凹凸を含んだ路面上における
小型ヒューマノイドロボットの歩行の安定化*田尻智紀^{*1}, 大神麗^{*2}, 杉本和矢^{*3}
高田洋吾^{*1}, 脇坂知行^{*4}

Stabilization of Walking on Uneven Road for a Small Humanoid Robot

Tomoki TAJIRI, Rei OGAMI, Kazuya SUGIMOTO,
Yogo TAKADA^{*5} and Tomoyuki WAKISAKA^{*5} Graduate School of Engineering, Osaka City University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka, 558-8585 Japan

Recently, humanoid robots have widely researched, and they have become possible to be controlled robots with complicated kinetic characteristics. However, in the cases that the robot walks on an unknown undulating road or receives disturbances such as collision with an object from the outside, the robot loses stability and falls even if the inverted pendulum model is used. In this paper, an impedance control of a swing leg and a PI control of the rotation of a humanoid robot's waist are used to stabilize the dynamic walk on the unknown undulating road. For an impedance control, force sensors on the soles of the humanoid robot are used to measure the torque and force of a swing leg that collide with the unknown undulating road. An angular velocity sensor and acceleration sensor in the body of the humanoid robot are used to measure the rotation of the waist and its error signal are used for the PI control of humanoid robot motion. As a result, it has been confirmed that the humanoid robot can walk on an unknown undulating road with proposed walking method.

Key Words: Legged Locomotion, Humanoid, Robot, Sensor, Digital Control, Impedance Control, Linear Inverted Pendulum

1. 緒言

少子高齢化が進む現在において、老人のための生活支援や介護のための労働力の不足が大きな問題となってきた。その労働力の不足を補うためにロボット技術を福祉分野へ適用する研究が注目されている。その中でも、ヒューマノイドロボットは、形状が人に似ていること、さらに車輪等と異なり移動時に地面との接触点を不連続に取ることができる等の特徴がある。それらの特徴から、ヒューマノイドロボットには、人の生活環境下でそのまま活動でき、人の使う道具をそのまま利用できる、人が親近感を感じやすい、段差や凹凸といった車輪という移動形態では対処することができない環境に対処することができる、といった利点があり、我々が日常で生活している環境で活動するロボットとして極めて有効である。しかし、安定な2足歩行による移動を行うためには、転倒しないように床面と足との不連続な接触を制御し、安定なロボットの姿勢を維持する必要がある。

ヒューマノイドロボットの2足歩行について、近年今まで様々な手法が考案されており⁽¹⁾、複雑なダイナミクスを持つヒューマノイドロボットの歩行パターン生成が可能になってきている。段差の高さの情報があらかじめ得られている既知の床面においては、ヒューマノイドロボットを単純な一質点系の倒立振子モデルで近似する線形倒立振子モード⁽¹⁾や、ZMP 予見軌道を規範とした台車モデル⁽¹⁾⁽²⁾などの手法を用いることで安定な動歩行が実現されている。しかし、実環境で歩行させる際に床面の情報をあらかじめ取得しておきロボットに随時与えるということは困難である。歩行中、センサを用いて路面の形状を測定するといった研究例⁽³⁾も存在する。しかし、高精度なセンシング機能を持つセンサの搭載が必要である。

ロボットが歩行する路面は、平坦とは限らず、ほとんどの場合小さな凹凸やゆるやかな傾斜を含んでいる。しかし、これらの微細な情報全てを予めロボットに記録しておくことは不可能に近い。本研究では、ヒューマノイドロボットとして富士通オートメーション株式会社製のHOAP-1を対象に、未知凹凸を含む床面上において、安定な歩行動作の実現を試みた。実現方法としては、まず、ロボットを歩かせるために必要な各関節データである歩行パターンを、線形倒立振子モードを用い

* 原稿受付 2010年6月17日。

^{*1} 正員, 大阪市立大学大学院工学研究科(☎558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)。^{*2} 大阪市立大学大学院工学研究科。^{*3} 学生員, 大阪市立大学大学院工学研究科。^{*4} 正員, フェロー, 大阪市立大学大学院工学研究科。

