

多様な路面性状に対する
2足歩行ロボットの適応
歩行に関する研究

Study on Biped Walking Robot
Adaptable to Various Road Profiles

2013年 2月

姜 賢珍

Hyunjin Kang

多様な路面性状に対する
2足歩行ロボットの適応
歩行に関する研究

Study on Biped Walking Robot
Adaptable to Various Road Profiles

2013年 2月

早稲田大学大学院 先進理工学研究科
生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

姜 賢珍

Hyunjin Kang

摘 要

近年，多くの機関や企業でロボットに関する研究が盛んに行われている．特に，車輪式やクローラ式，脚式あるいはそれらを組み合わせたハイブリッド式など，様々な移動様式のロボットに関する研究や開発が活発に行われている．その中でも脚式移動ロボットは移動面との接触状態が離散的な環境においても移動でき，固有な移動環境以外の想定していない環境においても適応的に移動することが可能である．脚式といえは4足や6足などの動物のような多足ロボットが多いが，それに比べて2足歩行は，ロボットの進行軸方向の長さが短いため狭い場所での小回りが可能であり，自由度に対して占有面積が小さいという特徴から，狭い人間の住環境での運用に適していると考えられる．人間の住環境には平坦な路面だけでなく不整路面も存在している．しかし不整路面といっても，脚接地面に変形を伴わない剛体路面以外に，砂地や草地，雪道といった加重により脚接地面が変形する軟弱路面も多く存在する．

そこで本研究では，2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として，多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行を実現するために，路面の力学的特性に基づいたモデル化とその制御法について明らかにすることを目的とした．具体的には，実環境に存在する様々な路面を調査し，工学的な観点からばね・ダンパ系でモデル化することで，路面を分類した．そして，路面パラメータを同定するために必要な路面を押し込む際の変位や速度，力などのデータを取得可能な路面性状測定装置を開発した．剛体の不整路面における歩行に関しては路面検知可能なセンサ式足部機構と路面適応制御を開発し，提案手法を2足歩行ロボットに実装して歩行実験を通して評価した．軟弱路面における歩行に関しては路面のモデル化に基づいた歩行安定化制御を開発し，2足歩行ロボットに実装して行った歩行実験により軟弱路面における歩行に成功し，その有効性を確認した．

本論文は，以下に示す8章から構成されている．各章の要約を示す．

第1章では，序論として本研究の研究背景と目的，その意義と関連研究の動向について述べた．

第2章では，多様な路面の工学的モデルがないことから路面のモデル化について述べた．まず，土木工学，地盤工学などの路面に関する他分野での文献調査と共に住環境に存在する多様な路面について調査を行った．調査した路面を各々の特性に応じて「凹凸度」，「軟弱度」，「低摩擦度」の3つの軸で分類した．また，路面の変形を，路面の弾性と粘性によるものにとらえ，ばね・ダンパと滑りを考慮する摩擦要素を用い

てモデリングし、並進変形だけでなく回転変形も考慮した6次元のモデルを提案した。特に Roll, Pitch 軸周りの回転変形は、上下方向の並進変形を表現するばね・ダンパモデルを4つ並列に配置し、それぞれの変形量の差により表現することにした。

第3章では、第2章において述べた路面モデルのパラメータを同定可能な路面性状測定装置の開発および評価実験と考察を述べた。路面性状測定装置は路面に対し、6自由度の構成で、先端部には足部型力センサと6軸力覚センサを搭載した。足部型力センサは2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R (Waseda Bipedal Humanoid - No.2 Refined) の足部と同サイズで、足底部を左右前後方向に4つに分割し、各々のばねの変形を光学センサで検出する光学式力センサを持ち、上下方向の並進変形と Roll, Pitch 軸周りの回転変形が計測可能である。路面に対して力と速度を制御しつつ加重し、連続的な変形量を計測することで路面モデルの粘弾性パラメータが同定可能である。開発した路面性状測定装置を用いて評価実験を行い、計測されたパラメータ値と考案した路面のモデルの有効性を確認した。

第4章では、未知の凹凸路面に適応可能な不整路面適応制御の開発、およびその評価実験と考察について述べた。開発した不整路面適応制御は、着地軌道修正制御と姿勢補償制御からなる。着地軌道修正制御は歩行パターンから得られる理論コンプライアンス中心移動量と足部の力センサのデータから算出される実測コンプライアンス中心移動量を比較することにより路面形状を検知するものである。姿勢補償制御は、瞬間的な姿勢の崩れに対応するために、姿勢角速度を用いた PID 制御からなり、ロボット自身の振動によって発生する角速度を不要に検出しないように移動平均フィルタを通しノイズを抑制する方法も採用している。提案手法を、2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し評価したところ、実験室内において 20[mm]の段差を高さ方向に踏む歩行や、傾斜 5[deg]の屋外環境での歩行に成功した。しかし、段差や傾斜が混在するような路面においては、安定領域を大きく確保できず、歩行安定性が悪いという課題があり、ハードウェアの面からも工夫が必要であった。

第5章では剛体の不整路面における適応歩行のための4点型路面検知足部機構の開発とそれを用いた不整路面適応制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。ロボットの足部が剛体平板であると、足底の中心部に突起物があるよううねり路面に対応することが難しいが、4点型路面検知足部機構はロボットの足底4隅の接地点に厚みを持たせることで、そのよううねり路面にも適応可能な構造である。足底4隅の接地点は路面高さを検出する接触式センサの役割も持ち、接地部の押し込み量をフォトリフレクタにより測定することで、路面との距離が測定できる。不整路面では4点すべてで接地することは原理的に不可能なため、4つのセンサのうち最初に路面を検知したセンサに応じて接地点を3点を選択し、支持多角形を確保する。そして路面

検知センサの値に応じてロボット足部が路面に倣うように着地軌道を修正する歩行安定化制御系を開発した。開発した4点型路面検知足部機構を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に装着して、第4章での姿勢補償制御も併用して歩行実験を行ったところ、厚さ 20[mm]までのアクリル板を用いた擬似的な不整路面での歩行に成功した。さらに、最大の凹凸 15[mm]と傾斜 7[deg]が混在する屋外環境での歩行にも成功し、その有効性を確認した。しかし、着地軌道を修正する際に足底中心点周りに足部姿勢を修正していたため、接地点が不整路面から滑落しやすく、さらに支持多角形における安定余裕が小さいため歩行成功率が低いという課題があった。

第6章では、第5章において述べた4点型路面検知足部機構の欠点を補う3点型路面検知足部機構の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。4点型路面検知足部機構では、足底4隅の接地点から不整路面との接地部を3点選択していたが、設定 ZMP から支持多角形の境界までの距離、すなわち安定余裕が小さく歩行安定性が悪いという問題点があった。そのため3点型の足部機構にすることで、支持多角形は小さくなるが安定余裕を大きく取ることが可能な構造にした。着地軌道の修正方法は4点型路面検知足部機構と同様であるが、路面に倣う際に接地点が並進方向に変位を生じ不整路面から滑落することを防ぐため、足部姿勢を修正する際の回転中心を足底中心点から路面との接地点に変更することで滑落防止を図った。また、路面検知センサで誤検知が生じることがあったため、センサ部の直動軸の材質を炭素鋼 S45C から軸受鋼 SUJ2 へ変更し、さらに高周波焼き入れ処理を施すことで軸の硬度や耐摩耗性を向上させた。開発した足部機構と制御法を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し評価実験を行ったところ、5[mm]から 20[mm]までの段差が混在する擬似不整路面、および傾斜 7[deg]の擬似斜面での安定した歩行を実現し、歩行成功率の向上を確認した。

第7章では、脚接地面が変形する軟弱路面に適応可能な制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。軟弱路面を歩行中は ZMP (Zero Moment Point) を制御することが難しいため、重心位置を安定化する制御法を開発した。具体的には、軟弱路面を一様なばね要素として仮定することで足部の6軸力覚センサの測定値から路面の変形量が推定できるため、片脚支持期には足関節でトルクを発生し、重心位置を安定化する。さらに、両脚支持期には各足の床反力を目標床反力に収束させるように脚長を修正し、重心位置を安定化することとした。開発した制御法を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し、高さ 50[mm]の極めて柔らかいウレタンスポンジ (密度: $22 \pm 2[\text{kg}/\text{m}^3]$) 上で歩行実験を行った。なお、路面性状計測装置で路面パラメータを同定し、ウレタンスポンジのばね定数を 60[N/m]に設定した。歩行実験の結果、ウレタンスポンジ上での足踏み動作と前進歩行に成功し、提案手法の有効性を確認し

た。

以上のように、第2章、第3章で述べた路面のモデル化と路面性状測定装置により、路面の工学的なモデルを立てた。また、第4章、第5章、第6章で述べた不整路面適応制御とセンサ式足部機構により、屋外に存在する凹凸路面で歩行できることを実証した。そして、第7章で述べた軟弱路面歩行安定化制御により、脚接地面が変形する軟弱路面での歩行に成功した。

最後に、第8章では、結論として以上の研究成果を総括した。また今後の展望として、路面モデルの確立と軟弱路面における歩行に対する問題点と2足歩行ロボットに実装されている制御の統合について言及した。

以上、本論文では、まず2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行を実現するために、力学的特性に基づいた路面のモデル化とそれぞれの路面に応じた制御法を開発することを目的とした。その成果として、住環境に存在する多様な路面をばね・ダンパ系で6次元のモデル化し、路面を分類した。そして、路面パラメータを同定するために必要な路面を押し込む際の変位や速度、力などのデータを取得可能な路面性状測定装置を開発した。また、剛体の不整路面における歩行に関しては路面検知可能なセンサ式足部機構と路面適応制御を開発し、提案手法を2足歩行ロボットに実装し、歩行実験を通して評価した。一方、軟弱路面における歩行に関しては路面のモデル化に基づいた歩行安定化制御を開発し、2足歩行ロボットに実装して行った歩行実験より軟弱路面における歩行に成功し、その有効性を確認した。最後に本論文において述べられた歩行制御法を実装することで、2足歩行ロボットに多様な性状の路面を歩行する能力を付加することが可能であることを主として報告した。

本研究の成果は、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの実用化に向けた基盤技術になるものである。この技術により、2足歩行ロボットの歩行能力が向上され、剛体路面のみならず軟弱路面など人間の様々な生活環境において移動が可能になった。高い運動能力を持つロボットを提供することができ、人間共存型ロボットの実現に一步近づいたと言える。さらに、狭い人間の住環境での運用に適している2足歩行ロボットの運動能力と共に他分野の多様な技術との相互関係によって、より人間共存型ロボットの飛躍的な活躍が拡大されるものであると期待できる。よって、ロボット工学、機械工学のみならず土木工学、地盤工学など幅広い工学分野の発展に大きく貢献するものであると考える。

目 次

記号の説明

第 1 章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の背景	2
1.3 本研究の目的と意義	5
1.4 関連する研究事例	6
1.5 本論文の構成	9
第 2 章 多様な路面分類	13
2.1 はじめに	13
2.2 路面の分類	14
2.3 路面のモデル	17
2.4 まとめと考察	34
第 3 章 路面性状測定装置の開発	37
3.1 はじめに	37
3.2 基本設計	37
3.3 路面測定足型センサ部の設計	49
3.4 評価実験と考察	61
3.5 まとめ	74
第 4 章 不整地路面適応制御の開発	77
4.1 はじめに	77
4.2 着地軌道修正制御	78
4.3 姿勢補償制御	83
4.4 評価実験と考察	87
4.5 まとめ	110

第5章	4点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御の開発	111
5.1	はじめに	111
5.2	基本設計	115
5.3	4点型路面検知足部機構の開発	115
5.4	4点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御	124
5.5	評価実験と考察	128
5.6	まとめ	160
第6章	3点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御の開発	163
6.1	はじめに	163
6.2	基本設計	163
6.3	3点型路面検知足部機構の開発	164
6.4	3点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御	183
6.5	評価実験と考察	188
6.6	まとめ	213
第7章	軟弱路面歩行安定化制御の開発	215
7.1	はじめに	215
7.2	足型センサを用いた適応歩行制御法	216
7.3	重心位置補償制御法	219
7.4	歩隔修正制御および足底姿勢修正制御法	224
7.5	床反力調整制御法	237
7.6	評価実験と考察	242
7.7	まとめ	262
第8章	結論	263
8.1	総合的な考察	263
8.2	結論	266
8.3	今後の展望	269
付録A	2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R	273

A.1	基本設計	273
A.2	機械ハードウェア	275
A.3	制御システム	276
A.4	WABIAN-2R	276
付録 B 遊脚軌道修正制御		281
B.1	はじめに	281
B.2	遊脚軌道修正制御法	282
B.3	評価実験と考察	291
B.4	まとめ	304
参考文献		307
謝辞		321
研究業績		

記号の説明

第3章

Δl :

着地路面検知用移動許容量

$\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]^T$:

足座標原点にかかる力・モーメント

$\Delta \mathbf{x}_f$:

足座標原点の歩行パターンからの位置偏差

$\Delta \dot{\mathbf{x}}_f$:

足座標原点の歩行パターンからの速度偏差

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & & & & & 0 \\ & K_y & & & & \\ & & K_z & & & \\ & & & K_{mx} & & \\ & & & & K_{my} & \\ 0 & & & & & K_{mz} \end{bmatrix} :$$

6次元仮想ばね係数行列

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_x & & & & & 0 \\ & C_y & & & & \\ & & C_z & & & \\ & & & C_{mx} & & \\ & & & & C_{my} & \\ 0 & & & & & C_{mz} \end{bmatrix} :$$

6次元仮想粘性係数行列

Δt :

制御周期

$\Delta \mathbf{x}_f(t)$:

現在の足座標原点の歩行パターンからの偏差

$\Delta \mathbf{x}_f(t - \Delta t)$:

1制御周期前の足座標原点の歩行パターンからの偏差

$\Delta z_{ac}(t)$:

現在の足座標原点のZ軸方向の実測コンプライアンス中心移動量

$\Delta z_{ac}(t - \Delta t)$:

1制御周期前の足座標原点のZ軸方向の実測コンプライアンス中心移動量

K_{z1}, C_{z1} :

着地路面検知用コンプライアンス係数

K_{z2}, C_{z2} :

振動抑制用コンプライアンス係数

$\Delta\theta_x(t), \Delta\theta_y(t):$	現在の足座標原点の Roll 軸, Pitch 軸方向のコンプライアンス中心移動量
$F_{\theta_x}, F_{\theta_y}:$	Roll 軸, Pitch 軸方向の床反力
$K_{\theta_x}, C_{\theta_x}, K_{\theta_y}, C_{\theta_y}:$	Roll 軸, Pitch 軸方向の着地路面検知用コンプライアンス係数
$\Delta z_{th}(t):$	現在の足座標原点の Z 軸方向の理論コンプライアンス中心移動量
$\bar{z}_{pat}(t):$	基準歩行パターンにおける足先位置高さ
$z_{waist}(t):$	腰座標原点の歩行面から高さ
$e(t):$	着地路面高さ誤差
$H(t):$	現在の Z 軸方向の着地軌道修正量
$H(t - \Delta t):$	1 制御周期前の Z 軸方向の着地軌道修正量
$k_e:$	ゲイン
$\bar{z}_{final}(t):$	軌道修正後の Z 軸方向の足先位置高さ
$\theta_{xfinal}(t), \theta_{yfinal}(t):$	軌道修正後の Roll 軸, Pitch 軸方向の足部姿勢角
$\theta_{xpat}(t), \theta_{ypat}(t):$	基準歩行パターンの Roll 軸, Pitch 軸方向の足部姿勢角

第 4 章

$\Delta\theta = [\Delta\theta_{roll}, \Delta\theta_{pitch}]^T:$	姿勢角の操作量
$\Delta\bar{x}_{zmp} = [\Delta\bar{x}_{zmp}, \Delta\bar{y}_{zmp}]^T:$	設定 ZMP と実測 ZMP の差である ZMP 偏差
$\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}:$	姿勢角推定のためのゲイン行列
$\Delta\theta' = [\Delta\theta'_{roll}, \Delta\theta'_{pitch}]^T:$	時刻 t における姿勢角の修正量
$T_{modif}:$	姿勢角の修正期間

第 5 章

$x_p:$	ロボットの基準点 P の x 座標位置
$y_p:$	ロボットの基準点 P の y 座標位置
$\theta_p:$	ロボットの方向

θ_R :	右側車輪の回転角度
θ_L :	左側車輪の回転角度
r :	車輪の半径 (左右同じとする)
l :	車輪間距離
n :	Bezier 曲線の次数
s :	パラメータ ($0 \leq s \leq 1$)
\mathbf{P}_i :	制御点 (2次元ベクトル)
$B_i(s) \equiv {}_n C_i \times s^i \times (1-s)^{n-i}$:	Bernstein 関数
T_n :	n 番目の通過点から $n+1$ 番目の通過点までの移動に要する時間
a_{nm} :	n 番目の関数の m 次の項の係数
s_n :	n 番目の通過点に対応する媒介変数
$\mathbf{P}_R(t) = [x_R, y_R]^T$:	右車輪の接地点の位置
$\mathbf{P}_L(t) = [x_L, y_L]^T$:	左車輪の接地点の位置
$L_R(t)$:	車輪の移動距離
$\sigma_R(t)$:	車輪の回転方向を示す関数
θ_{ilt} :	足の傾き角度
x_{RF}, y_{RF} :	右足の絶対座標における位置
x_{LF}, y_{LF} :	左足の絶対座標における位置

第6章

$O-xy$:	x 軸および y 軸を含む平面が路面に一致し、原点が路面に固定されている直交座標系 (絶対座標系)
$P-x'y'$:	原点が左右の足の中点に固定されている直交座標系 (運動座標系)
x'_W, y'_W :	運動座標系 $P-x'y'$ から見た受動車輪の位置
a_W :	受動車輪と足部中心間の距離
θ_W :	受動車輪の転がり方向と x' 軸のなす角
θ_P :	x 軸と x' 軸のなす角

F_t :	受動車輪の転がり方向に加わる力
F_n :	受動車輪の垂直方向に加わる力
v_t :	受動車輪の転がり方向の速度
v_n :	受動車輪の垂直方向の速度
μ_t :	受動車輪の転がり方向の摩擦係数
μ_n :	受動車輪の垂直方向の摩擦係数
N_w :	路面から受動車輪に加わる垂直抗力
T :	基本パターン関数の周期
F_{min} :	足部に作用する内力の最小値
F_{max} :	足部に作用する内力の最大値
Δ :	ゲイン関数の補間マージン
L :	位置指令値の振幅
L_0 :	位置指令値の初期値
Θ :	角度指令値の振幅
ϕ :	位置と角度の位相ずれ

第 7 章

$O-xyz$:	x 軸および y 軸を含む平面が路面に一致し、路面に垂直な軸を z 軸とし、原点が路面に固定されている (右手) 直交座標系 (絶対座標系)
$P-\overline{xyz}$:	原点がスケート側の足に固定されている (右手) 直交座標系 (運動座標系)
T :	各パターンの時間
$v_S(t)$:	スケート足の x 方向速度
$x_S(t)$:	スケート足の x 方向絶対位置
$\bar{v}_K(t)$:	蹴り足の相対的な x 方向速度
$\bar{x}_K(t)$:	蹴り足の相対的な x 方向位置
$\bar{z}_K(t)$:	蹴り足の相対的な高さ
v_{S0} :	スケート足の初期速度
v_{St} :	スケート足の最終速度
y_{S0} :	スケート側の足の y 方向初期位置

\bar{y}_{K0} : 蹴り足の y 方向初期位置 (相対座標)

本論文中における記号表記に関する注意事項

1. 記号上部の線 (例: $\bar{\mathbf{r}}_i$) は運動座標系 $\bar{\mathbf{O}}-\bar{\mathbf{XYZ}}$ もしくは腰座標系におけるベクトル表現であることを示す.
2. 記号上部の 1 つの点 (例: $\dot{\mathbf{r}}_i$) は時間に関する 1 回微分であることを示す.
3. 記号上部の 2 つの点 (例: $\ddot{\mathbf{r}}_i$) は時間に関する 2 回微分であることを示す.

第1章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 本研究の背景
- 1.3 本研究の目的と意義
- 1.4 関連する研究事例
- 1.5 本論文の構成

1.1 はじめに

本論文では、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行に関する研究について論ずる。

脚式移動機構は、車輪式やクローラ式、脚式あるいはそれらを組み合わせたハイブリッド式など、様々な移動様式のロボットに関する研究や開発が活発に行われている。その中でも脚式移動ロボットは移動面との接触状態が離散的な環境においても移動でき、固有な移動環境以外の想定していない環境においても適応的に移動することが可能である。脚式といえば4足や6足などの動物のような多足ロボットが多いが、それに比べて2足歩行は、ロボットの進行軸方向の長さが短いため狭い場所での小回りが可能であり、自由度に対して占有面積が小さいという特徴から、狭い人間の住環境での運用に適していると考えられる。人間の住環境には平坦な路面だけでなく不整路面も存在している。しかし不整路面といっても、脚接地面に変形を伴わない剛体路面以外に、砂地や草地、雪道といった加重により脚接地面が変形する軟弱路面も多く存在する。本論文は、2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行を実現するために、路面の力学的特性に基づいたモデル化とその制御法について明らかにすることを目的とした。具体的には住環境に存在する様々な路面を調査し、工学的観点からばね・ダンパ系でモデル化することで、路面を分類した。そして、路面パラメータを同定するために必要な路面を押し込む際の変位や速度、力などのデータを取得可能な路面性状測定装置を開発した。住環境に存在する様々な不整路面に対して歩行能力を向上させることが可能な足部機構や適応制御の開発、また、軟弱路面における安定した歩行の実現させることが軟弱路面における安定化制御を提供するものである。

1.2 本研究の背景

近年、多くの機関や企業でロボットに関する研究が盛んに行われている[1,2]. 特に、前述したように車輪式やクローラ式、脚式あるいはそれらを組み合わせたハイブリッド式など、様々な移動様式のロボットに関する研究や開発が活発に行われている[3-43]. その中でも脚式移動ロボットは移動面との接触状態が離散的な環境においても移動でき、固有な移動環境以外の想定していない環境においても適応的に移動することが可能である. 脚式といえば4足や6足などの動物のような多足ロボットが多いが、それに比べて2足歩行は、ロボットの進行軸方向の長さが短いため狭い場所での小回りが可能であり、自由度に対して占有面積が小さいという特徴から、狭い人間の住環境での運用に適していると考えられる[44-75]. 人間の住環境には平坦な路面だけでなく不整路面も存在している. しかし不整路面といっても、脚接地面に変形を伴わない剛体路面以外に、砂地や草地、雪道といった加重により脚接地面が変形する軟弱路面も多く存在する.

しかし、多くのところからは2足歩行の基礎となる剛体路面での歩行に関して主に研究を進めている.

早稲田大学における2足歩行ロボットおよびヒューマノイドロボットの研究は、加藤一郎研究室において1966年度より開始された[76].

ロボットの2足歩行に関する研究は、空気圧駆動による軽量モデル WAP(Waseda Auto Pedipulator)シリーズ[77], サーボ駆動による重量モデル WL(Waseda Leg)シリーズ[78]および全身を備える2足ヒューマノイドロボット WABIAN(WAseda BIpedal humANoid)シリーズを用いて行われてきた.

近年の研究では、1986年から1993年まで、上部部に設けられたバランシング・ウェイトを動かすことで下肢の発生するモーメントを補償する上部補償型2足歩行ロボット WL-12 シリーズの開発・研究が行われた. WL-12 シリーズでは、階段の昇降動作、未知の外力下での動歩行、動的な方向転換、未知の凹凸路面における動歩行などの成果を上げた[79-95].

1994年から1995年まで、人間の下肢関節をモデルとして、回転型非線形ばね機構を搭載した関節拮抗駆動型2足歩行ロボット WL-13 の開発・研究が行われた.

1995年にはWL-13を用いて関節拮抗駆動型2足準動歩行が実現された.

1996年には、股関節に回転型非線形ばね機構を用いた拮抗駆動関節を有する2足歩行ロボット WL-14 が開発され、同モデルを用いて関節拮抗駆動型2足動歩行および関節剛性可変による拮抗駆動型2足動歩行を実現した.

1997年には、人間の歩行の遊脚期における下肢軌道をモデルとした歩行パターンに

より歩幅 0.25[m], 1 歩 1.44[s]のより高速な拮抗駆動型 2 足動歩行を WL-14 にて実現した。

2001 年度には, 脚機構に 6 自由度の平行メカニズムを採用し, 電池により自立歩行が可能な WL-15 が開発され, 0.8[s/step]の比較的高速な動歩行, 0.96[s/step], 2 歩で 90[deg]の高速方向転換, 完全ワイヤレス稼動, 屋外での歩行, システム非稼動時の姿勢保持, 18[kg]の重量物搬送歩行を実現した。

2002 年度には, 改良版である WL-16 が開発され, 仮想コンプライアンス制御を用いることで, 厚さ 5[mm]の板を右足の下に敷いた路面での足踏み運動, 厚さ 2[mm]の板を無作為にならべて作成した仮想的な不整地において歩幅 0.1[m/step]の前方向への安定した歩行を実現した。また, 仮想コンプライアンス制御を用いて, 50[kg]の重りを搭載した状態で歩幅 0.1[m/step]の前方向への安定した歩行を実現した[96-99]。

2003 年度には WL-16R を開発し, 人間が搭乗した状態での歩行を実現した。また, 凹凸路面(厚さ 8[mm]), 傾斜路面(3[deg])での歩行等実現した。

2004 年度には WL-16RII を開発し, 人間が搭乗した状態での階段歩行を実現した。また, 着地軌道修正制御により ± 20 [mm]の不整路面歩行を実現した。

2005 年度には, 多段直動アクチュエータを搭載した WL-16RIII を開発した。また, 推定姿勢補償制御と着地軌道修正制御により砂利道(傾斜 3[deg]), 傾斜路面(10[deg])において歩行を実現した。

2007 年度に開発された WL-16RV は, 着地衝撃緩和型不整地路面適応制御により, 着地衝撃を 1000[N]から 400[N]まで低減した。さらに, 搭乗者もしくは外力によって発生する中長期的な外乱に対する歩行安定化を実現し, リアルタイム外乱補償制御との統合によって歩行パターンを修正することで, 閾値を超える外力から遠ざかる回避動作を実現した。

ヒューマノイドのプロトタイプとして, 1996 年に視聴覚情報取得機構を有する頭部, 胴部および腕部を持つ 2 足ヒューマノイド・ロボット WABIAN が設計・製作され, 開発したシステムを用いて上肢関節固定条件下で 1 歩 1.28[s], 歩幅 0.10[m]の動歩行, および手先一定条件下で双腕による動的荷物運搬作業を実現した。また, 人間が振る指揮棒のリズムに合わせての可変速ダンス, 人間とのジェスチャー交換, ISDN 回線を用いた遠隔操作などを実現した。

1997 年度には, 手先に加わる 6 軸力を計測するシステムを WABIAN に導入し, 水平平坦路上で歩幅 0.1[m], 1 歩 1.28[s]の歩行パターンを切り替えることにより, 手を用いた継続的な歩行追従動作を実現した。また 1997 年度に多様な全身運動を可能とするために片脚 6 自由度に改良した 2 足ヒューマノイドロボット WABIAN-R を開発し, 腰・体幹協調型 2 足動歩行を実現した[100-102]。

1998 年には、首関節に 1 自由度を付加した WABIAN-RII を開発し、腰自由度を活用することで歩行パターン切替えに必要な単位パターンの数を減らし、歩幅 0.15[m]、一歩 1.28[sec]の継続的な追従運動を実現した。

2000 年には、補償軌道生成において歩行に影響の少ないパラメータを調査・明確にし、補償軌道生成時間を大幅に短縮することで歩行中のパターン生成を可能とし、準リアルタイム（オンライン）で歩行パターンを生成しつつ人への追従運動を実現することを実現した。また、腰と体幹の強調動作によるリアルタイム安定化制御方式を考案し、静的外乱補償を実現した。

2002 年度には WABIAN-2/LL(WAseda BIpedal humANoid-2 Lower Limb)を開発した。これは従来の 2 足ヒューマノイドロボットとは異なり、片脚 7 自由度、腰に 2 自由度の合計 16 自由度を有している。新たな歩行パターン生成法として、膝関節を伸展させながらの歩行が可能となる「膝関節伸展型歩行パターン生成方式」を考案した。

2003 年度には、WABIAN-2/LL の下肢機構の剛性の強化を図った再設計をし、腰高さ一定型歩行で 0.20[m/step]、0.96[s/step]の歩行を実現した。また、膝関節軌道を立脚期・遊脚期ともに任意に指定可能にすることにより、0.35[m/step]、0.96[s/step]の歩行を実現した。

2004 年度には、2 自由度（Pitch, Roll）を有する体幹部と 7 自由度を有する上肢を開発し、WABIAN-2 の完成をした。

2005 年度には、踵接地が可能で、爪先立ちをした際に人間と同等の軌道を描くことができる爪先に受動的な 1 自由度を持つ足部機構と踵接地・爪先離地歩行パターン生成法を開発し、0.50[m/step]、0.96[s/step]までの踵接地・爪先離地歩行を実現した [103-105]。

2007 年度には 2004 年度に WL-16RII に実装された着地軌道修正制御を WABIAN-2R にも導入した。また、姿勢補償制御を組み合わせることにより、Pitch 方向での 20[mm]の凹凸に倣うことに成功し、また Roll 方向では 15[mm]の凹凸まで倣うことが可能となった。これにより不整地に対する適応性が向上した。

以上のようにこれまで行われてきた 2 足歩行ロボット・ヒューマノイドロボットの研究について振り返ってみると、ここ 10 数年の間に飛躍的に進歩し、人間の住環境内で活躍するロボットの登場が現実味を帯びてきている。早稲田大学に限らず、他の様々な研究機関においても安定な動的歩行を実現するロボットの研究・開発が行われ、それらが実証されている。

1.3 本研究の目的と意義

上記に述べたように高西研究室では長年の間2足歩行ロボットの研究・開発を行ってきた。近年では、「人間の模擬」と「住環境における歩行能力の向上」の2点に重点をおいて研究が進められている。

特に、本研究では住環境における歩行能力の向上に関するものであり、2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行の実現することを目的とした。

多くのところでは2足歩行ロボットの第一報として変形しない剛体路面における歩行に関して主に研究を進めている。高西研究室では2006年度に人間搭乗型2足歩行ロボットを用いて凹凸と傾斜が混在する屋外の剛体路面での歩行に成功した事例がある。しかし、これまでに開発されてきている2足歩行ロボットの歩行能力は、人間と比べると程遠いものであり、人間の住環境下で実用化されるまでにはまだ大きな技術の発展が必要である。

また、前述したように人間が生活する住環境に存在する不整路面は剛体路面だけではなく、砂地や草地、雪道といった加重により脚接地面が変形する軟弱路面も多く存在する。

雪道のようにすべりやすい路面に関しても2足歩行ロボット HRP-3 を用いて適応歩行に成功した事例がある。しかし、砂漠やカーペットのような柔らかい路面に関しては多脚歩行ロボットを用いて成功した事例はあるが、2足歩行ロボットに関しては基礎的な理論だけあり、実際に成功した事例がない。軟弱路面は加重により路面自体が変形してしまうため、剛体路面のようにZMP (Zero moment point) を制御に生かせることが不可能である。そのため、軟弱路面における安定化歩行に関する先行研究が大変少ない。

そこで、本研究は2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行の実現するために、路面の力学的特性に基づいたモデル化とその制御法について明らかにすることを目的とした。まず、前述した剛体の不整路面における歩行能力の向上を図るため、路面検知可能なセンサ式足部機構と路面適応制御の開発を行う。また、軟弱路面における安定した歩行を実現する際に必要な路面の工学的なパラメータがない点に着目し、住環境に存在する様々な路面を調査し、工学的観点からばね・ダンパ系でモデル化し、路面の分類を行う。そして、路面パラメータを取得可能な路面性状測定装置を開発した。路面のモデルに基づいた歩行安定化制御の開発を目指す。

1.4 関連する研究事例

高西研究室以外でも2足歩行ロボットの研究が数多く行なわれている。ここで、企業および他の研究機関における2足歩行ロボットの研究を紹介する。

本田技研工業株式会社にて開発された ASIMO は、バッテリーを搭載することで、外部からの供給を一切なくすことに成功している。さらに、無線のコントローラで操作することが可能である。また、“移動体抽出”、“ポスチャ・ジェスチャ認識”、“環境認識”といった、人が命令する時の手の動きや人の歩く動きを認識し、判断して行動することができる。2005年度に発表された新型 ASIMO では、全身協調運動や姿勢制御技術の改良により、時速 6[km]の走行や旋回走行を実現した。また、人に合わせて行動する機能が強化されるとともに、ワゴンを使った運搬機能も追加された。また、開発された統合制御システムにより、受付案内や、デリバリーサービスなどの自動作業が可能となった。2007年度には、複数の ASIMO をネットワークで結ぶことにより、各々の ASIMO の作業状態を共有し、共同作業が可能となった。

ソニー株式会社にて開発された QRIO は、“実時間統合適応制御”により、不整地面や傾斜面での歩行や外力が加えられたときの姿勢保持がリアルタイムで行える。また、傾斜面での歩行と登坂を可能にする“路面適応制御”、外力が加わった場合に転倒しないよう姿勢保持を行なう“外力適応制御”、転倒時に衝撃回避に適した姿勢保持を行なうとともに関節を柔らかく制御して衝撃を緩和する“反射適応制御”を搭載し、必要な歩行動作パターンをリアルタイムで生成する“実時間歩行動作パターン生成制御”も備えている。さらに歩行・跳躍・走行運動総合制御を導入し、自律型ヒューマノイドとしては世界初の走行の実証実験に成功している。さらに2005年12月、新たに腕部に2自由度追加され、頭部に広角カメラが搭載されたことにより、物体認識、作業能力が向上された。

川田工業株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所、株式会社安川電機、清水建設株式会社らにて共同開発された HRP-2 Promet は「起き上がり」と「寝転び」の動作をはじめ、人間の動きに同調し搬送作業等を行うことが可能である。

東京大学井上研究室にて開発された H7 は、下半身の自由度に7自由度の構成を採用し、平面の歩行のみならず階段歩行にも成功している。さらに、オンラインパターン生成を成功させ、ジョイスティックによるリアルタイム操作を可能としている。

榊原機械株式会社にて開発された LAND WALKER は人搭乗型操縦ロボットで、移動はすり足歩行により行い、前後左右といった機体の移動をペダルによる足操縦にすることにより、空いている両手で機体左右に取り付いている銃を移動時にも操作することが可能である。また、取り付けられたコックピットモニタにより搭乗時では視認しにくい機体前下、後下の確認を行うことができる。

トヨタ自動車株式会社で開発された i-foot は、60[kg]の人間搭乗歩行に成功してい

る。また、脚は鳥脚タイプで後方に折れ曲がる方式を採用しており、乗降性に配慮された設計となっている。さらに、ジョイスティックにより、進行方向、歩行速度などをコントロールすることを可能としている。

川田工業株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所、川崎重工株式会社らにて開発された HRP-3P は、36 自由度をもつ上に、防塵・防滴機能を実現している。さらにスリップ検出機能により滑りやすい状態の路面上の歩行や、脚腕協調制御により手で体を支えながらの動作が可能である。

川田工業株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所、川崎重工株式会社らにて開発された HRP-3 Promet Mk-II は HRP-2 に比べて手首部分に 1 自由度、ハンド 5 自由度と合計 6 自由度、両腕分で計 12 自由度増加し、42 (首 2、腰 2、腕 7×2、脚 6×2、ハンド 6×2) の関節自由度をもつ。また、HRP-3P に比べ複雑な手先作業に対応することが可能である。ハンドの指は 3 本で、電動ドリルを把持できる。HRP-3P と同様に防塵・防滴機能を実現している。

