

受動歩行ロボットを連続歩行させる機構の研究

A Consecutive Walking Mechanism for Passive Walking Robots

○福田彬人 木田智晃 水戸部和久 山野光裕

○Fukuda Akihito, Kida Tomoaki, Mitobe Kazuhisa, Yamano Mitsuhiro

山形大学大学院 理工学研究科

Graduate school of Science and Engineering, Yamagata University

キーワード : 受動運動(Passive Dynamic Walking), 2 足歩行ロボット(Bipedal Robot),
バネ質点系(Spring-mass System)

連絡先 : 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16

山形大学工学部 機械システム工学科 水戸部研究室 福田彬人

Tel. : 0238-26-3238 E-mail: dwr07498@dip.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

近年 HONDA の ASIMO などに代表される人型 2 足歩行ロボットの研究開発が急速に進んでいるが、それらのロボットは膝や足首などの各関節にアクチュエータを搭載し予め計画された関節角軌道への追従制御による歩行生成が主流となっている。従来の関節角軌道追従制御を用いた歩行生成によるロボットは、歩行生成の際に特異姿勢の問題から膝を曲げたままの歩行となり、人間の滑らかな歩行との間には大きな隔たりが見られ

る。

またそれらのロボットはアクチュエータや高比率のギヤ、CPU 等により各関節を制御して歩行しているが、歩行に必要なエネルギーが人間の 10 倍程度とエネルギー効率の改善の余地が多分にあることがわかっている。¹⁾

これらの問題を解決する 1 つの方法として McGeer らの提唱した非駆動関節による歩行生成に基づいた受動歩行ロボット²⁾が注目され、半円足の転がり効果を利用した受動歩行^{3, 4)}パッシブ関節を有する二足歩行ロボッ

ト⁵⁾など様々なロボットへの応用研究が行われている。中でも小型のアクチュエータを利用してエネルギーを得て歩行するロボット¹⁾や空気圧アクチュエータを利用したロボット^{6, 7)}など受動歩行だけでは得ることのできないエネルギーを外部から供給して歩行する準受動歩行ロボットの研究が盛んに行われている。

本研究では受動歩行ロボットに外部からエネルギーを供給する機構として、バネと錘による振動機構を取付けた。バネ質点系で駆動する準受動歩行ロボットの大きな特徴としては(1)バネと錘の振動で簡便に横方向のZMPを制御できる、(2)遊脚が地面から浮く条件が簡単に得られる(3)バネ質点系の単振動と共振を利用してエネルギーを蓄積し、小さなアクチュエータで効率よく運動生成できるといった3点が挙げられる。

本稿では、バネ質点系の振動で水平面でも連続歩行ができる準受動歩行ロボットの機構、バネと錘による振動機構を用いた連続歩行実験の様子、力学的視点から考えた歩行シミュレーション、及び得られた実験データについて述べる。

2. バネ質点系で駆動する準受動歩行ロボット

Fig.2.1 に本研究で試作したバネ質点系で駆動する準受動歩行ロボットを示す。また製作したロボットの基本寸法は以下の通りである。

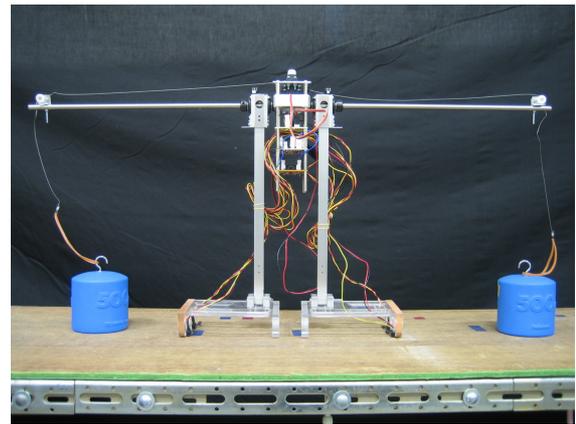


Fig.2.1 Semi-Passive bipedal robot

- 全高：400 [mm]
- 全幅：830 [mm]
- 全重量：1.2 [kg]