E-mail: d10ta001@ex.media.osaka-cu.ac.jp

て生成する。そして、足部の位置や姿勢の、足裏に取り付けられている感圧センサの出力信号を使った位置型インピーダンス制御を行うことで、床面の未知凹凸に対する緩衝材としての役割を足部に持たせた。更に、姿勢が傾いてしまった時、その傾きを修正するために、ジャイロセンサ・加速度センサの出力信号を使って、ロボットの上体の姿勢制御を行った。これらの方法をロボットの制御に適用し、物理シミュレータと実際のロボットを用いて、未知凹凸を含んだ路面上で安定な歩行を行うことができるか検証した。

2. ヒューマノイドロボットの構成

Fig.1 HOAP-1

Fig.2 Model of robot

Table 1 Parameters of each link

	Length (m)	Mass (kg)
Leg link 1	L_1 : 0.039	0.04
Leg link 2	L_2 : 0.10	0.46
Leg link 3	L_3 : 0.10	0.46
Leg link 4	L_4 : 0.037	0.14

本研究で用いた実験用 2 足歩行ロボット HOAP-1 の外観を図 1 に示す。HOAP-1 は、身長 483 mm、体重 5.9 kg の小型ヒューマノイドロボットであり、上体部に 8 自由度、脚部に 12 自由度で全体では 20 自由度を有する。脚部の各関節の配置を図 2 に示す。本研究では、歩行動作の制御に関しては脚部の 12 個のモータのみ使用しているので、上体部を省略した。腰部では 3 軸が、足首部では 2 軸がそれぞれ 1 点で交わる構造をしており、各リンクのパラメータについては表 1 に示す。腰部には 3 軸の加速度センサと 3 軸のジャイロセンサが、左右の足裏にはそれぞれ圧力に応じて抵抗値が変化する 4 つの感圧センサが取り付けられている。

3. 安定化制御系

3.1 遊脚部の位置型インピーダンス制御

図 3 のように未知凹凸に遊脚が接触した場合、計画されていた歩行パターンと現実の接触時状況との差から衝撃力による外乱が発生してしまい、その外乱により姿勢を崩してしまう。

Fig.3 Walking on a road with unknown step

ロボット制御の分野において、周囲の環境とロボットの接触状態を制御する手法としてインピーダンス制御がよく用いられており、ヒューマノイドロボットの分野においてもいくつかの利用例⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾があげられる。本研究では、ロボットの足裏に取り付けられている感圧センサを利用した位置型インピーダンス制御を行うことで、遊脚先端に加わる予期せぬ衝撃に対し、遊脚先端の位置と角度を修正し、動的な柔軟性を持たせている。

インピーダンス制御は、制御の対象とする部分に慣性、剛性、減衰係数の 3 つの仮想的なインピーダンス特性を与えて、センサなどを用いて取得した外力から位置の変位を運動方程式より導き、ロボットを動作させることで、対象とする部分にバネやダンパのような機構を仮想的にもたせることができる。本研究で用いたロボットの足裏には、左右それぞれ 4 つの感圧センサが取り付けられており、その配置は図 4 のようになっている。また、図 4 中の各パラメータを表 2 に示す。

Fig.4 Arrangement of sensors

Table 2 Parameters of the arrangement

	Length (m)
l_1	0.017
l_2	0.017
l_3	0.042
l_4	0.028

4つの感圧センサ(Force resister sensor 1~4)はそれぞれ z 方向の力のみが検出できるので、各センサにより測定した力をそれぞれ f_1, f_2, f_3, f_4 とすると、式(1)より x 軸回り、 y 軸回りの回転トルク τ_x, τ_y と、 z 軸方向の力 f_z を求めることができる。