韓国科学技術院(KAIST)にて開発された HUBO は、全身で 41 自由度の構成で、時速 1.25[km]の歩行に成功している。また、5 本の指に独立にアクチュエータが搭載されており、ジャンケンをすることが可能である。

韓国科学技術院(KAIST)にて開発された Albert HUBO は、全身で 66 自由度の構成で、時速 1.25[km]の歩行に成功している。顔は物理学者のアルバート・アインシュタインのものを正確に再現していて、話すことや、広範囲にわたる自然な表情を表現することができる。表情の機能はハンソン・ロボテックス社 (HRI) が開発したフィリップ・K・ディックのアンドロイドを元に作られている。

韓国科学技術院(KAIST)にて開発された HUBO FX-1 は、100[kg]の重量物可搬歩行に成功している。また、上体に取り付けられたジョイスティックにより操作することができ、前進、後退、旋回、横歩きといった歩行を可能としている。

独立行政法人情報通信研究機構(NICT)で開発された i-1 は、全身で 50 自由度 (腕 7×2、脚 7×2、腰 3、首 3、手 6×2、目 2×2) の構成で、油圧アクチュエーターと空気圧アクチュエーターで駆動される。ロボットのカメラで 3 次元形状を学習・認識させられる他、モーションキャプチャーを用いて人間の動作を観察しオフラインで学習するシステムを使うことにより、人間の動きを学習させていくことができる。教示、モーションキャプチャー、フルビジョンの 3 つの手段で動作を学習し、人間らしいなめらかな動きを行なうことができる。

独立行政法人科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 ICORP 型研究「計算脳」プロジェクトは、米国デューク大学と共同で、アカゲザルの大脳皮質活動情報から読み取って再構成した関節角度をネットワーク経由で米国～日本間で伝送し、リア

ルタイムで米国カーネギーメロン大学ロボティクス研究所と共同で開発した等身大ヒューマノイド・ロボット **CB-i** に歩いているかのような動作をロボットにさせることに成功している。ロボットは身長 155[cm], 体重 85[kg], 自由度は 51 自由度である。油圧・空圧・電動を組み合わせた構成になっており, 視覚, 聴覚, 前庭感覚, 力覚などを持つ。ロボット制御アーキテクチャーは神経細胞の信号を利用することができ, 各関節を多様なレベル (角度, 速度, トルク, インピーダンスなど) において制御する。制御は外部 PC クラスタによる実時間制御で行なっている。

東京大学情報システム工学研究室 (JSK) にて開発された小太郎は, 91 自由度, アクチュエータ数 120 程度 (追加可能) を搭載した柔軟筋骨格ヒューマノイドである。柔軟性可変, 多節脊椎, 多種多感覚, 筋配置変更が容易な (増強可能な) 筋, 体内分散処理系, 学習・自己組織化などの特徴を有する全身筋骨格型ヒューマノイドで, 2020 年というロングタームの実用化を目指したプロトタイプである。同研究室では, 82 自由度と 109 の筋が搭載された筋骨格ヒューマノイド小次郎も開発されている。

独立行政法人産業技術総合研究所にて開発された **HRP-4C** は身長 158[cm], 体重 43[kg] (バッテリー含む) で, 関節位置や寸法は日本人青年女性の平均値を参考に, 人間に近い外観を実現した。人間に極めて近い動作を実現するため, 腰に 3 自由度, 首に 3 自由度, 顔に 8 自由度を設けている。歩行動作や全身動作はモーションキャプチャーで計測した人間の歩行動作や全身動作を参考にして, **HRP** において開発された二足歩行ロボットの制御技術を適用することにより, 人間に極めて近い動作を実現した。また, 音声認識にもとづく応答動作など, 人間とのインタラクションを実現した。

Boston Dynamics にて開発された **PETMAN** は, 時速約 5[km]にて踵接地・爪先離地歩行が可能である。同社が開発した四足歩行ロボット **BigDog** のように, 優れた姿勢制御により歩行中に外乱を加えられても転倒せず姿勢を保つことができる。まだプロトタイプで下半身しか公開されていないが, 2011 年には人間型の全身が完成予定である。米軍の化学防護服のテスト用に開発されており, 体温, 温度, 発汗などのシミュレーション機能の搭載が計画されている。

上記に述べたように多くの機関と企業のロボットに関する研究が盛んに行われている。特に, 多くのところでは 2 足歩行ロボットの第一報として変形しない剛体路面における歩行に関して主に研究を進めている。高西研究室では 2006 年度に人間搭乗型 2 足歩行ロボットを用いて凹凸と傾斜が混在する屋外の剛体路面での歩行に成功した事例がある。しかし, これまでに開発されてきている 2 足歩行ロボットの歩行能力は, 人間と比べると程遠いものであり, 人間の住環境下で実用化されるまでにはまだ大きな技術の発展が必要である。

また, 前述したように人間が生活する住環境に存在する不整路面は剛体路面だけで

はなく、砂地や草地、雪道といった加重により脚接地面が変形する軟弱路面も多く存在する。

雪道のようにすべりやすい路面に関しても2足歩行ロボット HRP-3 を用いて適応歩行に成功した事例がある。しかし、砂漠やカーペットのような柔らかい路面に関しては多脚歩行ロボットを用いて成功した事例はあるが、2足歩行ロボットに関しては基礎的な理論だけあり、実際に成功した事例がない。軟弱路面は加重により路面自体が変形してしまうため、剛体路面のように ZMP (Zero moment point) を制御に生かせることが不可能である。そのため、軟弱路面における安定化歩行に関する先行研究が大変少ない。

そこで、本研究は2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行の実現するために、路面の力学的特性に基づいたモデル化とその制御法について明らかにすることを目的とした。まず、前述した剛体の不整路面における歩行能力の向上を図るため、路面検知可能なセンサ式足部機構と路面適応制御の開発を行う。また、軟弱路面における安定した歩行を実現する際に必要な路面の工学的なパラメータがない点に着目し、住環境に存在する様々な路面を調査し、工学的観点からばね・ダンパ系でモデル化し、路面の分類を行う。そして、路面パラメータを取得可能な路面性状測定装置を開発した。路面のモデルに基づいた歩行安定化制御の開発を目指す。

1.5 本論文の構成

前述したように、本研究では、2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行に関する足部機構と制御方式を提案し、これに基づき開発した足部機構を2足歩行ロボットに装着して評価実験を行うことによって、その有効性を実証することを目的とした。

本論文は全8章で構成されており、その構造は図1.1のようになっている。まず第1章(本章)では、序論として本研究の研究背景と目的、その学問的意義や関連する研究事例、論文構成について述べた。第2章では、多様な路面の工学的モデルがないことから路面のモデル化について述べた。第3章では、第2章において述べた路面モデルのパラメータを同定可能な路面性状測定装置の開発および評価実験と考察を述べた。第4章では、未知の凹凸路面に適応可能な不整路面適応制御の開発、およびその評価実験と考察について述べた。第5章では剛体の不整路面における適応歩行のための4点型路面検知足部機構の開発とそれを用いた不整路面適応制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。第6章では、第5章において述べた4点型路面検知足

部機構の欠点を補う 3 点型路面検知足部機構の開発, およびこの評価実験と考察を述べた. 第 7 章では, 脚接地面が変形する軟弱路面に適応可能な制御の開発, およびこの評価実験と考察を述べた. 軟弱路面を歩行中は ZMP を制御することが難しいため, 重心位置を安定化する制御法を開発した. 具体的には, 軟弱路面を一様なばね要素として仮定することで足部力センサの測定値から路面の変形量が推定できるため, 片脚支持期には足関節でトルクを発生し, 重心位置を安定化する. さらに, 両脚支持期には各足の床反力を目標床反力に収束させるように脚長を修正し, 重心位置を安定化することとした. 開発した制御法を 2 足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し, 高さ 50[mm]の極めて柔らかいウレタンスポンジ (密度: 22 ± 2 [kg/m³]) 上で歩行実験を行った. なお, 路面性状計測装置で路面パラメータを同定し, ウレタンスポンジのばね定数を 60[N/m]に設定した. 歩行実験の結果, ウレタンスポンジ上での足踏み動作と前進歩行に成功し, 提案手法の有効性を確認した. 以上のように, 第 2 章, 第 3 章で述べた路面のモデル化と路面性状測定装置により, 路面の工学的モデルを立てた. また, 第 4 章, 第 5 章, 第 6 章で述べた不整路面適応制御とセンサ式足部機構により, 屋外に存在する凹凸路面で歩行できることを実証した. そして, 第 7 章で述べた軟弱路面歩行安定化制御により, 脚接地面が変形する軟弱路面での歩行に成功した. 最後に, 第 8 章では, 結論として以上の研究成果を総括した. また今後の展望として, 路面のモデルの確立と軟弱路面における歩行に対する問題点と 2 足歩行ロボットに実装されている制御の統合について議論する.

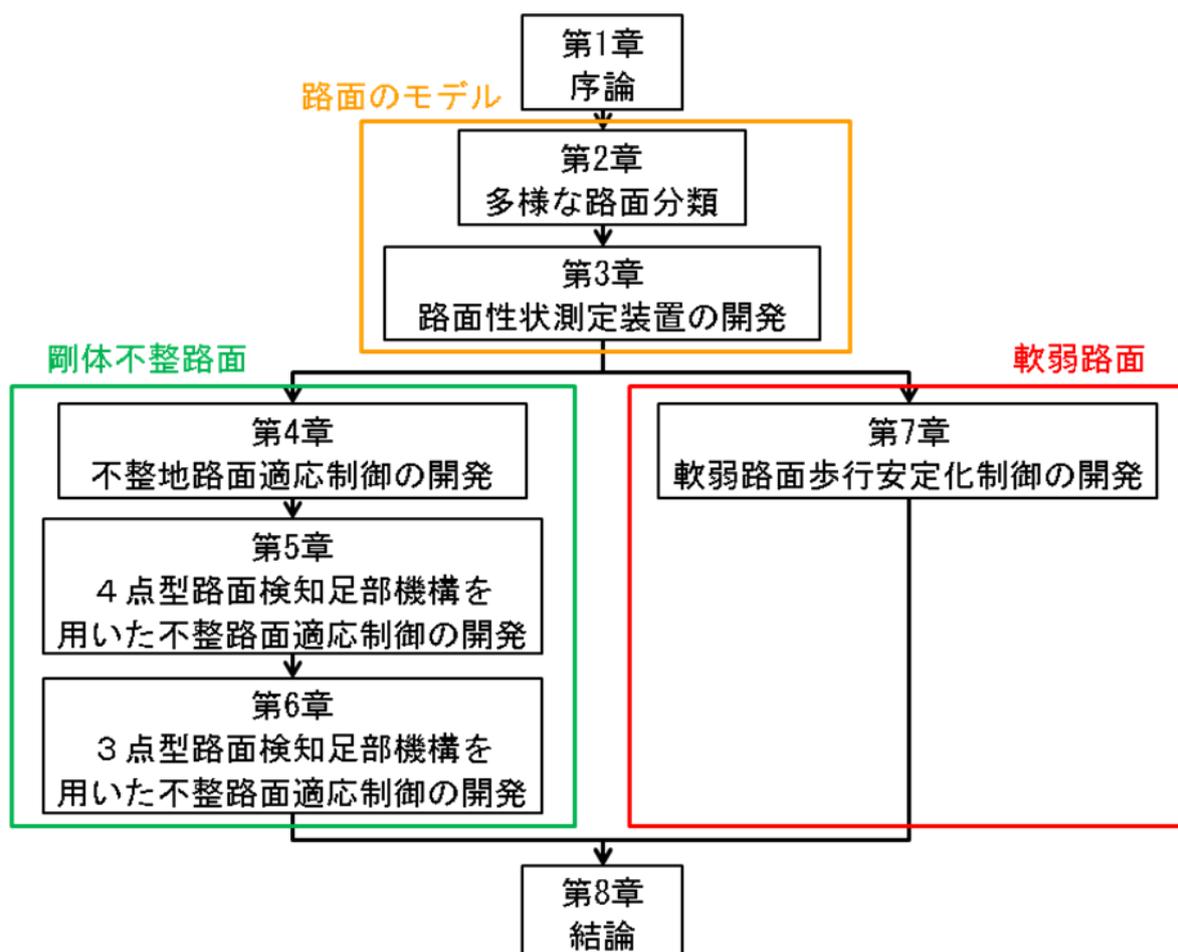


Figure 1.1 Configuration of this thesis.

第2章 多様な路面分類

- 2.1 はじめに
- 2.2 路面の分類
- 2.3 路面のモデル
- 2.4 まとめと考察

2.1 はじめに

第1章で述べたように本研究の目的は、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行を実現することである。本章では特に、住環境かにある様々な路面について調査し、路面のモデル化および路面の分類に焦点を当てる。2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、2足歩行ロボットの多様な路面性状に対する適応歩行を実現するために、路面の力学的特性に基づいたモデル化とその制御法について明らかにすることを目的とした。

人間が生活している住環境だと一言でいっても図2.1のように凹凸のある剛体の不整路面がある一方、自重によって変形が生じる軟弱路面も存在する。また、苛重が加



Figure 2.1 Various uneven road.

わると塑性が生じ、もとに戻らない砂漠のような路面も存在している。住環境化に存在する様々な路面における安定した歩行を実現させるためには、まず、路面を収集し、解析する必要があると筆者は考える。その結果から路面の特性を調べ、それを安定化制御に生かす。そのためにはまず、路面を分類し、分類された路面を再現できるようにパラメータを考案し、路面のモデル化を行うことを考えた。

本章では「多様な路面の分類」と「路面のモデル」およびまとめと考察を述べる。

2.2 路面の分類

移動ロボットを設計する際には、移動すべき環境を明確化しなければならない。平坦な移動環境に対比し、一般的な移動環境は「不整路面」である。不整路面の定義および表現方法は多種多様であり、かつ想定するロボットの種類によっても状況が異なるが、ここでは接地状態の予測や事前の運動計画が難しい路面とする。なお、液体中や気体中などの浮遊環境は、路面との接触が生じない移動を必要とするので、本論分では対象としない。移動ロボットが路面と接触して移動する場合、移動環境は重力に逆らう方向の環境（鉛直型移動環境）と重力に逆らわない方向の環境（水平型移動環境）の大きく2つに分けられる[106-113]。

2.2.1 水平型移動環境

重力に逆らわない水平面上の移動環境。路面の状態に注目すると、水平型移動環境はさらに以下の2つに分けられる：

- 剛体型不整路面 アスファルト路面、横断歩道、石畳、工事現場などの脚接地面に変形を伴わない凹凸のある環境。屋外に存在する路面の多くはこれに分類される。
- 軟弱型不整路面 砂地、砂漠、草地、絨毯、マットレス、布団の上などの脚接地面に変形を伴う環境。人間が生活する空間内に存在する柔らかい路面の多くはこれに分類される。

2.2.2 鉛直型移動環境

重力に逆らう鉛直方向の移動を伴う移動環境。坂道や階段、山道、また壁面、梯子などの環境がこれに該当する。

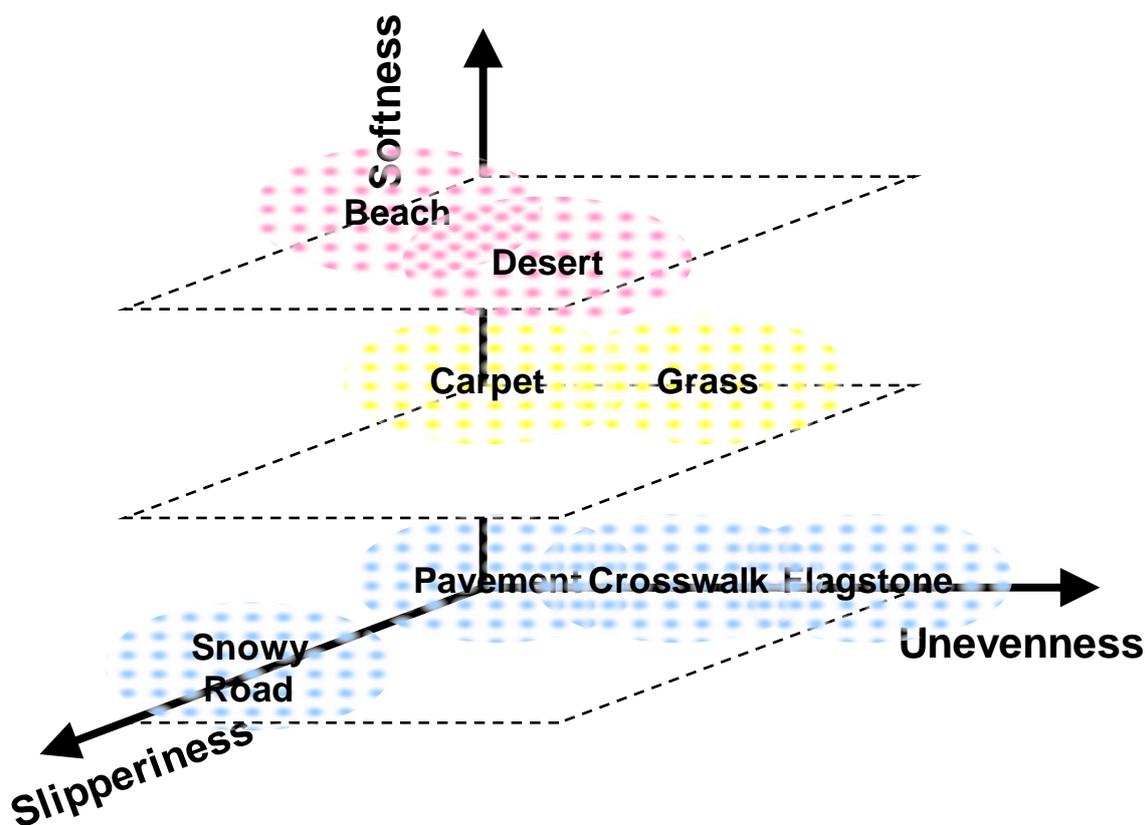


Figure 2.2 Characteristics of various uneven road.

これら以外にも狭隘型不整路面[114,115]などもある。

このような不整路面は、ロボットの大きさや構成が重要になり、それに特化した移動様式を開発することが望ましいと考えられる。汎用性の高い移動様式を考える場合には、上記に分類したように移動ロボットと環境の接地状況に特に注目すべきである。住環境に存在する様々な路面を図 2.2 にまとめる。

また移動ロボットと移動面の接触状態に着目すると、移動環境は大きく2つに分類することができる。まずは、車輪やクローラのように移動機構と地面が常に接触するような環境である。このような環境では、移動した後の跡が連続した線となるため、「連続接地移動環境」と呼ぶことにする。車輪やクローラで移動できなくなる環境としては、段差や障害物などの存在が考えられ、そのときの移動は分断された線分となる。このような環境を「不連続接地移動環境」と呼ぶ。こののような環境では」の障害物を乗り越えて移動するための機構としては、形状の変化するクローラや、アクティブサスペンション機能を持った車輪などが提案されてきている。これらの機構では、何らかの手段によって、移動機構と地面との接点を切り替えることによって移動を継

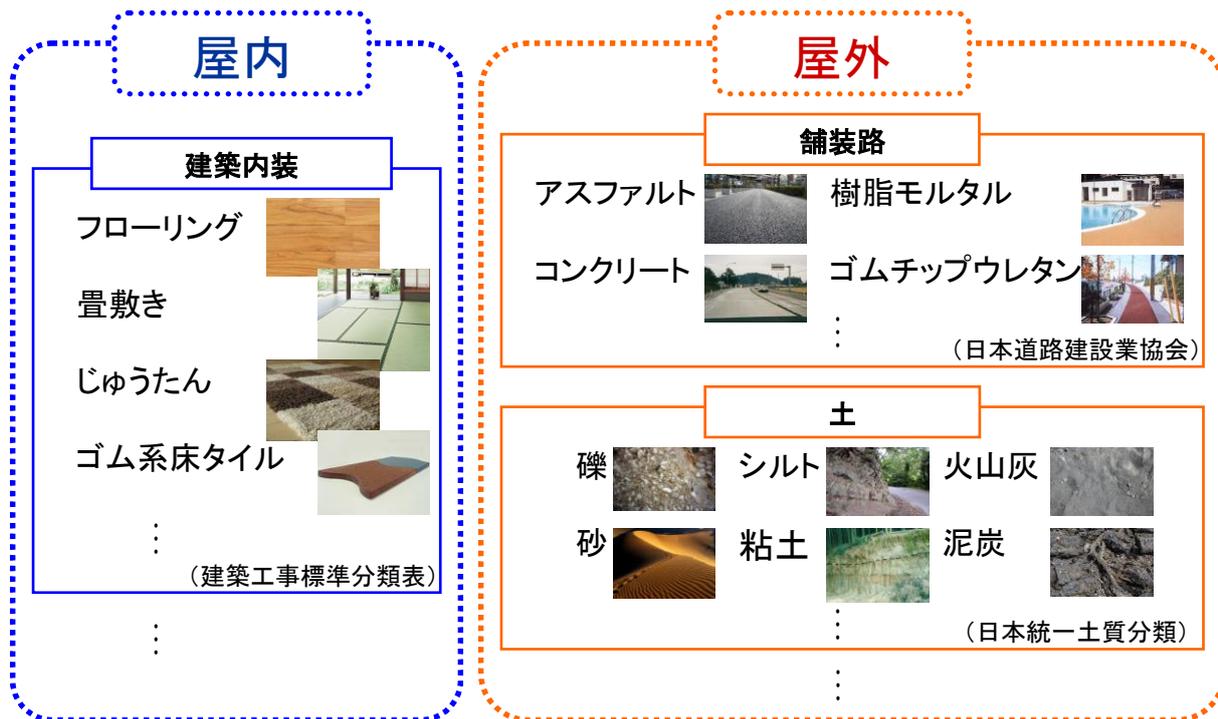


Figure 2.3 Human living environment.

続することが可能となる．さらに厳しい条件の移動環境としては、「離散接地移動環境」が考えられる．この移動環境は、もはや移動機構と地面との連続的な接触が許されず、離散的な点で本体を支持しつつ推進を行わなければならない．移動機構としては、人間や動物のような脚が必要となり、その移動トレースは離散的な点列となる．図 2.2 に示す不整路面が踏破でき、離散接地移動環境に適応可能な移動様式を持つロボットが実現されれば、人間の生活環境に存在するほとんどの環境を移動することができると思われる．

また、建築工事標準分類によるとフローリング、畳敷き、絨毯などのように内装の規格によって屋内の路面で分類される．また、屋外の路面に関しては道路舗装の規格や土質の分類により、図 2.3 のような路面が存在することが得られた．

これまでに挙げられた路面を検証した結果、軟弱路面には少なくとも柔らかい、崩れる、均一でないといった指標があるのではと考えた．そこで、これらの指標について分類を行うためのモデルのパラメータが必要である．そこで地盤工学やその他の路面に関する研究分野を調査した結果、建築工学的なパラメータから、工学的な路面のモデル化に利用できそうなパラメータとして、図 2.4 にパラメータを示す．基礎的な

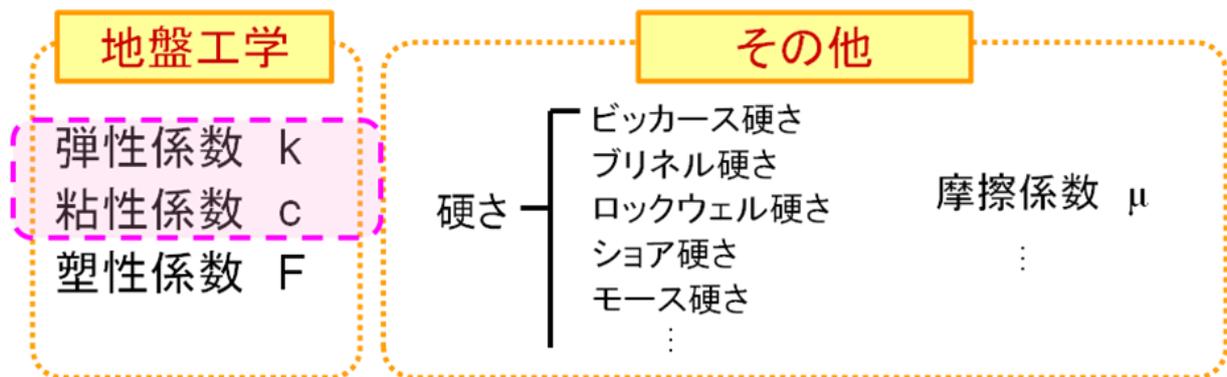


Figure 2.4 Road parameters.

段階として押し込み力が取り除かれた跡に元の形に戻るものの「柔らかい」という指標について分類を行うことを目標とし、安定化制御に利用できることやパラメータの測定が容易であることを考慮したところ、弾性係数 k と粘性係数 c を用いることで、柔らかさを表現した。

2.3 路面のモデル

2.3.1 概要

最終的な目標として多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行の実現としたうえで、まず本研究では加重により変形する軟弱な路面での安定歩行の実現を短期的な目標とする。軟弱路面を力学的にモデル化し、歩行安定化制御を構築する際に必要となると考えられる路面の“軟弱性”を表現する力学的パラメータの設定を行った。

2.3.2 パラメータの設定

前述のように軟弱な路面といっても、人間が生活する住環境下には様々な路面が存在し、軟弱であるかないかといった区別は曖昧である。このため、路面の軟弱度合いを表現するパラメータを設定する必要があった。

パラメータに必要な条件は、測定が容易であることと、制御手法を構築する上で各種方程式に組み込むことが容易であることである。

一般に物体の硬さを表すパラメータとして、材料力学の分野ではビッカース硬さや

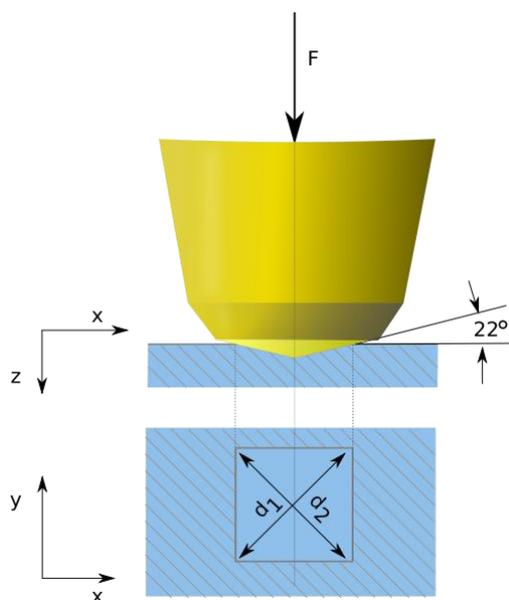


Figure 2.5 Measuring method of Vickers hardness.

ロックウェル硬さ，ショア硬さといった指標が存在し用いられている．しかし，これらの指標は定められた大きさ，形状の圧子を対象物質に押し付けたときの変形量を用いた指標（図 2.5）であり，将来的に一般的なロボットの制御への応用を考えた場合，ロボット足部が多種多様な形状をとりうる以上，パラメータとして汎用性に欠けるこれらの指標は適さないと考えられる．

一方，地盤工学や建築工学の分野では，建築物や車両の重量による地盤や建築物の変形を表現するため地盤の強度を表現するのに時として弾性係数や粘性係数，塑性係数を用いている．ここでは，一般的な力学パラメータであり，運動の定式化が容易な弾性係数と粘性係数を用いることにした．

また，軟弱性とは直接的には関連は無いが，2足ロボットの歩行成功率に多大な影響を与えると考えられる摩擦についても考慮するため摩擦係数を導入した．

2.3.3 仮説モデルの構築

材料力学や地盤工学の分野では，図 2.6 に示す一般に有限要素法によるモデル化や解析が広く行われている[107,108]．

有限要素法は，解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法の一つであり，支配方程式が定義された領域を小領域（要素）に分割し，各小領域に

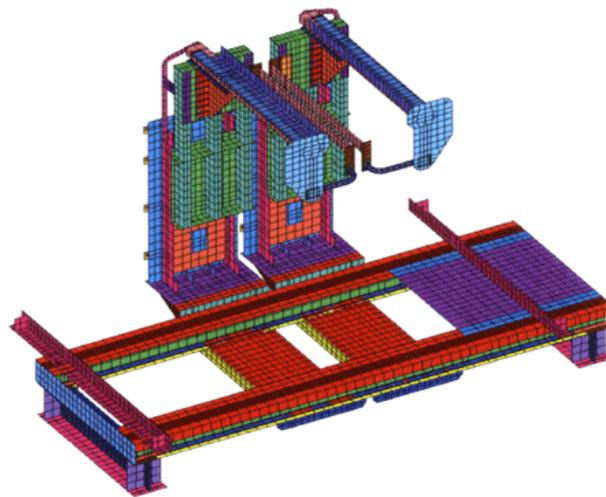


Figure 2.6 A case of model analysis by finite element method.

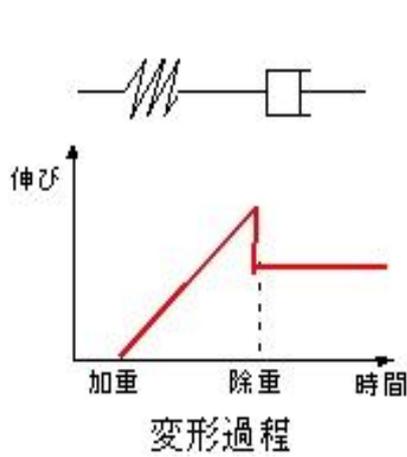


Figure 2.7 Maxwell model.

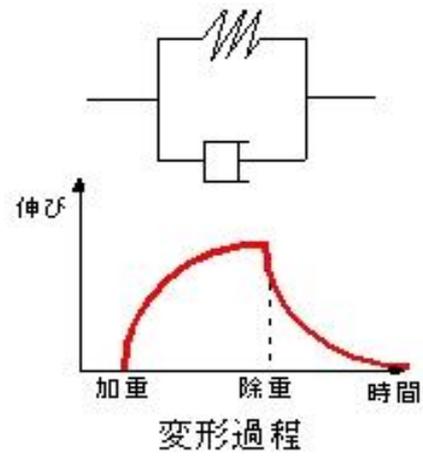


Figure 2.8 Voigt model.

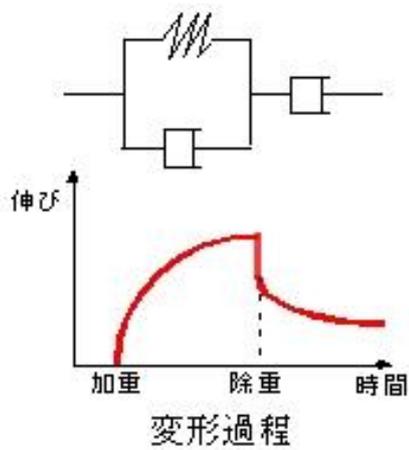


Figure 2.9 Three-element model.

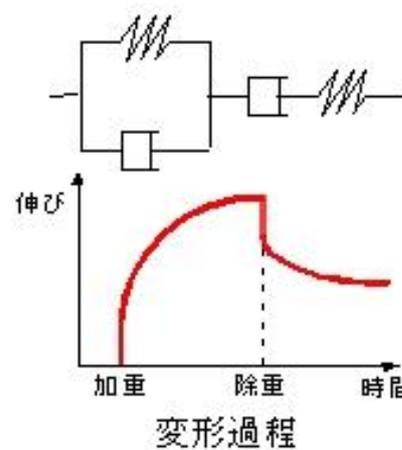


Figure 2.10 Four-element model.

は比較的単純で共通な補間関数を用いる方法である。

有限要素法の特徴として、複雑な形状や複数の物質が組み合わさったモデルにおいてもより精確なモデル化が行えるという利点がある。しかし本研究の場合、2足歩行ロボットが歩行を行う際の振動やロボット本体の剛性、あるいは逆運動学計算の際のモデルの簡略化に起因するロボット自体のモデル誤差が大きく、そこまで路面に精確なモデル化が必要かといった問題が存在する。また、計算時間の問題も存在し、実際に歩行中に計算を行う際、その都度有限要素解析を行ってはいは計算速度がとても追いつかない。このため、本研究では、計算速度を重視したより単純なモデル化を行うため、集合係数系のモデルを構築することとした。

一般に、物質の粘弾性を扱うレオロジー分野では、粘弾性を複数持つ力学モデルとして、マクスウェルモデル (図 2.7)、フォークトモデル (図 2.8) また三要素モデル (図 2.9)、四要素モデル (図 2.10) などがよく用いられる。

まず、仮説モデルとして、フォークトモデルを参考にばねダンパを組み合わせたモデルを図 2.11 と式(2.1)に示す。

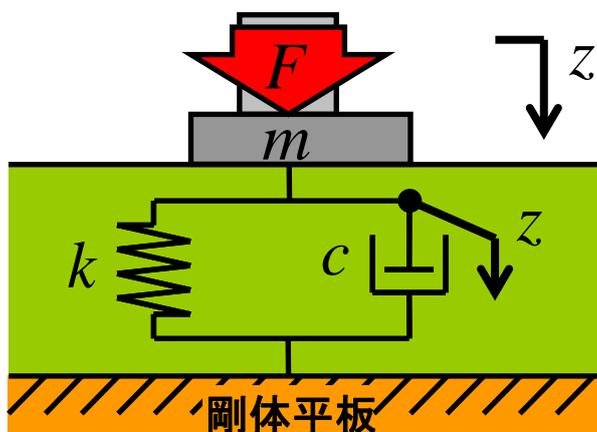


Figure 2.11 Hypothetical model

$$F = m\ddot{z} + c\dot{z} + kz \quad (2.1)$$

構築したモデルにおいて、圧縮力 F と圧縮量 Z 、およびその速度が得られれば、各係数が計算できると判断した。

2.3.4 予備実験

設定したモデルにおける弾性、粘性を測定する装置を開発するにあたり、これらのパラメータを算出する方法と算出に必要な物理量を検討するために、いくつかの予備実験を行った。前述にて述べたように、加えた荷重と変形量の関係から弾性係数と粘性係数が算出できると判断し、図 2.12 に示のオートグラフ装置を用いて圧縮試験を行った。

また、被圧縮材は住環境に存在する路面を想定し、図 2.13 に示すように床材として用いられ、かつオートグラフにて試験が可能（小型で持ち運び可能）であり、入手が容易なものを選んだ。

なお、実験は WABIAN-2R の歩行時床反力を考慮し、直径 10[mm]の圧子にて、反力が 1[kN]となるまで押下圧縮を行った。またダンパの影響を検証するため、押し込み速度を 1[mm/sec], 2[mm/sec], 3[mm/sec]と変化させそれぞれ圧縮を行った。ただし、スポンジのみ厚さの関係から圧縮に時間がかかりすぎるため、3[mm/sec], 6[mm/sec], 9[mm/sec]とした。



Figure 2.12 Autograph equipment.

