

総合論文

路面形状に偏差のある環境に対する 適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発

山 口 仁 一^{*1*4} 木 下 昇^{*2} 高 西 淳 夫^{*3*4} 加 藤 一 郎^{*3*4}

Development of a Biped Walking Robot Adapting to an Unknown Uneven Surface

Jin'ichi Yamaguchi^{*1*4}, Noboru Kinoshita^{*2}, Atsuo Takanishi^{*3*4} and Ichiro Kato^{*3*4}

In this paper, the authors introduce a biped walking control method for adapting to an unknown uneven surface, and a biped walking robot which has a special foot mechanism for the control method. The biped walking robot has an ability to acquire, during its dynamic walking, the information of the landing surface's height and angle of inclination. The authors performed adaptive walking experiments with the robot using the control method. As a result, dynamic biped walking adapting to an unknown uneven surface was realized. The adaptable uneven surface's height range per one step walking was from -16 to +16[mm], and the adaptable angle of inclination range was from -3 to +3° at the maximum walking speed of 1.28[sec] per step with a 0.3[m] step length.

Key Words: Humanoid, Biped Walking Robot, Dynamic Walking, ZMP, Trajectory Control

1. はじめに

従来の2足歩行ロボットによる動歩行に関する研究は、その歩行制御方式において、遊脚の足底下面が路面に接触する以前に歩行路の形状が既知でなければならぬ[1]～[5]。しかし、いずれも路面形状偏差に対する歩容への影響や要求される路面形状の測定精度については言及されていない。

そこで筆者らは、1991年以前に早稲田大学で開発した2足歩行ロボットのなかで最も安定した3次元動歩行を行う「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WL-12 RV（総重量103.5[kg]、全長1.8[m]）」[6]～[8]を用いて、既知路面上における動歩行の成功確率および路面形状の偏差による歩容への影響に関する実験を行い、次の結果を得た。

まず、既知路面上での動歩行に関しては、実際の機械モデル誤差が、安定した動歩行実現の妨げとなっていることが明らかになった。具体的には、機械モデルの構造部材のたわみ等が、遊脚の着地位置および時刻の偏差となって現れ、この偏差により生じる着地衝撃などにより歩行成功確率の低下を招いてい

る。この問題の解決策としては様々なアプローチによる解決方法が既に提案されている。筆者らが提案している代表的な2例を示すと、まず、外乱に対して大きな安定余裕を持つ2足歩行を実現する方法としては、実際のZMPを用いて2足歩行ロボットの上体補償軌道の学習制御を行うことで、より安定度の高い(stability marginの大きい)歩行を実現する方法を提案している[9]。しかし、同方式が適用可能な歩行速度は、着地衝撃が比較的小さい低速の場合であり、1歩2.6秒より高速な歩行になると着地衝撃のため学習に支障をきたしてしまうという問題点がある。次に、上述と異なるアプローチによる方法としては、筆者らはフットスイッチより得られる着地時刻情報を用いて、着地時刻誤差を減らすべく下肢軌道の学習を行う方法を提案している[10]。また簡易な方法としては、理論と実験との整合を図るために、高ゲインの局所位置フィードバック制御を適用している下肢のアクチュエータの位置ゲインなどの制御パラメータや下肢軌道の種々のパラメータを歩行実験を行なながら試行錯誤的にチューニングする方法がある[9][11]。このほかにも佐野らにより両脚支持期に対して下肢の関節にトルク配分制御を導入することで滑らかな立脚切替を実現する制御則が提案されている[12]。

しかし、上述の方法を用いて（文献[12]の制御則を除く）既知の歩行路面上で高い歩行成功確率を実現できる状態であっても、同ロボットの歩行路面の形状偏差に対する歩容への影響は歩行速度が上がるにつれて大きくなり、人間と同程度の1歩1秒程の動歩行の場合、路面高さにおいては数ミリメートル程度

原稿受付 1995年5月10日

*1早稲田大学大学院理工学研究科

*2松下電器産業株式会社

*3早稲田大学理工学部

*4早稲田大学理工学総合研究センター

*Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

*Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

*School of Science and Engineering, Waseda University

*Advanced Research Center for Science and Engineering, Waseda University

の精度を、路面の傾斜角度においては、0.5度程度の精度を満たさなければ、遊脚着地時に生じる路面形状偏差を原因とする歩容への悪影響が、1歩の時間(1歩行周期の半分)以内に減衰しない場合があるため、安定した動歩行の維持が保証できないことが判明した。これは、従来の2足歩行制御方式が、歩行は着地路面に対して行う動作にもかかわらず、着地路面に対する脚の軌道制御をロボットの内界センサを用いて間接的にしか行っていない閉ループ制御系を構成していることに大きな問題があるものと考えられる。

一方、人間の生活環境においては、その路面(床面)が完全な幾何学平面であることは少なく、ほとんどの場合、多少の凹凸やうねりがある。また、路面(床面)に絨毯などが敷いてあり、遊脚着地時に僅かに変形してしまう場合もある。筆者らは人間の住環境で生活支援を行うことを目的とする人間形ロボット「ヒューマノイド」(等身大)[13]の移動機構の開発を目指しているが、上述の歩行実験結果は、同ロボットと同步行制御方式による人間の住環境での安定した動歩行維持が不可能であることを示している。

ところでこのような路面に対して人間は、路面の形状を高い精度で知ることなく、視覚情報から、大まかな路面の形状を把握するだけで歩行を開始あるいは続行している。

これは、人間が歩行を開始する前、あるいは歩行中であっても足部が歩行路面に接地する前までは、路面上の小さな凹凸や僅かなうねり等を考慮せず歩行を行い、足部が歩行路面に接地した後に、着地路面に関する詳細な情報を取得し、その情報を基に着地路面に対する下肢軌道の修正を行うことで、視覚情報のみでは路面の形状を高い精度で知ることが困難な路面に対して、安定かつスムーズな動歩行を実現しているものと考えられる。このような歩行、すなわち着地路面の形状に偏差がある環境に対して実時間で適応する歩行は、人間形ロボット「ヒューマノイド」に強く求められる能力である。

ところで、1985年に高西らは、2足歩行ロボットWL-10 RD(足首部アクチュエータにトルク制御を導入)[4]の足部にジャイロセンサと傾斜角センサを取り付け、ロボット自身による路面形状の検知を試みている。しかし、遊脚が着地する際に生じる衝撃を十分に緩衝することができず、ロボット自身が発生した振動により動歩行中に着地路面情報を得ることができなかつた。

これに対し、人間は内骨格構造をとることで、堅い骨を覆っている軟組織(関節部の軟骨、皮膚および皮下組織を指す)により、外部環境と衝突を伴う動作を行う場合でも、衝突による衝撃を緩衝することで、衝突時に自分自身および衝突対象に振動が発生することを防ぐことで、衝突対象に関する各種情報を取得することができるものと思われる。人間が行う動作には外部環境と衝突をともなうものが多いが、これらの機能は閉ループ制御系構築を大いに助けているものと考えられる。

そこで筆者らは1990年に、動的足踏み状態において着地位置誤差を原因とする着地衝撃による歩容への影響を軽減すると同時に着地路面に対する相対位置情報を取得できる足底機構部WAF-1(Waseda Anthropomorphic Foot No.1)を開発した[14]。

1992年には、前進する通常の動歩行に対応すべく足底機構部WAF-1の衝撃緩衝機構と着地路面検知機構(着地路面に対する相対位置情報を取得)を改良し、さらに新たに立脚切替を安定化する機構を開発・搭載することで、ある程度の路面形状偏差や下肢軌道偏差に対するロバスト性を2足歩行ロボットに持たせることができる足底機構部WAF-2(Waseda Anthropomorphic Foot No.2)を開発した[15][16]。そして同時期に、足底機構部WAF-2より得られる着地路面に対する相対位置情報を用いて下肢軌道を変更・制御する閉ループ制御系を導入することで高さ方向にのみ偏差のある路面に適応する歩行制御方式を考案した[17]～[19]。

1993年には、歩行開始時の着地路面のみを既知とし、同ロボットの足底機構部WAF-2から得られる、着地路面との相対位置情報と下肢の各関節の回転角度情報を用いて、その後の着地路面の絶対傾斜角度を推定し、同時に下肢軌道を変更・制御することで、路面の高さ方向に加え傾斜角度に関しても偏差がある路面に対する予備的な適応歩行実験を動歩行下で行った。その結果、機械モデルの構造部材のたわみなどにより、着地路面の絶対傾斜角度の検出値に累積誤差が生じ、歩行を継続することができなかった。

ところで、既知の水平面から未知の斜面に対する静歩行による昇降は、1988年Yuan F. Zhengらにより2足歩行ロボットSD-2を用いて実現されている。同ロボットの歩行制御方式は歩行開始時の着地路面を水平既知として、遊脚着地時に足底板を着地路面に対してならわせる着地制御を、足底板下の踵と先端部に搭載した力センサの情報を用いて行い、両脚支持期におけるロボット下肢の各関節の関節角度情報を基に着地路面の相対角度を算出し、この情報を基に上体軌道を変更することで未知の斜面の昇降を実現するというものである。しかし、同ロボットの歩行制御は重心を用いた静的な歩行を対象にしたものであり、両脚支持期の時間が短くなる動歩行を対象にしたものではない。そして外界センサにより直接的に着地路面の絶対傾斜角度を測定するものではないため、筆者らが行った歩行予備実験において問題となつた、歩行を重ねるにつれ増大する、算出される着地路面傾斜角度の累積誤差に関して考慮されていない[20]。

以上、従来の研究結果を踏まえ、本研究では、路面形状に偏差がある環境に対して、実時間で適応する動的な2足歩行実験の最終段階として、着地路面との相対位置に加えて、人間の三半規管に相当する外界センサとして着地路面の傾斜を動歩行中においても測定できる着地路面検知システムを有する2足歩行ロボットを開発し、次に、安定した動歩行を維持するための要となる遊脚着地時に、着地路面情報を用いて脚の軌道制御を着地路面に対して実時間で行う閉ループ制御系を構成する歩行制御方式を考案することで、路面の高さ方向に加え傾斜角度に関しても偏差がある路面に対して、着地路面の傾斜角度測定において累積誤差の心配なく、実時間で適応する動歩行を2足歩行ロボットにより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-12 RVII(Waseda Leg-12 Refined VII)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、動歩行下で全歩行周期に渡り着地路面との相対位置に

