技術論文

上体運動により3軸モーメントを補償する 2足歩行ロボットの開発

山口仁一* 高西淳夫**加藤一郎**

Development of a Biped Walking Robot Compensating for Three-Axis Moment by Trunk Motion

Jin-ichi YAMAGUCHI Atsuo TAKANISHI Ichiro KATO

We have been using the ZMP (Zero Moment Point) as a criterion to distinguish the stability of walking for a biped walking robot which has a trunk. In this paper, we introduce a control method of dynamic biped walking stabilized by trunk motion compensating for the three-axis moment on an arbitrary planned ZMP. We developed a biped walking robot WL-12 RV (Waseda Leg-12 Refined V) and performed a walking experiment with WL-12 RV using the control method. As a result, we realized fast dynamic biped walking (walking speed 0.54 s/step and step length 0.3 m) on a flat floor. This walking speed is about 50 percent faster than that with WL-12 (Waseda Leg-12) which compensates for only the two-axis (pitch-axis and roll-axis) moment by trunk motion.

Key Words: Biped walking robot, Dynamic walking, ZMP, Trajectory planning

1. はじめに

われわれは、1986年に歩容安定化のための補償器として上体を有する2足歩行ロボットWL-12を開発し、同時に、任意の下肢運動を与えても上体運動によりZMPを補償することで歩行の安定化を図る上体補償型2足歩行制御方式を提案した¹⁻³⁾. 同歩行制御方式を用いて1990年までに外力の加わらない水平・平坦路上において歩幅0.3[m]で1歩0.8[s]の動歩行を実現した⁵⁾.

本方式においては、その前提条件として"ロボットの 足底接地点における並進に対する摩擦係数は十分に大き い"としていた。つまり、上体運動によりピッチおよび ロール軸モーメントのみを補償し、ヨー軸モーメントに ついては歩行の安定性に無関係であるとして、これを無 視していた。しかし、われわれが行った歩行実験におい て、歩行が高速になるとロボットの足底と路面間にヨー 軸回りの滑りが生じ、これが歩行の安定性に大きく影響 するという問題が生じてきた。

ところで、人間の場合は両腕の振りや腰の回転を利用 してヨー軸モーメントの補償を行っている.これは、特 に高速な歩行において、歩行の安定性維持に大きく寄与 しているものと考えられる.

そこで本研究では、上体運動による3軸モーメントの補償が可能な2足歩行ロボットを開発し、その歩行制御方式を考案することにより、これまでより高速な歩行を実現することをその目的とした.

開発した2足歩行ロボット WL-12RV と考案した歩行制御方式を用いて歩行実験を行った結果,歩幅0.3[m]で1歩0.54[s]の動歩行を実現し、従来に比べ約1.5倍の歩行速度の高速化に成功したので、以下に報告する.]

2. 2 足歩行ロボット WL-12 RV

2.1 機械モデルの構成

本機械モデル (**Fig. 1**) は総重量103.5[kg], 全長は直立静止状態で約1.8[m]である。機械モデルの組立図

原稿受付 1992 年 9 月 18 日

^{*} 早稲田大学大学院理工学研究科

^{**} 早稲田大学理工学部

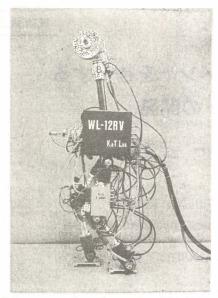


Fig. 1 Biped walking robot WL-12 RV

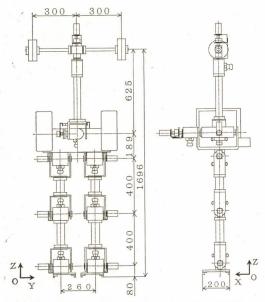


Fig. 2 Assembly drawing of WL-12RV

を Fig. 2 に、自由度配置図を Fig. 3 に示す.