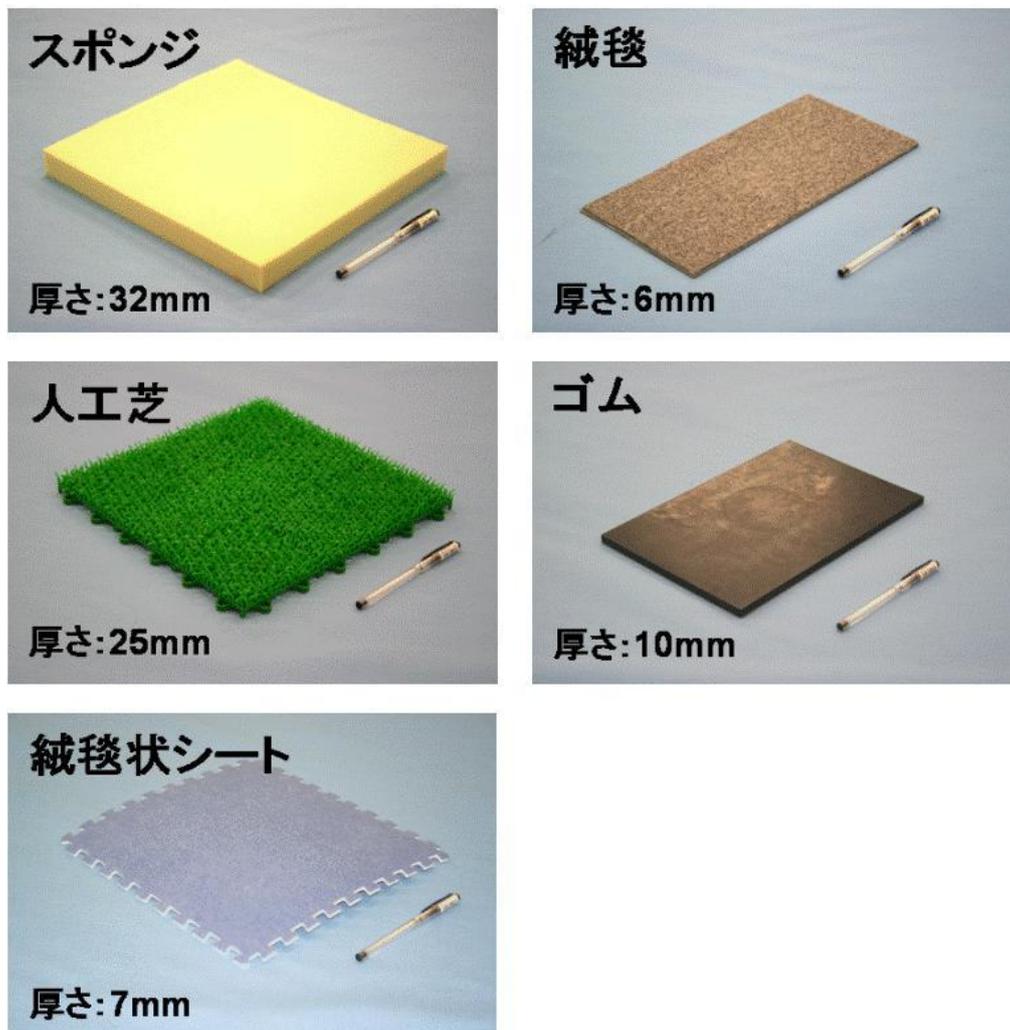


Figure 2.13 Virtual floor material for experiment

その結果を図 2.14～図 2.18 に示す. 全体として指数関数的に非線形な傾向が見て取れた. 一般に押し込み量と反力の関係のグラフの傾きが弾性係数を表す. 予備実験の結果, 押し込み量に対して反力は明らかに増加傾向にあった (傾きが存在した) ため, 弾性の影響は確かに存在すると考えられる. しかし, 得られたグラフの形状は一部を除いていずれも非線形なものであったため, 単純にグラフの傾きをそのまま弾性係数として利用することは難しい. また, 本予備実験で用意した圧縮材については, ほとんどの素材において押し込み速度を変化させても反力に目立った変化は見られなかったかごくわずかな変化が見られたただけであったが, 持ち運び可能などといった制約から, サンプルとしては極端に制限された集団であり, 適当な路面を圧縮した場合には粘性項にも同様な非線形成分が生じるものとは十分に考えられる

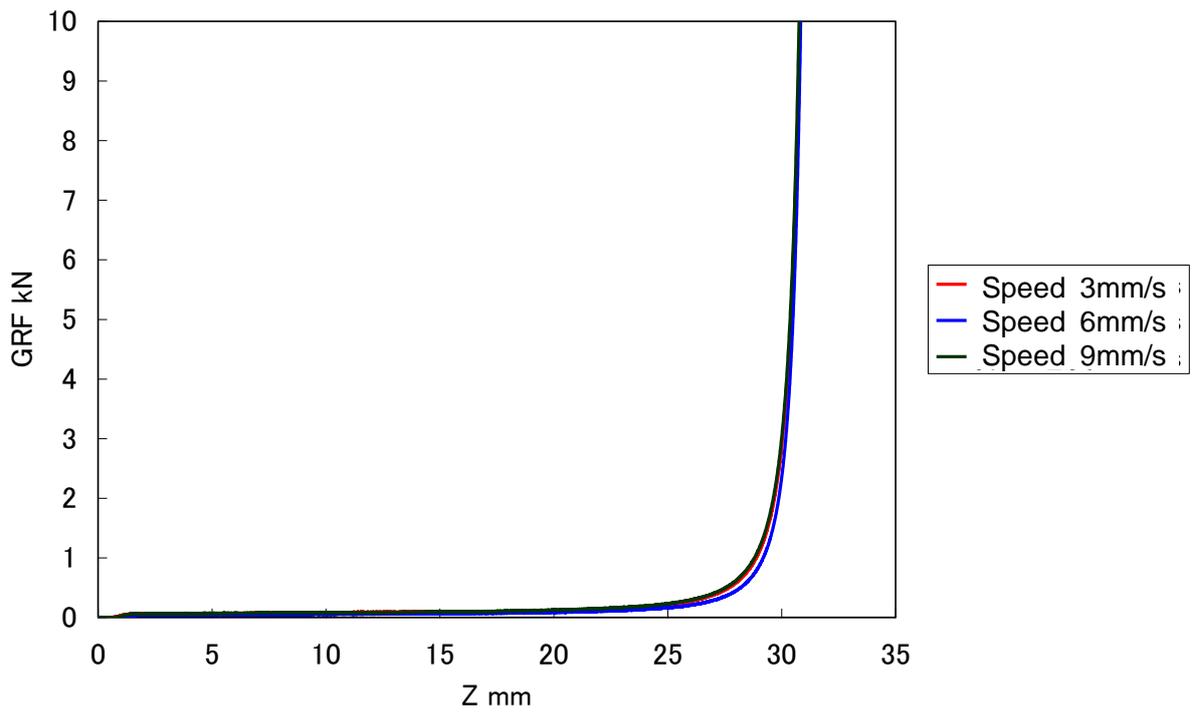


Figure 2.14 Relation between amount of compression and reaction force (sponge).

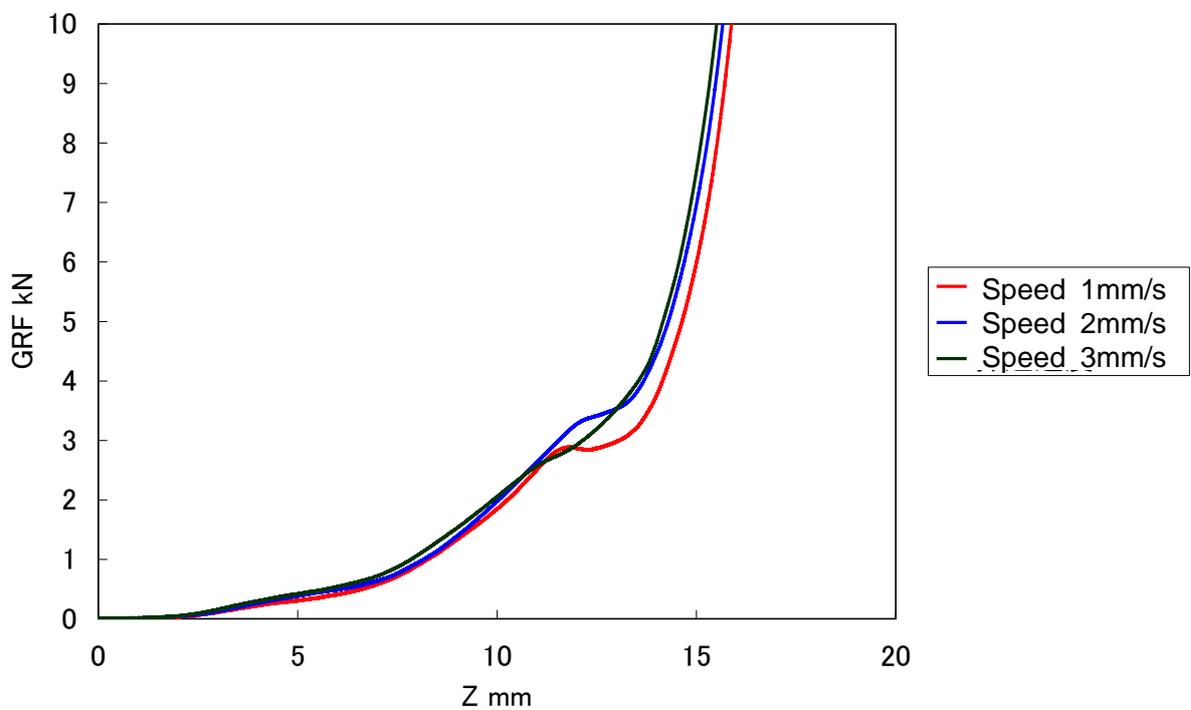


Figure 2.15 Relation between amount of compression and reaction force (artificial lawn).

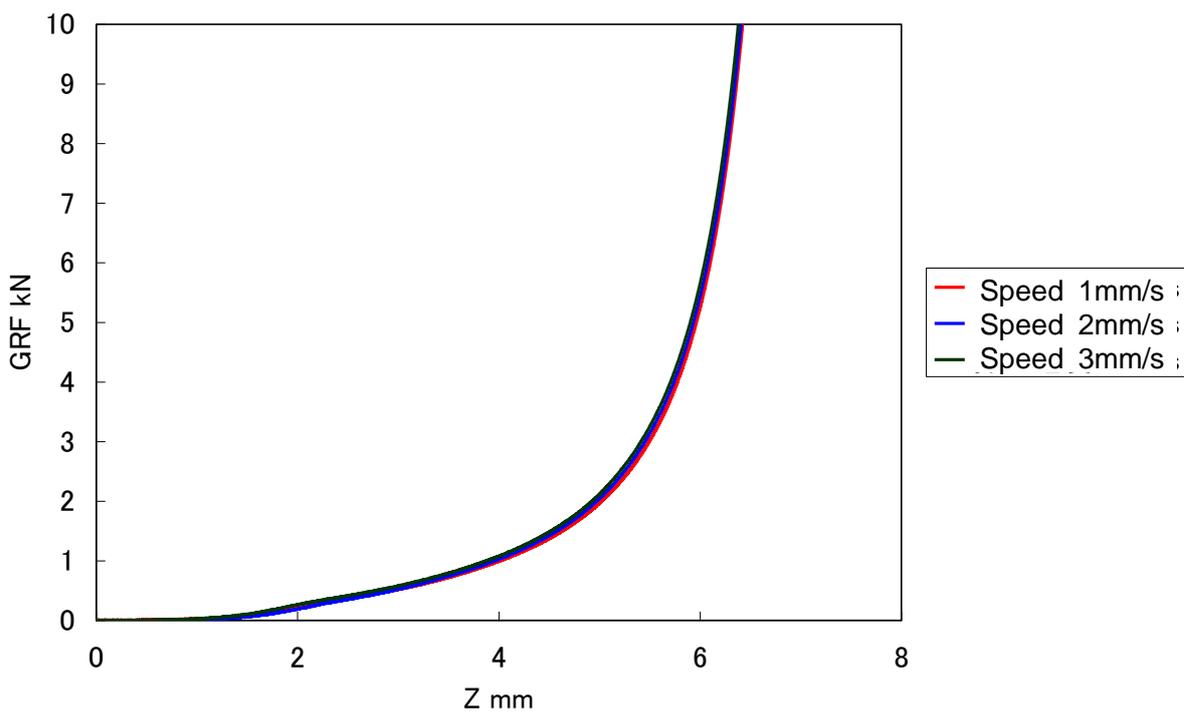


Figure 2.16 Relation between amount of compression and reaction force (carpet seat).

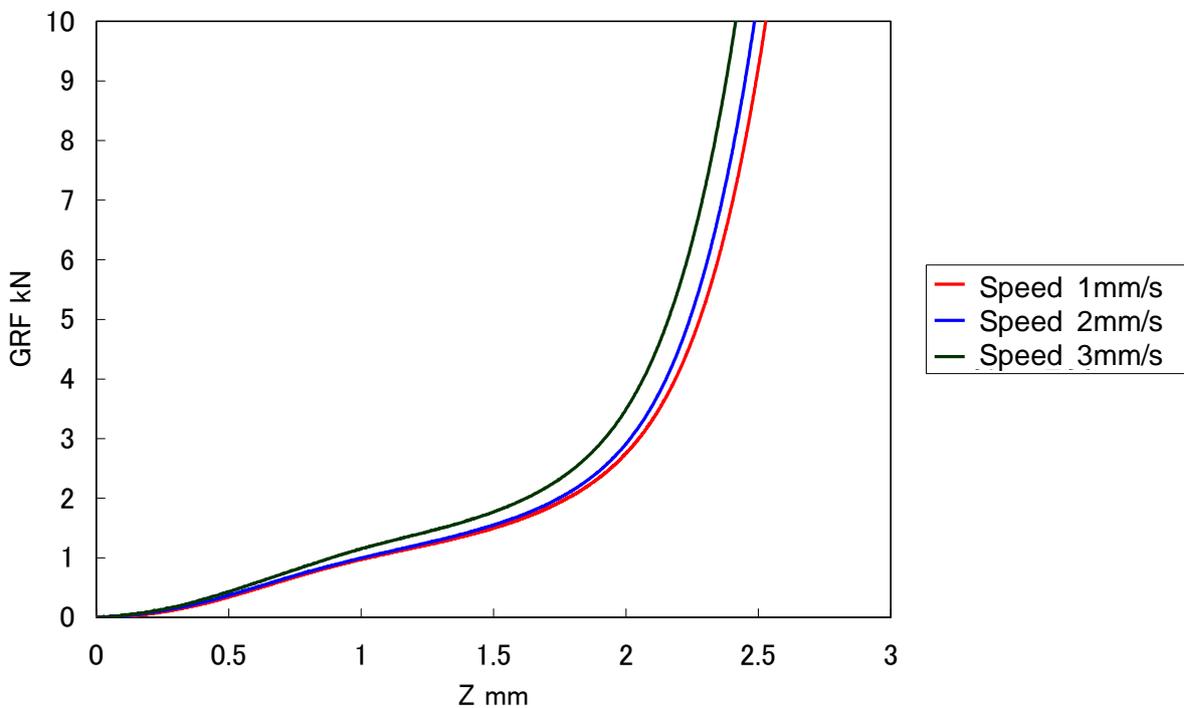


Figure 2.17 Relation between amount of compression and reaction force (carpet).

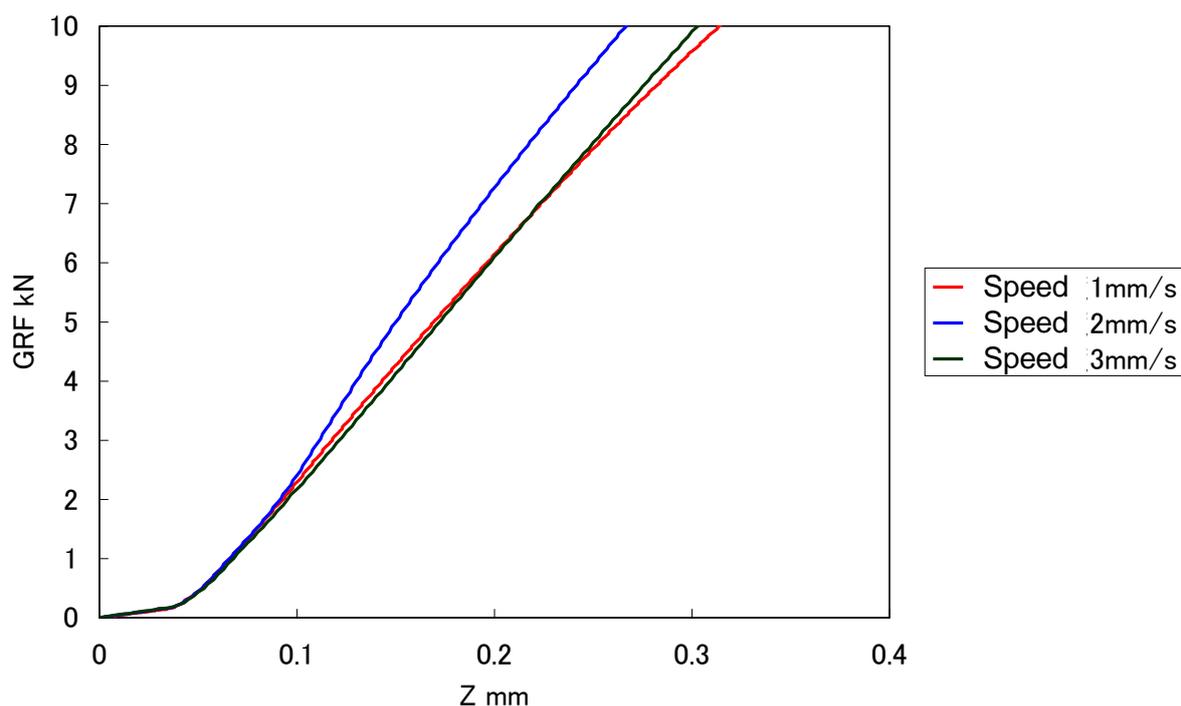


Figure 2.18 Relation between amount of compression and reaction force (gum)

2.3.5 非線形成分の処理

前項にて予備実験を行った結果、押込み実験により得られる粘弾性には、非線形成分が含まれていることが分かった。本項では、制御上で各種運動方程式をもとに数式化するために非線形成分を処理し数式化する方法について述べる[116]。

(a) 重回帰分析方式（べき級数展開方式）

この方式は得られた応答のグラフ上からサンプルとなる点をいくつか選び、それらの点を通るよう重回帰分析により非線形成分をべき級数式として近似する方法である（式 2.2）。式 2.3 を用いて、床反力 F [N]、変位 x [mm]、速度 y [mm/sec]を圧縮試験により得た上で係数 a および b を重回帰分析により探索する。サンプル数が増えるほど、あるいは次数が上がるほど精確なグラフが得られる傾向がある（図 2.19）。この方式は一般的な弾性係数、粘性係数として数値化できるわけではないが、各係数が粘弾性の強さを表し、圧縮量と反力の関係を数式化可能である。

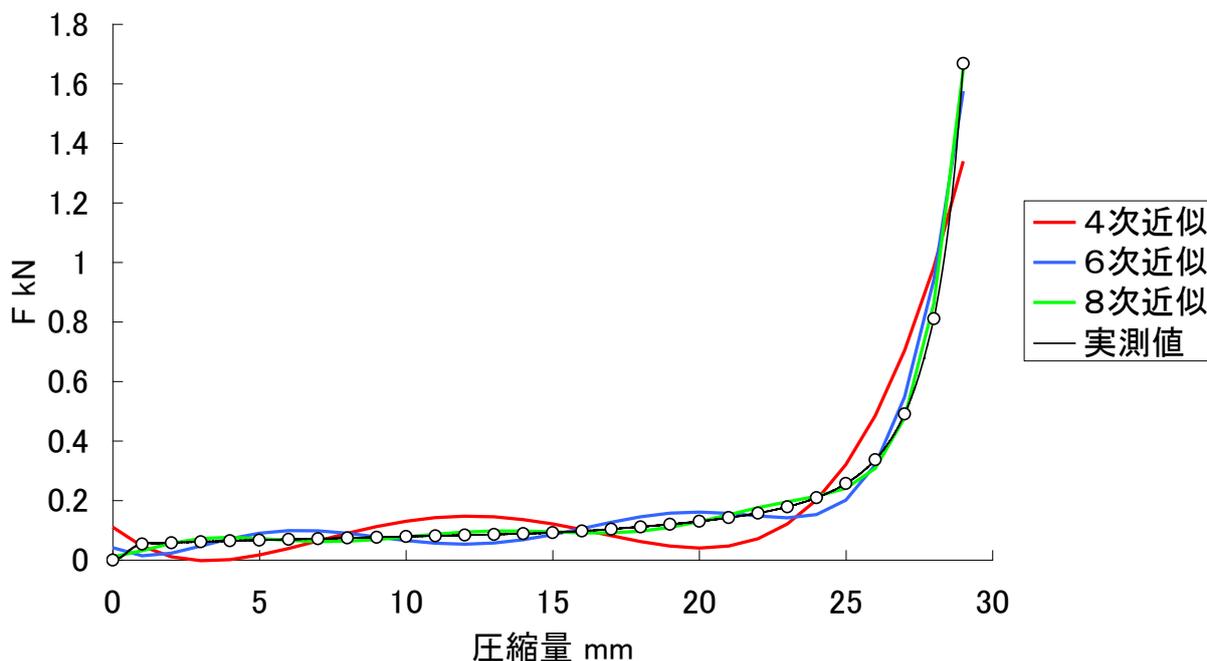


Figure 2.19 Non-linear approximation by power series(sponge: speed 3mm/min)

$$F = a_1x + a_2x^2 + \dots + B \quad (2.2)$$

$$F = a_1x + a_2x^2 + \dots + b_1y + b_2y^2 + \dots + C \quad (2.3)$$

ただし、この方式はべき級数の性質上、押し込み量に対する反力の値が単調増加になるとは限らない。理論上、押し込み量が増加したにもかかわらず反力が減少した場合、弾性エネルギーの観点ではエネルギーが発生した事になり、エネルギー保存則に反する。べき級数の次数を上げることで（実測データが単調増加している限り）見かけ上は単調増加に限りなく近いグラフを得るところはできるものの、本質的な解決にはならない。上記の理由より、本方式は採用しないとした。

(b) シグモイド近似方式

前項にて述べた通り、弾性エネルギーの観点から、押し込み量に対して反力は単調増加の関係でなければならない。この問題を解決するため、単調増加関数であるシグモイド関数（図 2.20）、式 2.4 を用いた近似方法を試験的に考案した。

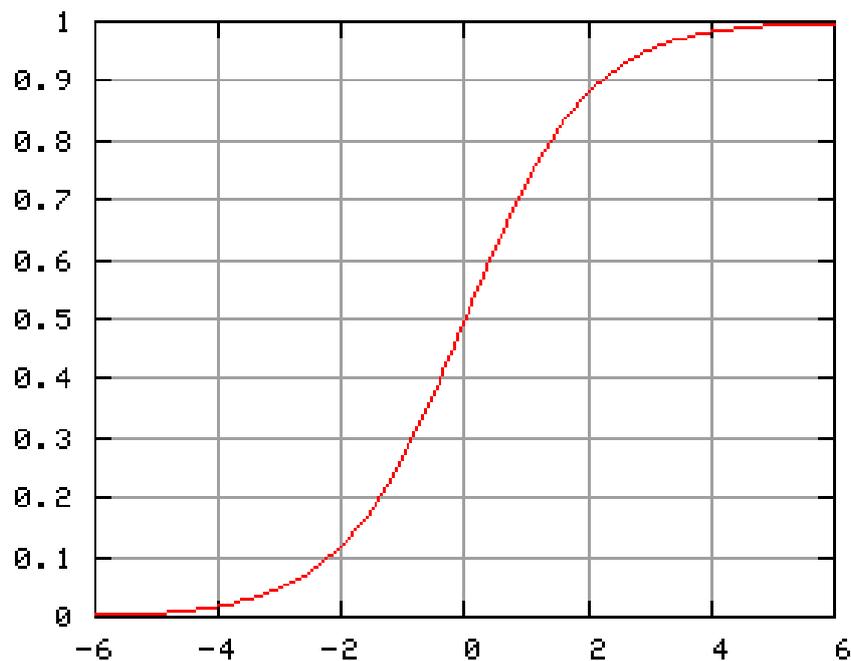


Figure 2.20 Sigmoid function.

$$F = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (2.4)$$

$$F = \frac{a_1}{1 + e^{-b_1(x+c_1)}} + \frac{a_2}{1 + e^{-b_2(x+c_2)}} + \dots + d \quad (2.5)$$

本方式はシグモイド関数を用いた式 2.4 を利用し、床反力 F [N]、変位 x [mm]を圧縮試験により得た上で係数 a , b , c , d を最適値探索法により探索した (図 2.21)。この方法は、先に述べた単調増加という条件に対しては効果があったものの、以下のような欠点があった。

- ① 初期値を始めとした各種条件により、計算結果が著しく変化し、無数に存在する圧縮対象 (路面) に対して共用できるそれらの条件を発見することが難しい。
- ② 傾きが一度だけ増加した後、元に戻るというシグモイド関数のグラフの形状の都合上、グラフの傾きが何度も変化するような関数の近似に適さない。このような関数を近似する場合、式 2.5 のように複数のシグモイド関数を用いて多項式化する必要がある。
- ③ 探索する係数の数が多いため、計算時間が長い。今回の場合、速度を計算に入れ

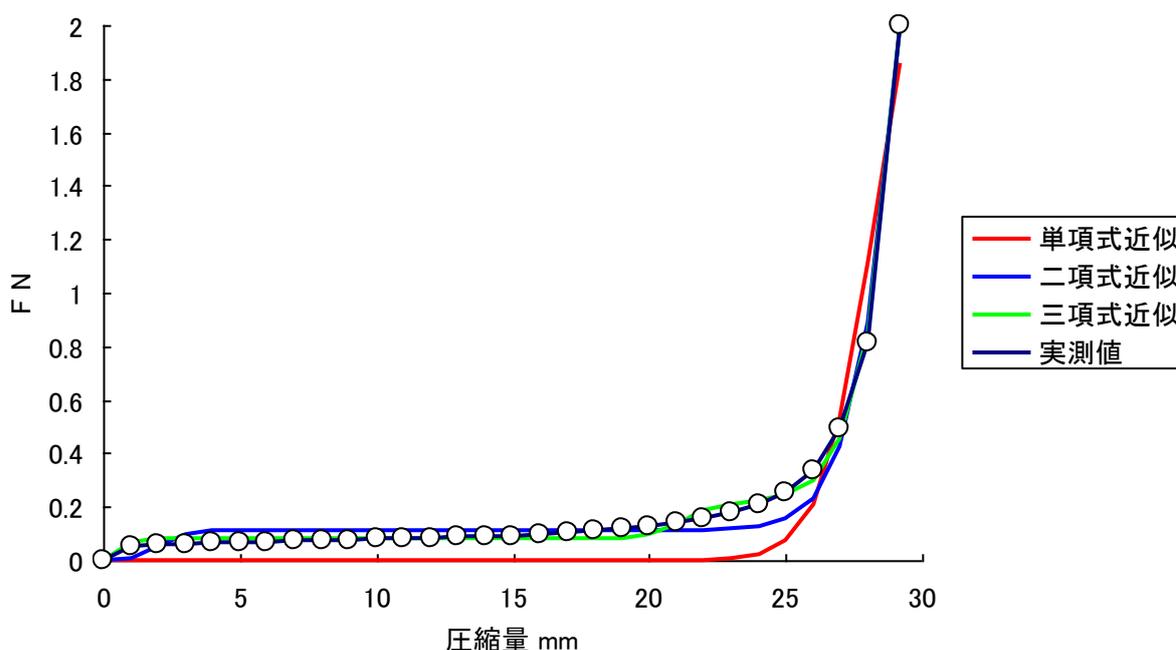


Figure 2.21 Non-linear approximation by Sigmoid function

④ ていないにもかかわらず膨大な時間がかかった。また、前項のような操作を行う場合、計算時間が爆発的に増加し、将来的に実際にロボットに搭載し計算する場合に支障が出る。

以上のような欠点から、シグモイド関数を用いた非線形近似の採用は見送った。なお、本方式は構想段階で上記の問題から採用が見送られたため、式 2.5 では速度の項が考慮されていない。将来、初期条件その他の問題が解決され、利用しようとした際には、ダンパ項を考慮するために式 2.2 に対する式 2.3 のように、速度の項を加える必要がある。

(c) 区分線形法

本方式は得られた非線形関数のグラフを複数の区間に分割し、各区間内で直線とみなすことで線形化を行う方式である (図 2.22)。本方式は他の方式と異なり、最適値探索を用いない。

分割数を増やすほど計算時間が増加する代わりに精確に再現でき、逆に分割数を減らすと非線形成分に対する再現度は落ちるものの計算時間が短縮できる。他の方式でもこういった精度と計算時間のトレードオフの関係は存在するが、本方式は分割数を

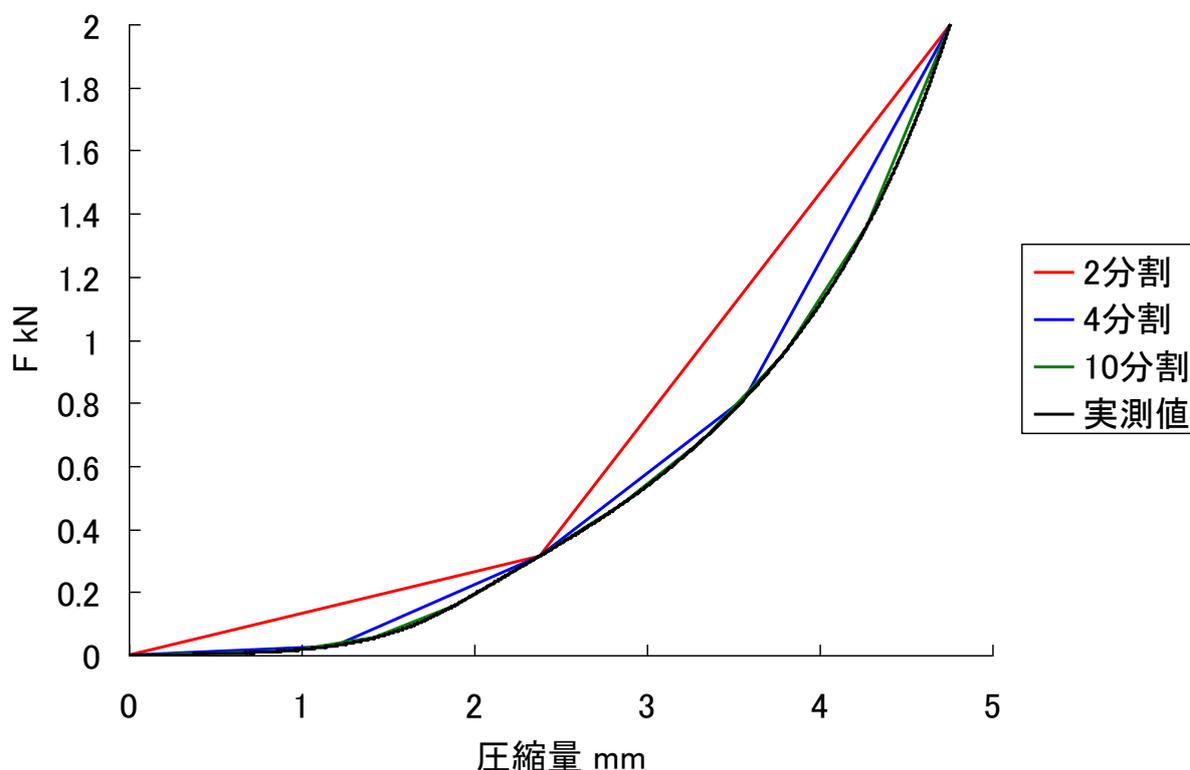


Figure 2.22 Non-linear approximation by piecewise linear

増減することでこれらのバランスを容易にコントロール可能であるというメリットが存在する。

路面の分類としては計算時間の拘束条件が無い場合、より精度の高いパラメータを計測するために分割数を上げ、将来的に2足歩行ロボット上でこれらの計算を行いながら歩行を行う場合には、分割数を落とし最低限の精度を維持した上で計算速度を優先するといった使い分けが可能である。以上の理由から、非線形成分の処理方法として本方式を採用することとした。

2.3.6 路面モデルの構築

前項で述べたように材料力学や地盤工学の世界では、一般に有限要素法によるモデル化や解析が広く行われている。

有限要素法の特徴として、複雑な形状や複数の物質が組み合わさったモデルにおいてもより正確なモデル化が行えるという利点がある。しかし本研究の場合、2足歩行ロボットが歩行を行う際の振動や、ロボット本体の剛性、あるいは逆運動学計算の際

のモデルの簡略化に起因するロボット自体のモデル誤差が大きく、そこまで路面に精確なモデル化が必要かといった問題が存在する。また、計算時間の問題も存在し、実際に歩行中に計算を行う際、その都度有限要素解析を行ってはいは計算速度がとても追いつかない。このため、本研究では、計算速度を重視したより単純なモデル化を行うため、集合係数系のモデルを構築することとした。

モデルとして、フォークトモデルを参考にばねダンパを組み合わせたモデルを採用している。また、ダンパ項を一層を加えて荷重によって変形してしまい、もとの形に戻ってこない塑性を再現することにした。

(a) Z 軸方向変形モデル

考案した Z 軸方向の変形モデルを図 2.23 と式 2.6～式 2.7 に示す。

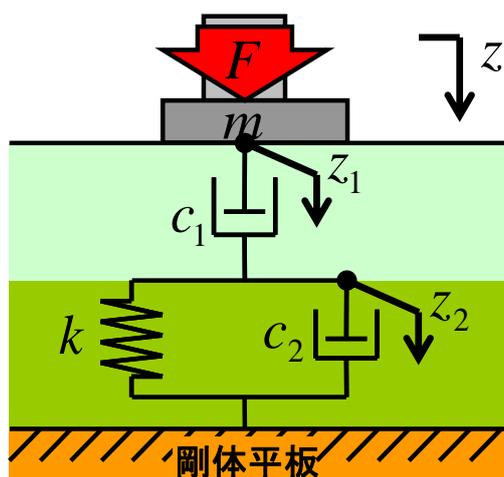


Figure 2.23 Deformation model along vertical axis

$$F = m\ddot{z}_1 + c_2\dot{z}_2 + kz_2 \quad (2.6)$$

$$F = m\ddot{z}_1 + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \quad (2.7)$$

(b) X,Y 軸方向変形モデル

考案した X 軸方向と Y 軸方向の変形モデルを図 2.24 と式 2.8～式 2.9 に示す。

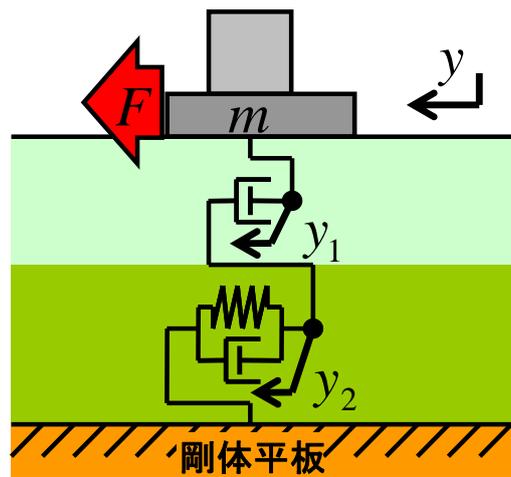


Figure 2.24 Deformation model along x and y axes

$$F = m\ddot{y}_1 + c_2\dot{y}_2 + ky_2 \quad (2.8)$$

$$F = m\ddot{y}_1 + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (2.9)$$

(c) Yaw 軸回転変形モデル

また Yaw 軸に関しては回転要素を用いて再現した. 考案した Yaw 軸方向の変形モデルを図 2.25 と式 2.10~式 2.11 に示す.