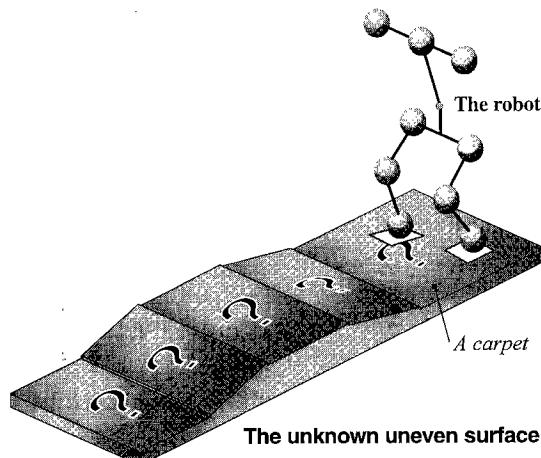


Fig. 1 Walking surface

加え絶対傾斜角度を $\pm 0.5^\circ$ 程度の精度で測定することに成功したと同時に、水平平坦路上を歩行する歩行パターンを基準として下肢軌道を変更・制御することで、水平な路面に対して、1歩あたりの相対高低差+16 [mm]～-16 [mm]、絶対傾斜角度 $\pm 3^\circ$ までの路面形状偏差に対して、実時間で適応する動歩行(1.28 [s/step]で0.3 [m/step])を実現したので、以下に報告する[21]～[24]。

2. 研究対象とする路面の条件

- 本論文で研究対象とする路面の条件を次のように設定した。
- 着地路面の高さおよび絶対傾斜角度を未知要素とし、各未知要素は遊脚が着地する以前に既知となることはない。なお、現行の機械モデルWL-12シリーズは下肢にロール軸回りの能動自由度を持たないため、ロール軸回りの傾斜は水平既知(精度 $\pm 0.5^\circ$)とする。
 - 着地路面の強度は十分に高く、機械モデルが歩行を行うにあたり、その変形量及び移動量は動力学を考慮にいれた補償動作を行う必要がない範囲とする。
 - 2足歩行ロボットの足底下面4隅にある着地スパイク(Fig. 6参照)の全てが接地可能である。

なお、これらの条件を満たす路面の例としては、Fig. 1に示すような未知の台形状路面などが該当し、路面の材質に関しては、機械モデルが歩行を行うにあたり全く変形しないものから単脚支持期において2 [mm]程度の沈みこみが起きる路面までが該当する。人間の住環境に用いられている床材を例に上げると、変形しないとみなせるフローリングの床、そして、それに絨毯を敷いたものや畳などのように僅かに変形する路面までが該当する。

3. 2足歩行ロボット WL-12RVII

3.1 機械モデルの構成

本機械モデル(Fig. 2)は、総重量109.3 [kg]、全長は直立静止状態で1866 [mm]である。機械モデルの組立図をFig. 3に、自由度配置図をFig. 4に示す。

自由度配置は、Fig. 4に示すように、下肢には各脚の股関

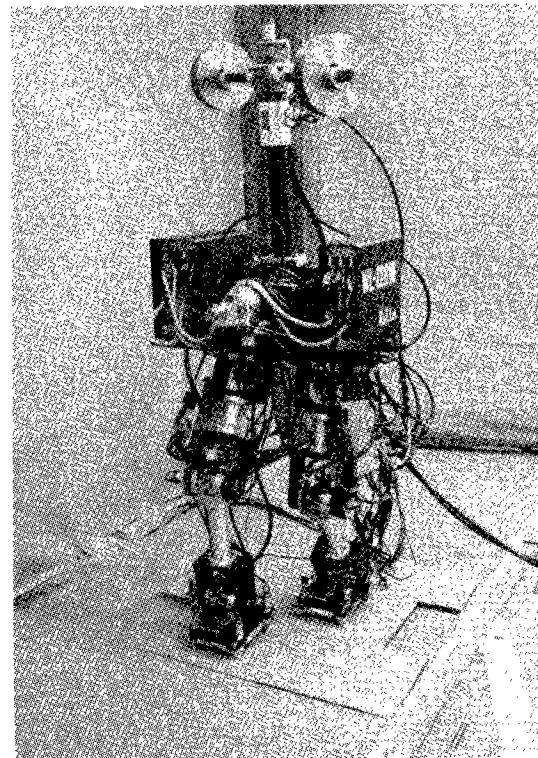


Fig. 2 Biped walking robot WL-12RVII

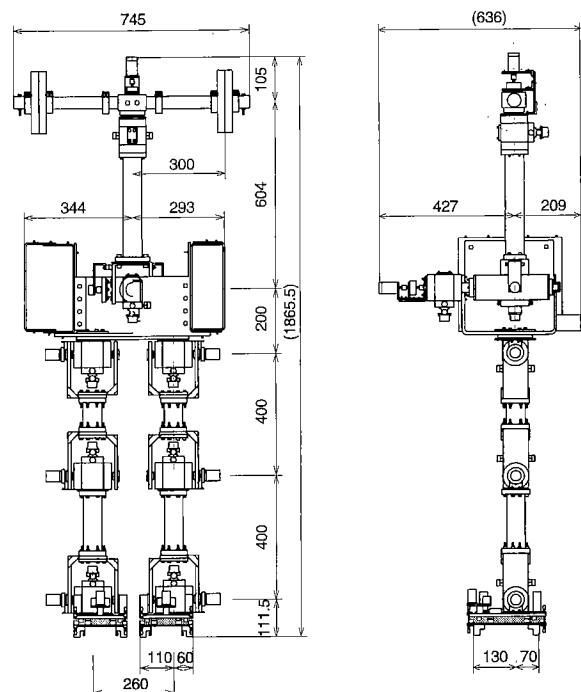


Fig. 3 Assembly drawing of WL-12RVII

節、膝関節、そして足関節にピッチ軸回りの能動自由度を持ち、上体にピッチ軸回り、ロール軸回り、そしてヨー軸回りの能動自由度を各1自由度持ち3自由度、合計で9自由度の構成となっている。本機械モデルの上体機構部はピッチ、ロール、

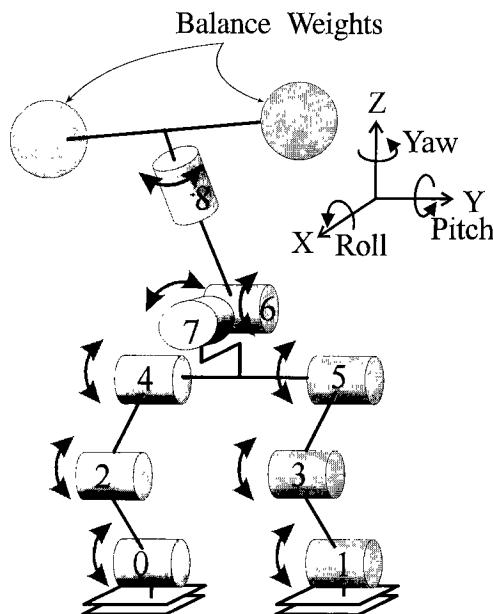


Fig. 4 Link structure of WL-12RVII

そしてヨー軸回りの3軸全てのモーメントを発生することで、下肢の発生する3軸全てのモーメントを補償することができる。本機構部の重量は、モーメント補償用の重りを搭載した状態で約30[kg]である。上体機構部の詳細については文献[6]～[8]を参照されたい。各自由度は油圧式のRA(Rotary Actuator)とサーボ弁を組み合わせた電気一油圧サーボシステムを採用している。

本機械モデルの腰部両脇に搭載されている制御システムの概略をFig. 5に示す。本制御システムは、各アクチュエータの制御用に16[bit]CISC型CPU(Z8002, 4[MHz])4基、実時間での歩行パターン生成用に32[bit]RISC型CPU(T800, 20[MHz])2基を搭載し、高速処理が要求される実時間制御を外部から的一切の補助なしに自律的に行うことができる。なお、歩行時のロボットの各関節には高ゲインの局所位置フィードバック制御を適用している。

3.2 足底機構部

本機械モデルの足底機構部WAF-3(Waseda Anthropomorphic Foot No. 3)は、人間の手のひらや指腹、そして足の裏にみられるように、柔軟であるある程度荷重がかかるとそれ以上変形しない、堅さ特性が非線形な特性を持ち、そして内部には路面の形状および絶対傾斜角度を歩行中に検知するに必要な各種センサを搭載している。本足底機構部の構造と着地路面の測定のために設けた測定座標系O'-X'Y'Z'をFig. 6に、2足歩行ロボットに装着した写真をFig. 7に示す。本足底機構部の構成は、足首部アクチュエータに直接取り付けられる上部足底板と実際に着地路面と接する下部足底板、上部足底板と下部足底板を連結するワイヤー、そして上部足底板と下部足底板の間に、衝撃緩衝材をはさんだサンドウイッチ構造からなる。そして、Z'軸(5.5[mm])およびX'軸(±5.0[mm])の並進、X'軸(±2.3°)およびY'軸(±1.7°)の回転の受動自由度を持つ。重量は、片足につき2.6[kg]、通信ケーブル等を含め約