自由度配置は、Fig. 3 に示すように、下肢にピッチ軸の自由度を6自由度、上体にピッチ、ロール、ヨー軸の自由度を61自由度持ち3自由度、合計で9自由度である。

2.2 上体機構部

本機械モデルの上体機構部は3軸のモーメントを発生できるものである. その機構の概略図を Fig. 4 に示す. この図に示すように上体の先端部にヨー軸の1自由度を

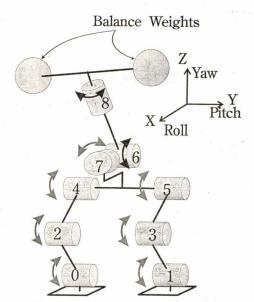


Fig. 3 Link structure of WL-12RV

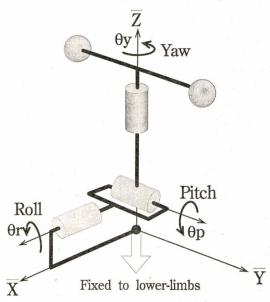


Fig. 4 Link structure of trunk

設け、これにより両端におもりを取り付けたアームを回転させることでヨー軸回りの偶力モーメントを発生する. そして、おもりとヨー軸アクチュエータをピッチとロール軸アクチュエータで回転させることでピッチ軸とロール軸回りのモーメントを発生する.

このようにヨー軸の自由度を上体の先端部に配置し、 その質量もピッチおよびロール軸モーメントの補償に利 用することで、ヨー軸モーメントを発生できる機構を持 つことによるロボット全体の重量増加をきたすことがな い上体機構を実現した. なお,上体機構部の総重量は約30[kg],アームの両端に取り付ける おもりの質量は,一端につき 10[kg] である.

3. 歩行制御方式

本歩行制御方式の概略は、上体補償軌道算出アルゴリズムを用いて、任意の下肢軌道および ZMP 軌道から上体補償軌道を算出し、それらの軌道を設定歩行パターンとして歩行ロボットをプログラム制御するというものである。

本方式の要である3軸モーメントに対応した上体補償 軌道算出アルゴリズムの骨子は以下の3点からなる.

I:2足歩行ロボットのモデル化

II: Iのモデルにおけるモーメントに関する方程式の 導出

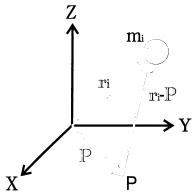
Ⅲ: Iの線形化モデルを用いた繰返し計算によりⅡを 満足する上体補償軌道の厳密解の算出

以下に、その上体補償軌道算出アルゴリズムについて述べる.

3.1 歩行系とロボットのモデル化

先に述べた問題点をふまえ、2足歩行ロボットの歩行 系に次の前提条件と座標設定を行う^{4,6,8)}.

- (1) 歩行系は質点の集合よりなる.
- (2) 路面は十分に硬く, どんな力が作用しても動か ない.
- (3) X軸 (ロボットの正面方向に一致) およびY軸 を含む平面が路面に一致し,路面に垂直な軸を Z軸とする直交座標O(右手系)を設定する.(Fig. 5)



 m_1 : mass of particle i

 $r_i \!=\! [x_i,y_i,z_i]$: position vector of particle i

 $P = [x_p, y_p, z_p]$: position vector of P $G = [g_z, g_y, y_z]$: gravitational acceleration

 $T = [T_z, T_y, T_z]$: total torque acted on P

Fig. 5 Definition of vectors for walking system

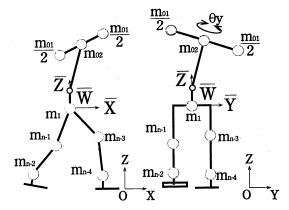


Fig. 6 Modeling of biped walking robot

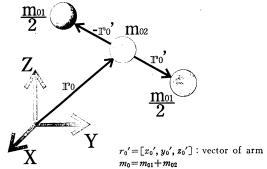


Fig. 7 Definition of vectors for trunk

- (4) 歩行系と路面との接地状況は点接地の集合とする.
- (5) 接地点において、路面での回転(X, Yおよび Z軸回り)に対する摩擦係数は無視できるほど 小さい。

また、Fig. 6 に示すように機械モデルを上体 3 質点、 下肢をn 質点系としてモデル化する.

3.2 運動方程式の導出

本研究では、歩行の安定判別に ZMP 規範を用いている 5 . また、ここで補償の対象とする 2 の中に関する 2 軸回りのモーメントとする.