$$\begin{aligned} f_z &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \\ \tau_x &= (f_1 l_1 + f_2 l_1) - (f_3 l_2 + f_4 l_2) \\ \tau_y &= (f_1 l_3 + f_2 l_3) - (f_3 l_4 + f_4 l_4) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)より、遊脚先端部にかかる力とトルクが得られるので、図5に示すような仮想的なバネ・ダンパ機構を実現するための遊脚先端部の運動は、仮想慣性量を M_{imp} (対角行列: $\text{diag}(J_x, J_y, M_z)$), 仮想粘性係数を C_{imp} ($\text{diag}(C_x, C_y, C_z)$), 仮想剛性定数を K_{imp} ($\text{diag}(K_x, K_y, K_z)$), 外力を $F = \begin{bmatrix} \tau_x & \tau_y & f_z \end{bmatrix}^T$, 遊脚先端部分の位置と回転を $p_{\text{leg}} = \begin{bmatrix} \theta_x & \theta_y & p_z \end{bmatrix}^T$ とすると式(2)で与えられる。ただし、 θ_x, θ_y はそれぞれ x 軸・ y 軸回りの回転角度を、 p_z は z 軸方向の変位距離を表す。また、 θ_x, θ_y, p_z のそれぞれについて、図2で示す直立状態を原点とし、図5の矢印方向を正と定義している。

Fig.5 Model of impedance control

$$F = M_{\text{imp}} \ddot{p}_{\text{leg}} + C_{\text{imp}} \dot{p}_{\text{leg}} + K_{\text{imp}} p_{\text{leg}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A &= K_x + C_x / \Delta t + J_x / \Delta t^2 \\ \theta_x^n &= \frac{\tau_x + K_x \theta_x^0}{A} + \frac{C_x \theta_x^{n-1}}{A \Delta t} + \frac{J_x (2\theta_x^{n-1} - \theta_x^{n-2})}{A \Delta t^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)より、インピーダンス制御による遊脚先端部の x 軸回りの制御量は式(3)で与えられる。ただし、 θ_x^0 は初期値(遊脚が接触した瞬間の値)、 θ_x^n は現在値、 θ_x^{n-1} は1制御周期前の値を、 θ_x^{n-2} は2制

御周期前の値をそれぞれ表す。 y 軸回転方向、 z 軸方向についても同様に制御することで、遊脚先端部分の位置と回転角度の制御を行う。

インピーダンス制御を行い、遊脚先端部が接触した床面から受ける衝撃力およびトルク F が小さくなるように制御することで、遊脚先端部が床面に接触した時に生じる衝撃力 F 等が緩和されて、足底が床面に倣うようにした。表3のパラメータを用いて、段差 20 mm の上に遊脚を接触させる動作を行わせた時の、ロボットの腰部から足先までの長さの時間変化とその時の足裏に加わっている z 方向の力の時間変化の様子を、図6に示す。ただし、この動作では、 z 軸方向のみインピーダンス制御を適用し、その効果を検証した。

Table 3 Parameters used in impedance control

	Value
M_z	1.4 kg
C_z	70.0 Ns/m
K_z	100.0 N/m

Fig.6 Time behaviors of force measured with force sensors and position change p_z in impedance control

図6に示すように、遊脚先端部に圧力が加わるにつれて遊脚の z 方向の位置 p_z が変化していることが判る。このことから、未知段差で遊脚の z 方向の着地位置が修正されていることが確認できる。

3.2 上体部の姿勢制御 本研究では、歩行ロボットの安定な歩行のために、歩行中は上体の鉛直姿勢を基本の姿勢とした。しかし、図7のように床面の小さな傾斜によって上体部が傾いてしまうと、ZMPが足部の安定領域からはみ出してしまう。そこで、上体を極力路面と垂直にするために、姿勢が傾いた時に、その傾きをジャイロセンサと加速度センサによって計測し、計測した傾きの値が足首部のモータを回転させることで小さくなるように制御して、歩行中の姿勢の安定化を試みた。

Fig.7 Walking on a road with slopes

$$\theta_{\text{ref}}^{\text{leg}} = K_P \left\{ (\theta_{\text{gyro}} - \theta_{\text{target}}^{\text{body}}) + \frac{1}{T_I} \sum (\theta_{\text{gyro}} - \theta_{\text{target}}^{\text{body}}) dt \right\} \quad (4)$$

$$\theta_{\text{gyro}} = \sum \omega_{\text{gyro}} dt \quad (5)$$

$$\theta_{\text{target}}^{\text{body}} = \left[\tan^{-1}(a_z/a_x) \quad \tan^{-1}(a_z/a_y) \right]^T \quad (6)$$