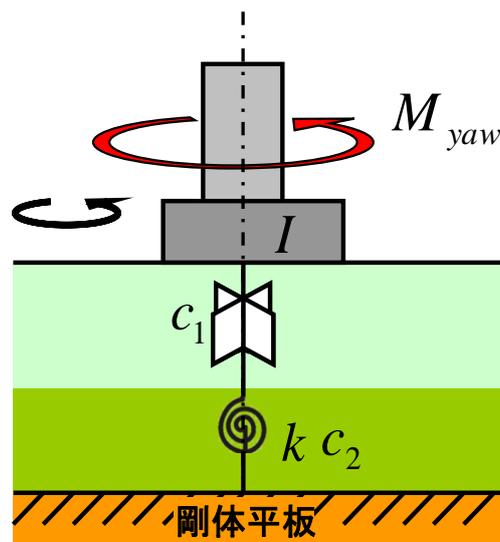


Figure 2.25 Deformation model about yaw axis

$$M_{yaw} = I\ddot{\theta}_1 + c_2\dot{\theta}_2 + k\theta_2 \quad (2.10)$$

$$M_{yaw} = I\ddot{\theta}_1 + c_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \quad (2.11)$$

(d) Roll, Pitch 軸回転変形モデル

(a)の Z 軸方向モデルを平行に配置することで表現する. 考案した Roll 軸と Pitch 軸方向の変形モデルを図 2.26 に示す.

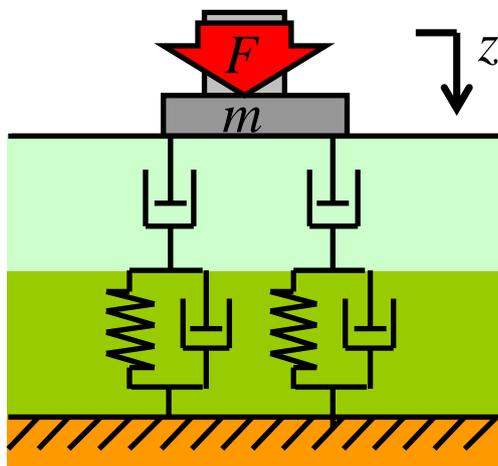


Figure 2.26 Deformation model about roll and pitch axes

(e) X,Y 軸方向摩擦モデル

路面のモデルは多様な路面性状に対する 2 足歩行ロボットの適応歩行を実現するため, 考案したものである. 今回の軟弱路面での安定した歩行に用いることのみならず今後様々な分野で用いられることを考え, 摩擦に関しても考慮し, モデル化を行った. 考案した X 軸と Y 軸方向の変形モデルを図 2.27 と式 2.12 に示す.

$$\mu = \frac{F_z}{F_x} \quad (2.12)$$

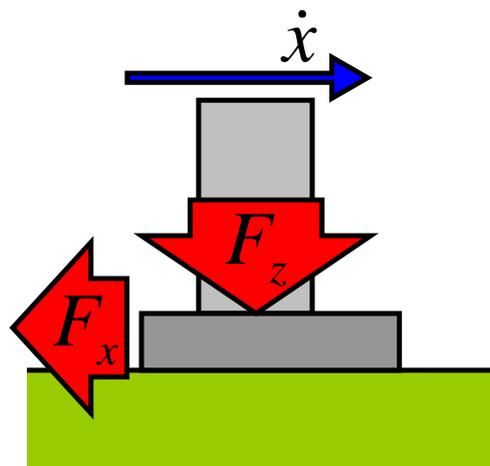


Figure 2.27 Friction model along x and y axes

(f) X,Y 軸方向摩擦モデル

考案した Yaw 軸方向の変形モデルを図 2.28 と式 2.13 に示す.

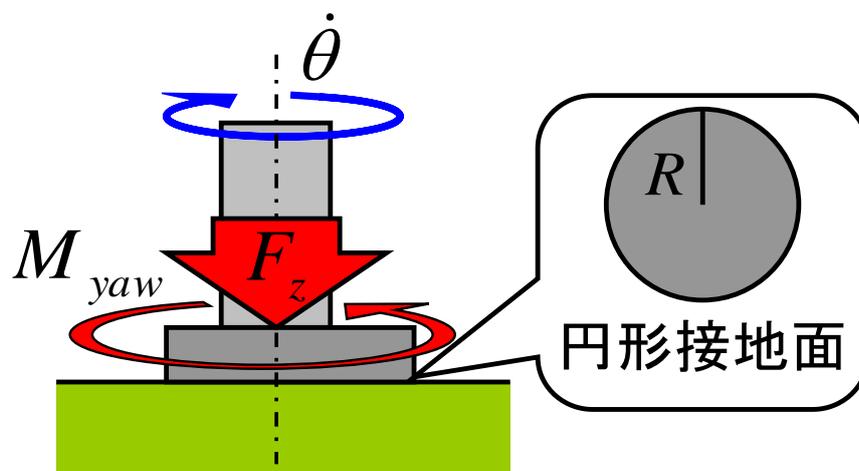


Figure 2.28 Friction model about yaw axis

$$\mu_{yaw} = \frac{3 M_{yaw}}{2 F_z R} \quad (2.13)$$

以上の結果を踏まえ、最終的に図 2.23 のような 3 次元立体モデルを構築した.

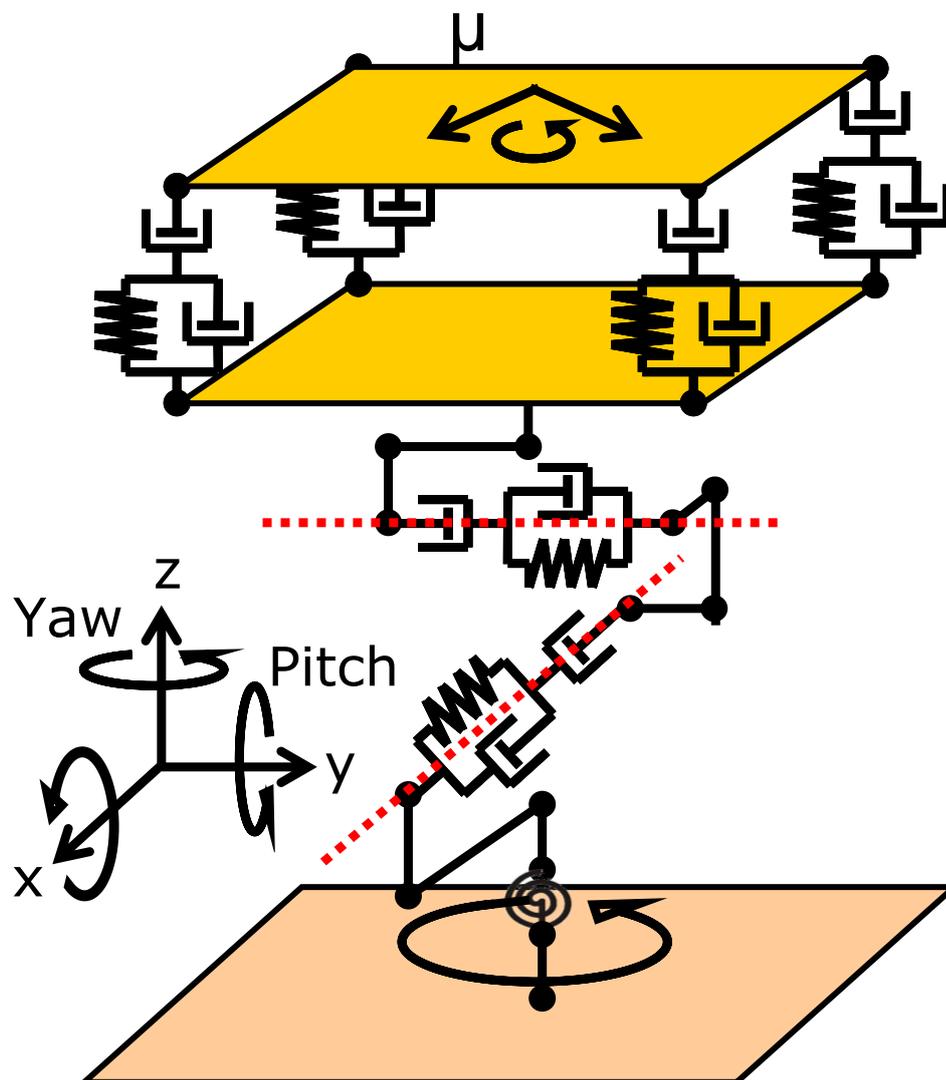


Figure 2.29 Solid modeling of road

2.4 考察とまとめ

土木工学や建築工学，地盤工学など路面に関する他分野の文献を調査し，分析したうえで，住環境化に存在する様々な路面の分類を行った．また，多様な路面性状における2足歩行ロボットの適応歩行を実現させるために，その一方として工学的な路面のモデル化を行った．3次元の立体モデルを構築し，X, Y, Z方向およびRoll, Pitch, Yaw軸周りの変形を再現した．路面の変形を路面の弾性と粘性によるものにとらえ，ばね・ダンパとすべりを考慮する摩擦要素を用いてモデル化を行った．特に，Roll,

Pitch 軸周りの回転変形は、上下方向の並進変形を表現するばね・ダンパモデルを 4 つ並列に配置し、それぞれの変形量の差により表現することとした。

オートグラフを用いて実験を行った結果、摩擦と弾性については路面によって差異が見られ、路面を分類するうえで有効であることが分かった。また、粘性に関しては圧縮速度によって明確な反力の変形が見られることからその有効性を確認したが、弾性と粘性が混雑しているため、区別がつかない問題があった。そこで、区別がつくように弾性モデルの再考が必要である。また、摩擦に関してもすべりと変形の区別がつかないということから、摩擦項に関しても再現できるように、綿密な再検討が必要である考える。

2.4.1 並進方向モデルについて

実験から得られたデータから得られる知見を元に、今回考案した路面のモデルに関して 2 つの大きな問題点が露呈した。

まず一つ目は、粘性項の必要性である。圧縮試験を行った結果、グラフを比較すると Z 軸方向、X 軸方向については圧縮量と反力の関係のグラフは単調増加を示し、弾性が存在することは見て明らかである。一方で、粘性については速度を変化させてもグラフに明確な変化が見られない。粘性の影響が強ければ、圧縮速度が大きくなるほど、同じ圧縮量での反力は大きくなるはずであるが、結果を見る限りそのような特徴は見られない。これらの実験結果および前項での検証から予想できることは 2 つあり、1 つは用意した路面を模擬するサンプルが十分でなかったために粘性が表れなかったこと、もう一つは路面の変形を表現する際には、粘性の影響はむしろ少なく弾性が支配的であることが予想できる。これまで予備実験を行ってきた中でも、粘性の顕著に見られるサンプルはなかったことから、後者の説が有力ではないかと考えている。

また二つ目は摩擦と変形が分離できないという問題である。装置の特性上、計測できる変位とは、「路面の変形量」と「装置と路面間の変位」の合計である。粘弾性を測定する際に必要となるのは前者であり、摩擦を計測する際に必要なのは後者である。このため、これらの変位を分離して計測する手段がなければ粘弾性と摩擦の計算が不可能であるといった問題が生じた。

このため、実際に計測が行えたのは Z 軸方向および Roll, Pitch 軸方向だけであるといえる。

2.4.2 回転モデルについて

実験の結果，人工芝，絨毯シート，絨毯においてはある値に向かって収束する様子が見て取れた．一方，人肌ゲルや衝撃吸収ゲルというゲル状の素材では一度極大となるピーク値を取ってから徐々に収束している．これはピーク値をとった後，圧縮材が床面から剥がれ，ねじれが生じたことによると思われる．ゲルのように粘着性があり，各軸方向に極端に変形量の大きい路面に対しては摩擦という概念が通用しないのではないかと考えられる．また，毛足の長い絨毯では，収束が遅かった．

しかし，回転についても並進同様，相対変異と変形量が分離できないため算出ができないという問題が分かった．

続いて，これらの工学的な路面モデルを用いて，軟弱路面における安定歩行を実現するためには安定化制御に生かせる路面のパラメータが必要である．その問題点に関する改善策の提案と評価について次章において報告する．

第3章 路面性状測定装置の開発

- 3.1 はじめに
- 3.2 基本設計
- 3.3 路面測定足型センサ部の設計
- 3.4 評価実験と考察
- 3.5 まとめ

3.1 はじめに

第2章では、軟弱路面における適応制御に生かせる路面の工学的なパラメータがない点から路面を6次元にモデル化を行ったことと、これを用いて路面を『凹凸』、『摩擦』、『弾性』の3つの項で分けて様々な路面の分類、およびまとめと考察を述べた。これにより、路面のモデルを構築することはできたが、このモデルの有効性の確認と制御に導入するに際し必要となる各々のモデルパラメータを測定可能な機構が必要であった。そこで路面性状測定装置の設計および製作を行った。本章では開発した路面性状測定装置の機構と評価実験、考察について述べる。

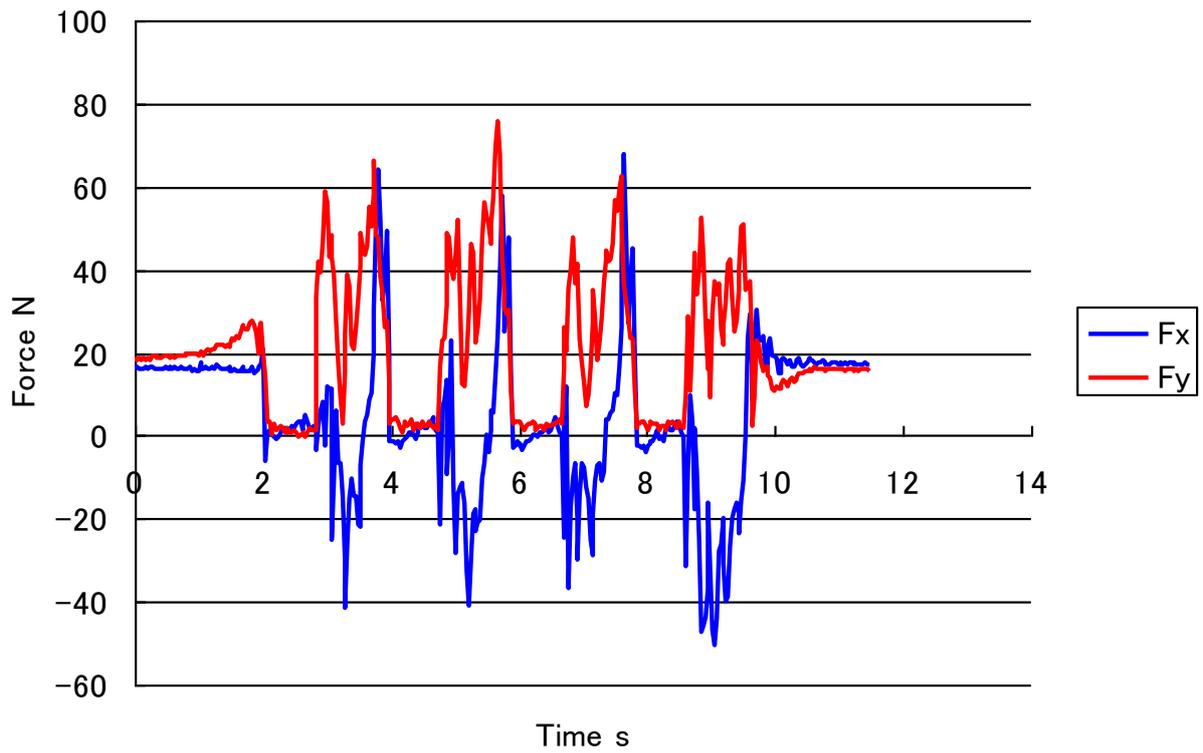
3.2 基本設計

これまでに述べた内容から、路面の測定装置として必要な機能としては路面に対し、一定の速度で荷重を加える事のできることである。可動角・可動域・駆動速度については図3.1に示す2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R の歩行時の足部6軸力覚センサの値と遊脚後期から立脚期の足部の軌道をもとにした。

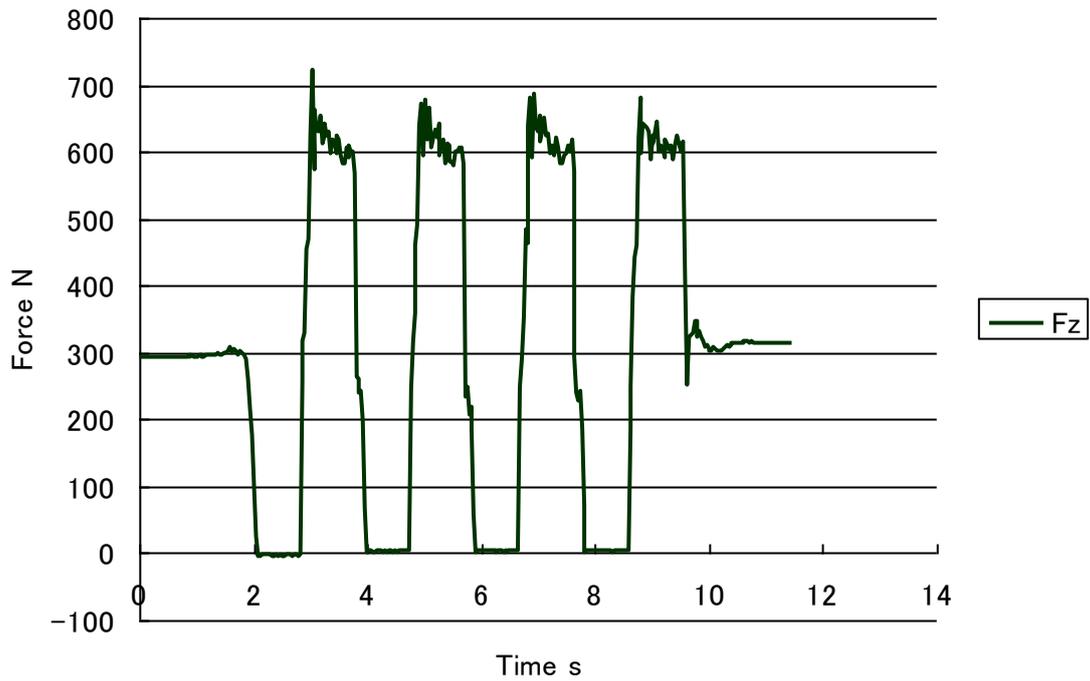
そこで、以下の4点を路面測定装置の要求仕様と設定した。

- (a) Z軸方向に対しては700[N]程度の力で路面に対し圧縮可能であること。
- (b) X,Y軸方向に対しては80[N]程度の力が発生可能であること。
- (c) Z軸方向に150[mm/sec]程度、X,Y軸方向には800[mm/sec]程度の速度で足先を移動可能であること
- (d) WABIAN-2R と同等の足関節自由度を持つこと。

これらについて開発した路面性状測定装置の設計について述べる。



(a) X axis and Y axis



(b) Along the vertical axis

Figure 3.1 Force applied to foot during walking.

3.2.1 筐体構造の構想

X, Y, Z 軸方向足部を移動でき、かつ各軸方向に加重が出来るロボットとして、一般にガントリー型（図 3.2）やスカラ型（図 3.3）のロボットが存在する。

本測定装置の場合、各軸方向に特に Z 軸方向には約 800[N]という大きい力を発生させる必要があることから、可動範囲が狭いが剛性が確保しやすく、逆運動学計算が容易であるガントリー型の測定装置を製作することとした[117-120]。



Figure 3.2 Gantry robot (GR-1750 series [Hirata corporation]).



Figure 3.3 Scalar robot G-series [Seiko Epson corporation].

3.2.2 駆動部品の選定

スカラ型ロボットは各関節が回転運動することでエンドエフェクタを目標位置まで動かすのに対し，ガントリー型のロボットは各駆動軸で直動運動を行う必要がある．直動運動の場合にはアクチュエータとしてモータの出力を直動運動に変える必要があり，また回転運動におけるベアリングに相当する直動ガイドが必要となる．

本測定装置では，モータの回転運動を直動運動に変換する機構として図 3.4 に示すボールねじを用いた．

また，直動ガイドとしては一般的に図 3.5 のようにリニアガイドを用いることが多いが，リニアガイドは構造上，力の向きによって耐荷重，耐モーメントが大きく異なる．また，各軸方向に大きな力を発生させる本測定装置の場合，いずれの方向にも要求仕様を満たすリニアガイドを選定しようとするサイズやコストが巨大になり適さない．このため，リニアガイドに比べ，安価で耐荷重，耐モーメントに優れた図 3.6 に示すリニアブッシュを直動ガイドとして用いることとした．



Figure 3.4 Ball screw.



Figure 3.5 Linear motion guide.



Figure 3.6 Linear bush.



Figure 3.7 Experiment of withstand capacity.

しかし、リニアブッシュは中を通る軸に対してはめあいの関係にあり、軸とブッシュには高い精度の同心度が要求される。このため、複数本を並列に並べた場合、軸側とブッシュ側それぞれの位置関係の精度によっては潤滑性が損なわれ、組み上がらないということがあった。

リニアブッシュの複数本を並列に配置した場合の寸法精度の影響、また Solid Works による有限要素解析により、強度・変形量が理論上では問題ないことは確認した上で実際に大荷重を加えた場合にも変形や破壊が生じることなく、滑らかに動作するかという点を検証するため、図 3.7 に示すように検証用のモックアップを製作し、検証実験を行った。

その結果、自製程度の寸法精度でも、Z 軸方向に対し、800[N]の荷重を加えた状態で、水平方向に 1[N]以下の力で簡単に駆動することができた。これにより、寸法の精度指定に、注意すれば本測定装置の直動ガイドとして、リニアブッシュは問題無く使用できることが判断した。

3.2.3 材質の選定

WABIAN-2R は軽量化のため A7075 を始めとしたアルミ系合金により構成されているが、本実験装置は加重試験装置という性質上、重量を考慮する必要は無く、また筐体の剛性を確保するため S45C を主に用いた。また防錆として、各種の寸法精度が確

保しやすい無電解ニッケルめっきにての表面処理を行った。

3.2.4 モータの選定

式 3.1～式 3.3 を元に測定装置に必要なトルクと速度選定を行った。その結果，X，Y，Z 軸方向の駆動部には（株）マクソンモータ製 RE40 を，足関節駆動用には RE35 を利用することにした。選定結果を以下に示す。なお，足関節について実機として用いる本研究室の WABIAN-2R と同様の構成であるため，省略する。

$$T = \frac{F_{all} \cdot R}{n \cdot 2\pi \cdot n_1} \quad (3.1)$$

$$r = \frac{v \cdot n \cdot 60}{R} \quad (3.2)$$

$$W = \frac{T \cdot r \cdot 2\pi}{1000 \cdot 60} \quad (3.3)$$

T: モータトルク(mNm)

r: モータ回転数(rpm)

W: モータ出力

F_{all}: 要求直動方向力(N)

F_{press}: 押し付け力成分(N)

F_{conf}: 摩擦成分(N)

μ: 摩擦係数

m: 駆動部分質量(kg)

F_i: 慣性力成分(N)

a: 必要最大加速度(m/s²)

v: 要求直動方向速度(mm/sec)

R: ボールブッシュのリード (12mm)

n: 減速比

n₁: トルク効率 (0.9)

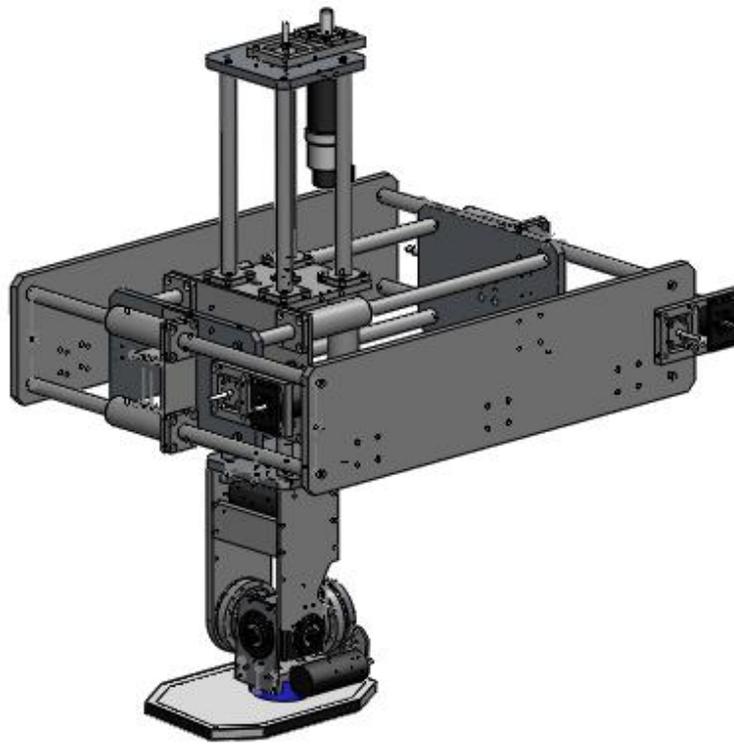


Figure 3.8 Outline view of equipment (drive part).

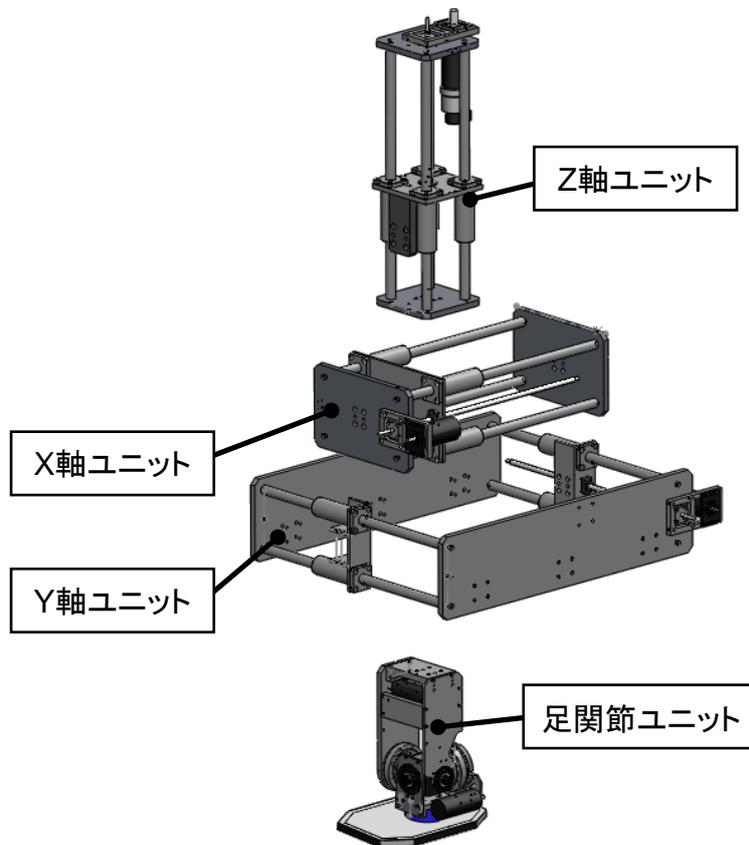


Figure 3.9 Exploded view of equipment (drive part).

(1) X,Y 軸ユニット

図 3.10 と図 3.11 に示す X, Y 軸ユニットは、それぞれエンドエフェクタを X 軸, Y 軸方向に駆動するためのユニットである。各軸方向への駆動は剛性確保のため、直動ガイドとして四本の鋼鉄製の軸と 4 つのリニアブッシュを持つ。

(2) Z 軸ユニット

図 3.12 に示す Z 軸ユニットは、エンドエフェクタを Z 軸方向に駆動するためのユニットである。X, Y 軸と同様に剛性確保のため、直動ガイドとして四本の鋼鉄製の軸と 4 つのリニアブッシュを持つ。

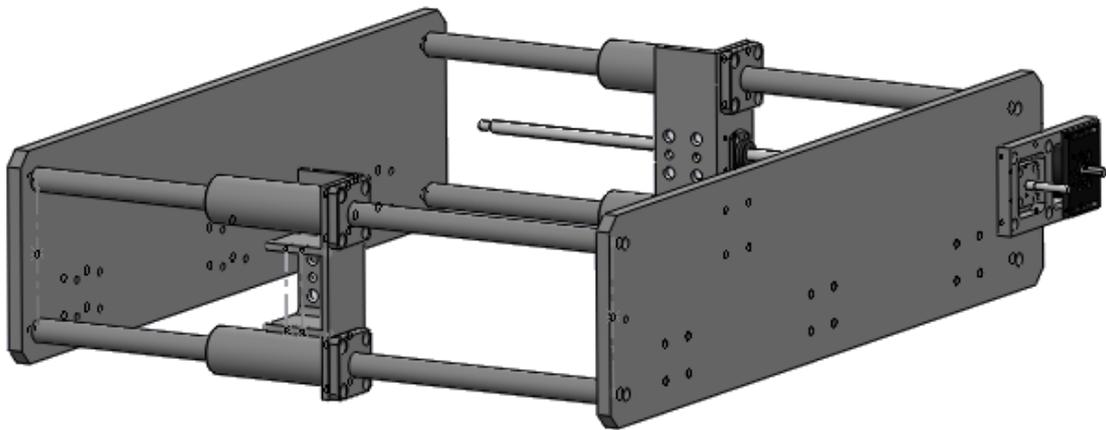


Figure 3.10 X axis unit.

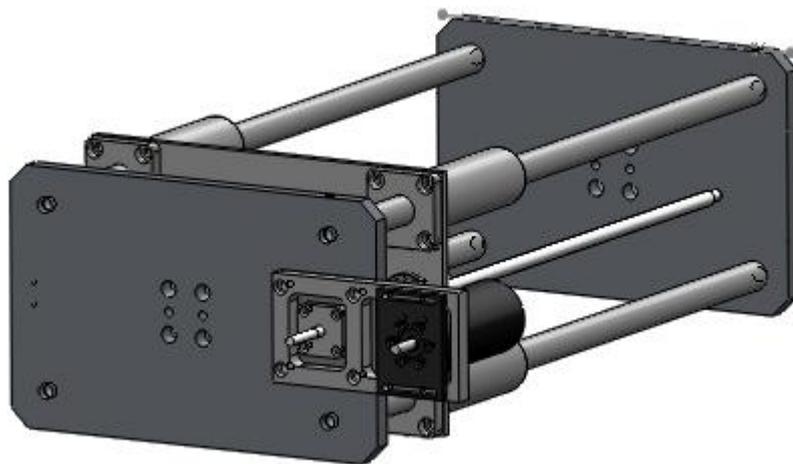


Figure 3.11 Y axis unit.

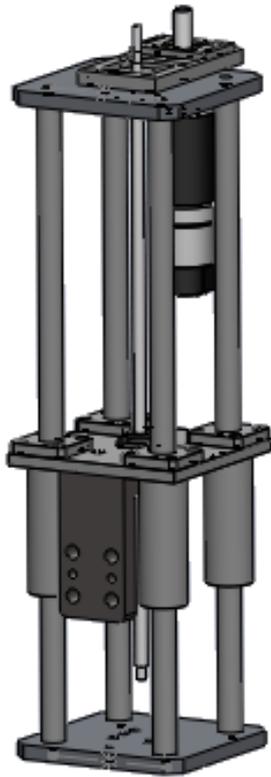


Figure 3.12 Z axis unit.

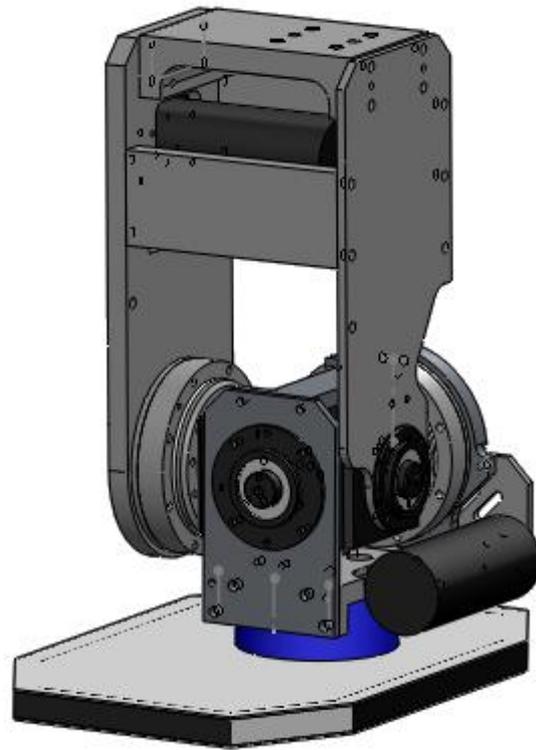


Figure 3.13 Foot joint unit.

(3) 足関節ユニット

足関節ユニット（図 3.13）は、基本的に WABIAN-2R と同等の設計であり、DC モータの出力をハーモニックドライブを介して関節を駆動する。各関節の可動角、最大トルクは基本的に WABIAN-2R に順ずる。

一部コスト削減と剛性強化のため、構造の簡略化と材質の変更（A7075→S45C）を行った。また、WABIAN-2R と同等の設計であるため、WABIAN-2R 用の足部を装着でき、将来的に新たに製作した足部機構の評価等に利用できるものと思われる。

(4) ベースユニット

ベースユニットは拡張性を重視し、アルミフレームで設計および製作した。このためベースユニットは、図 3.14 に示すようにアルミフレーム用の豊富なキャスタ・アジャスタ類を利用した。また将来的に、屋内のみならず屋外での圧縮実験を行う際にも、接地を換装することで対応可能であると思われる。また、図 3.15 に示すようにベースユニット側部にはモータドライバ台を設置した。

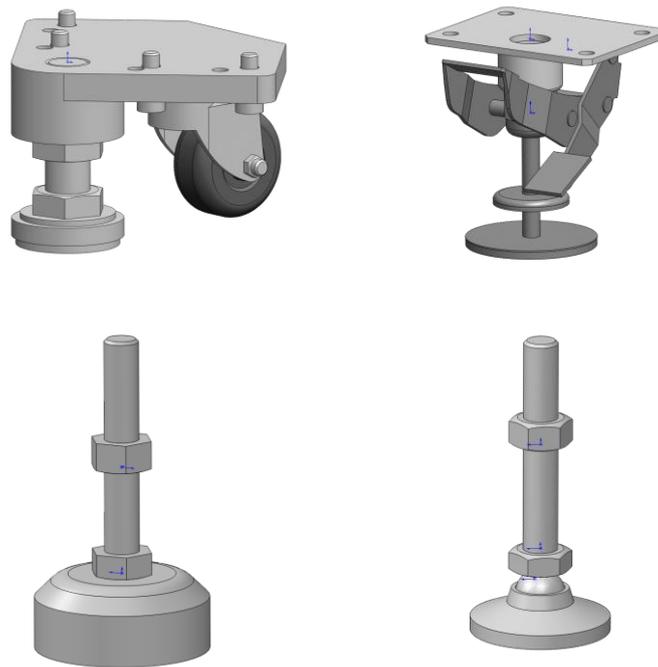


Figure 3.14 Contact part of equipment.