先の座標設定に加え上体のアームについて **Fig. 7** に 示すベクトル r_0' を設定すると、路面上の任意の点Pに 関する運動方程式はダランベールの原理を用いて次のようになる.

$$m_{01}r_0' \times \ddot{r}_0' + \sum_{i=0}^{n} m_i(r_i - P) \times (\ddot{r}_i + G) + T = 0$$

ここで $P(x_p,y_p,z_p)$ を ZMP とし $P_{zmp}(x_{zmp},y_{zmp},z_{zmp})$ と表し、 さらに Fig. 6 のように各部の相対運動を考えるために、ロボットの腰部付近に固定された運動

座標系 $\overline{W}(\overline{X},\overline{Y},\overline{Z})$ を設定する。 絶対座標系 O に対する運動座標系 \overline{W} の原点を $Q(x_q,y_q,z_q)$ として, \overline{W} におけるピッチ軸,ロール軸,ヨー軸回りの運動方程式を上体質点の運動に関する項を未知変数の項として左辺に,下肢質点が発生するモーメントを My(t), Mx(t), Mz(t) と置き,既知変数の強制項として右辺にまとめ,上体のピッチおよびロール軸回りの運動により発生するヨー軸モーメントを $Mz_0(t)$ と置くと次の式を得る.

$$\begin{split} m_{01}(z_0'\ddot{z}_0'-x_0'\ddot{z}_0')+m_0(\bar{z}_0+z_q)(\ddot{\bar{x}}_0+\ddot{x}_q+g_x)\\ -m_0(\ddot{z}_0+\ddot{z}_q+g_z)(\bar{x}_0-\bar{x}_{zmp})=-My(t) \\ (2)\\ m_{01}(y_0'\ddot{z}_0'-z_0'\ddot{y}_0')-m_0(\bar{z}_0+z_q)(\ddot{\bar{y}}_0+\ddot{\bar{y}}_q+g_y)\\ +m_0(\ddot{z}_0+\ddot{z}_q+g_z)(\bar{y}_0-\bar{y}_{zmp})=-Mx(t) \end{split}$$

$$m_{01}(x_0'\ddot{y}_0' - y_0'\ddot{x}_0') + Mz_0(t) = -Mz(t)$$

$$Mz_0(t) = -m_0(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_q)(\bar{y}_0 - \bar{y}_{zmp})$$

$$+m_0(\ddot{y}_0 + \ddot{y}_0)(\bar{x}_0 - \bar{x}_{zmp})$$
(4)

3.3 上体補償軌道の近似解法

本項では、Fig. 6 に示す上体 3 質点系モデルを Fig. 8 配に示すように、ロボットは歩行中腰高さ一定、また、上体のアームは水平面内を回転し、上体の 3 質点は 2 軸方向に運動しないものとし、運動方程式の線形非干渉化を行い上体補償軌道の近似解を求める手法について述べる。また、2 足歩行ロボットの歩行は、水平・平坦路上における定常歩行とする.

式(2),(3) および(4) は、Z軸方向の運動を共有し、また下肢と上体は回転型の関節を介して連結している(Fig. 4) ということから非線形・干渉系である。そこでロボットは歩行中腰高さ一定、また、上体のアームは水平面内を回転し、上体質点はZ軸方向に運動しないものと仮定し、線形・非干渉化し、ヨー軸モーメントに関する式をヨー軸アクチュエータの角度 θ_V で表すと式(5)~(7)を得る。なお、Rはアームの回転半径とする。

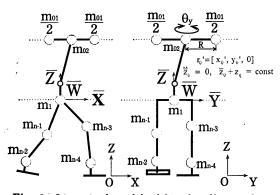


Fig. 8 Linearized model of biped walking robot

$$m_0(\bar{z}_0 + z_q)(\ddot{\bar{x}}_0 + \ddot{x}_q) - m_0 g(\bar{x}_0 - \bar{x}_{zmp}) = -My(t)$$
(5)

$$-m_0(\bar{z}_0+z_q)(\ddot{\bar{y}}_0+\ddot{y}_q)+m_0g(\bar{y}_0-\bar{y}_{zmp})=-Mx(t)$$
(6)

$$m_{01}R^2\ddot{\theta}_y = -Mz_0(t) - Mz(t)$$
 (7)

また、このとき My(t)、Mz(t)、Mz(t) は、下肢軌道 および ZMP 軌道から算出できるので既知関数となり、 $Mz_0(t)$ は、先に上体ピッチ・ロール軸軌道を求めることで既知関数となる。そして、定常歩行であることからロボットの下肢の各質点ならびに ZMP は運動座標系 \overline{W} に関して周期的な相対運動をするので、さらに My(t)、Mz(t)、Mz(t) は周期関数となる。よって、式(5)、(6) および(7)の左辺も同じく周期関数になる。そこで、式(5)、(6) および(7)の右辺をフーリエ級数展開し、また、 $\overline{x}_0, \overline{y}_0, \theta_y$ を係数未知のフーリエ級数で表し、式(5)、(6) および(7)の左辺に代入し、両辺の係数を比較することで $\overline{x}_0, \overline{y}_0, \theta_y$ のフーリエ係数を求める。そして、これを逆フーリエ級数展開することで、上体補償軌道の近似解を求めることができる。