具体的にはまず、ロボットの腰部に取り付けられているジャイロセンサの出力を積分することで、現在のロボット上体部の傾き θ_{gyro} を求める。そして、上体部の傾きと目標とする姿勢の角度の差をもとに足首部の関節のサーボモータを動作させることで、上体を水平に対して垂直に保つようにした。この時、目標とする姿勢(上体部傾き $\theta_{\text{target}}^{\text{body}}$)は、ロボットの腰部に取り付けられている加速度センサの出力を用いて求められた現在の重力方向とした。この重力方向にはロボット自身の加速度の影響が含まれる。そのため、ロボットが進行方向に加速している間、加速度センサはその運動加速度の影響を受け、結果としてロボットの上体は鉛直姿勢ではなく進行方向にやや傾くように制御される。このように、人が加速走行時に上体を意図的に進行方向へ傾けるのと同様に、歩行ロボットも歩行の速度上昇に伴って、その分上体を傾けるように制御される。このように、ロボットが後ろに転倒することを防ぎ、よりロボットの運動を安定化できるよう制御されている。ジャイロセンサ、加速度センサを用いた PI 制御については式(4)を用いた。なお、式中の θ_{gyro} はロボットの上体部の傾きで式(5)から、 $\theta_{\text{target}}^{\text{body}}$ は目標となる上体部の傾きであり、式(6)から求められる。式(5)で必要となるロボットの初期姿勢角に関しては、比較的平らな床面にロボットを固定し、その時の加速度センサの出力を式(6)に代入して求める。式(4)で示す PI 制御器で、 θ_{gyro} が式(6)から得られる $\theta_{\text{target}}^{\text{body}}$ となるように制御する。ただし、 K_P 、 T_I は PI 制御のパラメータ、 ω_{gyro} はジャイロセンサの出力から得られた腰部の角速度、 a_x 、 a_y 、 a_z は加速度センサの出力から得られた軸方向の加速度をそれぞれ表す。

y 軸回りの方向に 2.0 deg (0.035 rad) 傾いた斜面を歩行させた時の、ジャイロセンサの出力を積分して得られた上体部の傾きを図 8 に示す。ただし、

図 8(a)は、PI 制御によるフィードバックなしで傾斜を歩行させた場合について、図 8(b)は、上述した PI 制御により、足首のモータを操作して現在のロボットの上部の傾きを修正した場合について、示している。ともに 0.5 秒後から歩行を開始し、2.0 秒後に傾斜を上り始めている。

(a) Without PI controller (b) With PI controller

Fig.8 Angle of the waist

図 8 より、制御ありと制御なしを比較すると、制御ありでは床面の傾斜により傾いていた y 軸回りの姿勢の角度が、改善されていることが確認できた。制御なしのとき、 θ_y の平均値 0.02 rad、分散値 0.024 rad であったのが制御ありとしたとき、平均値 0.009 rad、分散値 0.017 rad となって改善した。x 軸回りの傾きに関しては、あまり改善が確認できなかった。これは、x 軸回りの姿勢の制御に用いているジャイロセンサの信号の平滑化が原因であると考えられる。シミュレーションで足と床が接触する時、力、加速度、角速度といった物理量が大きく振動する。そのままの信号をフィードバック信号として用いられないため、データの平滑化を行っているが、平滑化による信号の時間的遅延により、制御系がやや不安定になっている。

4. 凹凸を含んだ路面上での歩行動作

4.1 倒立振子モードによる歩行パターンの生成

Fig.9 Liner inverse pendulum model (LIPM)

本研究で用いた歩行パターン生成には、梶田らにより考案された線形倒立振子モード⁽¹⁾を用いた。線形倒立振子モードとは、図 9 のようにロボットを単一質点系とみなし、倒立振子の質点の運動方程式を解くことで、安定な歩行運動をするために必要なロボットの重心の軌道を導き出す手法である。図 9 の蹴り力 f を調整することで、重心の落

下を防ぎ、重心を任意の高さ(z_c)に固定することができる。線形倒立振子モードでは、歩行の周期、支持脚の接地位置をあらかじめ設定することで、歩行動作に必要な重心の軌道を求めることができる。本研究では、支持脚の接地位置に関しては、絶対座標空間での座標ではなく図 10 のように現在の支持脚の位置から次の支持脚の位置までの偏差を指定し、式(7)、(8)を用いて足が地面に接触するたびに次の設置場所を計算している。ただし、 $(p_x^{(i)}, p_y^{(i)})$ は*i*歩目の支持脚の接地位置を表す。