このロボットはバネ質点系の(1)の特徴を利用するために、腰部に横方向の自由度を持たせた。横方向の自由度は Fig.2.2 で示すように腰部を剛体のリンク機構ではなく、軸を通してのベアリングをはめているゴムブッシュが変形することによって与えている。

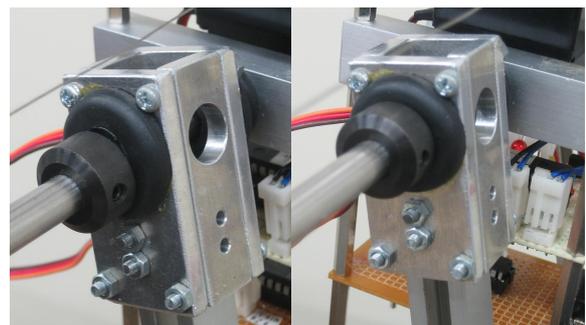


Fig.2.2 Lateral freedom joint of the waist

ロボットの足底部分は緩い円弧状の方が慣性力などをより有効に利用できる^{2,3)}ことが知られている。本研究では遊脚の振り出しがスムーズに行われる円弧の径 R600 の足裏とした。

足底には Fig.2.3 で示すように片側 2 個ずつタッチセンサを取付け、脚の接地を検出できるようにしている。

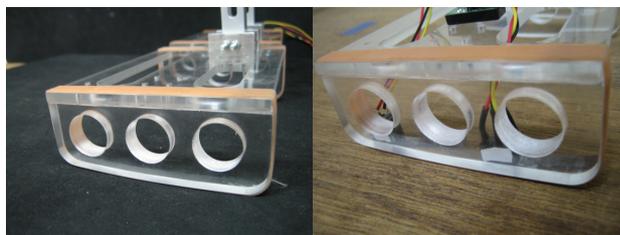


Fig.2.3 Touch sensors attached at the Sole

受動歩行ロボットでは脚が接地する際などに失われるエネルギーを外部から加えるために、腰部の軸に Fig.2.4 で示す小型ラジコンサーボモータを取付けた。またサーボモータ、ワイヤー、プーリ、バネ、錘の位置関係は Fig.2.5 で示したようになっている。サーボモータが回転するとワイヤーとその先に取り付けてあるバネを引っ張ることでバネと錘に振動を与える機構となっている。サーボモータによってワイヤーを引張り、バネと錘を振動させることで前述した(3)の特徴を最大限に利用し、水平面でも連続した歩行ができるようになった。

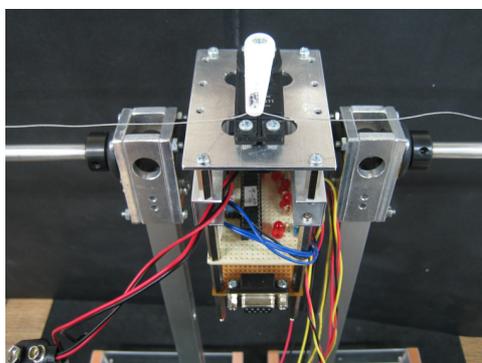


Fig.2.4 Servomotor and Control circuit

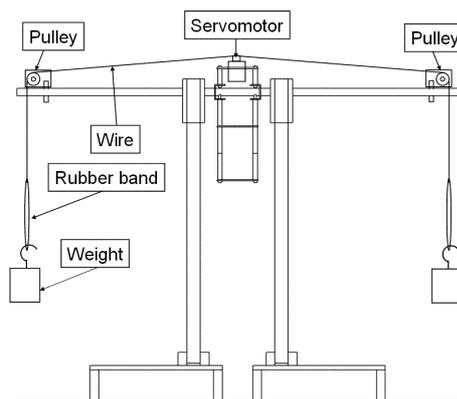


Fig.2.5 Relationship among Servomotor, Pulleys, Wires, Rubber bands and Weights

Fig.2.6 にロボット全体の信号の流れを示す。ラジコンサーボモータを制御する信号は赤外線リモートコントローラから受け取った値を PIC マイコンに送信し、その値によって与えられた回転角度指令をサーボモータに与えることで動作させている。

