計測自動制御学会東北支部 第236回研究集会 (2007.6.15)
資料番号 236-17

ヒューマノイドロボットのフィードバック制御

Feedback Control of a Humanoid Robot

○高山和也*, 釜谷博行*
○Kazuya Takayama*, Hiroyuki Kamaya*
*八戸工業高等専門学校
*Dept. Electrical Eng., Hachinohe National College of Technology

キーワード: ヒューマノイドロボット(humanoid robot), 3次元倒立振子モデル(3D Inverted pendulum model), ZMP(zero moment point), 画像処理(Image processing), フィードバック制御(feedback control)

連絡先: 〒039-1192 青森県八戸市田面木字上野平16-1 八戸工業高等専門学校 電気情報工学科
釜谷博行, Tel.: (0178)27-7283, E-mail: kamaya-e@hachinohe-ct.ac.jp

1. はじめに

現在，ヒューマノイドロボットは一般の人が見たり，手に入れたりすることが容易になり，ますます身近な存在になってきている．このため，ロボットには歩くことはもちろん，様々なパフォーマンスを行うことが要求される．

本研究室にある小型ヒューマノイドロボットHOAP-2は，各関節角度の時系列データを逐一送信するという低レベルのインターフェースを通して制御を行う方式をとっている。しかし，時系列データを作成するためのソフトウェアを備えていない．このため，ユーザーにとって非常に扱いにくいシステムとなっている.そこで，本研究では，HOAP-2のための基本動作ライブラリを確立し，簡単な操作で所望の動作パターンを生成するようなソフトウェアの開発を行っている．今回は，安定に歩くための歩行パターンの生成法について検討するとともに，ロボットの視覚領域を広げるための首のフィードバック制御について述べる．

2. ロボット概要

本研究では小型ヒューマノイドロボットのHOAP-2(富士通オートメーション株式会社製)を用いる(図2-1)．ロボットは，高さ50cm，重さ7kgで，25個のモータ，加速度センサ，角速度センサ，足底センサ，USBカメラが内蔵されている．また，USB通信によりパソコンと接続し，RT-Linuxを用いたC言語での開発が可能である．

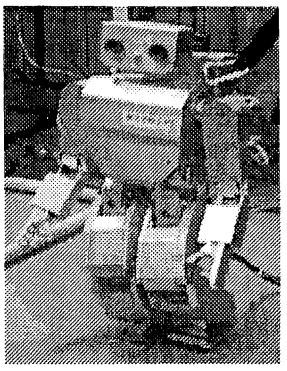

図2-1 HOAP-2全体図

3. 歩行制御

3-1. 3次元倒立振子モデル

歩行パターンを生成するモデルの1つとして3次元倒立振子によるモデルが提案されている(1)．これは，ロボットが片足のみで体を支えている状態を倒立振子に見立てたもので，これを用いることで，重力による影響を考慮した歩行パターンの生成が可能となる．

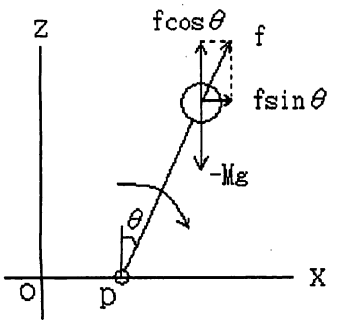

図 3-1　倒立振子

3-1-1. 運動方程式

図 3-1 において，x 方向の運動方程式は，

$$f_x = f\sin\theta = M\ddot{x} \tag{3.1.1}$$

z 方向の運動方程式は，

$$f_z = f\cos\theta - Mg \tag{3.1.2}$$

で表される．このとき，z 方向の力 f_z を 0 とし，(3.1.1)式に代入すると，

$$M\ddot{x} = \frac{Mg}{\cos\theta}\sin\theta = Mg\frac{x}{z} \tag{3.1.3}$$

となる．また，原点から足の位置が p だけ離れている場合は，

$$\ddot{x} = \frac{g}{z}(x-p) \tag{3.1.4}$$

となる．ここで，z 方向の力が 0 より z を一定とし，x について解くと，

$$x_{(t)} = (x_{(0)}-p)\cosh\left(\frac{t}{T_C}\right) + T_C\cdot\dot{x}_{(0)}\sinh\left(\frac{t}{T_C}\right) + p \tag{3.1.5}$$

$$\dot{x}_{(t)} = \frac{(x_{(0)}-p)}{T_C}\sinh\left(\frac{t}{T_C}\right) + \dot{x}_{(0)}\cosh\left(\frac{t}{T_C}\right) \tag{3.1.6}$$

となる．ただし，$T_C = \sqrt{\frac{z}{g}}$ は重心の高さと重力加速度によって決まる時定数で，$x_{(0)}, \dot{x}_{(0)}$ は時刻 0 における重心の位置と速度である．