ところで、ヨー軸軌道のフーリエ係数の中でオフセットの項は不定となる。すなわち、ピッチ、ロール軸の場合における重力項のように初期値を決定する項は存在しない。よって、そのオフセットの項に関しては、定常歩行においてアームの振り幅が一定値(可動角)内に入るように設定する。

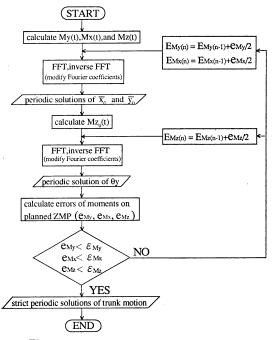


Fig. 9 Flowchart of iterative algorithm

3.4 上体補償軌道の厳密解法

2 足歩行ロボットの上体補償軌道の厳密解を算出する には、非線形で干渉のある 2 階微分方程式を解く必要が ある. このため本方程式の解を解析的に求めることは困 難である.

そこで、Fig. 9 のフローチャートに示すような繰返し計算により、上体補償軌道の厳密解を求める手法を考案した。

まず、先に述べた線形微分方程式 (式 5, 6, 7) を用いて算出した上体補償軌道の近似解を厳密モデルの式(2)、(3) および (4) に代入し、その右辺と比較することで設定 ZMP における上体の発生する モーメント 誤差 $e(e_{My},e_{Mz},e_{Mz})$ を求め、これらの誤差の符号を反転したものを式 (5)、(6) および (7) の右辺に蓄積し、再び計算を行い、この操作を誤差が許容値 $e(e_{My},e_{Mz},e_{Mz})$ 以下に収束するまで繰り返すことにより厳密解を得る.

しかし、このままでは厳密解を得るのに非常に多くの計算回数を必要とする。そこで、本アルゴリズムでは、n回目の繰返し計算に用いる蓄積したモーメント誤差 $E_n(E_{My(n)},E_{Mz(n)},E_{Mz(n)})$ を、収束の規則性を利用しその極限値を式(8)を用いて推定しながら繰返し計算

を行なうことで計算回数の短縮を図っている。なお、 $e_{(n)}$ は、n回目の繰返し計算の後に算出されるモーメント誤差を示す。

$$E_n = \frac{2E_{n-1} + e_{(n-1)}}{2}$$

$$n = 3, 4, 5, \cdots$$
(8)

where
$$E_1=0$$
, $E_2=e_1$

n回目の繰返し計算で用いる各線形微分方程式を式(9), (10) および(11) として示す.

$$m_{0}(\bar{z}_{0}+z_{q})(\ddot{\bar{x}}_{0}+\bar{x}_{q})-m_{0}g(\bar{x}_{0}-\bar{x}_{z\,m\,p})$$

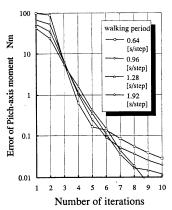
$$=-My(t)-E_{My(n)} \tag{9}$$

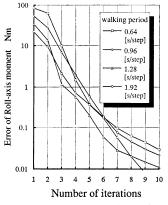
$$-m_0(\bar{z}_0 + z_q)(\ddot{y}_0 + \ddot{y}_q) + m_0 g(\bar{y}_0 - \bar{y}_{zmp})$$

$$= -Mx(t) - E_{Mx(n)}$$
(10)

$$m_{01}R^2\ddot{\theta}_y = -Mz_0(t) - Mz(t) - E_{Mz(n)}$$
 (11)

以上において、定常歩行における解法について述べてきたが、歩行開始と歩行停止を含む場合においても、その一連の歩行動作(歩行開始、定常歩行、停止)を1つの歩行周期とし、その停止期間を充分に長くとることで、同様のアルゴリズムにより上体補償軌道を求めることができる^{8,5)}. 繰返し計算の回数と各誤差の収束性の関係をFig. 10 に示す。この図より6回程の繰返し計算で各モーメント誤差は0.1[Nm] 以下に収束していることがわ





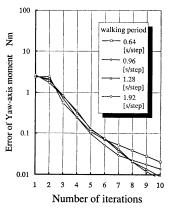
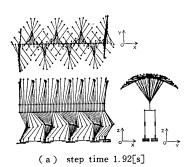
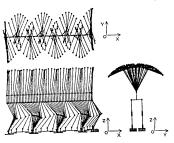


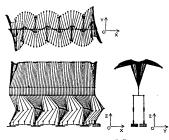
Fig. 10 Relation between error and number of iterations





(b) step time 1.28[s]

Fig. 11 Walking simulations



(c) step time 0.64[s]

かる.