またロボットの足底に取り付けたタッチセンサからの接地状況の情報を PIC マイコンを通して PC に送信する。これより、定量的なデータを取得でき、後述する遊脚の浮く条件や ZMP の変位などと合わせることでより歩行の解析が進むものと考えられる。

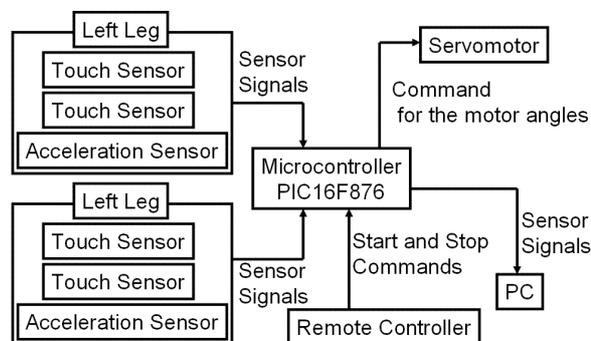


Fig.2.6 Signal flow

3. 力学的解析

3.1 ZMP シミュレーション

前節で述べたバネ質点系で駆動する準受動歩行ロボットについて、ZMP がどのように変位しているのかを考えるために Fig.3.1 で示す図のようにロボットを簡略化して考えた。

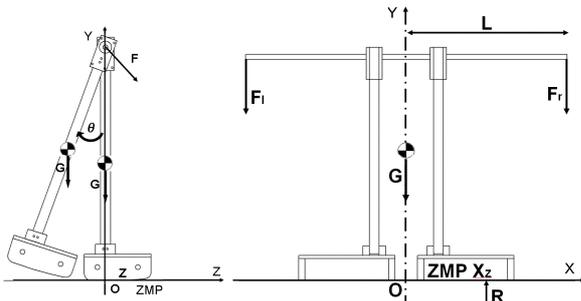


Fig.3.1 Simplified models of the robot

ZMP を考える際に、進行方向と左右方向に分けて考察した。進行方向成分については、支持脚の重心から下ろした垂線と地面との交点を原点 O ，遊脚の重心座標を x ，ZMP の座標を Z ，遊脚の質量を m ，遊脚の角度を θ ，慣性モーメントを I ，床反力を R ，重力を G ，支持脚の重心座標を X_s ，支持脚の重心にかかる重力を G_s とすると，原点まわりのロボット全体の回転運動の運動方程式

$$x \times m\ddot{x} + I\ddot{\theta} = x \times G + \overline{OZ} \times R + x_s \times G_s \quad (1)$$

また，遊脚が支持脚より受ける力を F とすると，支持脚の重心の運動方程式

$$m\ddot{x}_s = -F + R + G_s (=0) \quad (2)$$

遊脚の重心の運動方程式

$$m\ddot{x} = F + G \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ZMP まわりで慣性力と重力によるモーメントの和が } 0 \text{ となることから，式(1)(2)(3)より} \\ (x - \overline{OZ}) \times m\ddot{x} + I\ddot{\theta} - (x - \overline{OZ}) \times G \\ - (x_s - \overline{OZ}) \times G_s = 0 \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)から，ZMP 座標を求める。