また，この運動方程式は y 方向についても同様となる．

3-1-2. 歩行素片

前述の運動方程式(3.1.5),(3.1.6)式を用いて，ロボットが片足で支持している間の重心の軌跡を表したパターンを歩行素片という．図 3-2 の歩行素片は，高さ z =0.3[m]，時間 T_{sup} =0.8[s]，歩幅 x =0.15[m]，足の間隔 y =0.078[m]として求めた．

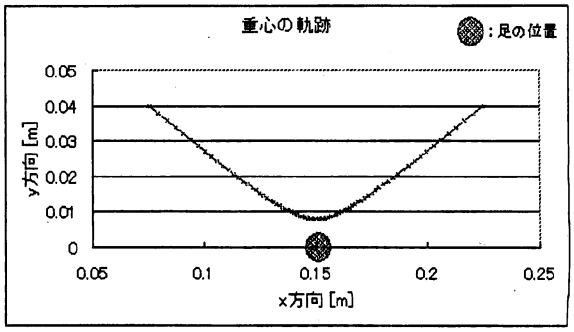

図 3-2　「歩行素片」重心の軌跡

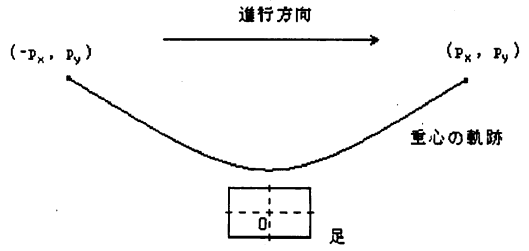

図 3-3　「歩行素片」重心・足の位置

いま，図 3-3 において足の位置が $p=0$ にあり，1 つの歩行素片の支持期間が $[0, T_{sup}]$，x 方向の初期条件が $(-p_x, v_x)$，終端条件が (p_x, v_x) とすると，(3.1.6) 式の境界条件は $x_{(0)} = -p_x$，$t = T_{sup}$，$\dot{x}_{(0)} = v_x$ より，

$$\dot{x}_{(T_{sup})} = v_x = \frac{-p_x}{T_C}\sinh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right) + v_x\cosh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)$$

$$v_x = \frac{\frac{-p_x}{T_C}\sinh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)}{1-\cosh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)} = \frac{p_x\left(1+\cosh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)\right)}{T_C\sinh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)} \tag{3.1.7}$$

となる．また，y 方向の初期条件を $(p_y, -v_y)$，終端条件を (p_y, v_y) とすると，

$$\dot{y}_{(T_{sup})} = v_y = \frac{p_y}{T_C}\sinh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right) - v_y\cosh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)$$

$$v_y = \frac{\frac{p_y}{T_C}\sinh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)}{1+\cosh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)} = \frac{-p_y\left(1-\cosh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)\right)}{T_C\sinh\left(\frac{T_{sup}}{T_C}\right)} \tag{3.1.8}$$

となる．このような歩行素片を歩行時の各足の

位置でそれぞれ作成し，これらをつなぎ合わせることにより全体の歩行パターンを作成することができる（図 3-4）.

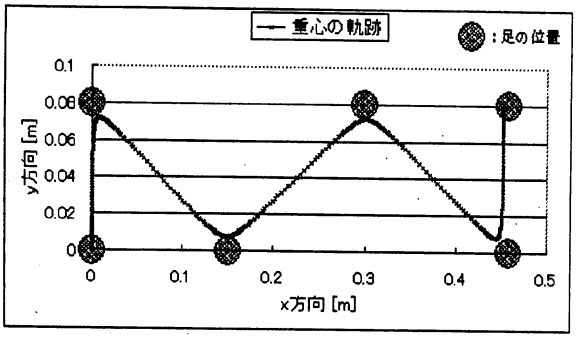

図 3-4　「歩行素片」歩行パターン

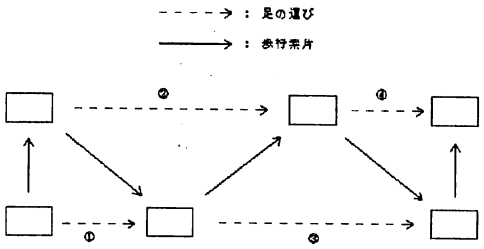

図 3-5　足の運び

こうして，重心の軌跡と足の位置から，一歩の時間 T_{sup} を短い時間 dt （例：dt=0.01[s]）で区切り，その区切り毎に逆運動学の計算を行うことにより，ロボットの各時刻での関節の角度を知ることができる．しかし，このままでは速度に滑らかでない部分が生じてしまい，加速度が不連続になってしまう．そのため，各歩行素片をつなげるときに加速度が連続になるように補正を加える．