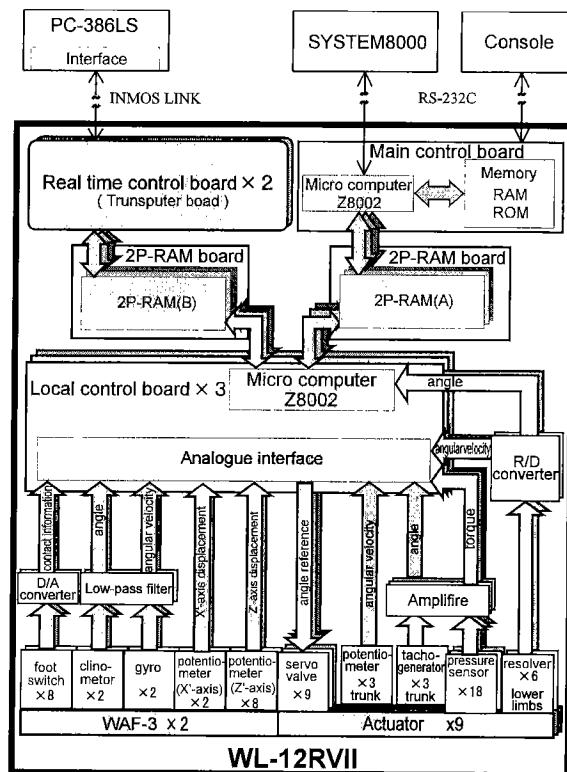


Fig. 5 Computer system structure of WL-12RVII

3.0[kg]となっている。本足底機構部は、以下に示す3つの機構を合わせ持つ。

- ・衝撃緩衝機構
- ・立脚切替安定化機構
- ・着地路面検知機構

以下に、これらの各機構について述べる。

衝撃緩衝機構：本足底機構部は、足底板下に設けた力センサ情報などを用いたソフトウェアによるフィードバック制御では対応が困難である「着地路面に対する高速なならい動作や、遊脚着地時の衝撃の緩衝、および歩行中にロボット自身に生じる振動の抑制」を可能とするために、衝撃緩衝材料を用いた受動的な衝撃緩衝機構を持つ。本機構の構成は、上部と下部の足底板の間に取り付けられる衝撃緩衝材料と上部足底板下面に取り付けられる上部ストッパーによりなる。衝撃緩衝材料には、優れた衝撃吸収性、耐久性、柔軟性をもちオーブンセルフォームである、E・A・R SPECIALTY COMPOSITES社製メモリーフォーム(米名confor foam)のM-36イエローを216[cm²]、厚さ25[mm]を20[mm]に圧縮した状態で上下足底板の間に装着している。この結果、衝撃緩衝機構としては、+Z'軸方向に0.046[mm/N]程のコンプライアンスで5.5[mm]程度のストロークを持ち、減衰係数は406[N・s/m]程である。Z'軸方向のストロークに制限を与える上部ストッパー(Fig. 6参照、片足に8個搭載)は、ジュラルミンよりなるブロックの下面に、ウレタンゴム(1.40[cm²]、厚さ1[mm])とテフロン樹脂(1.40[cm²]、厚さ1[mm])による2層構造材料と発泡シリコン(1.40[cm²]、厚さ3.3[mm])を並列に配した特殊なストッ

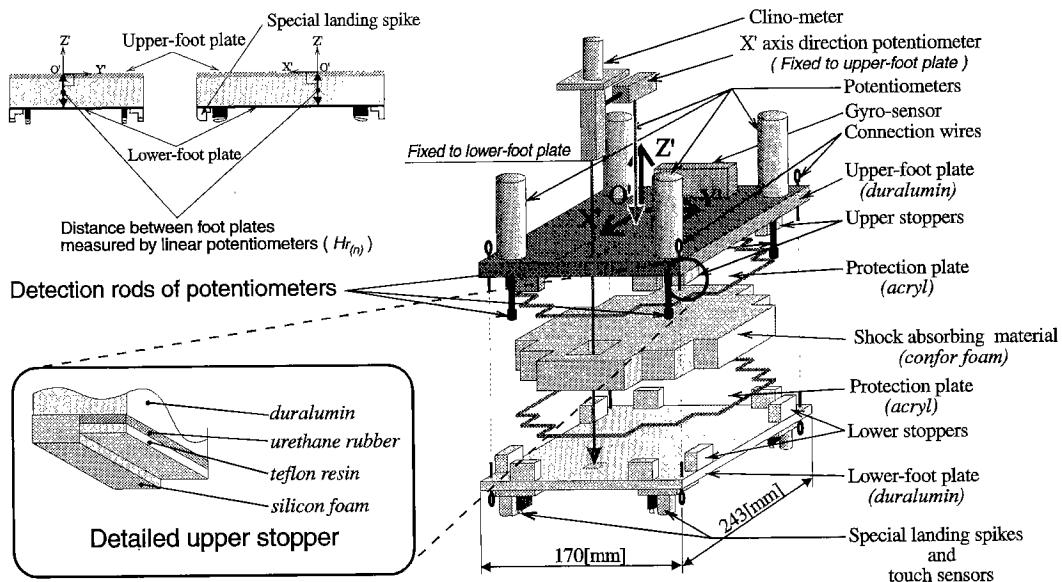
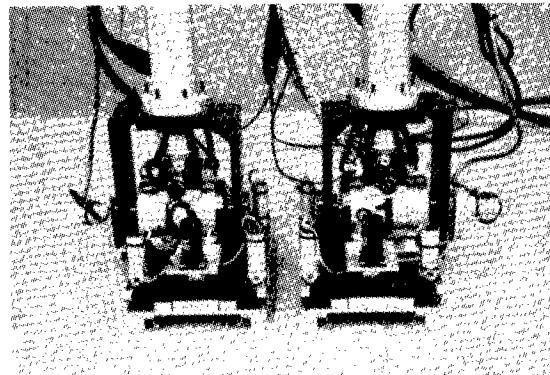
Fig. 6 Structure of WAF-3, $O'-X'Y'Z'$: detection coordinate

Fig. 7 WAF-3 installed on a biped walking robot WL-12RVII

パを用いている。このようなストップ構造を採ることで、力に對して滑らかに堅さが上昇するストップ機構を実現することができた。そしてこれらのストップは、立脚切替安定化機構の主要部品にもなっている。

ここで、従来の足底機構部 WAF-2 の衝撃緩衝機構との変更点について述べると、従来の機構では用いている衝撃緩衝材料の堅さが温度により変化してしまい、特に 10°C 以下では堅くなり他の 2 つの機構に悪影響をおよぼしてしまうという問題を抱えていた。そこで、本衝撃緩衝機構ではバイメタル式のサーモスタットを組み合わせたヒータ（下部足底板下面に搭載）により足底機構部全体を約 40°C に保温することで、この問題を解決することとした。また、これにより従来、伸び特性（足底板間）の調整にウレタンフォームを衝撃緩衝材料と組み合わせて使用していたが、本機構ではその必要はない。衝撃緩衝材料の選定方法に関しては、文献[15][16]を参照されたい。

立脚切替安定化機構：本足底機構部は、従来の足底機構部 WAF-2 と同様の立脚切替安定化機構を持つ。本機構と衝撃緩衝機構を組み合わせることで、路面形状偏差と下肢軌道偏差を加えた総偏差が、 Z' 軸方向においては $\pm 3[\text{mm}]$ 程度を、 X' 軸

方向においては $5[\text{mm}]$ 程度を、傾斜角度においては、 1° 程度の総偏差に対するロバスト性を 2 足歩行ロボットに持たせることができる。本機構の詳細については、文献[15]～[18]を参照されたい。

着地路面検知機構：従来の足底機構部 WAF-2 は、着地路面に対する相対位置を測定するため、上部足底板と下部足底板の相対位置関係を直動型ポテンショメータで測定していた。本足底機構部では、それらに加え、以下に示す着地路面に関する各種情報を取得できる。

(a) 下部足底板の接地情報

(b) 着地路面（下部足底板）に対する上部足底板の相対位置情報

(c) 着地路面（下部足底板）の絶対傾斜角度情報（ピッチ軸回り）

(d) 上部足底板の角速度情報（ピッチ軸回り）

搭載しているセンサについて説明すると、(a) 下部足底板の接地状態を検出するために、下部足底板下面 4 隅にレバー付きのマイクロスイッチを搭載している。これらのマイクロスイッチは、歩行中での破損を防ぐために、レバー形状を中心部が $-Z'$ 軸方向に凸な形に、そして取り付け位置を着地スパイクと着地路面により形成される支持多角形の内側としている (Fig. 6 左上参照)。(b) 着地路面との相対位置を取得するために、上部足底板上面 4 隅にバックスプリング付きの直動型ポテンショメータ（緑測器（株）社製、LP-30 UF-R）を 4 基搭載している。これらのセンサにより実際に路面にならないながら着地する下部足底板の上部平面を測定することで間接的に路面に対する相対位置を測定することができる（足底機構部 WAF-2 と同様）。これらに加え、上部足底板と下部足底板の X' 軸方向の相対位置を測定するために、上部足底板上面中心部に、バックスプリング付きの直動型ポテンショメータ（緑測器（株）社製、LP-15 UL-B）を 1 基搭載している。実際には、このセンサは下部足底板上面に取り付けられた傾斜角センサ取り付けブロックの

側面と上部足底板既知位置とのX'軸方向の距離を測定している。(c)着地路面(下部足底板)の絶対傾斜角度を測定するために、下部足底板上面にセンサ取り付けブロック等を介してサーボ型傾斜角センサ(日本航空電子工業(株)社製、MC 100 L)を搭載している。(d)上部足底板の角速度(ピッチ軸回り)の測定および絶対傾斜角度(ピッチ軸回り)を推定するために、上部足底板上にレートジャイロ(村田製作所(株)社製、ENV-05 S)を搭載している。各センサのサンプリング周波数は搭載コンピュータシステムの速度等の関係から100[Hz]である。

4. 歩行制御方式

歩行制御方式について述べる前に、本論文で報告する2足歩行制御の方針について説明する。本歩行制御方式における2足歩行の安定化は、Fig. 8に示すように、3重で行っている。

まず、基礎となる2足歩行の安定化制御には、筆者らが既に提案している、足底と着地路面により形成される支持多角形内部(安定領域内)の任意の位置で、下肢の発生するピッチ、ロール、そしてヨー軸回りの3軸全てのモーメントを上体運動により補償する上体補償型2足歩行制御方式を用いる[6]～[8]。

次に、その上位に位置する歩行安定化機構(主に高周波成分に対する安定化制御を担当)として、上体補償型2足歩行制御方式で考慮していない、機械モデルの構造部材の僅かなたわみなどを原因とする下肢軌道偏差や歩行路面の僅かな測定誤差による歩容への影響を除去するために、本足底機構部の衝撃緩衝機構と立脚切替安定化機構を用いている。以上の2重の安定化により、例えば、水平なフローリングの床に絨毯を敷いたもののように僅かに変形する路面を水平平坦路面とみなしてロボットをプログラム制御しても、その歩行成功確率はほぼ100%となる[15][16]。

そして、最上位に位置する安定化制御(主に低周波成分に対する安定化制御を担当)として、形状に偏差がある路面に対応する下肢軌道制御ソフトウェアがある。これは本足底機構部の着地路面検知機構より動歩行中においても外界に関する情報を取得することで、ロボットの着地路面に対する歩行の状態および着地路面の絶対傾斜角度等の情報を基に下肢軌道を変更・制御することで、足底機構部の歩行安定化機構では対応が困難な未知の路面形状偏差や、何らかの原因で路面に対する下肢軌道に偏差が生じた場合においても、動歩行の継続を可能とするものである。このように、高周波成分に対する安定化制御を機械