Fig.10 Parameters used in LIPM

$$p_x^{(i+1)} = p_x^{(i)} + S_x \quad (7)$$

$$p_y^{(i+1)} = p_y^{(i)} + (-1)^i S_y \quad (8)$$

人の歩行動作は片足支持期間と両足支持期間の二つに分けることができるが、線形倒立振子モードは片足支持期間のみの軌道計画法であるため、両足支持期間中は異なる重心の軌道計画を考える必要がある。本研究では、両足支持期間中は、両足支持期間の開始時と終了時の重心の位置、速度、加速度をもとに、それらが連続になるように時間の5次関数で補間した。図 11 は支持脚交換時の様子をロボットの上方から見た図である。

Fig.11 Two legged supporting period

$$x(t) = a_0 t^5 + a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t + a_5 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^5 & t_0^4 & t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^5 & t_1^4 & t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 5t_0^4 & 4t_0^3 & 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 5t_1^4 & 4t_1^3 & 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \\ 20t_0^3 & 12t_0^2 & 6t_0 & 2 & 0 & 0 \\ 20t_1^3 & 12t_1^2 & 6t_1 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

あらかじめ両足支持期間の位置と周期を決めておき、両足支持期間中の重心の軌道 $x(t)$ を、式(9)のように多項式で補間した。式(9)中の $a_0 \sim a_5$ の係数は、式(10)によって求められる。また、重心の y 軸方向の軌道 $y(t)$ に関しても同じように補間した。

左右の遊脚については、式(11)を用いて軌道を生成している。現在接地中の脚が、計画されている次の接地場所へと移動する時に、最大高さ h 、歩幅 S_x 、片足支持時間 T_{one} を指定することで、遊脚の移動開始時に毎回軌道計算を行う。式(11)を用いることで、動作開始時と終了時の遊脚の加速度が緩やかな、図 12 で示すような足の動きをつくることができる。

$$\begin{aligned} x(t) &= x_1 + \frac{S_x}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{T_{\text{one}}} \right) \\ z(t) &= \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T_{\text{one}}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Fig.12 Motion of the swing leg

4.2 シミュレーションにおける凹凸面を考慮した歩行動作の生成

前節で述べた歩行パターンを、実際のロボットに適用することで2足歩行を実現することができる。しかし、そのためには指令値どおりに動作するアクチュエータ系を用いること、各リンクの剛性が高いロボットを用いること、完全に平らな床面上を歩くことなどが条件となる。実際の環境では、平坦に見える床面であっても数ミリ程度の微小な凹凸が多数存在し、その凹凸により発生する歩行中のわずかな振動でロボットは転倒してしまう。そこで、前節で述べた安定化制御系を用いて、歩行パターンを修正する。図 13 に歩行動作の制御の概要を示す。歩行パターン生成器によりロボットの重心の軌道 p^{cog} と、遊脚の軌道 $p_{\text{ref}}^{\text{leg}}$ を生成し、遊脚の軌道の方はインピーダンス制御により修正し $p_{\text{target}}^{\text{leg}}$ となる。その後、逆運動学により全関節の角度 θ_{ref} に変換し、PI 制御器からの出力 $\theta_{\text{ref}}^{\text{leg}}$ を加えた θ_{target} が全関節のモータへの指令値となる。

これらの歩行パターン生成および安定化制御系

Fig.13 Entire control system of HOAP-1

Table 4 Parameters of LIPM

	Value
T_{one}	0.3 s
T_{two}	0.2 s
S_x	0.06 m
S_y	0.04 m
h	0.02 m
Z_c	0.13 m

Table 5 Parameters used in controller

	Value
J_x, J_y	1.0 kgm ²
M_z	1.0 kg
K_x, K_y	100.0 Nm/rad
K_z	1.0 N/m
C_x, C_y	70.0 Nms/rad
C_z	10.0 Ns/m
K_p	2.5 s ⁻¹
T_i	0.8 s