左右方向の ZMP 座標 X_z は横方向への運動によるロボット各位の変位が微小で，ZMP 変位を考えるためにはアーム先端への錘からの力の変動を考慮するだけで十分と考えられるので Fig.3.2 のようなモデルとしてロボットを簡略化して考えることができる。このとき ZMP のまわりでこれらのモーメントの和が 0 になるように考えると

$$r_r \times F_r + r_l \times F_l + r_g \times G = 0 \quad (5)$$

となる。この式の Z 成分の式より左右方向の ZMP 座標が求められる。

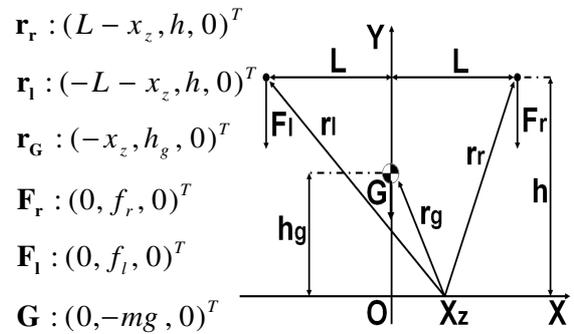


Fig.3.2 Simplified model for ZMP calculation

これらの関係に基づき数値的にシミュレーションした進行方向成分の ZMP 座標 Z_z を初期角度 θ_0 と比較したグラフが Fig.3.3 である。

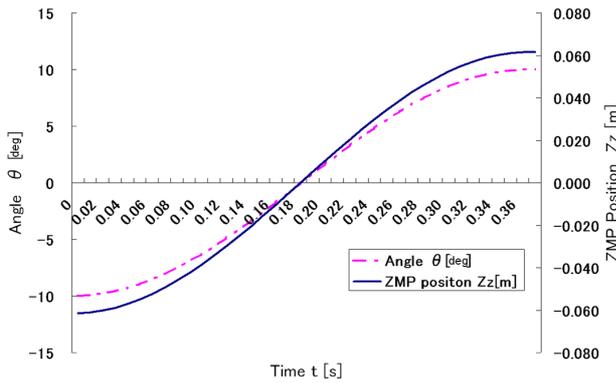


Fig.3.3 Simulated θ and Z_z

このグラフから、遊脚に初期角度 θ_0 を与え歩行させると、 θ が変化していくとそれに伴って ZMP の座標が自然に推移していくのがわかる。

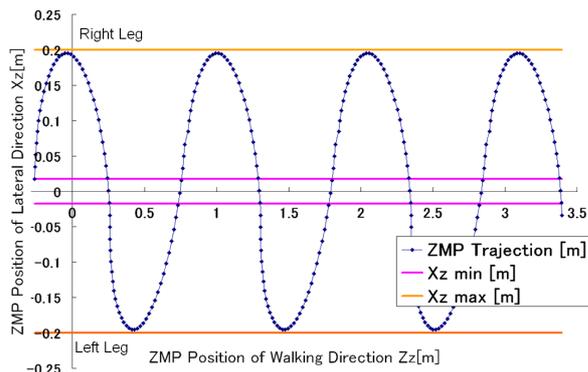


Fig.3.4 Simulated ZMP trajectory, walking direction and lateral direction

また、Fig.3.4 は受動歩行ロボットの進行方向の ZMP 座標 Z_z と左右方向の ZMP 座標 X_z を合わせたグラフである。

今回のように錘を利用して重心を左右に移動させ、遊脚を浮かせて歩行させたときの ZMP は、単振動の錘の振動のみで左右方向と進行方向への推移が自然に実現されることがわかる。

Fig.3.3 と Fig.3.4 を見ると、受動歩行ロボ

ットでは ZMP がスムーズに移動しているのがわかる。このことから非駆動関節を用いた受動歩行ロボットでも、関節角軌道を追従制御して歩行を生成しているロボットと同じように、歩行の際に ZMP を動かして歩行を行っていることがわかる。