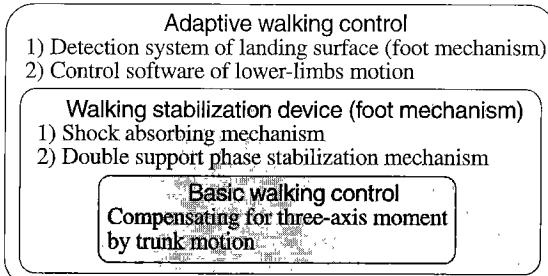


Fig. 8 Stabilization of dynamic biped walking in real world

ハードウェアにより行い、低周波成分に対する安定化制御をソフトウェアにより行うことで、幅広い周波数帯域における適応制御を可能にするとともに、制御システムの負荷を軽減できることが本制御手法の特徴となっている。また、路面の形状に偏差があっても歩行を継続できる能力は、ヒューマノイドの視覚システムによる3次元路面計測の要求精度を緩和し、ヒューマノイドのシステム全体の負荷を軽減する意味でも重要だと筆者らは考えている。以下、考案した路面形状に偏差のある環境に対応する歩行制御方式について述べる。

本歩行制御方式の概略は、次のようになる。まず歩行前に、動作の基準となる基準歩行パターンを高速上体補償軌道算出アルゴリズム[6]～[8]を用いて作成する。次に、基準歩行パターンを用いたプログラム制御により、上体運動により3軸モーメントを補償する上体補償型3次元動歩行を行う。次に、遊脚着地時に本足底機構部の着地路面検知機構により得られる着地路面情報を用いて下肢軌道を変更・制御する閉ループ制御系を導入することで未知の着地路面に対する実時間での適応を行う。そして適応後に、変更した下肢軌道を基準歩行パターンへ復帰させる復帰制御を行い、再び基準歩行パターンを用いたプログラム制御を行うというプロセスを1歩行周期に各脚に適用し、これを繰り返すことで、路面の高さ方向に加えて路面傾斜角度に関しても偏差がある路面に対して実時間で適応する歩行を全歩行周期に渡り行うというものである。なお、本論文では水平平坦路上を歩行するための歩行パターンを基準歩行パターンとした場合について述べ、その下肢軌道は、水平平坦路面に対し常に上部足底板が平行になるように設定している。本歩行制御方式のフローチャートをFig. 9に示す。以下、本歩行制御方式の要である足底機構部WAF-3の着地路面検知機構により得られる着地路面情報の処理方法と下肢軌道の変更・制御方法について述べる。

4.1 着地路面情報の処理方法

足底機構部WAF-3の着地路面検知機構により取得される

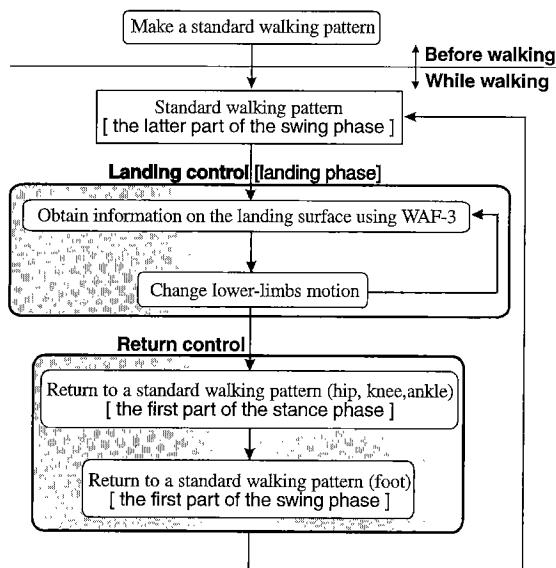


Fig. 9 Outline of the adaptive walking control method

Table 1 Division control of lower-limbs motion

	one stride						
Right leg	stance phase (double support phase) (III-c)	swing phase (IV) (I)		landing phase (II)	stance phase (double support phase) (III-a)	stance phase (single support phase) (III-b) (III-c)	
	stance phase (double support phase) (III-a)	stance phase (single support phase) (III-b)		stance phase (double support phase) (III-c)	swing phase (IV)	landing phase (I)	(II)

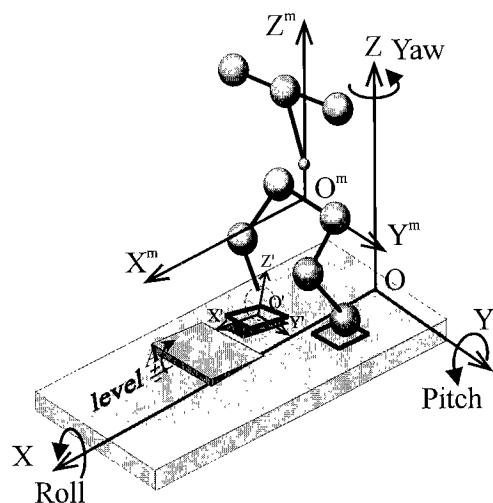


Fig. 10 Coordinate systems for adaptive walking

各種情報は、歩行中に実時間歩行パターン生成用コンピュータに送られ、以下の情報に整理される。また、歩行系に設定した各座標系を Fig. 10 に示す。

下部足底板の接地情報：接地状態は、下部足底板下面 4 隅に搭載された 4 つのマイクロスイッチの ON/OFF で判定する。4 つあるマイクロスイッチのうち 1 つ以上が ON の状態で、その脚を接地状態と判定し、特に全てのマイクロスイッチが ON の状態で完全接地状態と判定する。

着地路面（下部足底板）と上部足底板の相対角度（Y' 軸回り）と相対距離情報：上部足底板の上面 4 隅に固定された 4 基の直動型ポテンショメータにより、上部足底板上の 4 つの既知点と下部足底板上面との距離を測定し、この距離情報を用いて上部足底板上面に対する下部足底板の相対角度 A' (Y' 軸回り) と相対距離 H_r を算出する (Fig. 12 参照)。なお、算出には、2 通りの経路により測定した結果を平均化している。

着地路面（下部足底板）の絶対傾斜角度：上部足底板の上面に固定されたレートジャイロの出力値を時間積分した値を取り付けプロックを介して下部足底板に固定された傾斜角計の出力値を用いて、着地路面の絶対傾斜角度の測定を行う。測定には式 (1) を用いて行う。

$$A_n = \begin{cases} (A_{cn} + A_{n-1} + A_{n-2})/3 & \dots \text{(立脚期)} \\ (A_{gn} + A_{n-1})/2 & \dots \text{(着地期)} \\ A_{gn} & \dots \text{(遊脚期)} \end{cases} \quad (1)$$

A_n ：路面検知 n 回目における、着地路面の絶対傾斜角度の測定値

A_{cn} ：路面検知 n 回目における、傾斜角計による絶対傾斜角度

A_{gn} ：路面検知 n 回目における、レートジャイロセンサの積分値 (100 [Hz]) による傾斜角度値に、上部と下部足底板の相対角度 (A'_n) を加えたもの。ただし、立脚期に A_c を用いて時間積分による累積誤差を除去する。

式 (1) による着地路面の絶対傾斜角度の測定方法の概要は、次のようになる。まず、本論文では、遊脚の下部足底板が路面に接地後、または基準歩行パターンにおける下部足底板の設定着地時刻を過ぎてから、基準歩行パターンにおける両脚支持期に入る時刻までの期間を着地期と定義し、この期間にはレートジャイロセンサの出力値 (角速度情報) を時間積分した角度情報に直動型ポテンショメータから得られる着地路面との相対角度 A' を加えることで着地路面の絶対傾斜角度を推定する。次に、着地による振動が収まった立脚期に、傾斜角計の出力値によって着地路面の絶対傾斜角度の測定を行うとともに、レートジャイロセンサの出力値を時間積分して算出している角度情報の修正を行うことで、両脚支持期の時間が短い動歩行においても、全歩行周期に渡り着地路面の絶対傾斜角度を測定するというものである。実際のロボットの路面検知は、40 [ms] 間隔で行っている。なお、動歩行中の着地路面の絶対傾斜角度測定においての要となっているものは、足底機構部の衝撃緩衝機構にある。本機構により着地衝撃およびロボット自身が発生する振動を抑えることにより、動歩行中に着地路面の絶対傾斜角度を $\pm 0.5^\circ$ の精度で測定することができた (Fig. 20 参照)。測定可能範囲は $\pm 90^\circ$ である。

4.2 下肢軌道の変更方法

本歩行制御方式は、筆者らが既に文献 [17]～[19] で提案している「路面の高さ方向の偏差に対応する歩行制御方式」を基礎として、路面の傾斜角度偏差に対しても対応するべく、その下肢軌道の変更方法を発展させたものである。本歩行制御方式は、1 歩行周期中の脚の運動を Table 1 に示すようにロボットの足底部が路面に拘束される度合いに応じて、1 歩の期間を、全く拘束のない遊脚期、完全に拘束される立脚期、その中間の着地期と大きく 3 つに分けた上で、さらに、遊脚期を前期と後期に 2 つに分け、立脚期を両脚支持期 (前脚時) と単脚支持前期そして後期に 3 つに分けて下肢軌道の変更・制御を行う。各期間の歩行の様子を Fig. 11 に示す。以下、各期間における歩行動作について述べる。