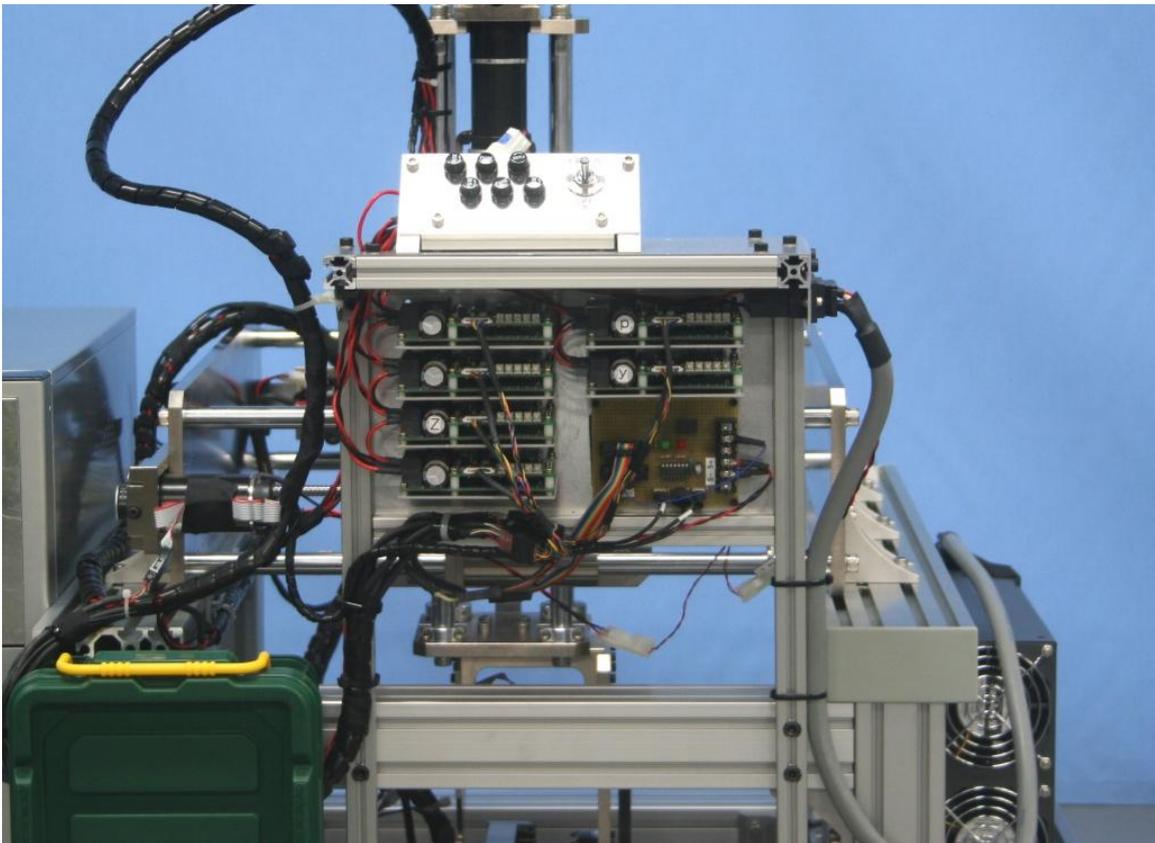


Figure 3.15 Motor driver board.

(5) 制御コンピュータ

測定装置の本体の側部には図 3.16 のように装置の制御用コンピュータを搭載するスペースを設け，測定装置を単独で用いて屋外でも実験が可能であるようにした．制御システムは WABIAN-2R と同様に QNX をオペレーティングシステムに用いており，制御ソフトは WABIAN-2R のものをベースに開発し，WABIAN-2R に近い操作性を実現した．

(6) 電源装置

各種モータ及び電源装置として，48[V]スイッチング電源を本体の側部に搭載している．また，Z 軸方向の駆動用のモータのロックブレーキ解除用の 24[V]電源は，本電源の出力から DC-DC コンバータを通して生成している．なお，制御系の電源 5[V]については，制御用 PC から供給している．また，本測定装置は安全装置として，サーボスイッチとソフト上での暴走防止の機能に加え，電気ハード上で安全機構を有し，3重の安全機構を搭載した．具体的には，フォトセンサを用い，安全可動域外へ装置の可動部が移動した場合に，モータドライバのブレーキ端子を短絡し，電磁ブレーキをかける機構とした．



Figure 3.16 Control computer.

(7) Yaw 摩擦計測用圧子の製作

Yaw 回転方向の摩擦係数を測定するための円形のエンドエフェクタ（圧子）を製作した。WABIAN-2R の足部の接地面は通常長方形に近いので、圧子を円形で製作するにはその足部形状に可能な限り条件に近い寸法とする必要があった。半径 R は WABIAN-2R に慣例的に用いられている足部の大きさを参考に設計を行い、6 軸力覚センサを中心とした際に、足部の内接円となる $R=70[\text{mm}]$ とした。また、裏面には WABIAN-2R の足部と同様の摩擦防止シート（サンストップ）を貼着した。

3.3 路面測定足型センサ部の設計

第2章にて述べたように、路面のモデル化を行う上で、路面の Roll, Pitch 軸回転方向の変形を表現するために Z 軸方向の粘弾性モデルを並列に配置するという手法をとった。これらのモデルを測定するためには、圧縮面に4つの並列な力センサを配置する必要がある。このため、WABIAN-2R の足部を模擬し、足底にあたる面に4つの Z 軸方向力センサを備えた足部型力センサの開発を行った[121,122]。

3.3.1 測定装置の仕様

前項にて述べたように、WABIAN-2R の歩行時に足部に加わる Z 軸方向の力は最大で約 800N 程度である。ただし、足底が分割されるため、平坦な路面に、水平に立地する場合には理論上、センサに加わる力は接地面積に応じてそれぞれ分散される。しかし、実際に2足歩行ロボットが歩行する際には水平立地するとは限らず、また路面の種類によっては足底の一部に集中して力が加わる場合も考慮して各々の力センサが 800N 程度の力を計測できるよう選定を行った。

また、将来的に WABIAN-2R を用いて歩行する際に、路面のパラメータを算出しながらパラメータの同定を行うことを考慮し、本センサは WABIAN-2R の足部として装着可能な形状とした。

3.3.2 センサの詳細設計

(a) 配置するセンサの数

図 3.17 に示すようにセンサを設計する上で、足底（測定）部の分割方法の検討を行った。第2章にて述べたが、一般的に空間上の3点が定まれば、平面が一位に定まる。このため、Roll と Pitch 方向の変形を表現するためには、最低3つの Z 軸方向モデルを配置する必要があると思われ、3つの力センサを配置するとこれらのモデルを測定可能であると考えた。しかし3分割の場合、足底部をどのように分割しても少なくとも1つの区画は単体でモーメント荷重を受けてしまう。最終的に、足部の6軸力覚センサを中心に XY 方向にそれぞれ分割することが直感的に最も表現しやすいのではないかと考え、最終的に図 3.18 のような分割方法に決着した。

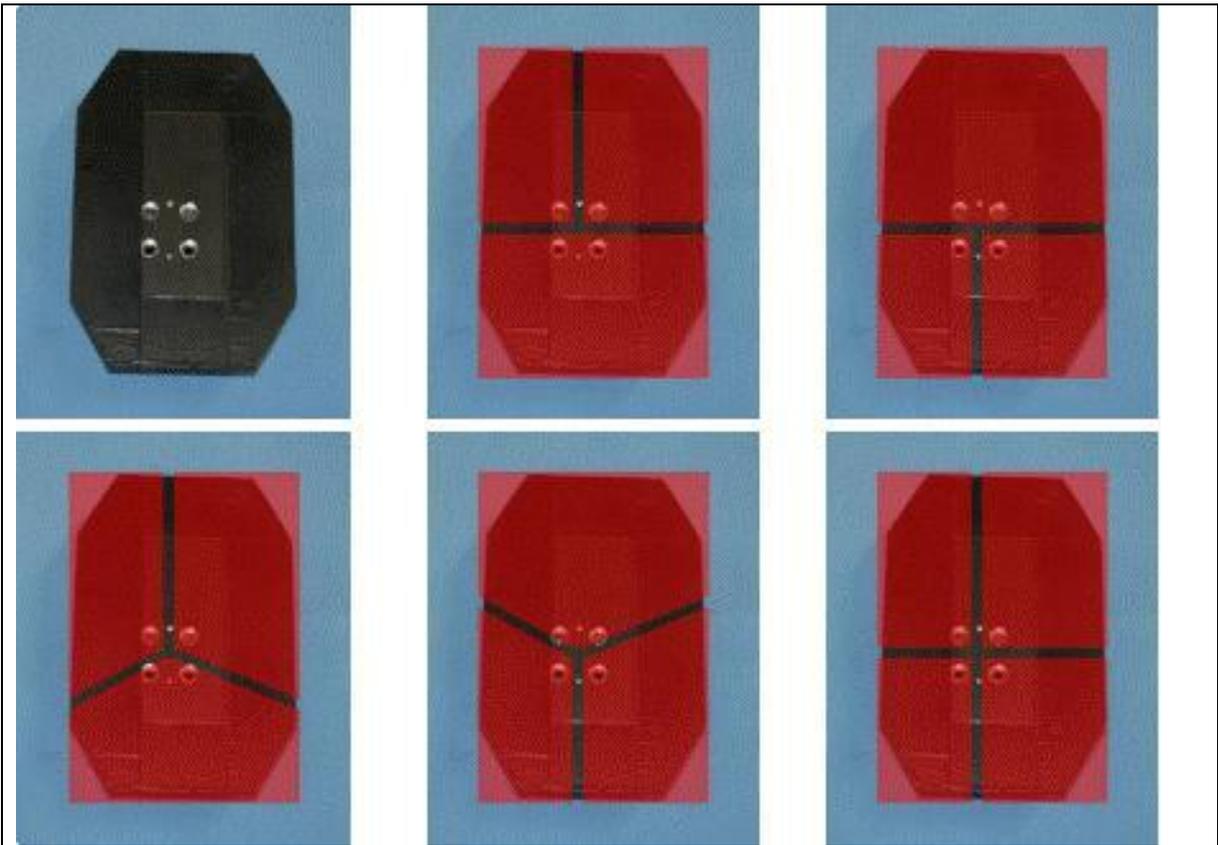


Figure 3.17 Approach to split of foot.

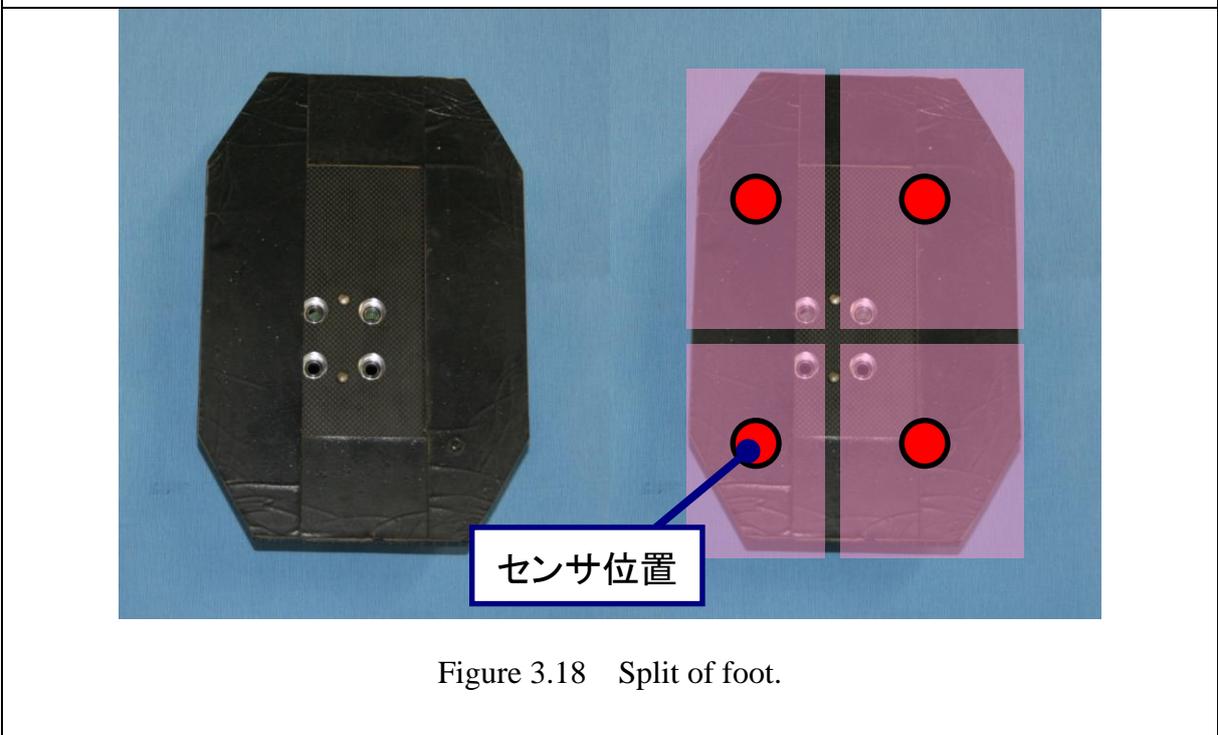


Figure 3.18 Split of foot.

(b) センサの選定

次に、配置するセンサの選定を行った。前項にて述べた通り、WABIAN-2Rの歩行時に足部に加わるZ軸方向の力は最大で約800[N]程度である。このため、また足底が4分割されるため、理論上の路面に対して平行に立脚した場合、加わる力は接地面積に応じて分散されるはずであるが、不整路面や姿勢によっては一部のセンサに極端に集中して力を受けることも十分に考えられる。このため、各々の力センサ自体が800[N]程度を目標に耐荷重を設定し、選定を行った。また、配置するセンサの種類については、Z軸方向の力を4箇所、Z,Y軸方向力およびYaw軸回転方向モーメントを1箇所計測する必要がある。部品数を少なくし、足部の構造を簡略化するために4つの3軸力センサを搭載する案(図3.19)も検討を行った。

しかし、一般的に3軸力センサは1軸力センサと比較して高価であるため、WABIAN-2Rにも搭載されている6軸力覚センサ(IFS)と4つの1軸方向力センサを併用する方式(案2)を採用した(図3.20)。比較検討の結果を表3.1にまとめる。

1軸力センサの採用が決め、実際に使用するセンサの選定を行った。1軸力センサについては一般的に多くのメーカーで販売が行われている(表3.2)。ひずみゲージ式のロードセルはセンサ自体は安価であるが、出力信号を増幅するため、専用のアンプが必要であり、非常に高価かつロボットに搭載するには大型である。また圧電型のセンサは非常に高価である。また、フィルム型の圧力センサも市場に存在するものの、定格荷重が小さいことや精度が悪いなどの問題がある。このため、本測定装置に用いる1軸力センサを製作することにした。

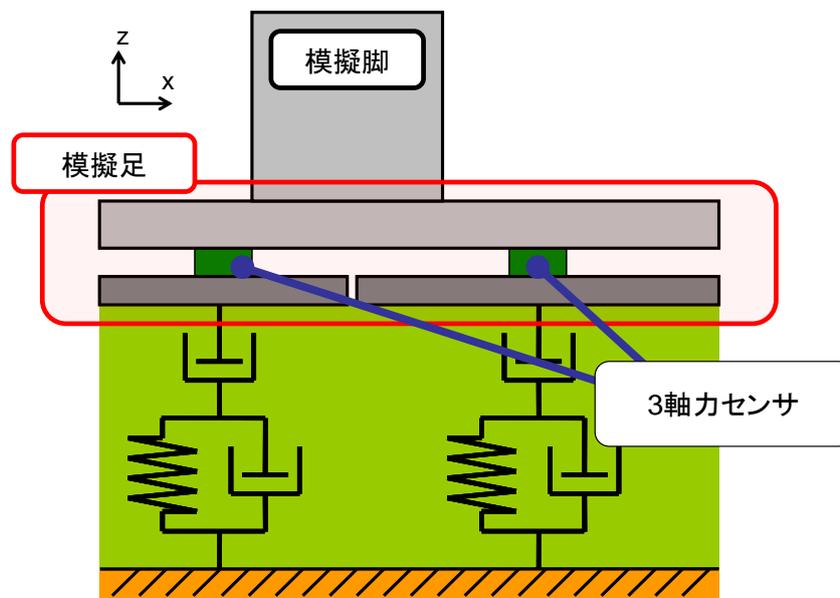


Figure 3.19 Triaxial force torque sensor.

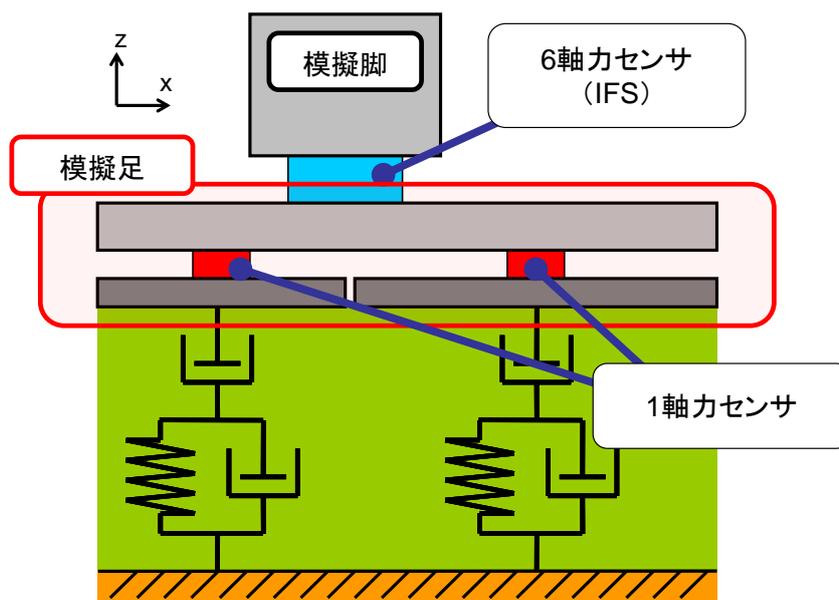


Figure 3.20 Six dimension and single-axis force torque sensor.

Table.3.1 Comparison of introduction sensor

	案 1	案 2
使用センサ	3 軸力センサ×4	1 軸力センサ×4 6 軸力覚センサ×1
コスト	高価 (単価 30 万円～)	比較的安価 (単価 2000 円～10 万円) ※IFS は在庫品
サイズ	大	小

Table.3.2 Comparison of sensors 1

名称	LMA-A-1kN	LMB-A-1kN	LUX-A-1KN
			
メーカー	共和電業	共和電業	共和電業
定格荷重	1kN	1kN	1kN
センサ部寸法	直径 20[mm] 高さ 9.5[mm]	直径 16[mm] 高さ 7[mm]	直径 28[mm] 高さ 37[mm]
非直線性	±1%RO 以内	±0.5%RO 以内	±0.15%RO 以内
繰返し性	1%RO 以下	0.3%RO 以内	0.05%RO 以下
ヒステリシス	±1%RO 以内	±0.5%RO 以内	±0.15%RO 以内
固定方法	はめ込み or 接着	はめ込み or 接着	上下ネジ止め
単価	36,000 円	36,000 円	約 90,000 円

Table.3.2 Comparison of sensors 2

名称	9602AA10 	Flexi Force A201-100 
メーカー	日本キスラー	ニッタ
定格荷重	5kN	440N
センサ部寸法	縦 25[mm] 横 25[mm] 高さ 10[mm]	直径 10[mm] 高さ 0.2[mm]
非直線性	不明	±5%RO 以内
繰返し性	不明	±2.5%RO 以内
ヒステリシス	不明	±4.5%RO 以内
固定方法	はめ込み or 接着	テープ留め
単価	208,000 円	約 2,000 円

(c) センサの製作

安価かつ容易に製作でき、精度の高い力センサとして、弾性ばねと赤外線距離センサを利用した力センサを製作した. 原理としては図 3.20 に示すようにばねにより力が変位に変換し、生じた変位を赤外線距離センサにより計測することで加えられている力が逆算する.

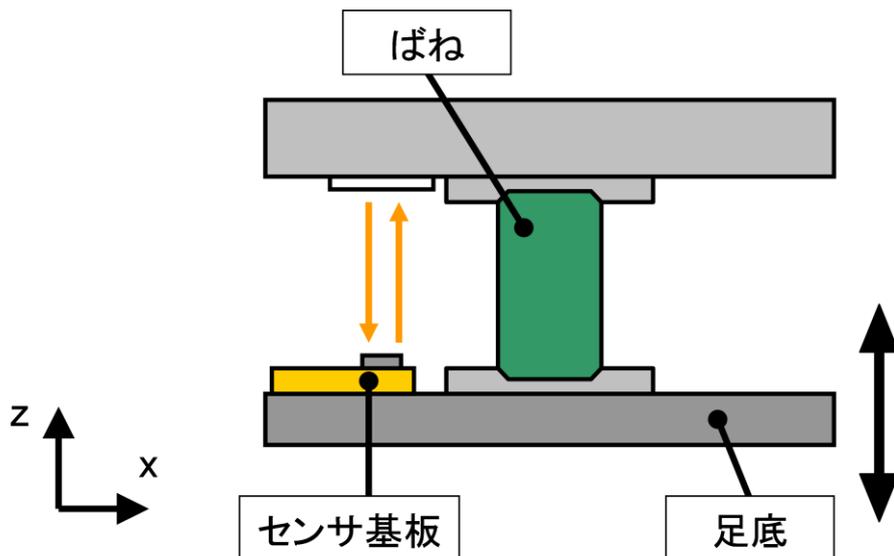


Figure 3.21 Structure of sensor.

(d) 赤外線距離センサの選定

一般に、距離センサとして赤外線を始めとした光距離センサや、超音波センサ、リニアエンコーダなどが挙げられる。ここで本測定装置では将来的に WABIAN-2R の足部に搭載するということと大きさや重量を考慮し、また入手性の良さ、ノイズ性能のバランスのとれた赤外線フォトセンサを用いることとした。

次に、実際に使用するフォトセンサであるが、圧縮物の変形量を同時に測定する必要があり、また WABIAN-2R の足部として搭載する前提である以上、センサ自体は弾性が大きく変形量が小さい方が望ましい。このため、比較的レンジが短く、短い距離で大きく電流量が変化するセンサのほうが、分解能の点で有利である。このような事情を考慮して、本センサに利用する赤外線距離センサには、図 3.21 に示すように比較的計測レンジの短いコーデンシ株式会社の SG-105 を使用した。

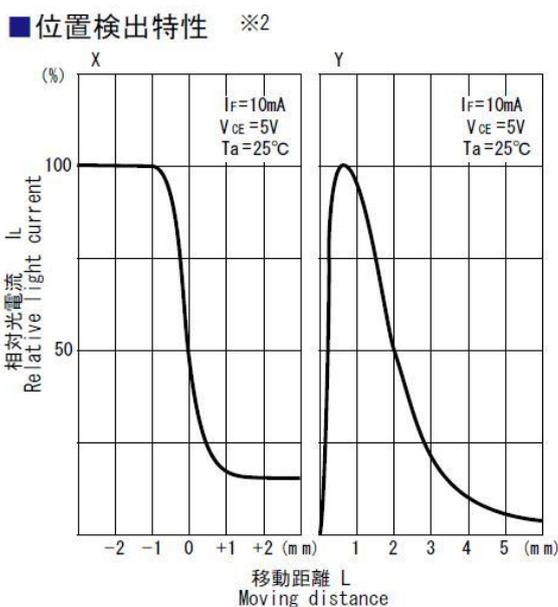
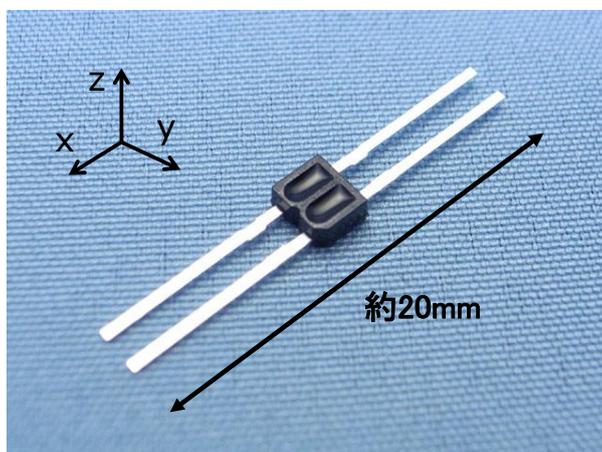


Figure 3.22 SG-105.

(e) センサ保護機構の検討

前項にてばねと赤外線距離センサを用いた力センサを採用することを述べたが、微小の変異を力として変換している以上、筐体の意図しない変形から影響を受けやすく誤差が出やすい(図 3.23)。このため、Z 軸方向以外の力、特に Roll, Pitch 軸方向の回転モーメントからセンサを保護する機構が必要であった。

センサ保護機構として考えた案は2種類あり、リニアブッシュを用いてZ 軸方向以外の力から保護するリニアブッシュ方式(図 3.24)と、部品同士のはめあいにより可動域を制限し、保護するはめあい方式(図 3.25)であった。

リニアブッシュ方式は文字の通り、リニアブッシュによりZ 軸方向以外の可動を制限する方式である。本方式の特徴として比較的軽量であることが挙げられる。しかしリニアブッシュの性質上、Yaw 回転を抑制するため、平行に少なくとも2本の軸とブッシュが必要である。また、部品の点数が増えるため、整備性が悪い。

また、径の小さいリニアブッシュの場合、軸との寸法上の隙間が小さいため、同一軸に対して複数を使用しようとした場合に、高い寸法精度が要求され、加工精度によっては著しく潤滑性が損なわれることや組み立たないことが予想された。

また、軽量化のために、青銅や樹脂製の無給油ブッシュを用いたモックアップを製作し、動作検証を行ったが、他の軸方向に力を加えただけで簡単にブッシュが軸に噛んでしまい、潤滑性が極端に悪くなった。この結果により、無給油ブッシュは耐モーメント性においてベアリング入りのリニアブッシュと比べ、極端に劣ることが得られた。

一方、はめあい方式はインローを直動ガイドとしてZ 軸方向以外の可動を制限する方式である。しかし、センサを外力から守るためにはめあい部が力を受ける必要がある一方で、はめあいには高い寸法精度が必要のためわずかな変形も許されないという設計上の矛盾が存在する。対策として、はめあい部には剛性が高く弾性素材である

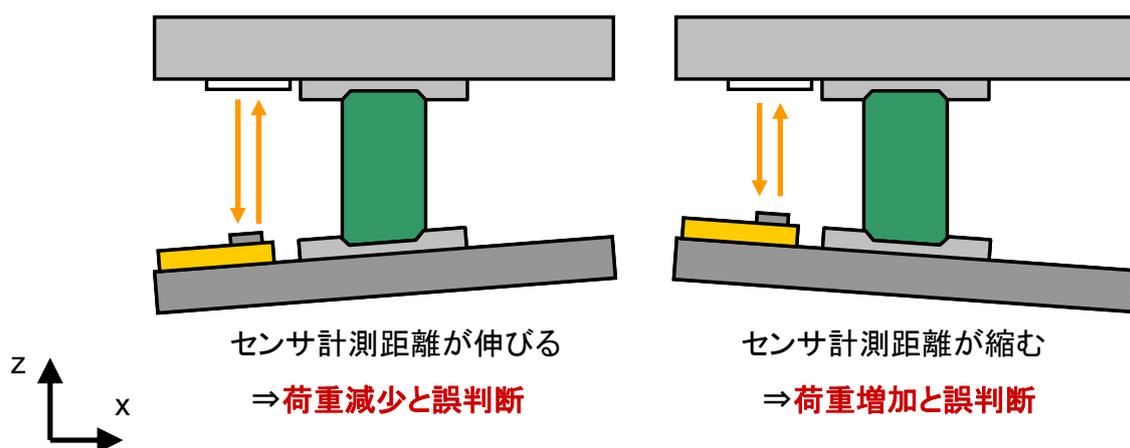


Figure 3.23 Error detection by moment load.

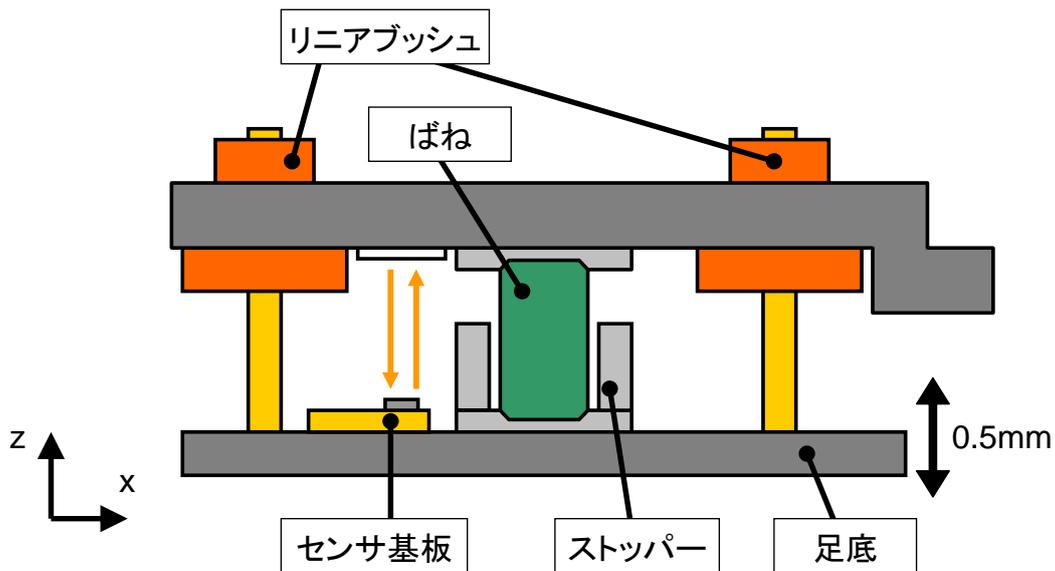


Figure 3.24 Linear bush system.

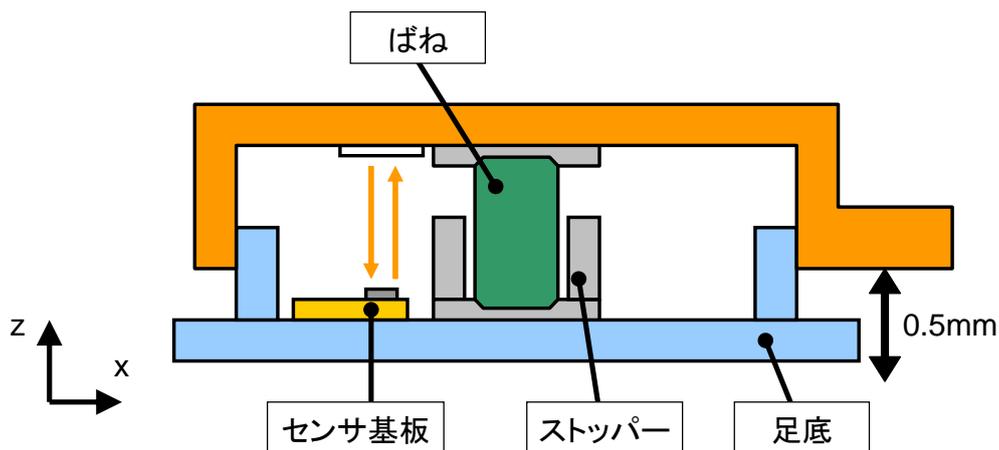


Figure 3.25 Fit system.

鋼鉄，あるいは摩擦の小さく安価な樹脂素材を頻繁に交換して用いるという対策が考えられるが，重量の増大や加工精度という新たな問題が解決できてない問題があった。

これらの問題を踏まえ，図 3.26 に示すように先のリニアブッシュ案をベースにそれぞれの案を統合した新たな機構を開発した。新たな機構では，直動ガイドとしてリニアブッシュを 1 本だけ使い，摩擦の小さい樹脂製のガイドを側面に接触させることで Yaw 軸方向回転を抑制する。このような構造とすることで部品数を減らし，軽量化を行いつつ，Z 軸以外の方向の力を排除する。また，構造の中央部に光センサを配置し，周囲を取り囲むようにばねを配置することで Roll, Pitch 回転モーメントによる誤検出の影響を可能な限り排除する。

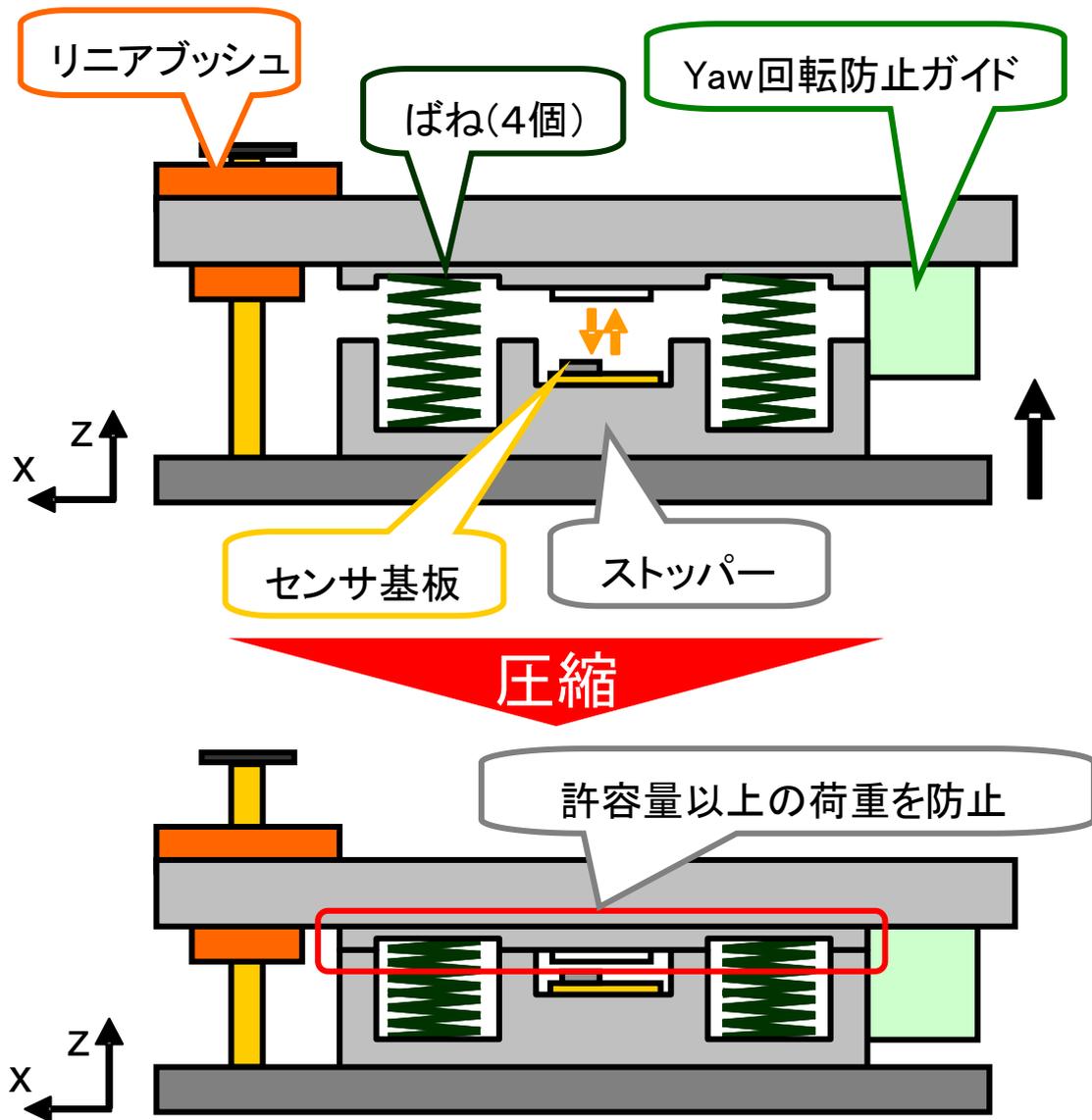


Figure 3.26 New mechanism with sensor.