3.2 遊脚の浮く条件

次に錘とバネによって遊脚が浮く挙動について考える。ロボットに働く力を Fig.3.5 のように考える。

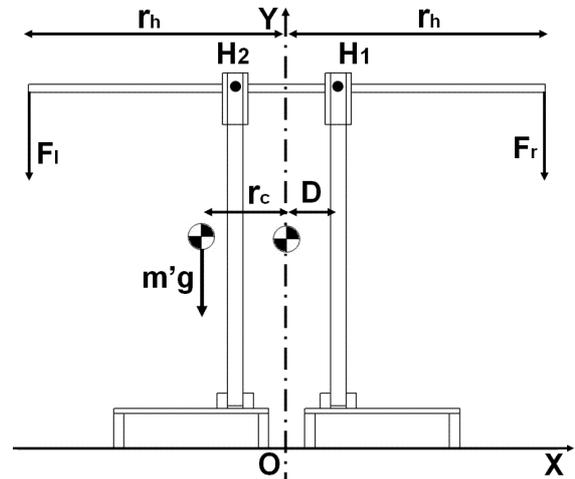


Fig.3.5 Simplified model for moment about waist joints

腰部 H1, H2 まわりのモーメントをそれぞれ考える。錘は上下方向に単振動しているものと見なせば、バネより軸にかかる力は正弦関数状に変動すると考えられる。錘の質量を m_w 、重力加速度を g とし、軸の両端にかかる力 F_l と F_r は同周期で位相が $180[\text{deg}]$ ずれていると仮定すると F_l と F_r の間の力の関係は

$$F_r = 2m_w g - F_l \quad (6)$$

となる。このとき支持脚として考慮してい

る脚を除く全質量を m' , その重心までの全体の重心を r_c , ロボットの中心から支持脚までの距離を D とすると, 腰部 H1, H2 にはたらくモーメント M_1, M_2 は

$$M_1 = (r_h + D)F_l - (r_h - D)F_r + (r_c + D)m'g \quad (7)$$

$$M_2 = (r_h - D)F_l - (r_h + D)F_r - (r_c + D)m'g \quad (8)$$

また(7)(8)式に(6)式を代入し,

$$F_l = m_w g + A \sin \omega t \text{ とおくと}$$

$$M_1 = 2r_h A \sin \omega t + 2Dm_w g + (r_c + D)m'g \quad (9)$$

$$M_2 = 2r_h A \sin \omega t - 2Dm_w g - (r_c + D)m'g \quad (10)$$

となる. (9)(10)式と(6)式をグラフ化したものを Fig.3.6 に示す.

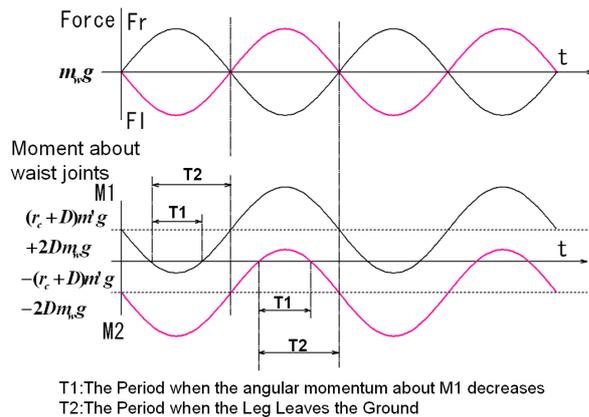


Fig.3.6 Simulated F_r, F_l and moment about waist joints

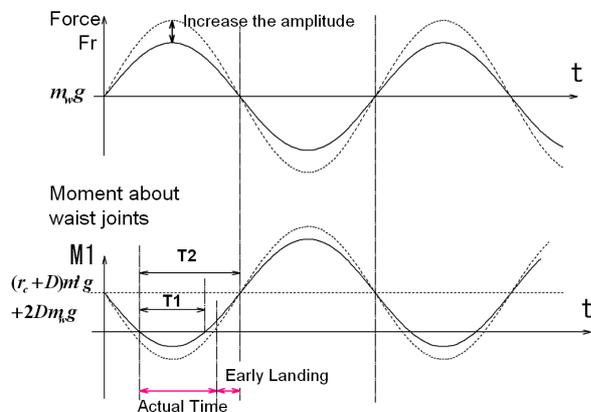


Fig.3.7 Force amplitude and the moment about waist joints

Fig.3.6 のグラフでは力 F_r と F_l が周期的に変化すると腰部 H1, H2 に働くモーメントが同じように周期的に変化していく様子がわかる. また, 腰部 H1 に働くモーメント M_1 が 0 になったときに遊脚が浮き始めるとすると Fig.3.6 のようにモーメント M_1 が負から正に転じたときに, H1 点まわりの角運動量は減少方向から増大方向へ変化し, 遊脚が着地する方向への運動となる.