3-2. ZMP(Zero Moment Point)の制御

３次元倒立振子モデルでは目標とするロボットの重心の運動・軌道を定めてきたが，今回は重心の代わりに ZMP の軌道を定めることにより，歩行の安定化を行う．

3-2-1. 安定領域

重心よりも ZMP を目標値に定める理由は，ロボットが立っている(転ばない)条件として，ロボットの足が地面に着いている領域内（安定領域）にロボットの ZMP が存在する必要があるためである(図 3-6)．例えば，静的な運動の場合は，「ZMP=重心の位置」となるが，動的な運動になると，ZMP の位置は重心の位置とは異なってしまう．このため，重心を制御する方法では ZMP が安定領域から出てしまい，転んでしまうという状況が発生する．

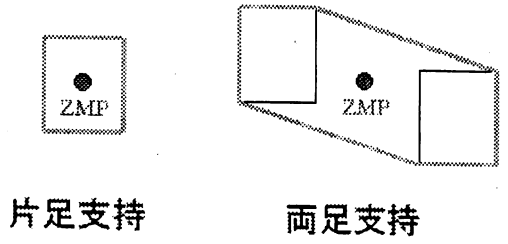

図 3-6　安定領域

3-2-2. ZMP 軌道生成

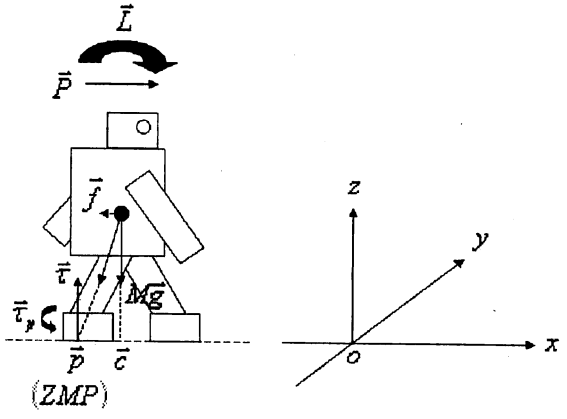

図 3-7　ロボットに働く力

いま，ZMP の位置を $\vec{p}$，重力加速度を $\vec{g}$，重心の位置を $\vec{c}$ とし，単一質点，重心高さ一定 $(c_z = z_c)$ とすると，x 成分に関する ZMP 方程式は，

$$p_x = c_x - \frac{z_c}{g}\frac{d^2}{dt^2}(c_x) \qquad (3.2.1)$$

と表される．この式を Δt で離散化した場合，$c_x \to x$ として，

$$\frac{d^2}{dt^2}(x_{(k)}) = \frac{x_{(k-1)} - 2x_{(k)} + x_{(k+1)}}{\Delta t^2} \qquad (3.2.2)$$

で与えられるため，

$$p_{x(k)} = ax_{(k-1)} + bx_{(k)} + cx_{(k+1)} \quad (3.2.3)$$

$$a = -z_c / (\Delta t^2 g) \quad (3.2.4)$$

$$b = (z_c + 2\Delta t^2 g) / (2\Delta t^2 g) \quad (3.2.5)$$

$$c = -z_c / (\Delta t^2 g) \quad (3.2.6)$$

として表される．

これを，kステップに対する行列で表すと，

$$\begin{bmatrix} p'_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{N-1} \\ p'_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1+b_1 & c_1 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & & 0 & 0 & 0 \\ & & & \ddots & & & \\ 0 & 0 & 0 & & a_{N-1} & b_{N-1} & c_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & a_N & b_N+c_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{bmatrix} \quad (3.2.7)$$

但し，$p'_1 = p_1 + a_1 v_1 \Delta t$，$p'_N = p_N - c_N v_N \Delta t$ とする．(3.2.7)式は，$\vec{p} = \vec{A}\vec{x}$ の形で表されるため，ZMP の軌道を $\vec{p}^d$ と定めると，$\vec{x} = \vec{A}^{-1}\vec{p}^d$ の演算により，ロボットの重心位置を求めることができる．

しかし，これは近似計算となるため，重心の位置を正確に求めることができない．そこで，求めた$\vec{x}$から ZMP を計算しなおし，それを $\vec{p}^*$ とし，

$$\Delta\vec{x} = \vec{A}^{-1}(\vec{p}^* - \vec{p}^d) \quad (3.2.8)$$

$$\vec{x} \leftarrow \vec{x} + \Delta\vec{x} \quad (3.2.9)$$

により修正後の$\vec{x}$を求める．そして，再度 ZMP の計算を行う．これらの処理を ZMP の誤差が十分小さくなる程度$(|\Delta\vec{x}| < 10^{-6})$まで繰り返す．上述の処理により，実際に定めた ZMP の軌道をたどらせることができる．また，y成分も同様に，

$$p_{y(k)} = ay_{(k-1)} + by_{(k)} + cy_{(k+1)} \quad (3.2.10)$$

として表され，同様の処理を行う．

ロボットを歩行させる ZMP の軌道として，3次元倒立振子モデルの歩行素片の軌道を利用した(図 3-8)．今回の研究では，x方向に 0.05[m] 進み，y方向に 0.0465[m]だけ ZMP が動くようにした．