I) 遊脚期後期：遊脚の下部足底板が接地していない間および

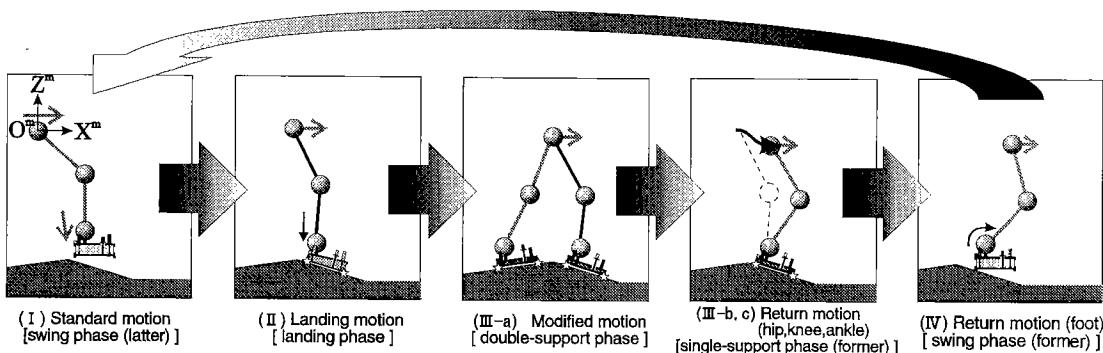


Fig. 11 Walking actions adapting to the ground geometry in one step-walking

基準歩行パターンにおける下部足底板の設定着地時刻に達するまでは、基準歩行パターンを用いて歩行を行う。

II) 着地期：この期間は、式(2-a, b, c)を用いて遊脚の着地制御を行う。

$$Z_{o(n)} = Z_{o(n-1)} + (H_{i(n)} \cos \alpha_n - H_{r(n-1)} \cos \alpha_{n-1}) \quad (2-a)$$

$$X_{o(n)} = X_{o(n-1)} + (H_{i(n)} \sin \alpha_n - H_{r(n-1)} \sin \alpha_{n-1}) \quad (2-b)$$

$$\alpha_n = a(A'_{n-1} + \alpha_{n-1}) + bA_{n-1}, a=0.7, b=0.3 \quad (2-c)$$

$Z_{o(n)}, X_{o(n)}$ ：路面検知 n 回目における、測定座標原点 O' の Z^m, X^m 座標（相対運動座標系 $O^m-X^mY^mZ^m$ における下肢軌道制御により行う）

$H_{i(n)}$ ：路面検知 n 回目における、水平平坦路上を基準歩行パターンを用いて歩行した場合での理論上の足底板間距離

$H_{r(n)}$ ：路面検知 n 回目に実際に測定される足底板間距離

α_n ：路面検知 n 回目における、ピッチ軸回りの上部足底板目標角度（相対運動座標系における足首部ピッチ軸アクチュエータを用いた姿勢制御）

式(2)を用いた着地制御の概要は次のようになる。まず、式(2-a)について説明すると、同式は着地路面検知機構より得られる足底板間距離（着地路面に対する距離） H_r を用いて上部足底板の Z^m 軸方向の軌道生成を行う。具体的には、基準歩行パターンで水平平坦路上を歩行した場合においての理論上の路面に対する遊脚の上部足底板 Z^m もしくは Z 軸方向軌道を目標軌道として軌道生成を行う。

つぎに式(2-c)について説明すると、同式は、着地路面に対して能動的なならい動作を行うために、上部足底板のピッチ軸回りの目標姿勢を決定する。同式の導入理由について述べると次のようになる。まず、上部足底板目標角度 α を絶対傾斜角度 A として実際に下肢軌道の変更・制御を行うと、遊脚の着地がスムーズにできず、着地衝撃の度合いによっては、傾斜角センサに悪影響を与えてしまう場合があり、動歩行の継続が保証できなかった。この原因は、上部足底板の姿勢制御を相対運動座標系で行っているため、機械モデルの構造部材の僅かなたわみや歩行中のモデル全体の僅かな揺動などにより着地路面に対する姿勢に偏差が生じるためと考えられる。次に、着地路面に対して上部足底板の姿勢制御を行った場合、すなわち上部足底板と下部足底板が平行になるように α_n を A'_n と α_{n-1} の和とし

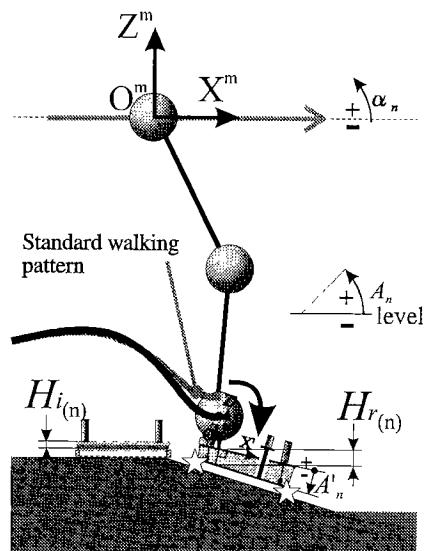


Fig. 12 Control of landing motion

て下肢軌道の変更・制御を行った場合は、滑らかに着地することはできるが、そのまま立脚として用いるには路面の絶対傾斜角度に対する偏差が大きくなってしまう場合があった。そこで、式(2-c)を用いて両者の方法に重みを付けて和をとり上部足底板目標角度 α の目標値を決定することで、この問題を解決することとした。重み係数 a と b は機械モデルWL-12 RVIIを用いた歩行予備実験より、それぞれ0.7と0.3に決定した。

最後に式(2-b)について説明すると、同式は上部足底板の X^m 軸方向の軌道生成を行う。具体的には、式(2-c)を用いた上部足底板の姿勢変更に伴う上部と下部足底板の X^m 軸方向の相対位置関係への干渉を除去するための軌道生成を行っている。着地期の下肢軌道修正の様子をFig. 12に示す。

III) 立脚期：(III-a) 両脚支持期（前脚時）には、着地路面情報を用いた下肢軌道の変更・制御を停止し、総変更量を着地路面偏差として実時間歩行パターン生成用コンピュータにより下肢軌道を生成し、この軌道を用いてロボットをプログラム制御する。(III-b) 単脚支持期前期には、軌道変更を受けた脚の足首と腰の相対位置関係を、基準歩行パターンにおける相対位置関係に復帰させる復帰制御を行う。復帰制御における軌道の変更方法は、設定ZMPに対する偏差を小さくするため X^m およ

び Z^m 軸方向の位置、速度、加速度が連続となるように、式(3)に示す5次の多項式を用いた補間により行っている。

(III-c) 単脚支持期後期には、基準歩行パターンの軌道とする。

ただし、上部足底板目標角度に関しては、路面の絶対傾斜角度 A としている。

$$\text{position}(t) = a_0 t^5 + a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t + a_5 \quad (3)$$

a_i : coefficient, $i=0, 1, 2, 3, 4, 5$, t : time

IV) 遊脚期前期：基準歩行パターンへの復帰を完了していない上部足底板の姿勢 (Y^m 軸回り) を5次の多項式を用いた補間により復帰させる。

4.3 前頭面内の路面傾斜角度偏差への適応の可能性について

本論文では、開発した機械モデルが下肢にロール軸回りの自由度を持たないため、歩行はロール軸回り（前頭面内）の傾斜角度が水平既知（精度 $\pm 0.5^\circ$ ）である路面上に限られる。しかし、本歩行制御の式(2)に示すピッチ軸回りに関する項をロール軸回りにおいても同様に適用することで、ピッチ軸回りに加えてロール軸回りにおいても傾斜角度偏差がある路面に対応可能である。しかしこの場合、ロボット本体に関しては足首部にロール軸回りの能動自由度を増設する必要がある。そしてWAF-3に関しては、ロール軸回りの路面傾斜角度測定用にレートジャイロと傾斜角センサを片足に付き1基ずつ増設（取付スペース確保済み）することに対応可能である。

4.4 WAF-3 のセンサの削減の可能性について

WAF-3 には本歩行制御方式が必要とする情報以外に歩行状態の測定および着地路面検知システムの自己診断を行うために各種センサが多数搭載されている。そこで、歩行状態の測定および着地路面検知システムの自己診断を行なう必要がない場合にはセンサを削減することができる。まず、路面の高さ方向にのみ偏差がある場合には、上下足底板間距離測定用に直動型ポテンショメータ1基、接地状態検知用にマイクロスイッチ1つ（足底板間距離測定結果から接地状態を推定することで削減することも可能）が必要である。次に、高さ方向に加えピッチ軸方向かロール軸方向のどちらかに偏差がある場合には、上下足底板間の相対位置測定用に直動型ポテンショメータ2基、接地状態検知用にマイクロスイッチ2つ（足底板間距離測定結果から接地状態を推定することで削除することも可能）、傾斜角測定用にレートジャイロ1基と傾斜角計1基が必要である。そして、高さ方向に加えピッチ軸方向とロール軸方向にも偏差がある場合には、上下足底板間相対位置測定用に直動型ポテンショメータ3基、接地状態検知用のマイクロスイッチ4つ、傾斜角測定用にレートジャイロ2基と傾斜角計2基が必要となる。

5. 歩行シミュレーション

本歩行制御方式下で、機械モデル WL-12 RVII が適応可能な路面の形状偏差を推定する意味で、歩行シミュレーションを行った。シミュレーションでは文献[6]～[8]と同様に機械モデルを上体を3質点、下肢を n 質点系としてモデル化して設定ZMPに対するZMP偏差を算出した。なお、歩行路は機械モデルが歩行を行っても全く変形しないものとし、機械モデル

の構造部材のたわみやアクチュエータの応答遅れはないものと仮定した。

その結果、水平平坦路上を歩幅 0.3[m]、上部足底板の路面からの最大高さ 5[cm]、1 歩 1.28[s] で歩行する歩行パターン（1 歩行周期の 2% 程を両脚支持期に、5% 程を着地期に割り当てている）を基準歩行パターンとした場合、水平平坦路上で、1 歩あたりの相対高低差 +17[mm] ～ -15[mm]、路面の絶対傾斜角度 $\pm 3^\circ$ までの偏差に対して適応可能であった。なお、下肢軌道は足部の着地時の路面に対する速度、加速度がゼロとなるように、5 次および 6 次の多項式を用いた補間により作成している。

Fig. 13 に、最も条件の厳しい路面に対する歩行シミュレーションの一例として両端に 3° の傾斜面を持ち、高さ 20[mm]

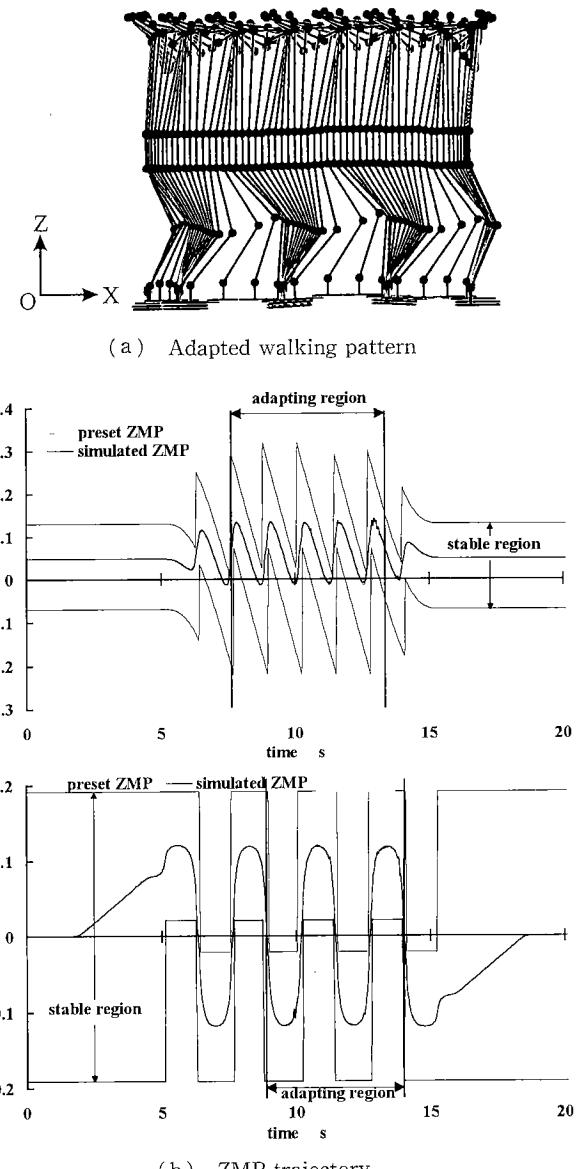


Fig. 13 Simulation of dynamic walking adapting to an unknown uneven surface. Inclination $+3^\circ$ (3rd step), -3° (5th step), length: 0.3[m/step], step time: 1.28[s/step].