Fig.14 Unknown modulating road for simulation

を用いて、シミュレーション上で未知凹凸を含む路面での歩行実験を行った。シミュレータには、産業技術総合研究所、東京大学および製造科学技術センターによって開発されたヒューノイドロボティクスのための総合ソフトウェア開発環境である OpenHRP⁽⁸⁾を用いた。シミュレータの時間刻みは 1 msec，ロボットの制御周期は 5 msec，その他のパラメータについては表 4 および表 5 に示す。シミュレーションで用いた路面の未知凹凸に関する寸法について図 14 に示す。図 15 に歩行時の重心の軌道，図 16 に遊脚先端部の軌道のシミュレーション結果をワールド座標系で示す。図 16 よ

Fig.15 Trajectory of COG

Fig.16 Trajectory of legs

Fig.17 Snapshots of the walking motion of HOAP1

り、歩行中に、遊脚先端部の位置が未知段差に合わせて適切に修正されているのが判る。シミュレーションによる歩行動作中の様子を、0.3 sec 毎のスナップショットにして図 17 に示す。図 17(e)で、左足から高さ 5 mm の段差に乗り上げ、その後未知段差上を歩行していることが確認できる。また、図 16 では、右足の軌道が、 x が 0.25 m 付近で乱れているのが確認できる。これは、安定化制御系が高さ 6 mm の未知段差からの衝撃をうまく緩和できていないためと考えられる。平坦路における地面の凹凸は、ほとんどが 6 mm 以下であるといえるので、実環境での歩行制御に十分効果的である。

5. 実機での検証

本節では、実際のロボットを対象として、前節で述べた歩行運動の制御方法を適用した実験結果を示す。

制御周期はシミュレーションのときと同じ 5 msec とし、その他の制御パラメータについては表 6 に示す。制御パラメータは、シミュレーションで用いたパラメータよりも大きな値を用いている。これは、シミュレーション環境では物体が外力によって変形することが考慮されていないため、接触時の衝撃力の立ち上がりが実環境よりも大きく、パラメータの値を小さくする必要があったためである。倒立振子モードのパラメータについてはシミュレーションと同じ値を用いた。また、未知段差については、厚さ 4 mm と 6 mm のアクリル板を図 18 のように配置した。実機での実験結果について、歩行時の重心の軌道を図 19 に、遊脚先端部から腰までの長さの時間変化を図 20 に示す。図 20 において、遊脚先端部から腰までの距離が 0.14 m から 0.18 m までの範囲で変化していることが判るが、一定周期ごとに特に大きく変化している部分は、ロボットが遊脚を上げ下げしている動作である。そして、遊脚を下げ、接触を認識した時（図 20 の a~d）の p_z の値が変化していることが確認できる。また、実機での歩行の様子を示す。0.12 sec 毎のスナップショットを、図 21 に示す。図 21(a) で、右足が 6 mm、左足が 4 mm の未知段差上に乗っており、次に、(d) で右足が左足と同じ 4 mm の段差に乗る上げ、その後歩行を継続している。

また、歩行開始時や停止時など、急な加速度が発生する時に姿勢が不安定になることを確認できた。両足支持期間中の重心軌道の生成法が、加速度に制限を設けていないためであると考えられる。両足支持期間において適切な加速度を考慮したパターン生成法、例えば線形振子モード⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾などの適用を検討している。線形振子モードは、制御するロボットの重心を仮想天井にぶら下げたおもりとするモデルであり、本研究で用いたロボットの重心を倒立振子のおもりとして制御する倒立振子モードとモデルの定義が似ているという特徴が挙げられる。また、倒立振子モードとは違い、地面への重心投影点が支持多角形内にある限りは、重心を任意の場所に ZMP 理論に基づいて安定に制御することができる。しかし、重心投影点を支持多角形内から出すことができないため、線形振子モードのみを用いた制御では歩行動作は静的な歩