また足底に取付けられたタッチセンサからの得られた接地情報から, Fig.3.7 のように実際に遊脚が接地する時間がシミュレーションで求められた接地時間よりも早い場合には, 両端にかかる F_r, F_l の力の振幅を大きくすることで遊脚が浮いている時間を長くし, 遊脚の接地する時間をシミュレーションで得られた安定して歩行ができる理想の時間に近づけるようにできると考えられる.

以上のことから, 足底に取付けたタッチセンサで遊脚が接地する時間を検出することで, その情報を定常歩行の安定な維持や, 歩行速度の変更へ利用できると考えられる. これらの情報をロボットにフィードバックすることで準受動歩行ロボットに様々な歩行を行わせることができると考えられる.

4. 歩行実験

前述したロボットを、実際に小型ラジコンサーボモータを駆動させ歩行実験を行った。Fig.4.1 に実験の様子を示す。なお実験条件は以下のようにする。

- ・ サーボモータからゴムまでのワイヤー長さ : 0.5 [m]
- ・ 錘の質量 : 0.5 [kg]
- ・ ゴムのバネ定数 : 29.1 [N/m]
- ・ 固有振動数 : 約 1.05 [Hz]
- ・ 静止時のロボット全体の前傾角 : 2 [deg]

サーボモータを用いて錘の加振を始め 1.5[s]に遊脚が浮き、歩行状態に入った。今回の実験では長さ約 1.5 [m]の実験台を転倒することなく歩行できた。そして足底に取付けたタッチセンサからの情報を PC に送信することで、遊脚の接地の様子を知ることができた。

次にサーボモータの回転する振幅と周期を変化させて歩行実験を行ったところ、サーボモータを 1.0 [s]周期で動かしたときにワイヤーに取付けたゴムが共振し、遊脚が浮き歩行することがわかった。これは 0.5 [kg]の錘を取付けたときのゴムの固有振動数と近くなるために、ゴムが共振しサーボモータの小さな力でも遊脚が浮いたためと考えられる。

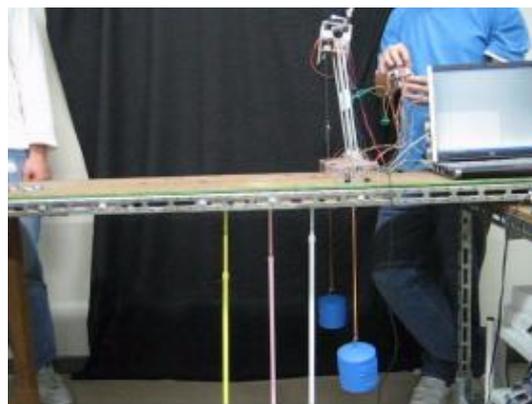


Fig.4.1 Experimental walking of the robot

サーボモータの振幅を 60° , 周期 1.0[s]で歩行実験を行った時の足底のタッチセンサから取得した脚の接地状況と、加速度センサから取得した脚の相対振り角度を Fig.4.2 に示す。

Fig.4.2 のグラフでは、タッチセンサの情報は左足が接地した場合を 10, 右足が接地した場合を-10, 両足が接地した場合を 0 としている。加速度センサのグラフは脚の振り角度は正の時に右足が振っていて、負の時に左足が振っていることを示している。