最後に，重心位置から逆運動学の計算を行うことにより，各時刻におけるロボットの関節角度を求める．

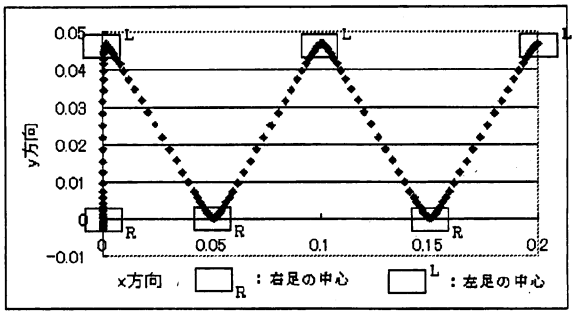

図 3-8　ZMP の位置

4. 首の制御

HOAP-2 は首にある２つのサーボモータにより，顔に取り付けられたカメラのパン，チルトが可能である．ロボットの視野を広げるには，注目している物体に顔を向ける動作が必要となる．いま，赤色のボールに注目することを考える．まず，カメラ画像(図 4-1)から RGB 値を読み取り，色相(図 4-2)の値を調べる．RGB 値をそれぞれ R,G,B とし，赤である可能性(色相)R' を次式で求める．

$$R' = R - G \quad (4.1)$$

今回は，R'が 80 以上(色相が 260～360, 0～40[deg])の領域を赤色であるとみなし，二値化した．

次に，赤色とみなした画像の重心を求め，その重心の位置を画面の中央にするようにサーボモータを制御する．この処理を逐次行うことにより，赤色のボールに追従させるようにした．

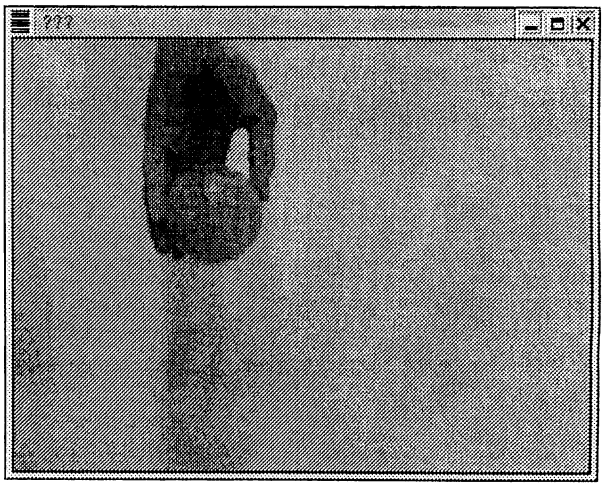

図 4-1　カメラ画像

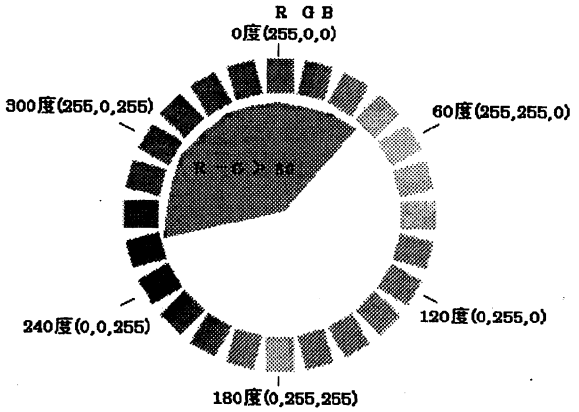

図 4-2　色相の角度，RGB 表示

5. まとめ

ZMP による制御方式を用いた場合には，倒立振子モデルのみを用いた場合に比べて，ロボットが安定に歩くことを確認した．また，カメラを用いた首の制御では，画像取得のサンプリング速度はおよそ 10[fps]と速くないものの，ある程度の速度でボールを追うことができることを確認した．

今後は，カメラからの画像による歩行軌道の生成や足底センサからのフィードバックを用い，より安定に歩行させるアルゴリズムの開発を行いながら，動作ライブラリの充実を図っていく必要がある．

6. 参考文献

(1) 梶田秀司編著：ヒューマノイドロボット，オーム社(2005)