(f) A/D 変換回路の開発

前項にて制作した力センサに使用した赤外線距離センサはフォトトランジスタであるため、通常では計測した力の値を電流値の強弱、すなわちアナログ値によって出力する。

一般的に2足歩行ロボットは足部に荷重がかかるため、必然的に足部のモータに大電流が流れる。WABIAN-2Rもこの例に漏れず本体体幹部から足部にかけてのモータの電源ラインには非常に大きな電流が流れ、強力なノイズ発生源となる。このため、アナログ信号の信号ラインを併設した場合、伝達ラインがこのノイズ発生源と隣接することになるため、信号は著しくノイズの影響を受けることになる。

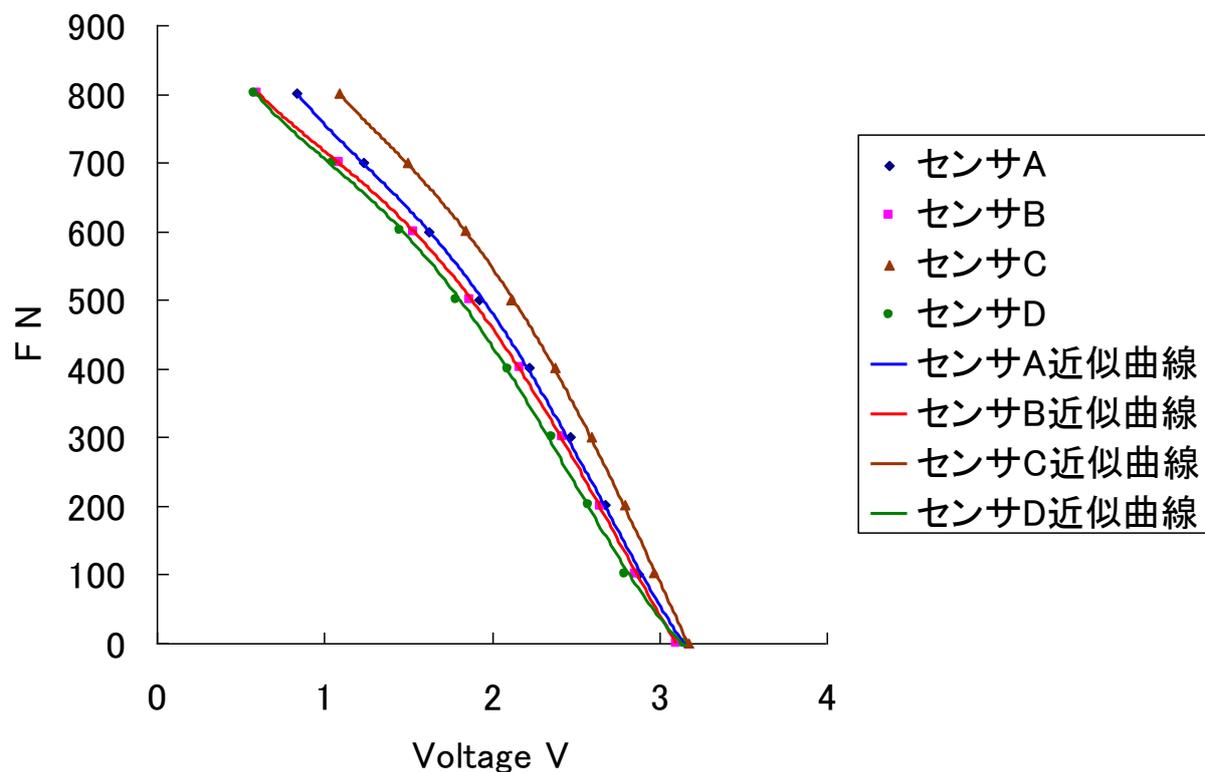


Figure 3.27 Result of sensor calibration

このようなノイズの影響を低減し、力センサの値の信頼性を増すため、足部でセンサの出力値をすぐに A/D 変換し、デジタルデータをシリアル通信によって制御 PC へ転送する回路を制作した。図 3.27 に示すように制作した回路を用い、6 軸力覚センサを用いてキャリブレーションを行った。

(g) まとめ

最後に路面のモデルを考慮し、路面のパラメータが測定可能な路面性状測定装置の全体図を図 3.28 に示す。また、開発した足部型力センサ機構の全体図を図 3.29 に示す。また、WABIAN-2R に製作した足部型力センサを搭載した際の全体図を図 3.30 に示す。

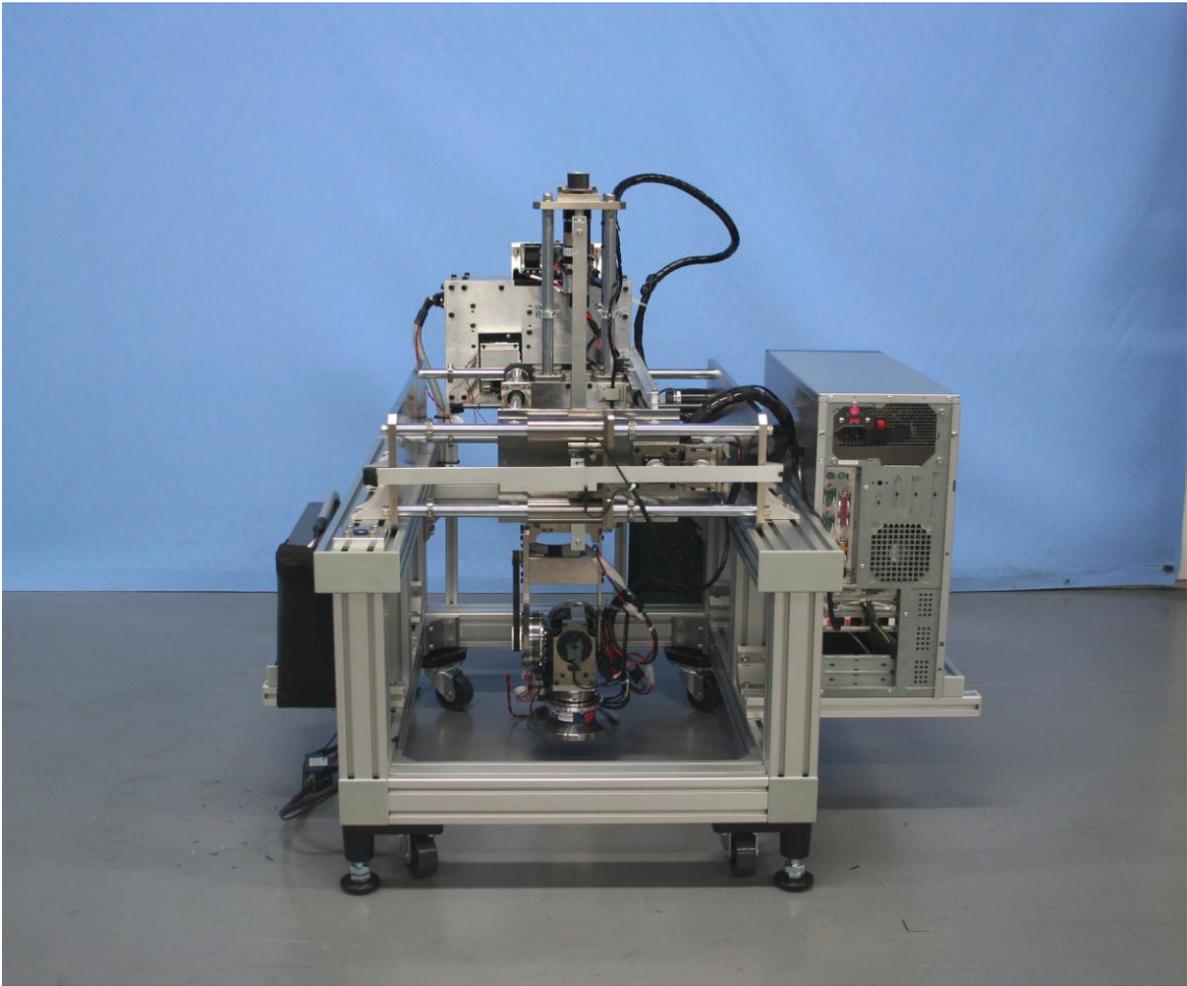
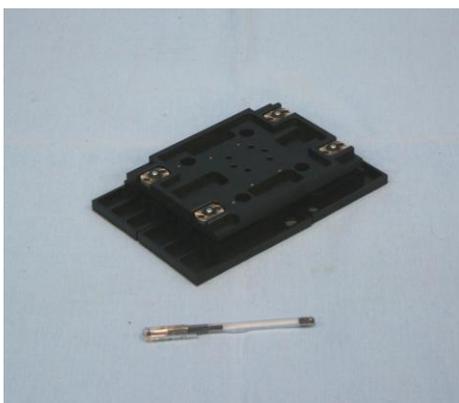
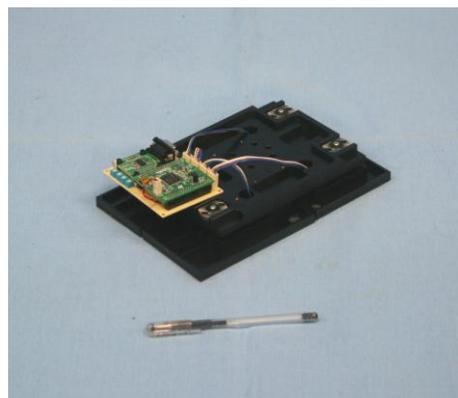


Figure 3.28 Overall view of road surface profiles measured equipment.



(a) Without control board



(b) With control board

Figure 3.29 Overall view of foot mechanism sensor.

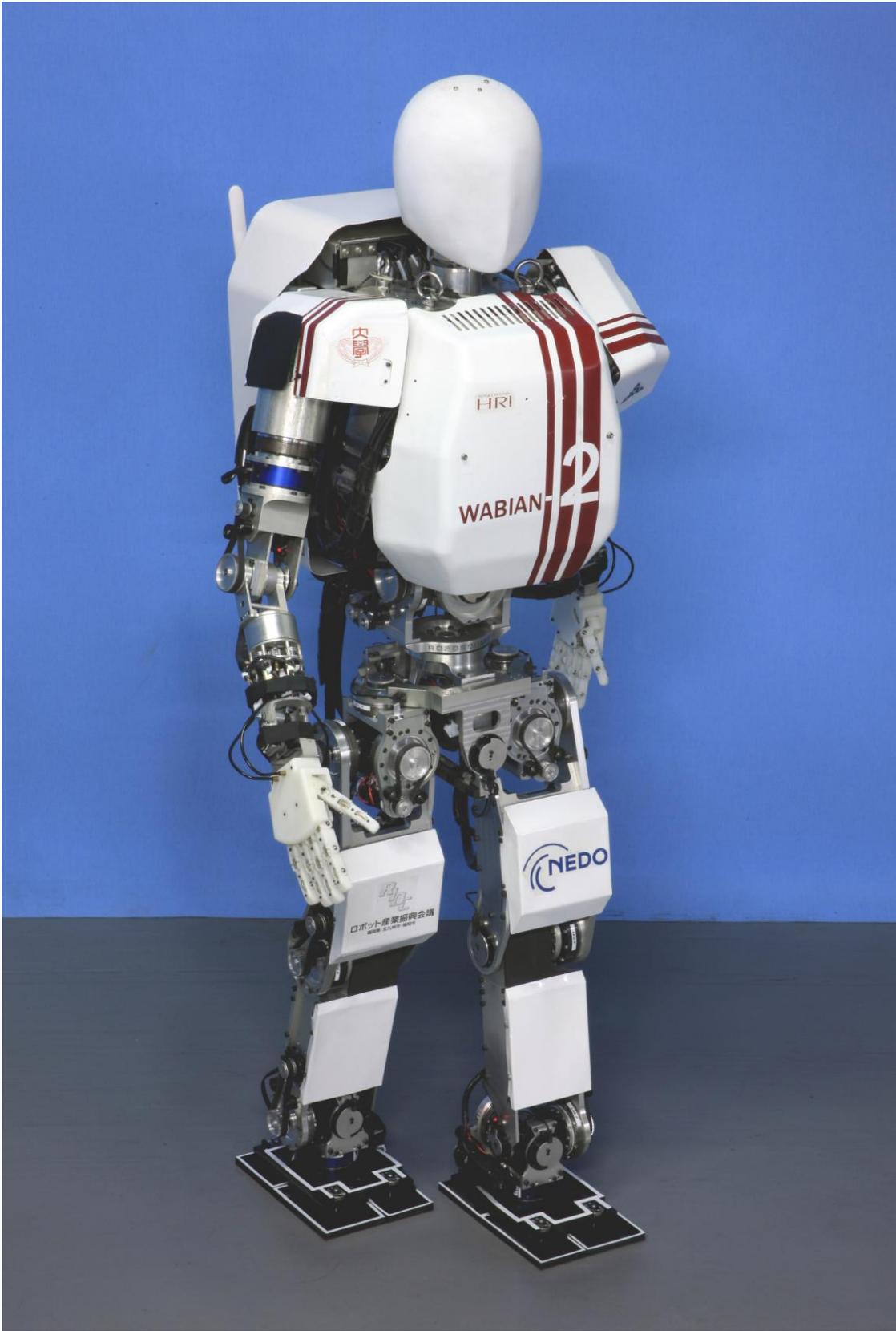


Figure 3.30 WABIAN-2R with foot mechanism sensor.

3.4 評価実験と考察

3.4.1 足部型力センサの評価実験

(1) 実験目的

開発した足部型力センサの力センサとしての精度の評価を目的とする。

(2) 実験方法

路面性状計測装置にて、エンドエフェクタに足部型力センサを装着した状態で水平に被圧縮材に対して圧縮試験を行う。このとき、4つのZ軸方向力センサの値の合計値と、足首部に装着された6軸力覚センサの値を比較する。

以下に実験における各種パラメータを示す。

等速押し込み

速度 : 1 [mm/sec]

圧縮量※ : 50 [mm]

被圧縮材 : 絨毯 (図 3.31)

※現在のソフトウェアでは力制御が行えない為、50[mm]圧縮した際、反力が800[N]程度になるまでの範囲を使用する。

(3) 実験結果

圧縮実験の結果であるセンサの出力値を図 3.32 に示す。実験の結果、高精度でZ軸方向の力を測定出来ていることがわかる。また、足部のセンサ値の合計が6軸力覚センサ値に追従していつことから、その有効性を確認した。



Figure 3.31 Carpet.

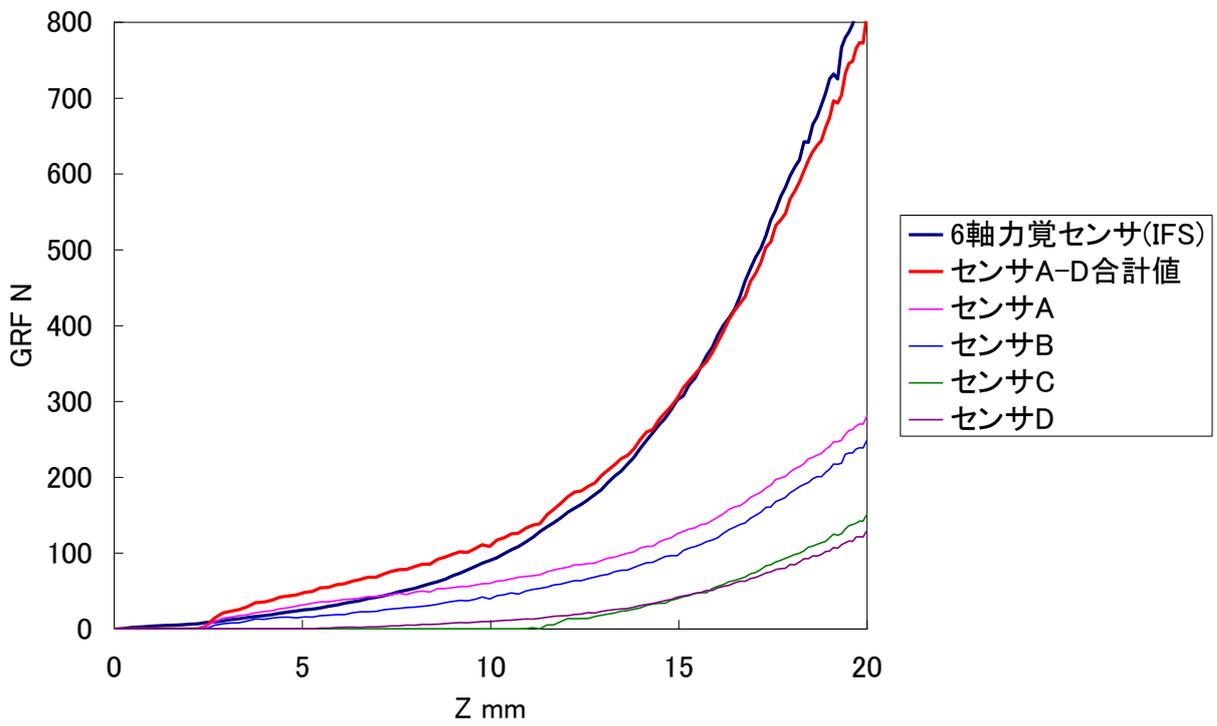


Figure 3.32 Result of foot mechanism sensor.

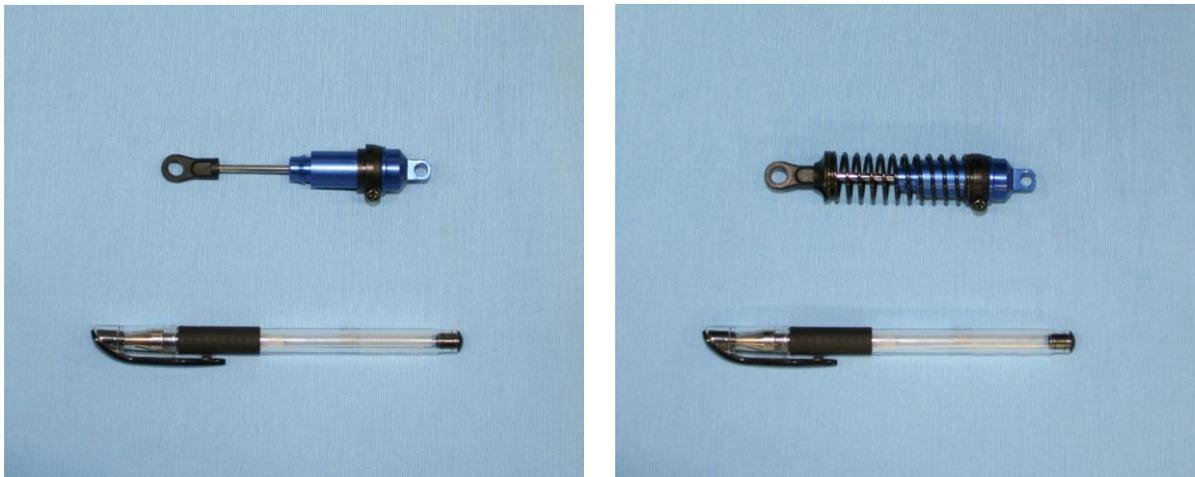
3.4.2 測定方法の検証実験

(1) 実験目的

開発した路面性状測定装置のセンサの粘弾性が測定できるか有効性を検証する評価を行う。

(2) 実験方法

ラジコン用のサスペンション（図 3.33～図 3.34）を理想的なダンパおよびばね・ダンパの複合と見立て、路面性状検証装置を用いて圧縮を行い、押し込み量と反力の関係を測定した。



(a) Damper

(b) Spring-damper

Figure 3.33 Suspension for radio control.



Figure 3.34 Combine jig and suspension for radio control.

以下に実験における各種パラメータを示す.

圧縮方法 : 等速圧縮
圧縮距離 : 20mm
圧縮速度 : 1,2,3[mm/sec]

(3) 実験結果

実験結果を図 3.35～図 3.36 に示す. ラジコン用のサスペンションを理想的なダンパおよびばね・ダンパの複合と見立て, 路面性状検証装置を用いて圧縮を行い, 押し込み量と反力の関係を測定した結果, 圧縮速度によって反力に明確な変化が見られたことから, 実際の路面に粘性が存在する場合にも, 結果のような変化が見られるものと思われ, その有効性を確認した.

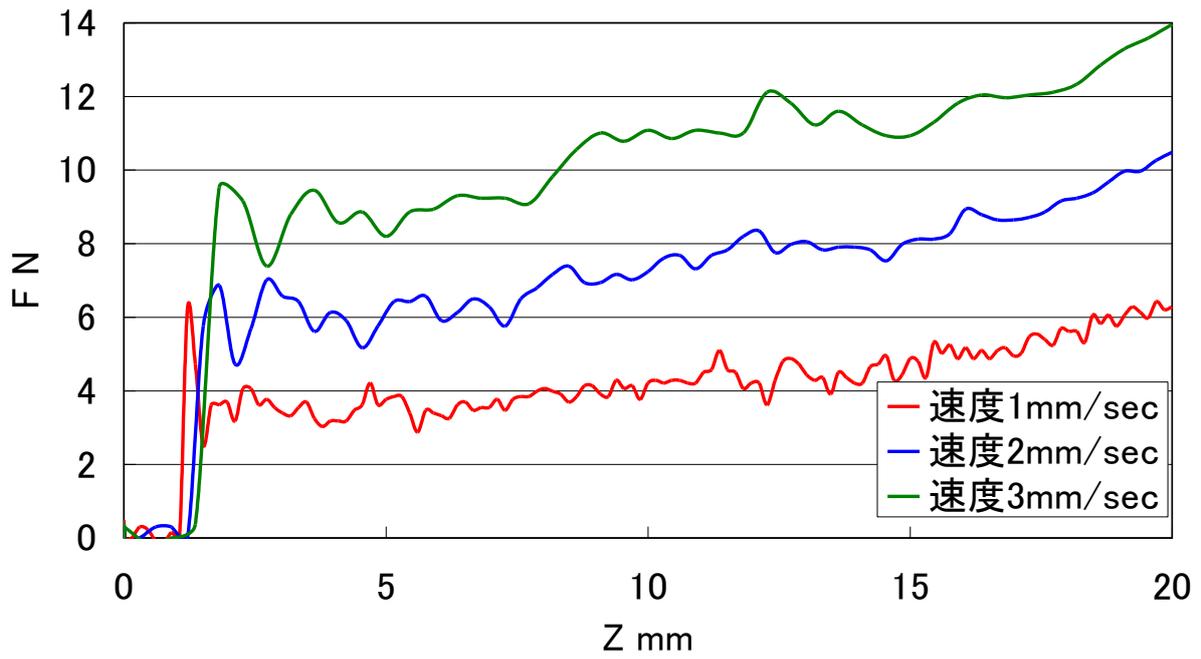


Figure 3.35 Relation between amount of compression and reaction force (damper).

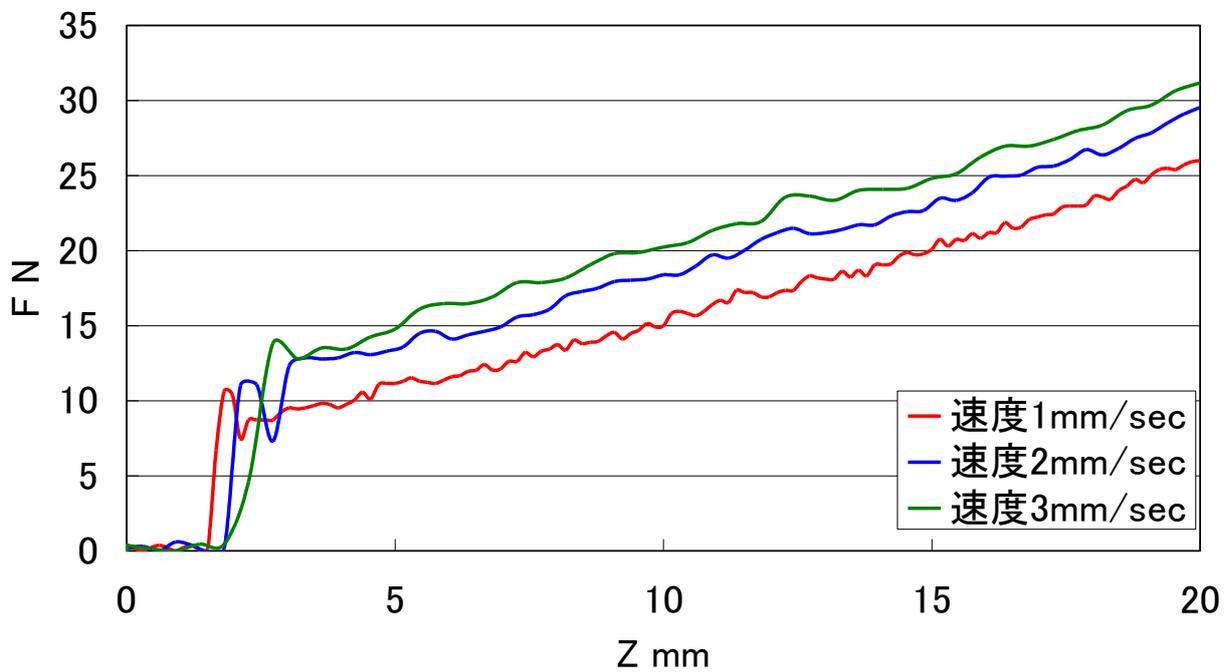


Figure 3.36 Relation between amount of compression and reaction force (spring-damper).

3.4.3 モデルの評価実験

(1) 実験目的

構築した路面の力学モデルを用いて、実際に路面の脆弱性が判別できるかどうかの評価を行う。

(2) 実験方法

路面性状検証装置を用いて路面に対し3種類の方向(図 3.37)について圧縮を行い、押し込み量と反力の関係を計測した。

なお、非圧縮材として路面を模擬した以下の5種類

- 被圧縮材 : 人肌ゲル (図 3.38)
- 衝撃吸収ゲル (図 3.39)
- 人工芝 (図 3.40)
- 絨毯シート (図 3.41)
- 絨毯 (図 3.42)

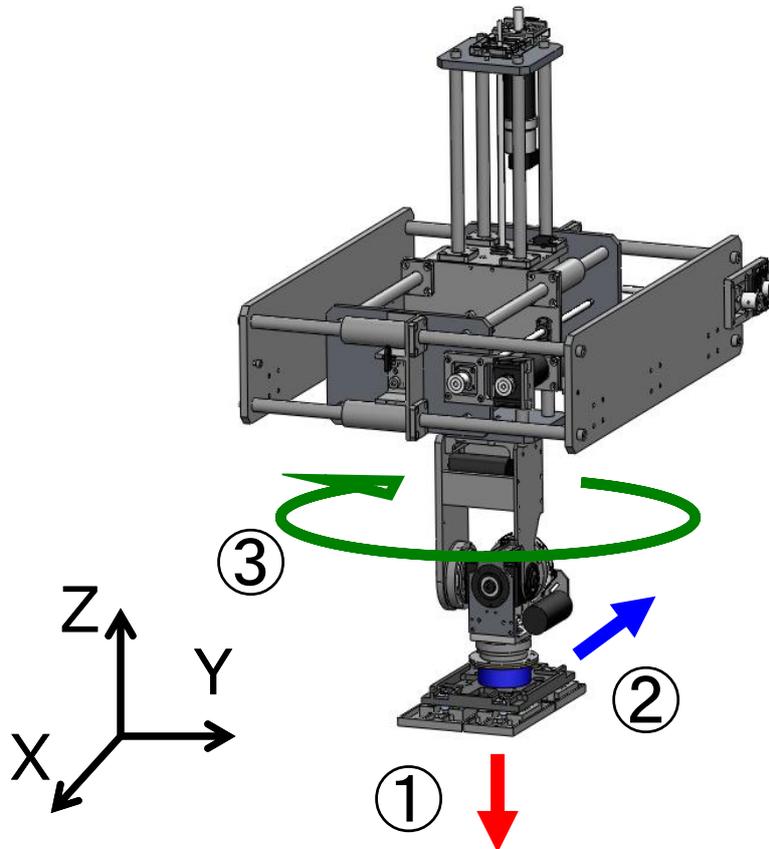


Figure 3.37 Driving direction.

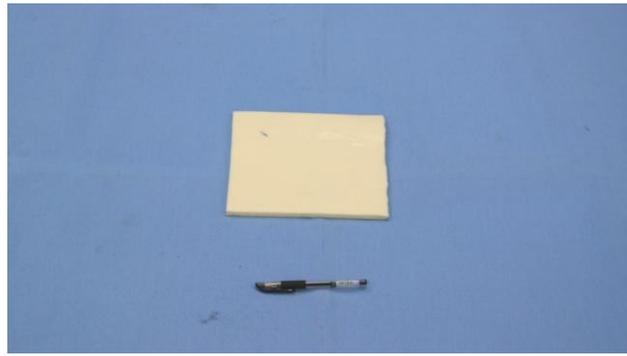


Figure 3.38 Human skin gel.

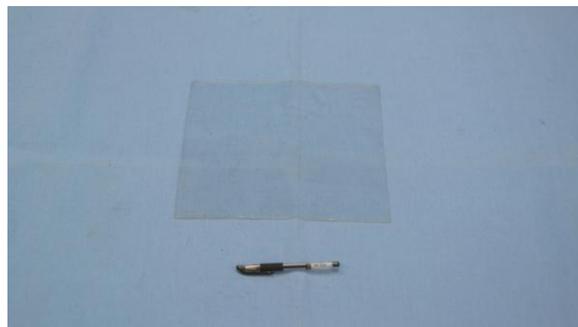


Figure 3.39 shock absorb gel.



Figure 3.40 Artificial lawn.



Figure 3.41 Carpet seat.



Figure 3.42 Carpet.

以下に実験における各種パラメータを示す.

(a) Z 軸方向

圧縮方法 : 等速圧縮
圧縮力 : 約 800[N]となるまで
圧縮速度 : 1,2,3[mm/sec]
被圧縮材 : 人工芝
絨毯

(b) X 軸方向

圧縮方法 : 等速圧縮
圧縮力 : 約 800[N]
圧縮速度 : 1,2,3[mm/sec]
被圧縮材 : 人肌ゲル
人工芝

(c) Yaw 軸方向

圧縮方法 : 等速回転
圧縮力 : 約 800[N]
回転速度 : 10[deg/sec]
圧縮角 : 100[deg]
被圧縮材 : 人肌ゲル
衝撃吸収ゲル
人工芝
絨毯シート
絨毯

(3) 実験結果

実験結果を実験結果を図 3.43～図 3.49 に示す。図 3.43 と図 3.44 から Z 軸方向の力を測定出来ていることがわかる。また、足部のセンサ値の合計が 6 軸力覚センサ値に追従していることから、その有効性を確認した。また、図 3.45～図 3.48 に示す結果は X 軸方向の力を表している。圧縮速度によって反力に明確な変化が見られたことから、その有効性を確認した。最後に図 3.49 は Yaw 軸方向の力を測定した結果であり、すべりと変形の区別がつかないということから、再検討が必要である。

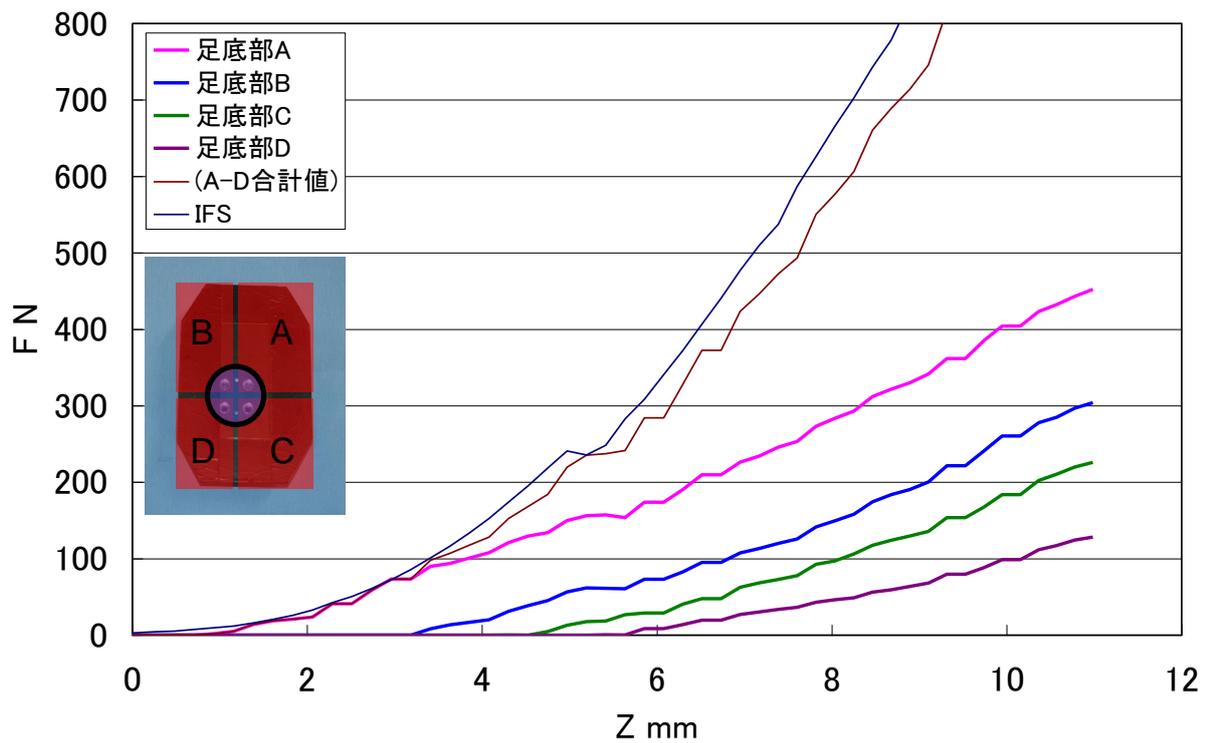


Figure 3.43 Relation between amount of compression and reaction force (artificial lawn).

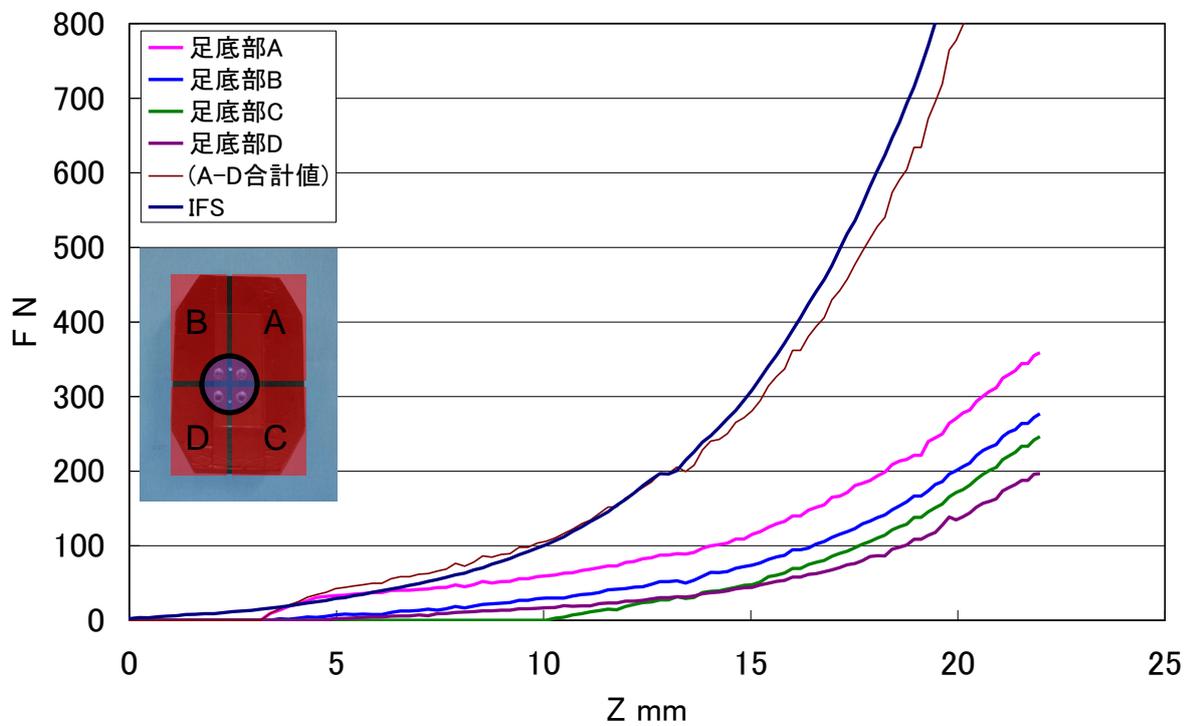


Figure 3.44 Relation between amount of compression and reaction force (carpet).