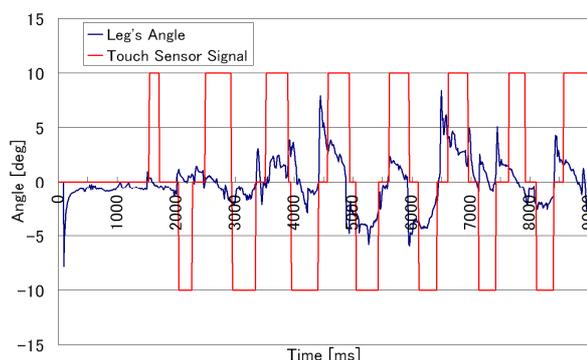


Fig.4.2 Movement of Legs, Stable Walk

Fig.4.2 を見ると、実験開始してサーボモータによってバネに振動のエネルギーが蓄えられた後に、脚の接地状況の情報から遊脚

が離れてロボットが歩き始めることがわかる。その後、遊脚の振り角度と支持脚の接地周期が同期し、定常歩行になる様子がわかる。また Fig.4.2 を見ると、支持脚が切替わった後に遊脚側の脚の角度が変化している様子がわかる。このことからタッチセンサと加速度センサを用いることでロボットの歩行の様子を取得できることがわかった。

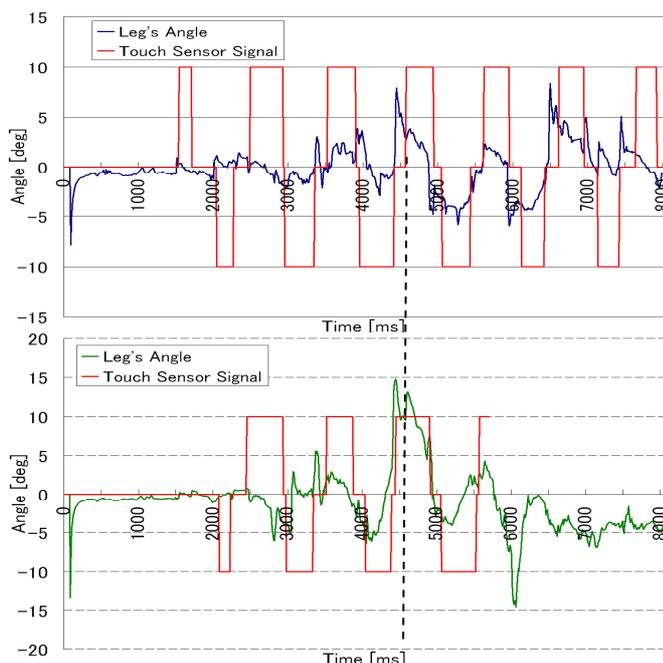


Fig.4.3 Movement of Legs, Stable walk (over) and Tumble (under)

安定して歩行を行っているときと脚が躓いてロボットが転倒してしまったときの脚の振り角度と接地状態を Fig.4.3 に示す。

Fig.4.3 を見ると 4.0[s]程度まではどちらの状態でも脚は同じような動きをしているが、4.5[s]付近では転倒した歩行のときの両脚支持期の時間が、安定して歩行を行っているときと比べると若干短くなっていることがわかる。両脚支持期の時間が短くなったことからロボットの接地のバランスが崩れて