4. 歩行シミュレーション

完全歩行時における歩行シミュレーションを行った結果をスティック線図にしたものを $\mathbf{Fig. 11}$ に示す。全体的に歩行が高速になるに従って、上体の運動の軌跡が小さくなっているが、これは慣性力を有効に利用して補償が行われているためであると考えられる。

5. 歩 行 実 験

水平・平坦路上において、先に述べた計算手法を用いて作成した設定歩行パターンを用いて、2足歩行ロボット WL-12RV をプログラム制御する歩行実験を行った、その結果、歩幅 0.3[m] で1 歩0.54[s]、すなわち従来モデル5)に比べ歩行速度が約 1.5 倍高速な歩行を実現した。

6. 結論

上体による3軸モーメントの補償が可能な2足歩行ロボット WL-12RV を開発し、3軸モーメントに対応した上体補償軌道算出アルゴリズムから求めた歩行パターンを用いて従来に比べ約1.5倍高速な歩行を実現した。これにより、開発した歩行制御方式ならびにシステムの有効性を確認した。

謝辞

本研究を進める過程で、2足歩行ロボットのハードウェアに関してご協力をいただいた黒田精工(株)、日本ムーグ(株)、東レ(株)、アナログ・デバイセズ(株)に感謝の意を表します。

山口仁一

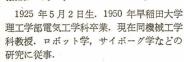


1968年2月12日生. 1991年早稲田大学 機械工学科卒業. 1991年早稲田大学大学院 理工学研究科修士課程入学. 現在同大学院 修士課程在学中. 2足歩行ロボットに関す る研究に従事. 日本機械学会,計測自動制

御学会,バイオメカニズム学会の会員.

(日本ロボット学会学生会員)

加藤一郎 (Ichiro KATO)



(日本ロボット学会名誉会員)

参考文献

- 高西,他,上体補償型2足歩行制御方式,第26回計測 自動制御学会学術講演会予稿集,p.505-506,1987.
- 2) 高西,他,上体補償機構を有する2足歩行ロボット WL-12 の開発ーシステムの開発と上体補償型動歩行の 実現一,第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集,p. 579-582,1987.
- Takanisi, A., et al., "Realization of Dynamic Walking Stabilized with Trunk Motion", Proceeding of ROMANSY 7, p. 68-79, 1988.
- 4) 高西, 他, 既知の外力下における上体補償型動歩行の実現, 第4回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, p. 15-20, 1988.
- Takanisi, A., et al., "Robot Biped Walking Stabilized With Trunk Motion", Proceeding of ARW on Robotics and Biological System, 1989
- Takanisi, A., et al., "Dynamic Biped Walking Stabilized With Optimal Trunk and Waist Motion", Proceeding of IROS '89, p. 187-192, 1989.
- 7) 高西, 他, 未知の外力下における 2 足歩行制御方式, 第 28 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, p. 431-432,
- 高西,上体の運動により ZMP を補償する2 足歩行ボット,日本機械学会第67期通常総会講演会資料集,No.900-14, Vol.D, p. 273-275, 1990.
- Takanisi, A., et al., "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagitally Uneven Surface", Proceeding of IROS '90, p. 323-329, 1990.
- 10) Takanisi, A., et al., "A Control Method for Dynamic Walking Under Unknown External Force", Proceeding of IROS '90, p. 795-801, 1990.
- 11) 高西, 他, 未知の外力下における下肢と上体の協調動作 による 2 足歩行ロボットの制御, 第 6 回生体生理工学シンポジウム論文集, p. 127-130, 1991.
- 12) 高西,他,上体運動により3軸モーメントを補償する2 足歩行ロボットの開発~高速動歩行の実現~,第6回知 能移動ロボットシンポジウム予稿集,p.1-6,1992.

高西淳夫(Atsuo TAKANISHI)

1956年4月12日生. 1985年早稲田大学 大学院理工学研究科博士課程修了. 同年同 大理工学部助手. 1988年 同専任講師を経 て, 1990年より同助教授, 2足歩行ロボッ ト, 咀嚼ロボットなどヒューマノイド関連 の研究に従事. 日本機械学会, 計測自動制

御学会、バイオメカニズム学会などの会員、工学博士・

(日本ロボット学会正会員)

