原理によると、それらはまた路面から歩行系に作用する反力および反力のモーメント（床反力・モーメント）とバランス状態にある。さらに、接地点においては圧縮力、つまり歩行系と路面とは互いに他を押し方向のみの力を作用可能である。

以上より、力学的結論として、「歩行のあらゆる瞬間において接地点が形成する凸多角形（支持多角形）の辺上あるいはその内側にモーメントがゼロとなる点が存在する」ことが導かれる。

このような点を「ゼロ・モーメント・ポイント」、または略して「ZMP」とよぶ。これはME分野でよく用いられる「床反力作用点」とも一致する。

図1のモデルにおけるZMPは、

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (1)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + g_y) z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)}$$

$[X_{zmp}, Y_{zmp}, 0]$: ZMPの座標

m_i : i 番目の質点質量

$[x_i, y_i, z_i]$: i 番目の質点座標

$[g_x, g_y, g_z]$: 重力加速度

で与えられる。

4 歩行制御方式

歩行制御の基本は、

I [歩行前] 軌道計画と運動パターンの設定

II [歩行中] 運動パターンを用いたプログラム制御

である。Iにおける歩行軌道は、前章のZMPに関する式①を満足していなければならない。演者らは以下に述べる2つの方法を開発している。

4.1 上体補償型2足歩行

1つは、上体部質点 m_0 を除く下肢部質点全て $m_i (i=1 \sim n)$ の軌道とZMP軌跡を任意に計画し、式①を満たす上体部質点 m_0 の軌道を計算する方法である。

数学的には、周期性のある強制項を持つ非線形連立常微分方程式の厳密周期解を数値解析的に求める問題に帰着される。

このように軌道計画された歩容を演者らは「上体補償型2足歩行」とよんでいる。

4.2 上体・腰協調補償型2足歩行

もう1つは、足部質点 m_{n-2}, m_{n-4} の軌道とZMP軌跡を任意に計画し、式①を満たす上体部と腰部質点 m_0, m_n の軌道を計算する方法である。このとき、腰部と上体部軌道の滑らかさを与えるある指標（評価関数）を用いて、最も滑らかな m_0, m_n の軌道（最適軌道）を計算する。また上記4質点以外の質点の軌道については、機構学的関係より腰部および足部軌道から従属的に定まる。

数学的には、周期性のある強制項を持つ非線形連立常微分方程式の厳密周期解群のなかで、同方程式を線形化した常微分方程式を拘束条件にもつ評価関数を最小とする解を数値解析的に求める問題に帰着される。

このように軌道計画された歩容を演者らは「上体・腰協調補償型2足歩行」とよんでいる。

5 おわりに

人間は、行き慣れた所なら立ち止まることなくスーッとドアを開けながら部屋に入ったり、あるいは歩行中ちょっと押されたくらいでは倒れることなく歩行を続けることができる。これらは、重力以外の外力が歩行系に加わる場合の歩行制御問題として捉えることができる。

前者は外力が既知の場合で、後者は未知の場合に対応する。前者については、上記の2方法を拡張すれば適用でき、演者らは実際に2足歩行ロボットを用いて実現している。

後者についても、リアルタイム化が必要で、かなり複雑にはなるが、既に新たな制御方式を考案し、実験によりその有効性を確認している。

また、人間は目を用いることで環境に適応した軌道の計画あるいは変更を自律的に行っている。これについても、2台のカメラを搭載し、視覚処理により障害物を認識しながら自律的に回避動作を行なう2足歩行ロボットを現在開発中である。