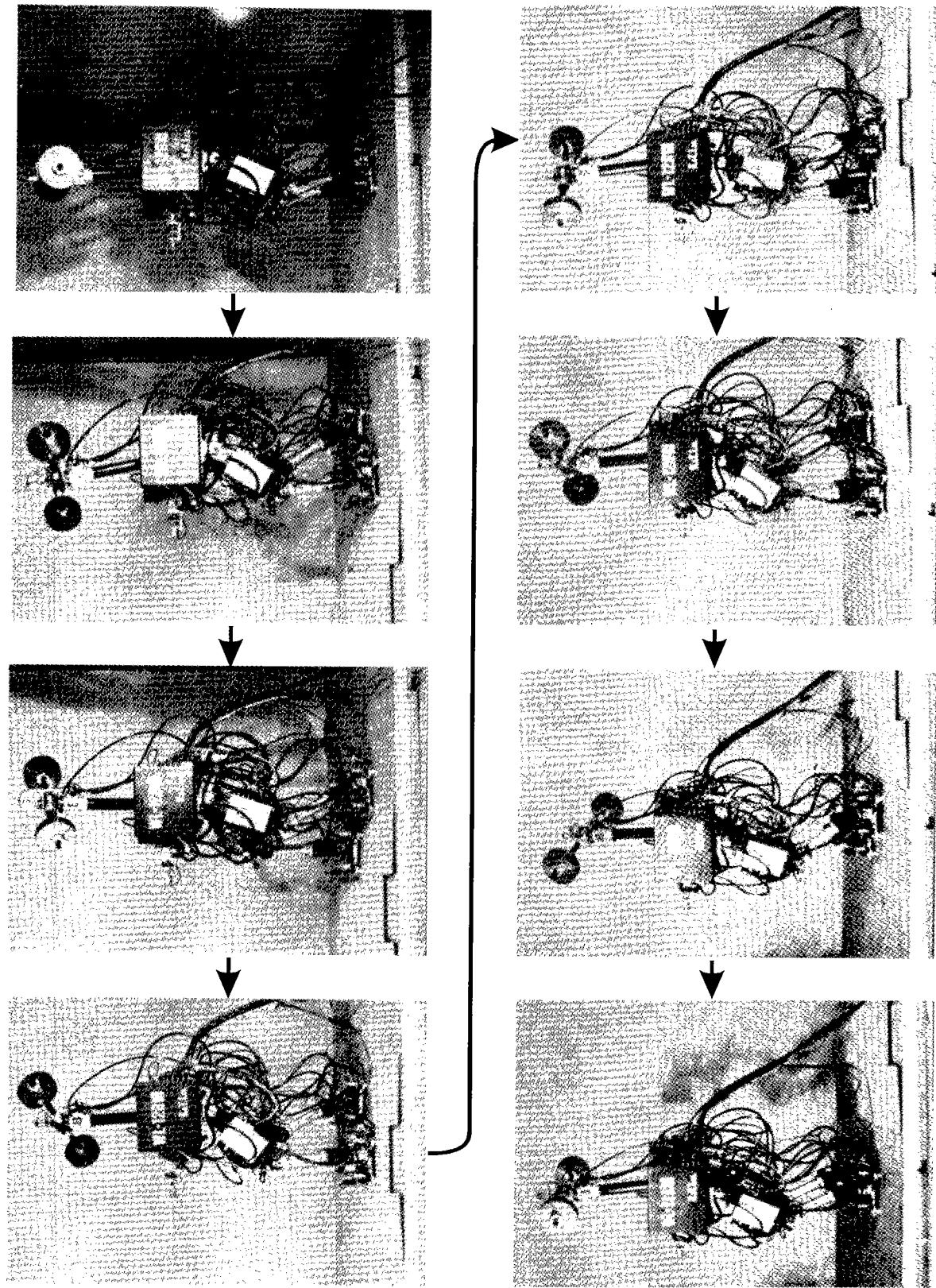
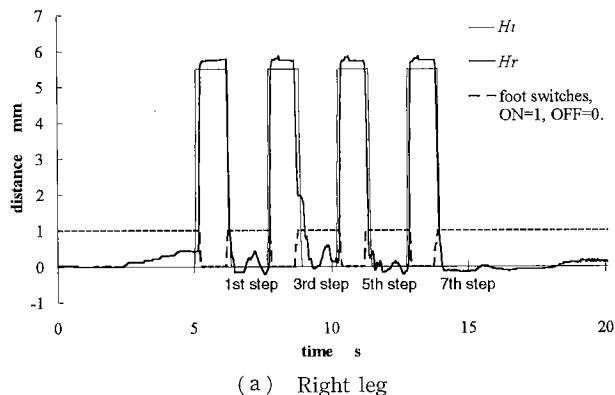
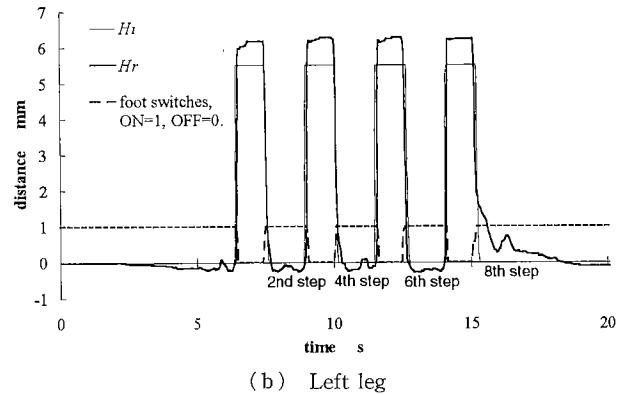


Fig. 14 Walking experiment. Realized dynamic walking adapting to an unknown trapezoidal surface.
Inclination +3° (3rd step), -3° (5th step), length : 0.3[m/step], step time : 1.28[s/step].

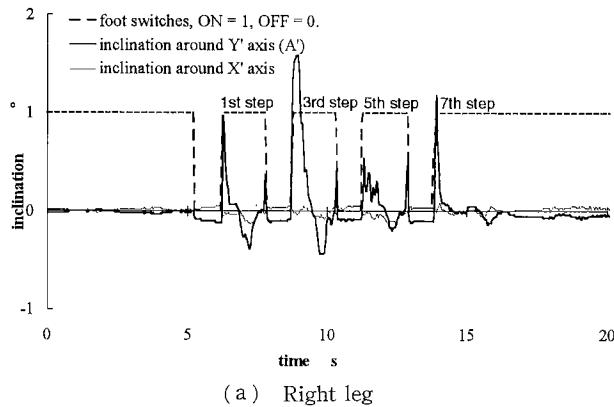


(a) Right leg

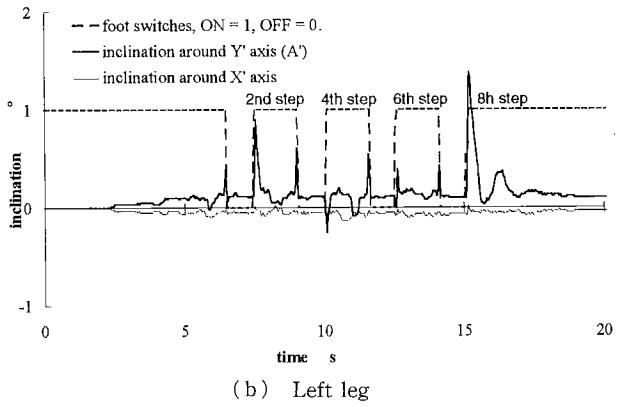


(b) Left leg

Fig. 15 Distance between upper-foot plate and lower-foot plate during dynamic walking adapting to an unknown trapezoidal surface. Inclination +3° (3rd step), -3° (5th step), length : 0.3[m/step], step time : 1.28[s/step].

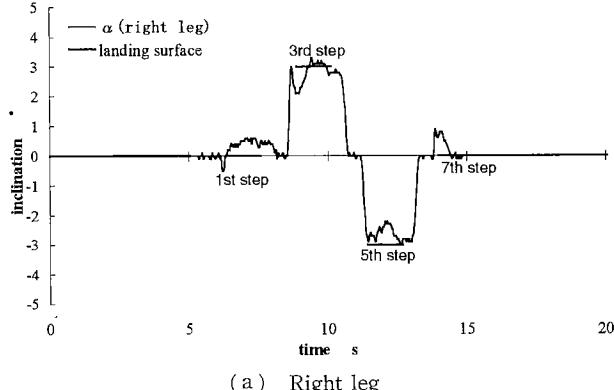


(a) Right leg

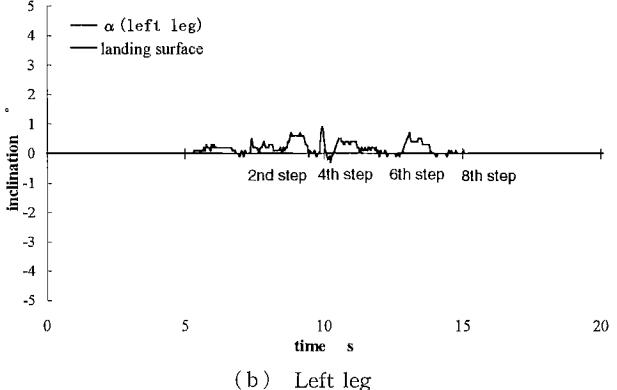


(b) Left leg

Fig. 16 Inclination of lower-foot plate from upper-foot plate during dynamic walking adapting to an unknown trapezoidal surface. Inclination +3° (3rd step), -3° (5th step), length : 0.3[m/step], step time : 1.28[s/step].