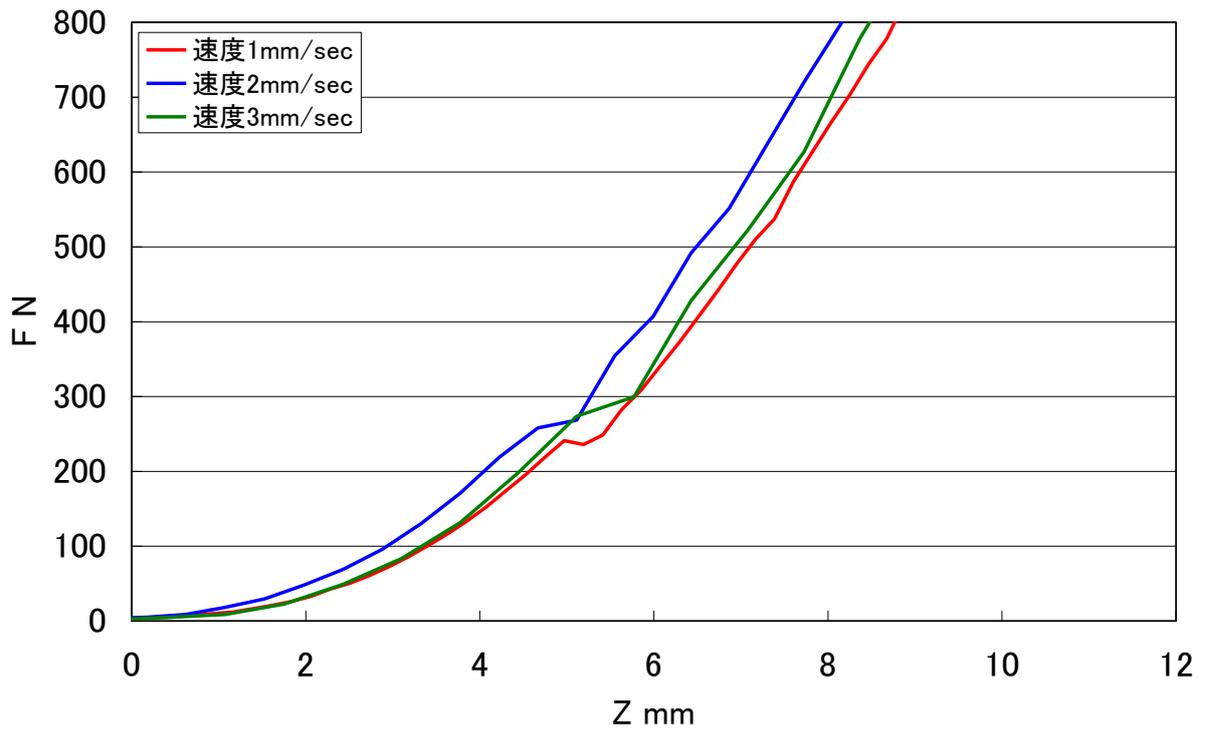


Figure 3.45 Altered relation between amount of compression and reaction force by push speed (artificial lawn).

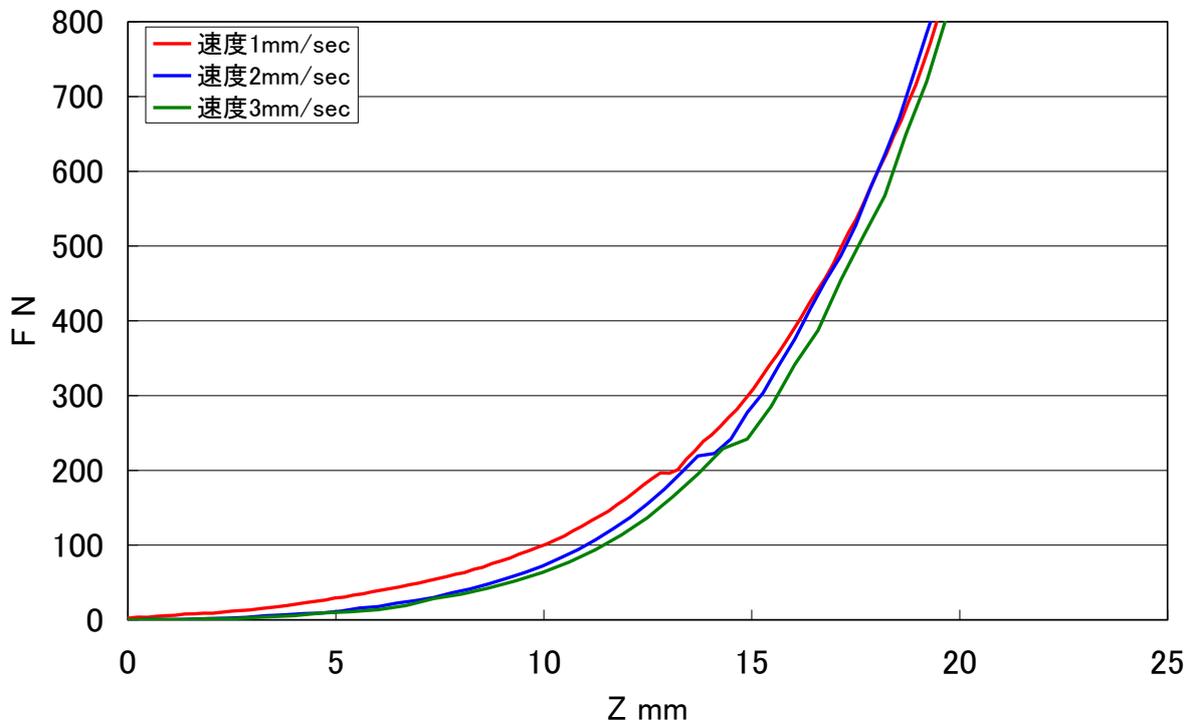


Figure 3.46 Altered relation between amount of compression and reaction force by push speed (carpet).

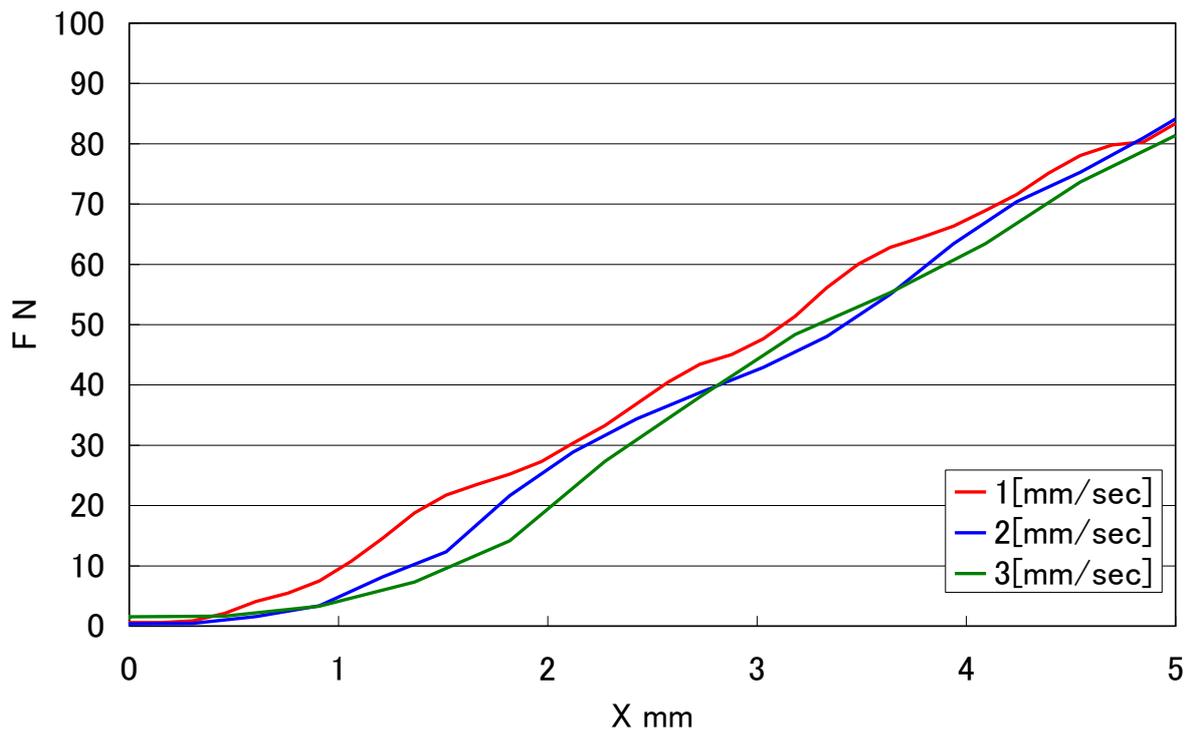


Figure 3.47 Relation between amount of compression and reaction force along x axis (artificial lawn).

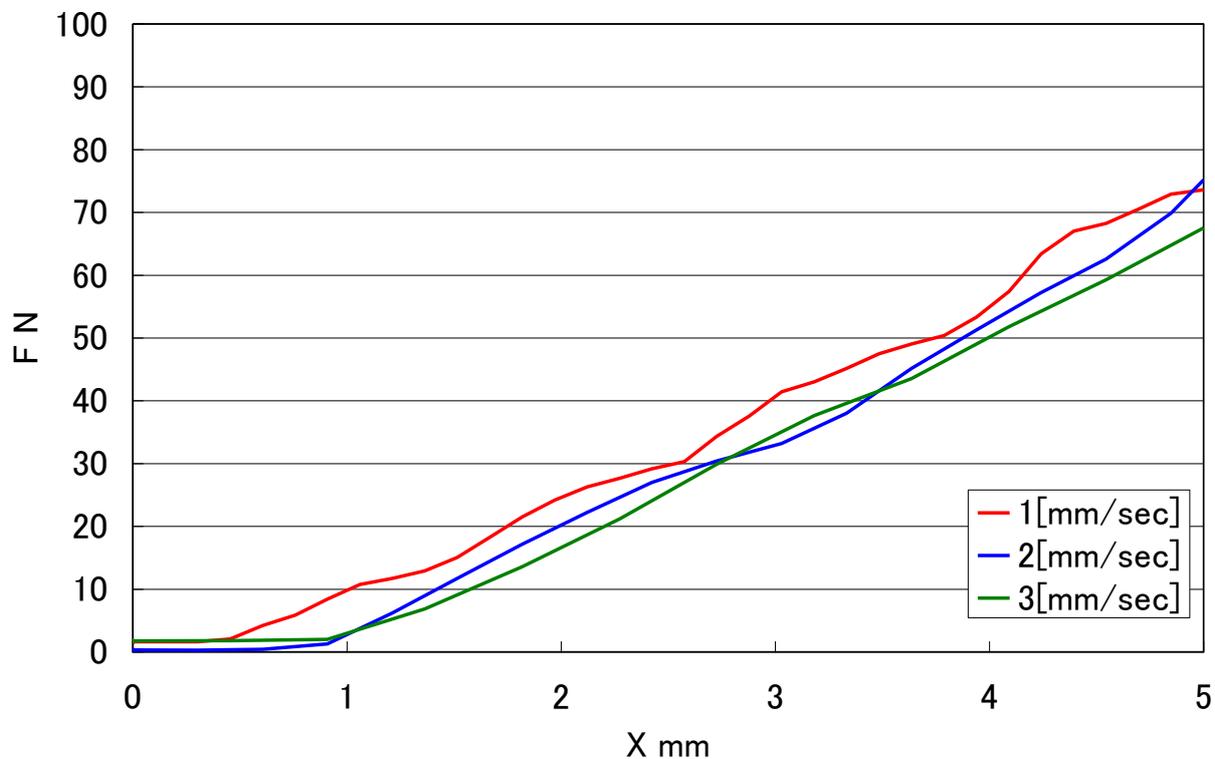


Figure 3.48 Relation between amount of compression and reaction force along x axis (human skin gel).

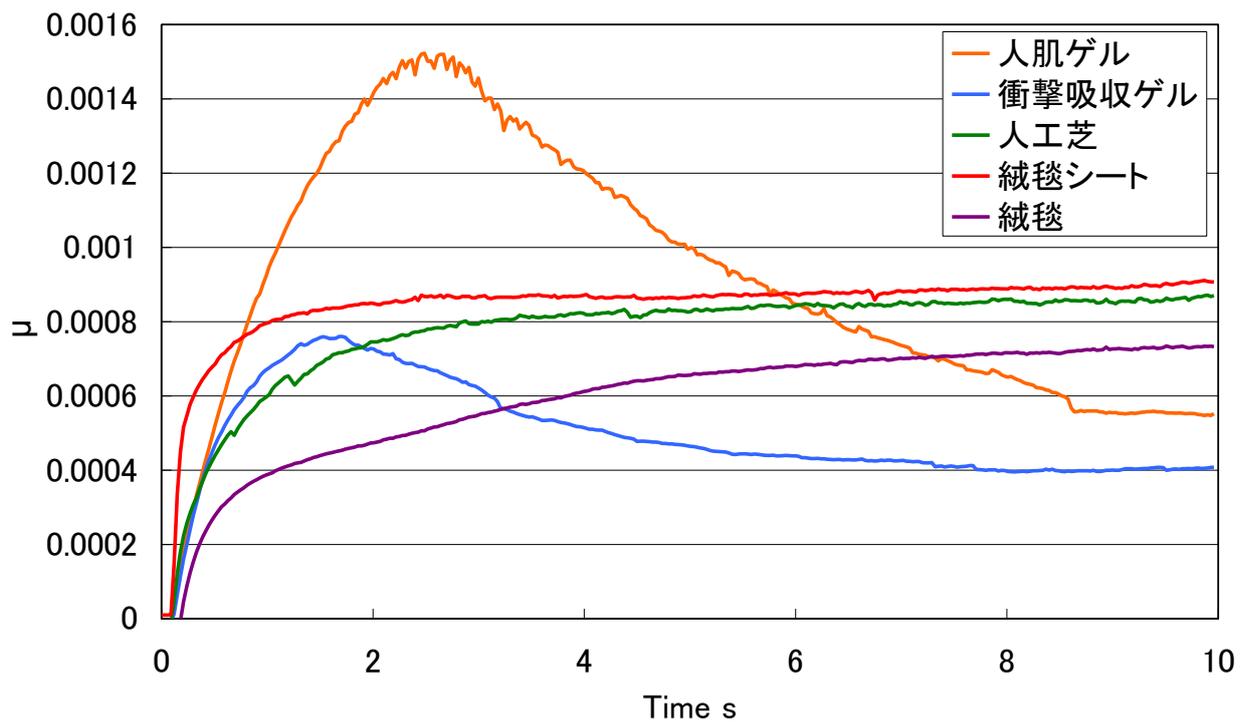


Figure 3.49 Result of friction experiment about Yaw axis.

3.4.4 考察

(a) 路面性状測定装置

検証実験および評価実験の結果から、開発したZ軸方向力センサの値の合計値が6軸力覚センサの値に追従していることが見られる。

また、ラジコン用サスペンションの圧縮実験の結果により、圧縮速度によって反力に明確な変化が見られたことから、実際に路面に粘性が存在する場合にも、このような変化が見られるものと思われる。

これらの結果から、開発した測定装置の有効性が確認できた。

また、測定装置の現状では基本的に1軸方向に対し、等速に荷重を加えた際の測定に限られていた。そのため、今後制御の改良を行い、実際のWABIAN-2Rの歩行パターンに則した足先軌道を再現し、床反力を再現したトルク制御を加えることで歩行時の条件の測定データが得られると考える。

(b) 並進方向

実験から得られたデータから得られる知見を元に、今回考案した路面のモデルに関して2つの大きな問題点が露呈した。

まず一つ目は、粘性項の必要性である。圧縮試験を行った結果、グラフを比較するとZ軸方向、X軸方向については圧縮量と反力の関係のグラフは単調増加を示し、弾性が存在することは見て明らかである。一方で、粘性については速度を変化させてもグラフに明確な変化が見られない。粘性の影響が強ければ、圧縮速度が大きくなるほど、同じ圧縮量での反力は大きくなるはずであるが、結果を見る限りそのような特徴は見られない。これらの実験結果および前項での検証から予想できることは2つあり、1つは用意した路面を模擬するサンプルが十分でなかったために粘性が表れなかったこと、もう一つは路面の変形を表現する際には、粘性の影響はむしろ少なく弾性が支配的であることが予想できる。これまで予備実験を行ってきた中でも、粘性の顕著に見られるサンプルはなかったことから、後者の説が有力ではないかと考えている。

また二つ目は摩擦と変形が分離できないという問題である。装置の特性上、計測できる変位とは、「路面の変形量」と「装置と路面間の変位」の合計である。粘弾性を測定する際に必要となるのは前者であり、摩擦を計測する際に必要なのは後者である。このため、これらの変位を分離して計測する手段がなければ粘弾性と摩擦の計算が不可能であるといった問題が生じた。このため、実際に測定が行えたのはZ軸方向およびRoll, Pitch軸方向だけであるといえる。

(c) 回転モデル

実験の結果、人工芝、絨毯シート、絨毯においてはある値に向かって収束する様子が見て取れた。一方、人肌ゲルや衝撃吸収ゲルというゲル状の素材では一度極大となるピーク値を取ってから徐々に収束している。これはピーク値をとった後、圧縮材が床面から剥がれ、ねじれが生じたことによると思われる。ゲルのように粘着性があり、各軸方向に極端に変形量の大きい路面に対しては摩擦という概念が通用しないのではないかと考えられる。また、毛足の長い絨毯では、収束が遅かった。

しかし、回転についても並進同様、相対変異と変形量が分離できないため算出ができないという問題が分かった。

3.5 まとめ

本章では第2章において述べた路面のモデルを検証するため、また路面のパラメータを測定するため開発した路面性状測定装置の開発および評価実験、考察について述べた。

加重により変形が生じる軟弱路面の力学モデルの構築と、構築したモデルのモデル

パラメータを測定する路面性状測定装置の設計および製作を行った。開発した路面性状測定装置を用いて、検証実験および評価実験を行った結果、開発したZ軸方向の力センサの値が6軸力覚センサの値に追従していることが分かった。

また、ラジコン用サスペンションの圧縮実験の結果、圧縮速度によって反力に明確な変化が見られたことから、実際に路面に粘性が存在する場合にも、このような変化が見られるものと思われる。

この結果、本測定装置を用いて得られるデータから有効性を確認し、検証できた。

しかし、現状では基本的に1方向に対し等速に荷重を加えた際の応答に限られていた。今後、ソフトウェアの改良を行い、実際のWABIAN-2Rの歩行パターンに則した足先軌道を再現し、床反力を再現したトルク制御を加えることで、歩行時の条件に近い計測データを得ることができた。

また、路面のモデルに関してZ軸方向とRoll, Pitch軸方向の以外、X, Y軸方向また、Yaw軸方向の周りの変形量が測定できる方法を再検討する必要があると結論する。

第4章 不整路面適応制御の開発

- 4.1 はじめに
- 4.2 着地軌道修正制御
- 4.3 姿勢補償制御
- 4.4 評価実験と考察
- 4.5 まとめ

4.1 はじめに

第2章から第3章までは、多様な路面の工学的なモデル化を行ったことと、路面モデルのパラメータを同定可能な路面性状測定装置の開発、および評価実験と考察を述べた。これにより、荷重が加えると接地面も変形する軟弱路面での歩行を実現するための安定化制御に生かせる要素を考案した。しかし、まだ剛体の不整路面における歩行能力もある程度致してない問題があった。そこで剛体の不整路面における適応歩行の能力向上をため、様々な制御手法を開発した。

筆者らの歩行制御方式の基本部分は、高西研究室において1996年より研究・開発を行っている2足ヒューマノイド・ロボットの動歩行制御方式を一部変更したものである。この手法においては、ロボットは水平平坦路を歩行するものとして歩行パターンを生成するため、このパターンのみでは不整路面での歩行は不可能である。

これまでにZMP制御と足部の力センサの情報をもとに仮想コンプライアンス制御を用いて着地衝撃の緩和を行っていた。しかしながら、これらの制御は傾斜路面への適応を目的としておらず適応に限界がある。また路面が凹路面の場合、足が着く前に姿勢が崩れ、歩行が難しかった。

不整路面における安定化を含む実時間歩行安定化に関する研究は多くの先行研究がある[123-138]。これらの多くはその観測量にZMPや体幹姿勢、上体加速度などを用いており、路面の凹凸をロボットが踏むことによりZMPや体幹姿勢、加速度などの偏差の急激な変化をセンシングし、ロボットの力学モデルに基づく高精度な加速度制御を行うものである。これらはロボット自体のモデルが比較的正確に取得できる場合に非常に有効である。

そこで、以下の2点を本章の研究目的とした。

- 開発する不整路面適応制御法は ZMP 計測用の力センサをのみで実装可能であること.
- 開発した姿勢補償制御法はジャイロセンサを用いること.
- 20 mm の凹凸のある不整路面において安定に歩行できること.

本章では剛体の不整路面での適応歩行を実現するために、着地軌道修正制御および姿勢補償制御、評価実験と考察について述べる.

4.2 着地軌道修正制御

前項で述べたように高西研究室で開発した人間搭乗型 2 足歩行ロボットに搭載されている実環境路面適応のための制御である着地軌道修正制御 [139-141] を WABIAN-2R に導入できるように改良を行うこととした.

着地軌道修正制御方式は、まず着地路面を検出するために、脚を Δl だけ伸ばしておく. そして、脚が Δl だけ縮む間に、歩行パターンから得られる理論コンプライアンス中心移動量と実測コンプライアンス中心移動量を比較することにより着地路面高さ誤差を検出し、その値に応じて高さ方向の着地軌道を修正する. その際、脚部コンプライアンスが小さいと大きな着地衝撃を生じ、ロボットが転倒する恐れがある. そこで、脚が Δl 短くなるまでは大きな着地衝撃を生じないように脚部コンプライアンスを大きくし、できる限り柔らかくしておく. 足裏に軟素材を貼るなどハードウェア的にコンプライアンスを持たせなければ着地衝撃を小さくすることは困難であるが、脚部コンプライアンスを大きくすることで、着地時の衝撃を多少抑制することができる. この軌道修正は遊脚期の後半に行い、両立脚期はその修正量を保持する. そして、立脚期の前半には基準歩行パターンに復帰する. このようにして、大きな着地衝撃が生じる以前に路面の形状を検知し、この路面情報を元に遊脚の荷重が増大してくる以前に歩行パターンにおける着地軌道を変更し路面にならわせることで、未知の凸路面、凹路面や傾斜路面における歩行を可能とするものである. 以下にこれらについて述べる.

4.2.1 非線形コンプライアンス制御

仮想的なコンプライアンスを実現する脚の運動は以下の式で記述される.

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\Delta\mathbf{x}_f + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{x}}_f \quad (4.1)$$

また、 $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ と $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ は以下のような仮想ばね係数，仮想粘性係数であり，次のような対角行列である：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & & & & & 0 \\ & K_y & & & & \\ & & K_z & & & \\ & & & K_{mx} & & \\ & & & & K_{my} & \\ 0 & & & & & K_{mz} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_x & & & & & 0 \\ & C_y & & & & \\ & & C_z & & & \\ & & & C_{mx} & & \\ & & & & C_{my} & \\ 0 & & & & & C_{mz} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ここで，制御周期を Δt とすれば，足部の速度は以下の式で与えられる．

$$\dot{\mathbf{x}}_f(t) = \frac{\Delta \mathbf{x}_f(t) - \Delta \mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (4.4)$$

これを用いて式(4.1)を離散化すると，足部のコンプライアンス移動量は以下のよう
に求められる．

$$\Delta \mathbf{x}_f(t) = \left[\mathbf{K} + \frac{\mathbf{C}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ \mathbf{F} + \mathbf{C} \frac{\Delta \mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{\Delta t} \right\} \quad (4.5)$$

非線形コンプライアンス制御は Z 軸方向に適用し，大きな床反力を発生することなく足部が路面形状に十分にならうよう，コンプライアンス中心移動量が着地路面検知用移動許容量 Δl 以下の場合にはコンプライアンス係数を非常に小さくしておく．そして，脚が着地路面検知用移動許容量 Δl 以上短くなったら，コンプライアンス係数を大きくする．

以下右脚の場合のみ示すが，左脚も同様である．

非線形コンプライアンス制御によるコンプライアンス移動量 (Z 軸方向) は以下の
ように算出する．

$\Delta z_{ac}(t-\Delta t) \leq \Delta l$ のとき

$$\Delta z_{ac}(t) = \left[K_{z1} + \frac{C_{z1}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ F_z + C_{z1} \frac{\Delta z_{ac}(t-\Delta t)}{\Delta t} \right\} \quad (4.6)$$

(i) $\Delta z_{ac}(t-\Delta t) > \Delta l$ のとき

$$\Delta z_{ac}(t) = \left[K_{z2} + \frac{C_{z2}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ F_z + C_{z2} \frac{\Delta z_{ac}(t-\Delta t)}{\Delta t} + (K_{z2} - K_{z1}) \Delta l \right\} \quad (4.7)$$

一方, Roll 軸, Pitch 軸に関しては通常のコンプライアンス制御を行う. ただし路面の凹凸に接触しても大きな床反力を生じないように, 定数 K , C を発振しないレベルでなるべく小さい値を実験により決める.

$$\begin{aligned} \Delta \theta_x(t) &= \left[K_{\theta x} + \frac{C_{\theta x}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ F_{\theta x} + C_{\theta x} \frac{\Delta \theta_x(t-\Delta t)}{\Delta t} \right\} \\ \Delta \theta_y(t) &= \left[K_{\theta y} + \frac{C_{\theta y}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ F_{\theta y} + C_{\theta y} \frac{\Delta \theta_y(t-\Delta t)}{\Delta t} \right\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

図 4.2 に以上の制御法の足部モデルと Roll 軸, Pitch 軸周りのならい動作の模式図に示す.

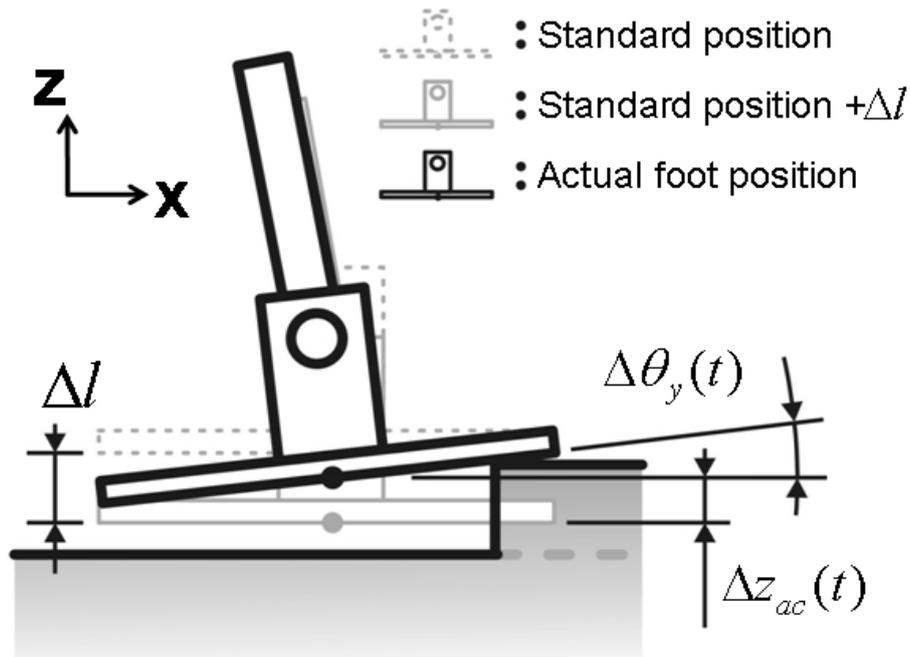


Figure 4.2 Landing motion.

4.2.2 着地路面高さ誤差の検出

非線形コンプライアンス制御を用いて水平平坦路を歩行した場合の Z 軸方向コンプライアンス移動量の理論値 $\Delta z_{th}(t)$ は容易に導出できる (図 4.3).

(i) $\Delta l - \bar{z}_{pat}(t) < z_{waist}(t)$ のとき

$$\Delta z_{th}(t) = 0 \quad (4.9)$$

(ii) $\Delta l - \bar{z}_{pat}(t) \geq z_{waist}(t)$ のとき

$$\Delta z_{th}(t) = \Delta l - z_{waist}(t) - \bar{z}_{pat}(t) \quad (4.10)$$

この理論値と実測値を比較することにより、制御周期ごとの着地路面高さ誤差 $e(t)$ を算出する.

$$e(t) = \Delta z_{th}(t) - \Delta z_{ac}(t) \quad (4.11)$$

凸路面に着地した場合は、平坦路ならコンプライアンス移動量が発生しない時刻に $\Delta z_{ac}(t)$ が値を持つことにより $e(t)$ は負の値をとり、反対に凹路面に着地した場合はコンプライアンス移動量が発生するべき時刻になっても $\Delta z_{ac}(t)$ が値を持たないために $e(t)$ は正の値をとる.

一方、Roll 軸、Pitch 軸に関しては、水平平坦路面歩行ではコンプライアンス移動量は理想的には生じないため、実測値をそのまま誤差として扱う

4.2.3 着地路面高さ誤差に応じた着地軌道修正

着地路面高さ誤差 $e(t)$ を制御周期ごとにフィードバックし、これに応じて基準歩行パターンにおける足部の Z 軸方向の軌道を修正することにより、路面へののらひ動作を行う.

Z 軸方向の着地軌道修正量 $H(t)$ は以下の式により算出する.

$$\begin{aligned} H(t) &= H(t - \Delta t) - k_e \cdot e(t - \Delta t) \\ &= -\frac{k_e}{\Delta t} \int_t e(t) dt \end{aligned} \quad (4.12)$$

この修正量を基準歩行パターンにおける足先位置高さ $\bar{z}_{pat}(t)$ に加えることにより、

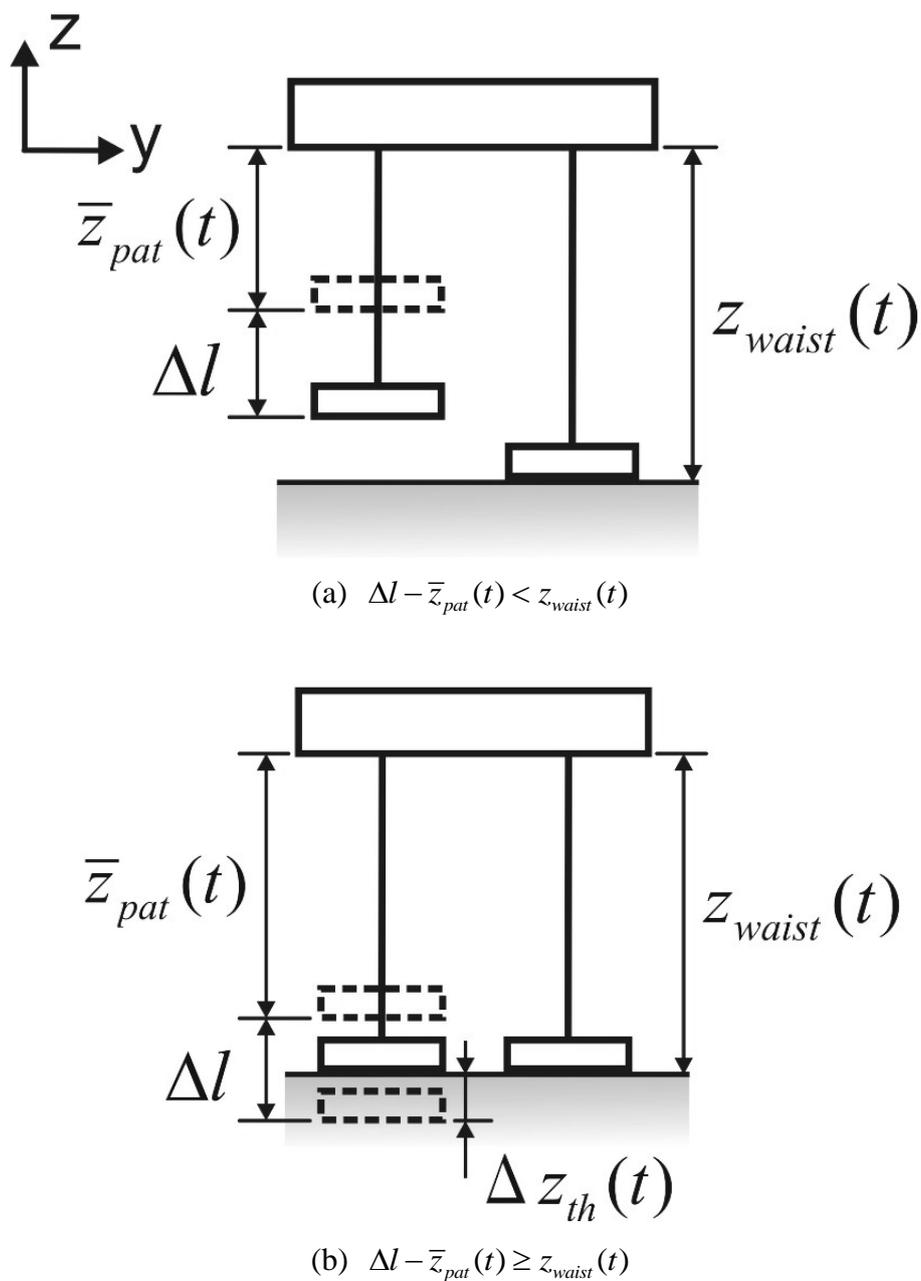


Figure 4.3 Theoretical compliance displacement in walking on even terrain.