行になってしまう。本論文で提案した歩行制御方法は、ロボットの姿勢が不安定になる時は歩行開始時や停止時、つまり、重心投影点が支持多角形内に存在する状況であるため、この制御方法を歩行動作の開始時と終了時に用いることで歩行の安定性が改善できると考えている。本研究で用いた上体の姿勢制御では、上体の姿勢を自由にかえることができないため人の生活環境下での活動を目指す上で、その活動を限定的なものにしてしまう恐れがある。その点に関しては、今回の研究をもとに状況に応じた上体姿勢の制御を組み合わせることで、さらに人に近い柔軟な歩行動作に近づけることができると考えている。また、実際の生活環境下では、今回提案した制御方法では対処が困難なさらに凹凸の激しい路面や急な斜面が想定される。本研究では、主に制御に利用した感圧センサ、加速度センサ・ジャイロセンサだけでは対応できない状況に対しては、視覚的機能を追加することで、さらに適応能力を高めることができると考えている。

Table 6 Parameters used in controller

	Value
J_x, J_y	1.0 kgm ²
M_z	1.0 kg
K_x, K_y	5.0 Nm/rad
K_z	200.0 N/m
C_x, C_y	10.0 Nms/rad
C_z	140.0 Ns/m
K_p	3.0 s ⁻¹
T_i	1.1 s

Fig.18 Unknown modulating road in for experiment

Fig.19 Trajectory of COG

Fig.20 Trajectory of legs

Fig.21 Snapshots of the walking motion of HOAP1

6. 結 言

本研究では、小型ヒューマノイドロボット HOAP-1 を対象に、未知凹凸を含む路面における、歩行パターン生成と安定化制御系を組み合わせた制御方法を考案した。そして、実機を用いた実験の結果、この制御方法により安定した歩行が可能であることが判った。遊脚先端部の位置、回転角度をインピーダンス制御で修正することで、歩行中、情報が与えられていない段差に差し掛かって安定を維持できることを確認した。さらに、ジャイロセンサの出力と加速度センサの出力を用いて PI 制御を行い、上体が鉛直姿勢になるように足

首のモータを制御することで、歩行中の姿勢を安定化することができた。そして、路面の未知の段差に乗り上げる状況に対処できることを確認した。

文献

- (1)Kajita,H., Hirukawa,H., Yoki,K. and Harada,K., "Humanoid Robot," Ohmsha, 2005, (in Japanese).
- (2)Kajita,K., From Inverted Pendulums to Biped Locomotion -ZMP and Control Theory-, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol 27, No.4, (2009), pp.392-395.
- (3)Kajita,S and Tani, K., Control of Dynamic Biped Locomotion Based on Realtime Sensing of the Ground Profile, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.7 (1996), pp.1062-1069.
- (4)Kawaji,S., Ogasawara,K and Iimori,J., Biped Locomotion Control with Compliance, *IEEJ Transaction on Industrial Applications*, Vol.116-D, No.1, (1996), pp.11-18.
- (5)Sorao,S., Murakami,T. and Ohnishi,K., Walking Control of a Biped Robot by Impedance Control, *IEEJ Transaction on Industrial Applications*, Vol.117-D, No.10, (1997), pp.1227-1233.
- (6)Nisikawa,N., Fujimoto,Y., Murakami,T. and Ohnishi,K., Variable Compliance Control for 3 Dimensional Biped Robot considering Environmental Fluctuations, *IEEJ Transaction on Industrial Applications*, Vol.119-D, No.12 (1999), pp1507-1514.
- (7)Hasimoto,K., Sugahara,Y., Kawase,M., Hayashi,A., Tanaka,C., Ohta,A., Sawato,T., Endo,N., Lim,H. and Takanishi,A., *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.6, (2007), pp.53-60.
- (8) Kanehiro,F., Hirukawa,H., Kajita,S., OpenHRP: Open Architecture Humanoid Robotics Platform, *The International Journal Research*, Vol.23, No.2, Feb 2004, pp.155-165.
- (9)Mitobe,K., Kaneko,M., Yamano,M. and Nasu,Y., Control of the Walking Robots Based on the ZMP Defined on the Ceiling, *Proceeding of the 22nd Annual Conference on Robotics Society of Japan*, Vol.21, 1G15, (2003).
- (10)Suzuki,T., Tsuji,M. and Ohnishi,K., ZMP Reference Trajectory Generation for Biped Robot with Inverted Pendulum Model by Using Virtual Supporting Point, *IEEJ Transaction on Industrial Applications*, Vol.128, No.6, (2008), pp.687-pp693.