(a) Right leg



(b) Left leg

Fig. 17 Angle of upper-foot plate during dynamic walking adapting to an unknown trapezoidal surface. Inclination +3° (3rd step), -3° (5th step), length : 0.3[m/step], step time : 1.28[s/step].

の台形状の障害物を踏み越えた場合の歩行シミュレーション結果をスティック線図にしたものとそのときのZMP軌道を示す。この図より設定ZMP軌道に対し最も大きな偏差が予想される条件下でもその偏差は僅かであり、上体補償軌道の変更の必要性がないことが確認できる。

6. 歩 行 実 験

開発した2足歩行ロボットシステムと提案した歩行制御方式

の有効性を実証するために、足底機構部WAF-3を搭載した2足歩行ロボットWL-12 RVIIと開発した歩行制御ソフトウェアを用いて、傾斜角度と高さ方向に関して偏差がある路面に対する適応歩行実験を行った。

歩行実験の結果、上述の歩行シミュレーションにおいて使用した基準歩行パターン(3次元動歩行、1.28[s/step]、0.3[m/step])を用いた場合、水平平坦路面上で、1歩あたりの相対高低差+16[mm]～-16[mm]、絶対傾斜角度±3°までの路面形

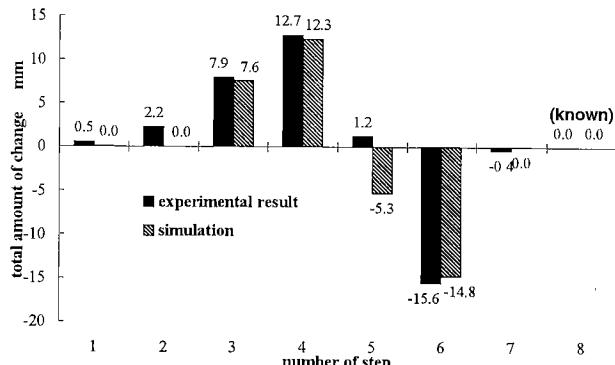


Fig. 18 Total amount of change in the upper-foot plate's trajectory on Z^m -axis per one step during dynamic walking adapting to an unknown trapezoidal surface. Inclination $+3^\circ$ (3rd step), -3° (5th step), length : 0.3[m/step], step time : 1.28[s/step].

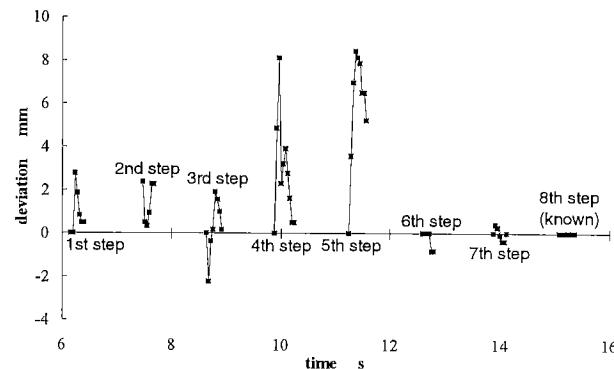
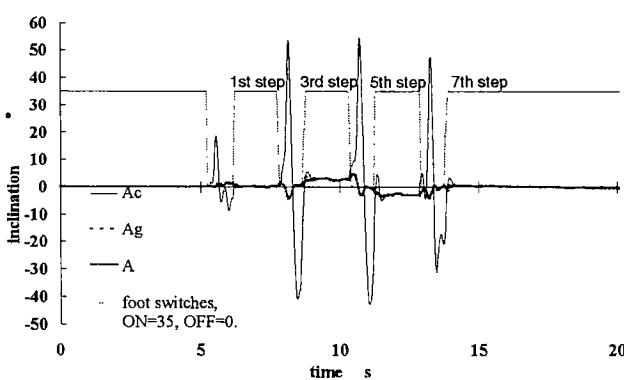
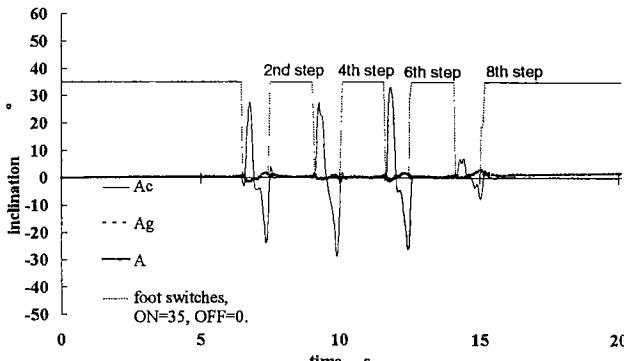


Fig. 19 Deviation of the upper-foot plate's trajectory on Z^m -axis from simulated trajectory. Inclination $+3^\circ$ (3rd step), -3° (5th step), length : 0.3[m/step], step time : 1.28[s/step].



(a) Right leg

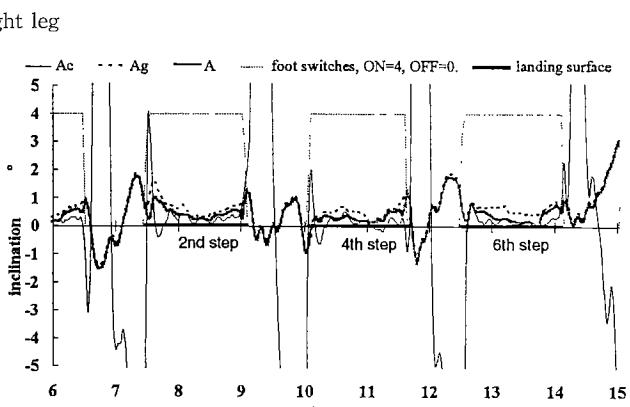
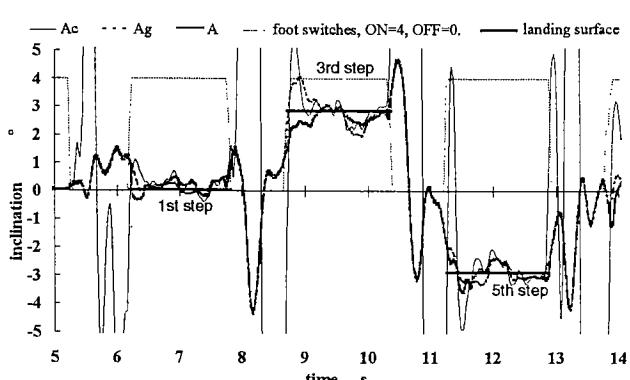


(b) Left leg

Fig. 20 Measurement results of landing surface's absolute inclination during dynamic walking adapting to an unknown trapezoidal surface. Inclination $+3^\circ$ (3rd step), -3° (5th step), length : 0.3[m/step], step time : 1.28[s/step].

状偏差に対して、歩行安定化機構が1歩の時間以内で除去できる偏差内に下肢軌道を実時間制御することができた。この結果は歩行シミュレーション結果とほぼ一致している。なお、歩行路としては、本機械モデルが歩行を行ってもほとんど変形しないフローリングの床から、日本の住環境において特徴的である畳のように、機械モデルが単脚支持状態で2[mm]程度の沈みこみが起きるものまで対応可能であった。

以下、最も条件の厳しい路面に対する歩行実験結果の一例と



して、歩行開始・終了を含む8歩で構成される動歩行(1.28[s/step], 0.3[m/step])下で、水平平坦路上に設けられた未知の台形状路面(高さ+20[mm], 斜面の絶対傾斜角度±3°)に対して適応する歩行を行ったときの歩行実験結果について述べる。実験の歩行路には、人間の住環境を想定して、フローリングの床に毛足の短いウールの絨毯を敷いた歩行路を用いている。また、この歩行路は2足歩行ロボットWL-12 RVIIが単脚支持状態で歩行路面に対し垂直方向に1.5[mm]程度の沈みこみが

起きるものである。

Fig. 14 に、そのときの連続写真を示す。ロボットの各関節のアクチュエータには、高ゲインの局所位置フィードバック制御を適用しており、従来のような着地衝撃を緩衝するための試行錯誤的な位置ゲインの調整は行っていない。路面形状偏差に対する歩行成功確率は、ほぼ 100% (50 回程度の歩行を行い、転倒回数 0 回) であった。

Fig. 15 に、歩行中の足底板間距離 H_r と基準歩行パターンで水平平坦路上を歩行した場合の理論上の足底板間距離 H_t を、**Fig. 16** に下部足底板に対する上部足底板の X' 軸回りと Y' 軸回りの傾きを示す。

Fig. 15 について説明すると、この図より着地期において、足底板間距離 H_r が目標値 H_t に全般によく追従していることが確認できる。これにより着地制御が期待通りに行われているといえる。なお、**Fig. 15(a)** に示した右足 3 歩目の両脚支持期にわずかな偏差がみられるが、これは、**Fig. 15(b)**、**Fig. 16(b)** より同時期に反対の脚であり立脚でもある左足が安定した支持を行っていること、そして **Fig. 16(a)** より右足に Y' 軸回りの揺動が確認できることから、足底機構部 WAF-3 の立脚切替安定化機構が作動しているためと考えられる。

Fig. 16 について説明すると、まず足底板間の Y' 軸回りの傾斜についてであるが、着地期には、最大で 1.5° 程度の傾斜を持って着地しているが、後の立脚期においては ±0.2° 程度に収束しており、かつ同時期の反対の脚である立脚には、揺動がほとんどない安定した支持が行われていることが確認できる。これはロボットがピッチ軸回りにおいて安定した歩行を行っていることを示している。これにより式 (2-c) を用いた着地制御の有効性が確認できる。そして、足底板間の X' 軸回りの傾斜についてであるが、図より最大でも 0.1° 程度の傾斜しかなく、ロボットがロール軸回りにおいて安定した歩行を行っていることが確認できる。