しまったと考えられる。また接地のバランスが崩れたために脚の振り角度が非常に大きくなってしまい、歩行のバランスが崩れて転倒してしまったと考えられる。

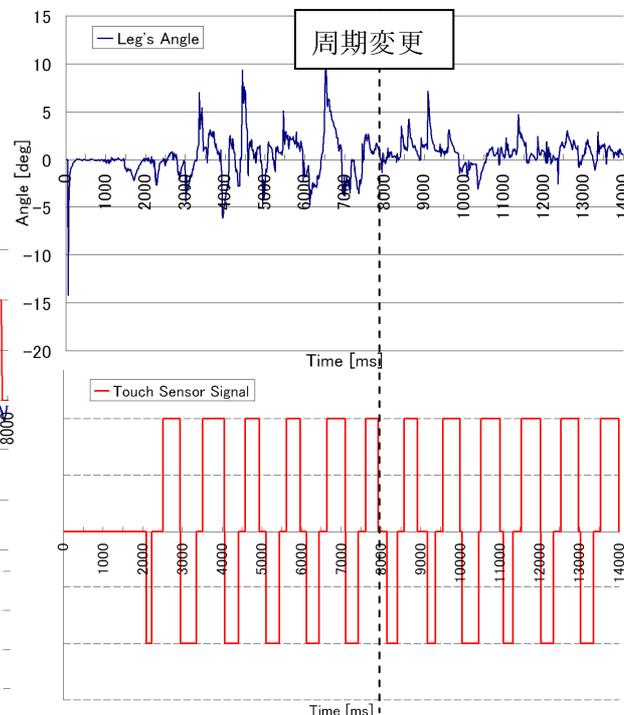


Fig.4.4 Movement of Legs, when changing the amplitude of the servo-motor

次に歩行中にサーボの振幅を 60° から 30° に変更し、錘の振幅を変更したときの遊脚の挙動がどの様に変化するかを調べる実験を行った。Fig.4.4 に実験開始後 8.0[s]のときにサーボの振幅が 60° から 30° に変化させたときのタッチセンサと加速度センサからの情報を示す。サーボの振幅が変化した 8.0[s]の後も遊脚が接地する周期には大きな変化が見られないことがわかる。しかし、脚の振り角度を見ると 8.0[s]で振幅が変化したあとの遊脚の振り角度が小さくなっている。このことから錘の振幅はロボットの歩行周期には大きく影響しないが、ロボットの歩幅

が変化することがわかった。従って錘の振幅を変化させることによってロボットの歩行速度を変化させることができると考えられる。

5. おわりに

本研究ではバネ質点系を利用した準受動歩行について小型アクチュエータにより外部から少量のエネルギーをロボットに供給することで継続的に歩行できる機構を開発した。

歩行実験では、腰部から長く伸ばした軸の先に取付けたゴムを小型ラジコンサーボモータで共振させ、遊脚を浮かせて歩行させることができた。錘の振幅を変えた歩行実験では錘の振幅を変化させても、脚が接地するタイミングは大きく変化しないことがわかった。しかし同時にサーボの振幅を変化させることでロボットの歩幅を変化させることができ、歩行速度を変えられる可能性も示した。

力学的解析では、ロボットを単純化し ZMP と腰部に働くモーメントによって脚の浮く条件について考察を行い、横方向の ZMP の変位と錘の振動の関係と遊脚が浮く条件を錘の振動により表した。

今後は条件を変えて様々な歩行実験を行い、力学解析の結果を実際の歩行に利用できるように更に検証を続けていく必要があると考えられる。

6. 参考文献

- 1) Steven Hartley Collins, Andy Ruina : “A Bipedal Walking Robot with Efficient and Human-Like Gait”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2005, pp 1983-1988
- 2) Tad McGeer : “Passive Dynamic Walking”, The international Journal of Robotics Research Vol.9, No.2, April 1990, pp62-82
- 3) 浅野 文彦, 羅 志偉 : “半円足の転がり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行 — (I) コンパス型モデルの駆動力学—”, 日本ロボット学会誌, Vol 25, No.4,2007, pp566-577
- 4) 浅野 文彦, 羅 志偉 : “半円足の転がり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行 — (II) 性能解析と冗長モデルへの拡張—”, 日本ロボット学会誌, Vol 25, No.4, 2007, pp578-588
- 5) 杉山 広祐, 小金澤 鋼一 : “パッシブ関節を有する二足歩行ロボットの ZMP 規範制御”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 2006
- 6) 細田 耕 : “動特性を利用した空気圧拮抗駆動二足歩行”, システム/制御/情報, Vol.49, No.10, 2005, pp411-416
- 7) 佐藤 裕亮, 米田完 : “自励運動型2足歩行ロボットの機構と制御に関する実験的研究”, 日本ロボット学会学術講演会, 2006 年 9 月