Fig. 17 に、上部足底板目標角度(足首部ピッチ軸アクチュエータの角度) α と着地路面の傾斜角度を示す。この図は、路面の傾斜角度偏差に対する Y' 軸回りの下肢軌道の変更の様子をあらわしている。全体の傾向は、立脚期には路面傾斜角度に対し 0.5° 以内の偏差を持った一定値になっているが、着地期から立脚期の単脚支持期前期にかけて路面傾斜角度に対して 1° 以内の偏差の変動値を取っているステップもある。これは、式 (2-c) を用いた着地制御により、衝撃を回避する運動が発生しているためと考えられる。

Fig. 18 に、各ステップにおける下肢軌道の Z' 軸方向軌道の総変更量(実験結果とシミュレーション)を示す。この図より、高さ方向に偏差のない着地路面(1, 2, 7 歩目)であっても下肢軌道の変更・制御が数ミリのオーダーで行われていることが確認できる。一方、高さ方向に偏差のある着地路面(3~5 歩)においても、実際の路面形状偏差に対して、実際の下肢軌道の変更量は異なる値となっている。この原因は機械モデルの構造部材のたわみなどによる内部的な偏差と僅かに変形する絨毯による影響と考えられる。

Fig. 19 に、着地期における実際の下肢軌道の Z' 軸方向軌

道のシミュレーションに対する偏差を示す。全体の傾向は、シミュレーション結果に対して着地期前期に正の偏差がみられ、後に偏差が小さくなっていく様子が確認できる。これは、シミュレーションでは考慮していない、機械モデルの構造部材のたわみなどの内部誤差および僅かに変形する絨毯により、全般に計画した遊脚着地時刻より早く着地する方向に、動的な偏差が生じており、この偏差を修正すべく下肢軌道の変更・制御が行われているためと考えられる。このように機械モデルの内部誤差や路面の僅かな変形量を修正しようとして生じる運動は、筆者らが高さ方向のみに偏差のある路面に対する適応歩行実験を行った際にもみられた[17]~[19]。これらの実験結果から、本歩行制御方式は、機械モデルの内部誤差や変形する路面に対しても、ある程度は対応できるといえる。

Fig. 20 に、着地路面の絶対傾斜角度の測定結果を示す。この図より着地路面の絶対傾斜角度が ±0.5° 程度の精度で検出できていることが確認できる。これは、要求される検出精度(1° 程度)を十分に満たしており、式(1)による着地路面の絶対傾斜角度の測定方法および開発した着地路面検知機構の有効性が確認できる。

ところで、適応可能範囲外の路面に対する歩行実験結果について述べると、この場合は 1 歩の時間以内で除去不可能な下肢軌道偏差が生じる。まず、適応可能範囲外 2 [mm/step] および 1° 程度までは(着地スパイクが段差の縁に引っかかる場合を除く)、2 もしくは 3 歩程度で下肢軌道偏差によるピッキング振動またはローリング振動が減衰した。しかし、この範囲を越えた場合においては、生じた不安定挙動を減衰させることができず転倒に至った。このような場合の姿勢安定化動作の例としては、上体と下肢の協調動作による動的な姿勢安定化制御が考えられるが、この問題については今後の課題としたい。

7. 結 論

本研究は、人間の住環境での歩行を目指し、形状に偏差のある路面に対して実時間で適応する 2 足歩行を等身大のロボットを用いて実現することを研究の目的とした。

そこでまず、衝撃緩衝材料を用いることで比較的軽量に、ロボットに一定程度のロバスト性を持たせると同時に、動歩行下で全歩行周期に渡り着地路面に対する相対位置情報と絶対傾斜角度を測定できる足底機構部を開発した。また、開発した足底機構部を有する等身大の人間形 2 足歩行ロボットを開発した。

次に、開発した足底機構部から取得できる複数の情報を用いて、路面形状に偏差のある路面に対して実時間で適応する歩行制御方式を考案した。

さらに、開発した 2 足歩行ロボットを用いて歩行実験を行い、路面形状に偏差のある環境に対して実時間で適応する歩行を実現した。

以上より、本研究で提案した歩行制御方式ならびに開発した 2 足歩行ロボットシステムの有効性を確認した。

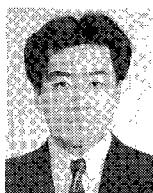
謝 辞

本研究は早稲田大学理工学総合研究センター「ヒューマノイドプロジェクト」の一つである「ヒューマノイドプロジェクト」

ト」で行われた。本プロジェクト研究に御協力をいただいた株式会社ATR、株式会社ナムコ、日産自動車株式会社、そして株式会社安川電機に感謝の意を表します。また、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御協力をいただいたアナログ・デバイセズ株式会社、黒田精工株式会社、東レ株式会社、日本航空電子工業株式会社、日本ムーグ株式会社、そして油研工業株式会社に感謝の意を表します。最後に、足底機構部の製作に関して協力していただいた小林恒孝氏、中條康氏、岩田充康氏、松下新治氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 梶田, 谷: “凹凸路面における動的2足歩行の制御について—線形倒立振子モードの導出とその応用—”, 計測自動制御学会論文集, vol. 27, no. 2, pp. 177-184, 1991.
- [2] 矢吹, 古莊, 佐野: “段差のある環境における2足歩行ロボットの動歩行制御に関する研究”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 319-320, 1991.
- [3] 佐野, 古莊: “角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元歩行”, 計測自動制御学会論文集, vol. 26, no. 4, pp. 459-466, 1990.
- [4] 高西, 石田, 山崎, 加藤: “2足歩行ロボットWL-10 RDによる動歩行の実現”, 日本ロボット学会誌, vol. 3, no. 4, pp. 325-336, 1985.
- [5] 高西: “上体の運動によりモーメントを補償する2足歩行ロボット”, 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 3, pp. 348-353, 1993.
- [6] 山口, 高西, 加藤: “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”, 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 4, pp. 581-586, 1993.
- [7] 山口, 高西, 加藤: “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～高速上体補償軌道算出アルゴリズムの開発～”, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 597-600, 1992.
- [8] J. Yamaguchi, A. Takanishi and I. Kato: “Development of a Biped Walking Robot Compensating for Three-Axis Moment by Trunk Motion,” Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93), pp. 561-566, 1993.
- [9] 李, 高西, 加藤: “上体を有する2足歩行ロボットの学習制御”, 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 7, pp. 1011-1019, 1993.
- [10] 高西, 松熊, 小林, 加藤: “着地タイミングに基づく2足歩行ロボットの下肢軌道学習制御”, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 237-238, 1993.
- [11] 梶田, 谷: “2足歩行ロボットの支持脚切り換えに関する実験的検討”, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 431-432, 1994.
- [12] 佐野, 古莊, 伊伸: “両脚支持期における2足歩行システムのトルク分配制御”, 計測自動制御学会論文集, vol. 26, no. 9, pp. 84-91, 1990.
- [13] 加藤: “リリスボット—生活支援ロボットの構想”, 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 5, pp. 614-617, 1993.
- [14] 高西, 粕田, 山口, 松熊, 加藤: “衝撃緩衝材料を用いた足底機構による2足歩行の安定化”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 325-326, 1991.
- [15] 山口, 高西, 加藤: “衝撃緩衝材料を用いた足底機構による2足歩行の安定化と路面位置情報の取得”, 日本ロボット学会誌, vol. 14, no. 1, pp. 67-74, 1996.
- [16] J. Yamaguchi, A. Takanishi and I. Kato: “Experimental Development of Foot Mechanism with Shock Absorbing Material for Acquisition of Landing Surface Position Information and Stabilization of Dynamic Biped Walking,” Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '95), pp. 2892-2899, 1995.
- [17] 山口, 高西, 加藤: “環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発～未知の凹凸路面に対する適応歩行の実現～”, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 233-236, 1993.
- [18] J. Yamaguchi, A. Takanishi and I. Kato: “Development of a Biped Walking Robot Adapting to a Horizontally Uneven Surface,” Proceedings of the 1994 IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94), pp. 1156-1163, 1994.
- [19] 山口, 高西, 加藤: “路面形状に偏差がある環境における2足歩行制御～未知の凹凸路面に対する適応歩行の実現～”, 日本ロボット学会誌, vol. 13, no. 7, pp. 1030-1037, 1995.
- [20] Yuan F. Zheng and Jie Shen: “Gait Synthesis for the SD-2 Biped Robot to Climb Sloping Surface,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 6, no. 1, pp. 86-96, 1990.
- [21] 山口, 木下, 松下, 高西, 加藤: “未知の路面形状に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発”, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1185-1186, 1994.
- [22] 山口, 木下, 岩田, 松下, 高西: “衝撃緩衝材料を用いた足底機構を持つ2足歩行ロボットによる未知路面歩行”, ロボティクス・メカトニクス講演論文集 (vol. A), pp. 190-193, 1995.
- [23] 山口, 高西: “実環境に適応する2足歩行ロボットの開発”, 第38回自動制御連合講演会, pp. 183-186, 1995.
- [24] J. Yamaguchi, N. Kinoshita, A. Takanishi and I. Kato: “Development of a Dynamic Biped Walking System for Humanoid—Development of a Biped Walking Robot Adapting to the Humans'Living Floor—,” Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '96), 1996.



山口仁一 (Jin'ichi Yamaguchi)

1968年2月12日生。1991年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1993年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学大学院博士後期課程4年。1996年より同大学理工学総合研究センター助手(任期2年)。人間形2足歩行ロボットに関する研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会、日本動物心理学会、バイオメカニズム学会の会員。

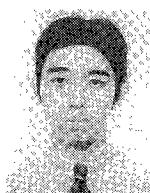
(日本ロボット学会学生会員)



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後期課程単位取得退学。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。工学博士。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。

(日本ロボット学会正会員)



木下 昇 (Noboru Kinoshita)

1967年4月11日生。1992年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1994年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年松下電器産業株式会社入社。在学中2足歩行ロボットに関する研究に従事。



故 加藤一郎 (Ichiro Kato)

1925年5月2日生。1950年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。千葉工業大学専任講師、助教授、早稲田大学助教授を経て、1967年より同機械工学科教授。1994年6月19日没。筋電制御義手WIMEハンド、人間形ロボットWABOTシリーズなどの作品がある。

(日本ロボット学会名誉会員)