路面の形状にならいいながらの着地動作を実現する．軌道修正後の足部 z 軸方向軌道 $\bar{z}_{final}(t)$ は以下の式で求める．

$$\bar{z}_{final}(t) = \bar{z}_{pat}(t) - \frac{k_e}{\Delta t} \int_t e(t) dt + \Delta z_{ac}(t) - \Delta l \quad (4.13)$$

ここで、基準歩行パターンにおける足先位置高さより Δl 分だけ足を伸ばしているのは、理想的歩行の場合も必ず Δl 分だけコンプライアンス移動量が発生するためである。

Roll 軸, Pitch 軸に関しては能動的な軌道修正は行わず、コンプライアンス制御のみを行う。

$$\begin{aligned}\theta_{x\text{final}}(t) &= \theta_{x\text{pat}}(t) + \Delta\theta_x(t) \\ \theta_{y\text{final}}(t) &= \theta_{y\text{pat}}(t) + \Delta\theta_y(t)\end{aligned}\tag{4.14}$$

式(4.13), (4.14)から得られる値から逆運動学計算により各リンク長さの目標値が求められ、各アクチュエータ制御部に出力される。

以上の着地路面高さ誤差の検出と軌道修正は遊脚期の後半に行う。コンプライアンス移動量が Δl 以上の大きさになるまで大きな床反力が発生しないことに注意されたい。

4.2.4 1 歩ごとの基準歩行パターンへの復帰動作

以上述べた着地軌道修正は遊脚期の後半に行い、Z 軸方向に関しては、両脚支持期は遊脚期最後の軌道修正量を保持し単脚支持期前半に基準歩行パターンに復帰する。Roll 軸, Pitch 軸に関しては立脚期を通じて遊脚期最後のコンプライアンス移動量を保持し、次の遊脚期前半に基準歩行パターンに復帰する。復帰軌道の生成には 5 次関数を用いた。

4.3 姿勢補償制御

前項にて述べたように剛体の不整路面における適応歩行能力の向上のため、高西研究室で開発した人間搭乗型 2 足歩行ロボットに搭載されている実環境路面適応制御である着地軌道修正制御と姿勢補償制御を改良し、WABIAN-2R に導入し評価実験を行った。実験の結果、WABIAN-2R は路面への適応動作の際に路面への適応不足のため、瞬間的に姿勢が崩れることがあることが確認された。

そこで新たに WABIAN-2R の背面に搭載したジャイロセンサを用いることを考えた。ジャイロセンサから得られた姿勢角速度を用いた PD 制御を適用し、瞬間的な姿勢崩れに適応するものとした[142-148]。また、両立脚期において足踏をするような挙動となるため、両立脚期には姿勢制御のゲインを落とし、さらに、WABIAN-2R 自身の振動によって発生する角速度を不要に検出しないように移動平均フィルタを通し、ノイ

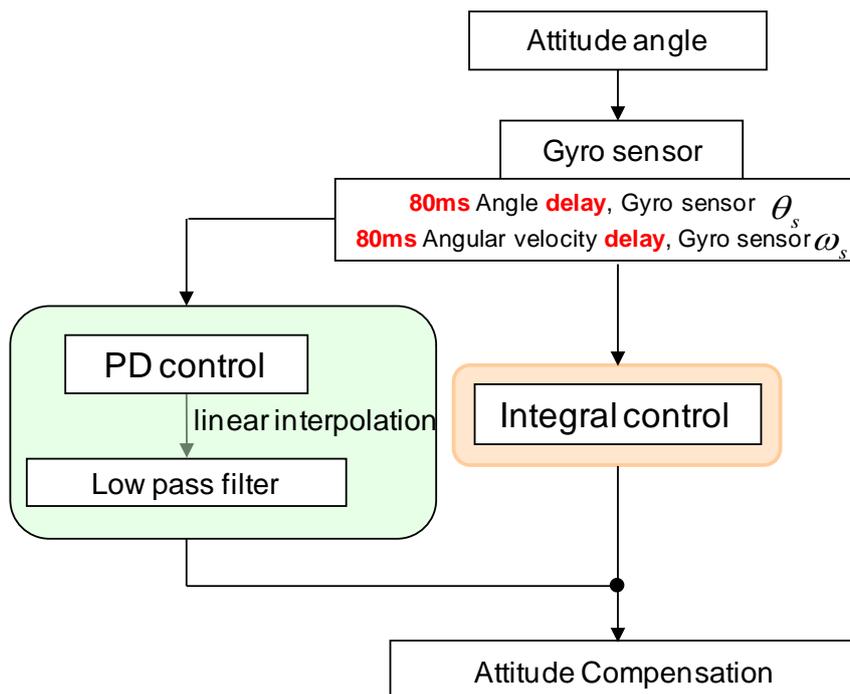


Figure 4.4 Attitude compensation method.

ズを抑制する方法を採用した。導入した姿勢補償制御の構成は図 4.4 に示す。基本的な制御構成としては PID 制御を用いている。以下にこれらについて述べる。

4.3.1 I (Integral) 制御

前述した通りに PID 制御における Integral 制御部分は 2006 年度に高西研究室で開発した人間搭乗型 2 足歩行ロボットに適用されている。制御概要としては、指定した時間内での目標姿勢との誤差を足しこみ、誤差の結果を計算後に指定時間内に 5 次補間を用いて目標姿勢へと復帰させるものである。

$$\theta_{control} = K \times \int (\theta_{ref} - \theta_{sensor}) dt \tag{4.15}$$

制御量: $\theta_{control}$
 姿勢角センサ値: θ_{sensor}
 姿勢角目標値: θ_{ref}
 積分時間: t
 補償ゲイン: K

4.3.2 PD (Proportional Derivative) 制御

前述の制御では長期的な編差に対してのみ有効なので、姿勢崩れに対する応答性を上げるための短期的な偏差に対する制御も開発した。PD 制御部分に関しては高速な応答が求められるが、センサ自体の遅れが 80[msec]程度、15[msec]ごとの離散データ出力であり、制御周期の 1[msec]と比較しても非常に遅いため、ハイゲインのフィードバックは実現できない。

そこで、センサから得られる遅れた角度と角速度を用いることで現在の角度を線形補間にて予想し、姿勢角目標値との差分を制御量として姿勢を復帰させることを試みた。

ローパスフィルタは制御量に対して移動平均を用いた。

$$\theta_{control} = K_p \times (\theta_{ref} - \theta_{sensor}) - K_d \times \omega_{sensor} \quad (4.16)$$

比例ゲイン : K_p
 速度ゲイン : K_d
 角速度 : ω_{sensor}

この制御手方では、角速度を使う制御のためゲインをある程度上げると、図 4.5 に示すように、ローパスフィルタを介しても歩行中に発振現象が生じ、足底の力に発振として反映される。

発振は両立脚期に発生し、遊脚中に減衰していくことが確認された。その原因としては図 4.6 に示すように、両立脚期においては足踏み動作をしながら姿勢を補償する

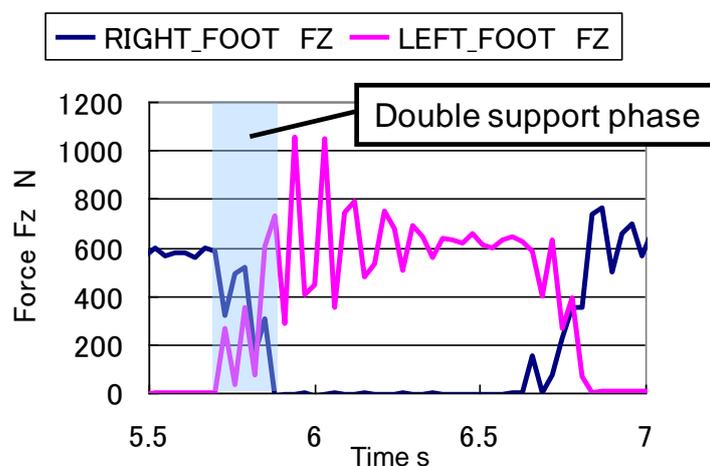


Figure 4.5 Ground reaction forces before the attitude control gain is changed.

状況となり，姿勢制御によって姿勢を発振させている状況に陥りやすい。

そこで，両立脚期における姿勢制御のゲインを低くすることで振動を抑制し，安定した歩行を実現した（式 4.17）。その結果を図 4.7 に示す。

$$\begin{aligned}
 Fz_{smaller} < 0 & & K_{attitude} &= K_{max} \\
 0 < Fz_{smaller} < F_{max} & & K_{attitude} &= K_{max} \times \frac{(F_{max} - F_z)}{F_{max}} \\
 Fz_{smaller} > F_{max} & & K_{attitude} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

- 両立脚状態と判断する床反力値： F_{max}
- 左右床反力の小さいほうの値： $Fz_{smaller}$
- ゲイン操作前の姿勢制御ゲイン： K_{max}
- ゲイン操作後の姿勢制御ゲイン： $K_{attitude}$

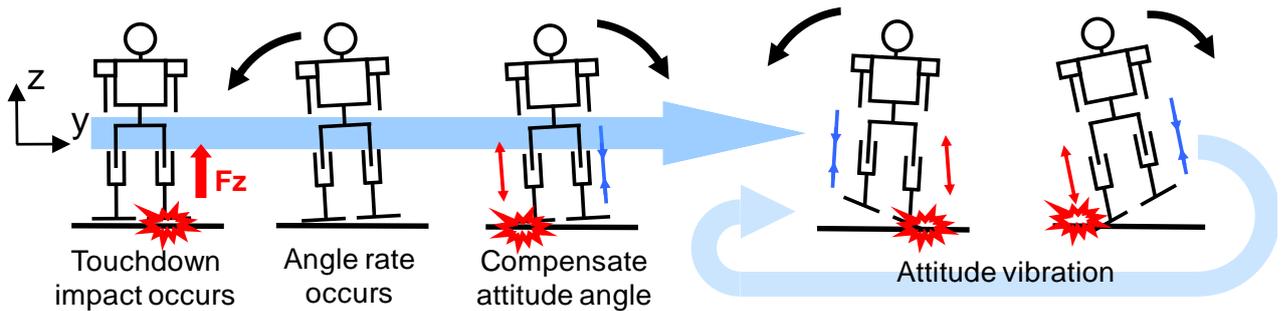


Figure 4.6 Vibration by attitude control in double support phase.

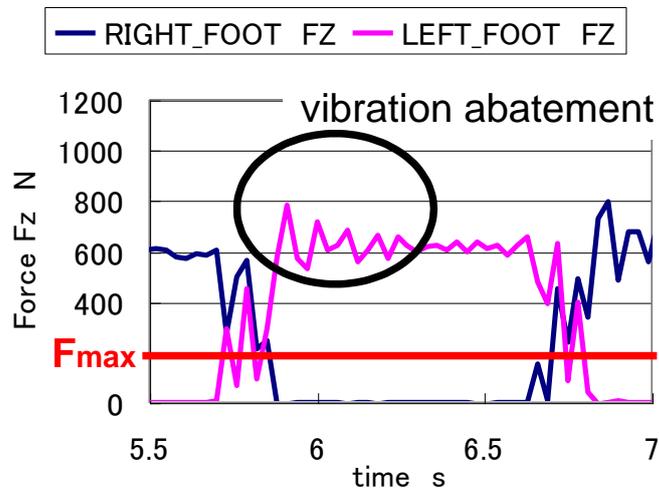


Figure 4.7 Ground reaction forces after the attitude control gain is changed.

また、2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R は平坦な路面を歩行する際でも、姿勢を左右に 1~2[deg]程度揺れながら歩行していることが観察された。これはハードウェア的なたわみを補償し、足底を路面に対して水平に保つ制御によるものである。従って、姿勢角目標値を 0[deg]（路面に対して水平）として姿勢を修正すると、姿勢角が 0[deg]となる代わりに、足底が路面に対して水平に接地しないことより安定した歩行が難しい。そこで、平坦な路面で安定した歩行を実現している際の姿勢角のデータを計測し、それを目標値として姿勢を補償することでこの問題を解決した。

4.4 評価実験と考察

4.4.1 多様な屋外路面における歩行実験

(1) 実験目的

開発した着地軌道修正制御と姿勢補償制御を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し、福岡市早良区百道浜 TNC 放送会館周辺での実環境路面において評価実験を行い、屋外に存在する様々な凹凸路面において、開発した制御が有効であることを確認する。

(2) 実験方法

まず、実験条件としては、従来の剛体平板足部機構を用い、制御としては以下のすべての制御法を実装し、評価実験を行った。

- ① 着地軌道修正制御 (2004 WL-16RII)
- ② ZMP 補償制御
- ③ 姿勢補償制御 (2006 WL-16RIV)
- ④ 姿勢制御

また、実験を行った環境は以下の通りである (図 4.8)。

- ① 左右方向傾斜 2[deg]前後 タイルが凸凹飛び出たうねった路面
- ② 左右方向傾斜 3[deg]前後 平らなタイル路面
- ③ 進行方向傾斜下り 3[deg] 平らなタイル路面
- ④ 進行方向傾斜下り 5[deg] 平らなタイル路面
- ⑤ 進行方向傾斜上り 5[deg] 平らなタイル路面

- ⑥ 路面ほぼ水平, 凹凸路面
- ⑦ 進行方向傾斜下 2~5deg 程度凹凸路面
- ⑧ ほぼ水平の平らなタイル路面
- ⑨ ⑧と同様

(3) 実験結果

実験の様子と結果を図 4.9~図 4.28 に示す. 全ての場所で歩行に成功し, また, 歩行中の姿勢角と ZMP グラフより測定値が目標値に追従していることが分かった. これらにより, 開発した着地軌道修正制御と姿勢補償制御の有効性を確認した.

また, ⑥, ⑦は路面に凹凸があるためか不安定であり, ⑦は転倒することもあった.

転倒時と歩行時の姿勢角を比較するに, WABIAN-2R の場合は姿勢角が $\pm 6[\text{deg}]$ 前後で転倒することが確認された.

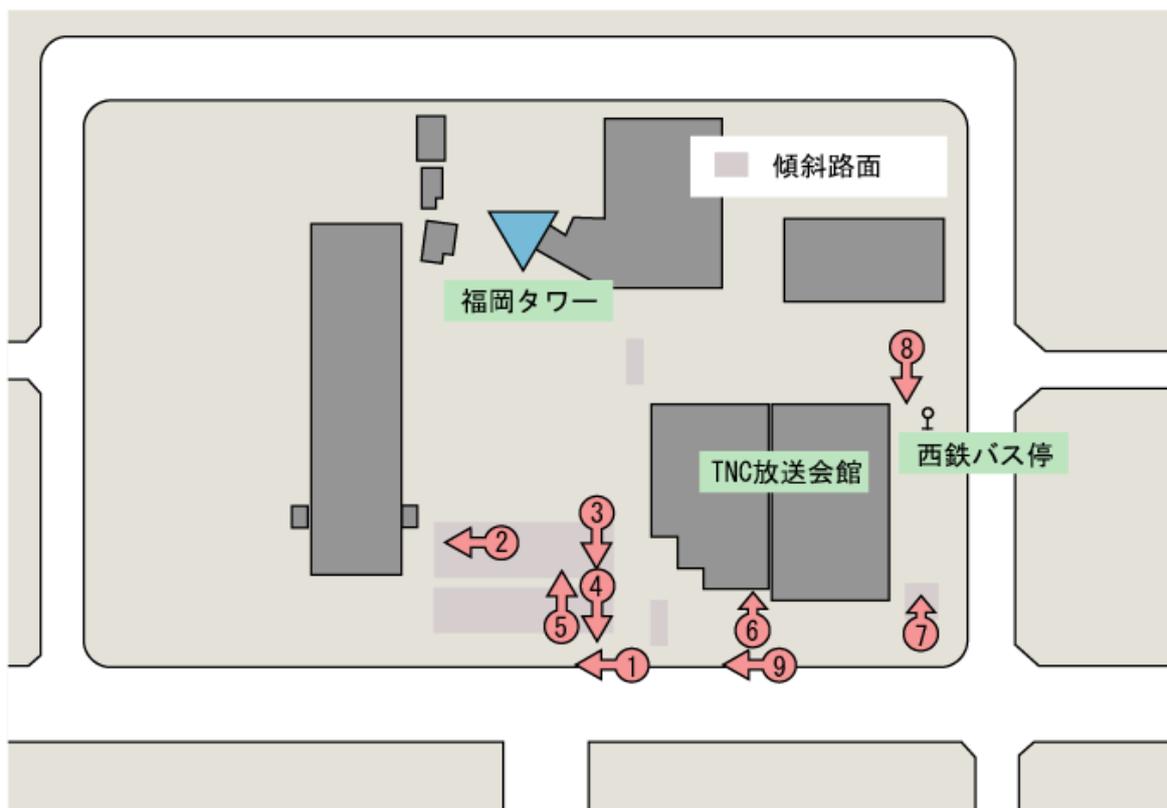


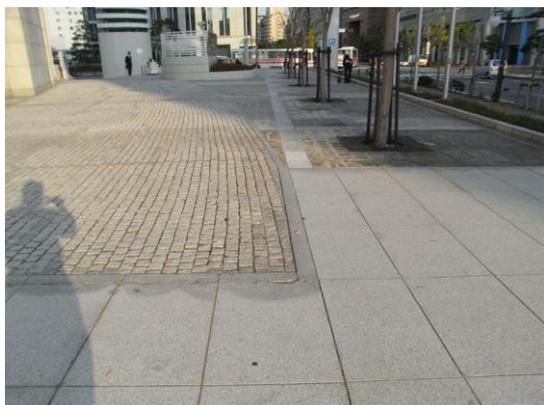
Figure 4.8(a) Outline of experiment area.



① Uneven and roll ground



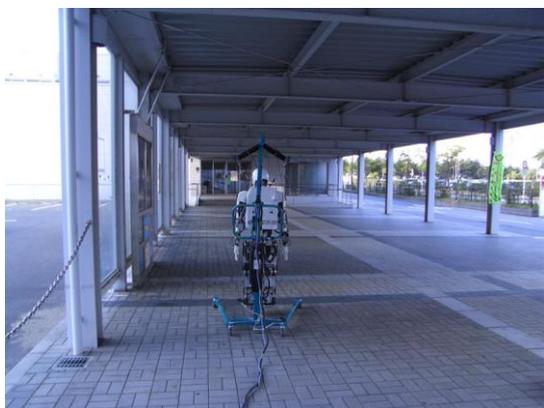
②~⑤ Slope ground 3~5[deg]



⑥ Uneven ground



⑦ Uneven and slope ground 2~5[deg]



⑧ Flat ground



⑨ Flat ground

Figure 4.8(b) Outline of experiment area.

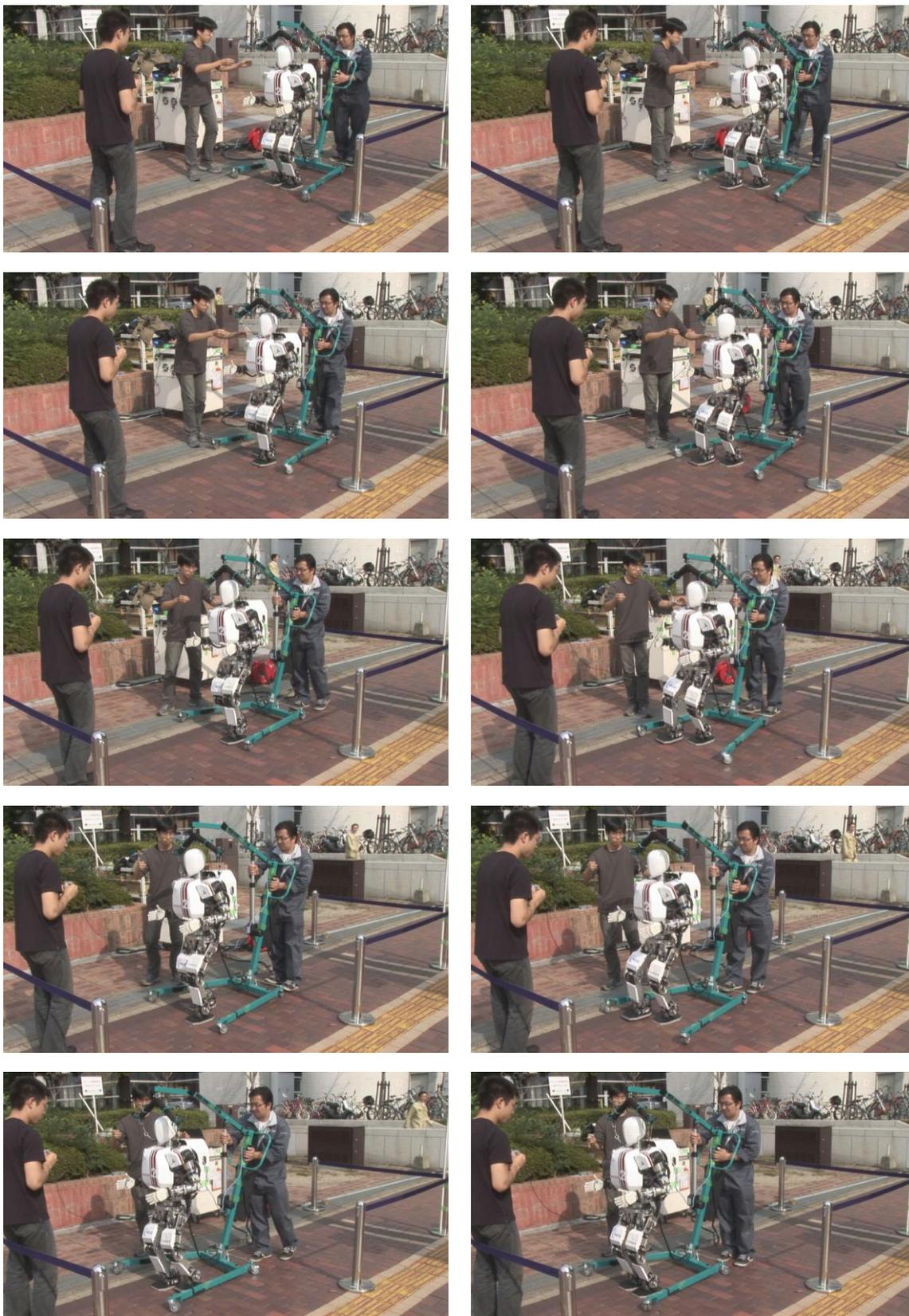
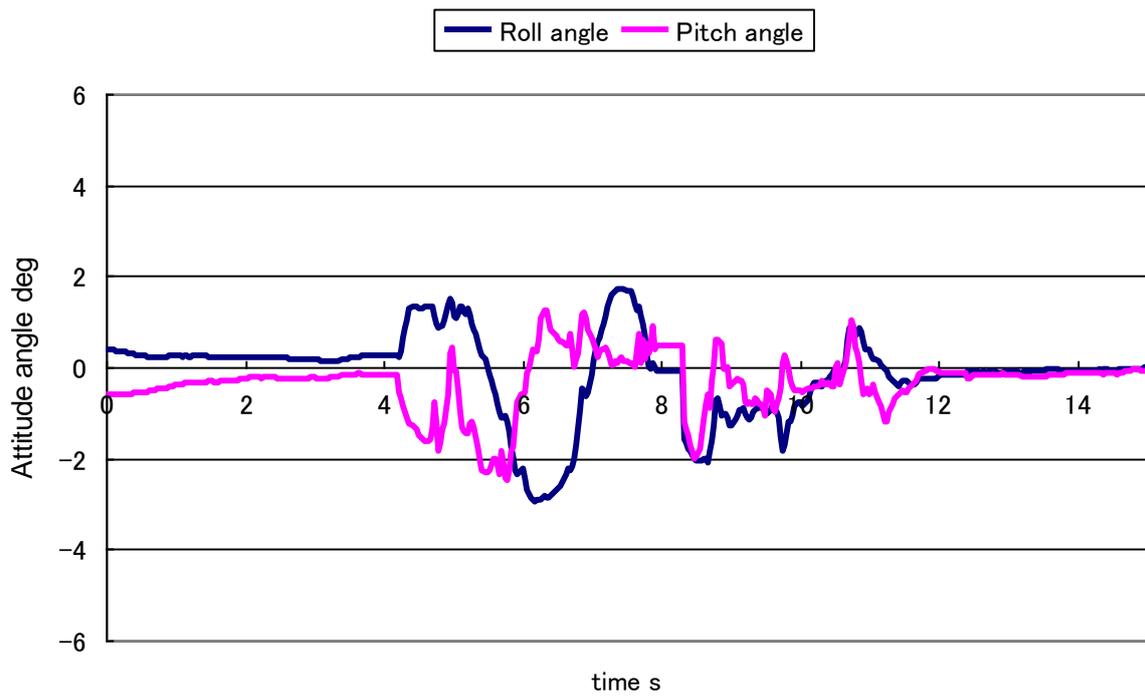
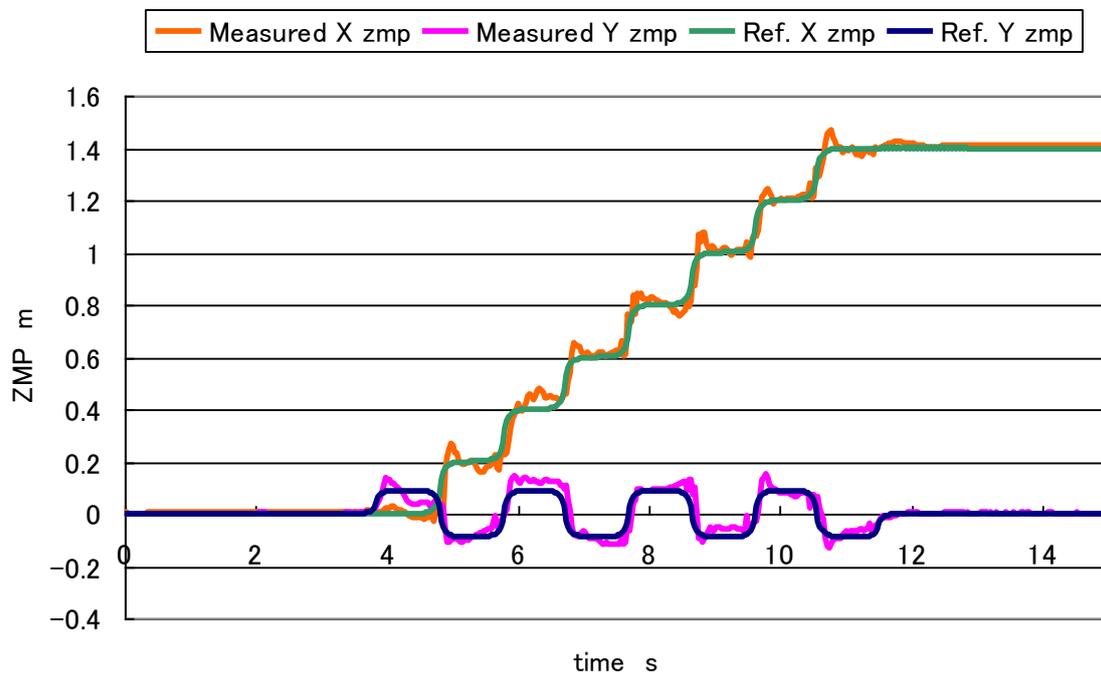


Figure 4.9 ①Walking experiment on slope of 2[deg] and uneven ground.



(a) Attitude angle

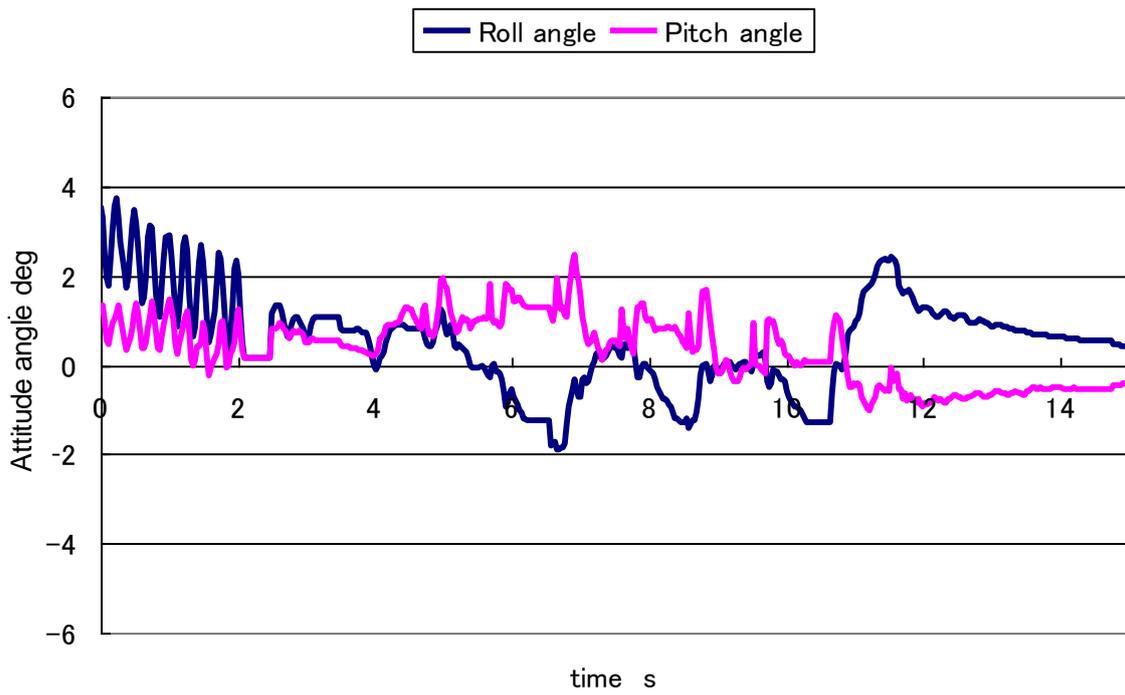


(b) ZMP trajectories

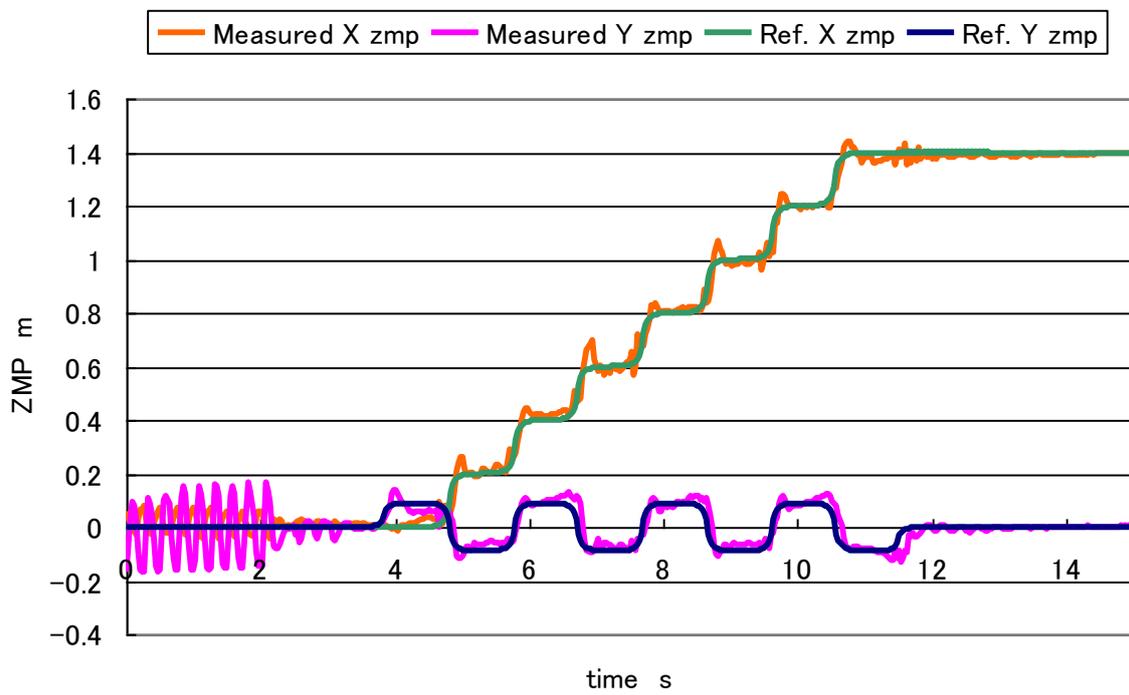
Figure 4.10 Experimental result in walking on slope of 2[deg] and uneven ground.



Figure 4.11 ②Walking experiment on slope of 3[deg].



(a) Attitude angle

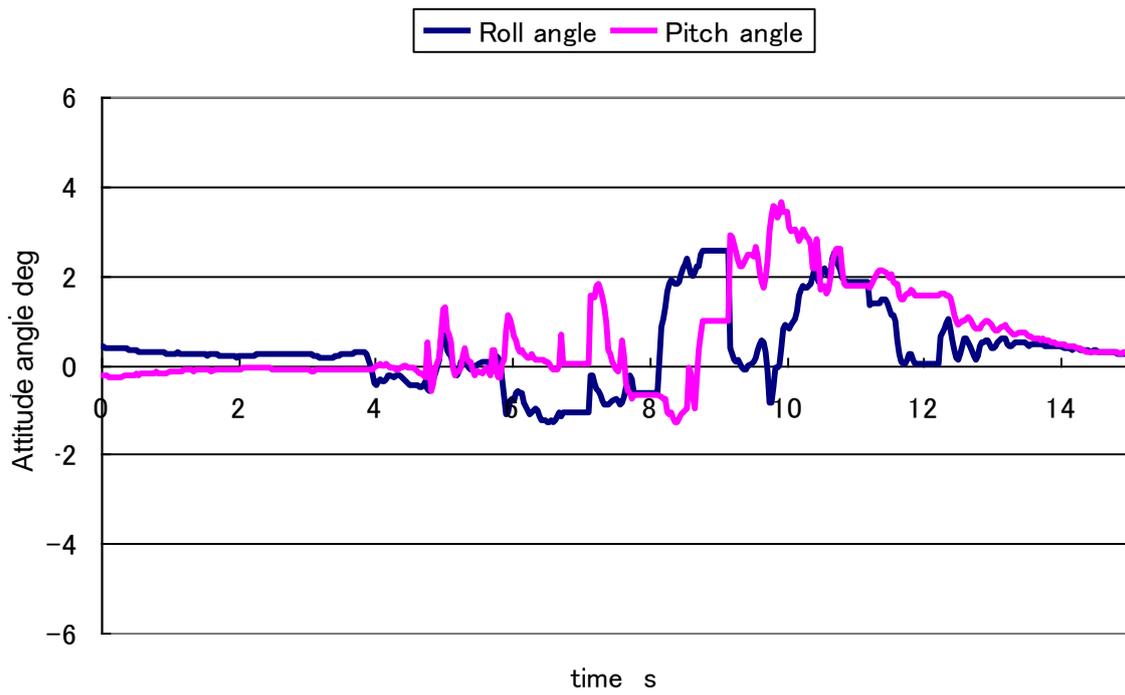


(b) ZMP trajectories

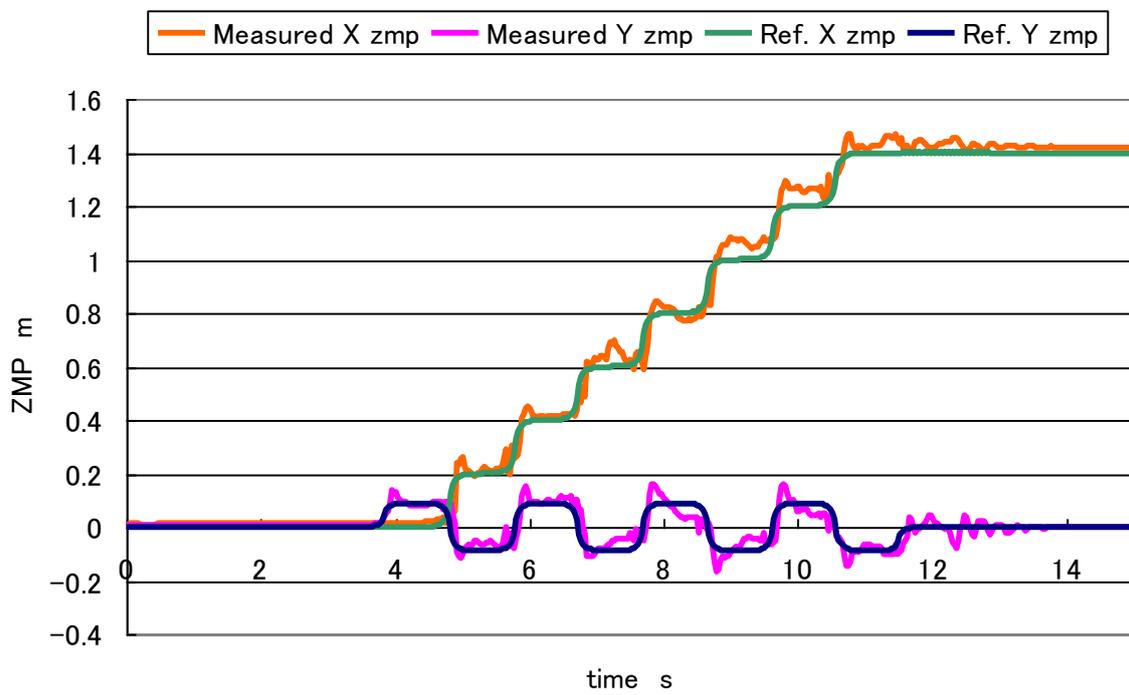
Figure 4.12 Experimental result in walking on slope of 3[deg].



Figure 4.13 ③Walking experiment on flat →slope of 3[deg].



(a) Attitude angle

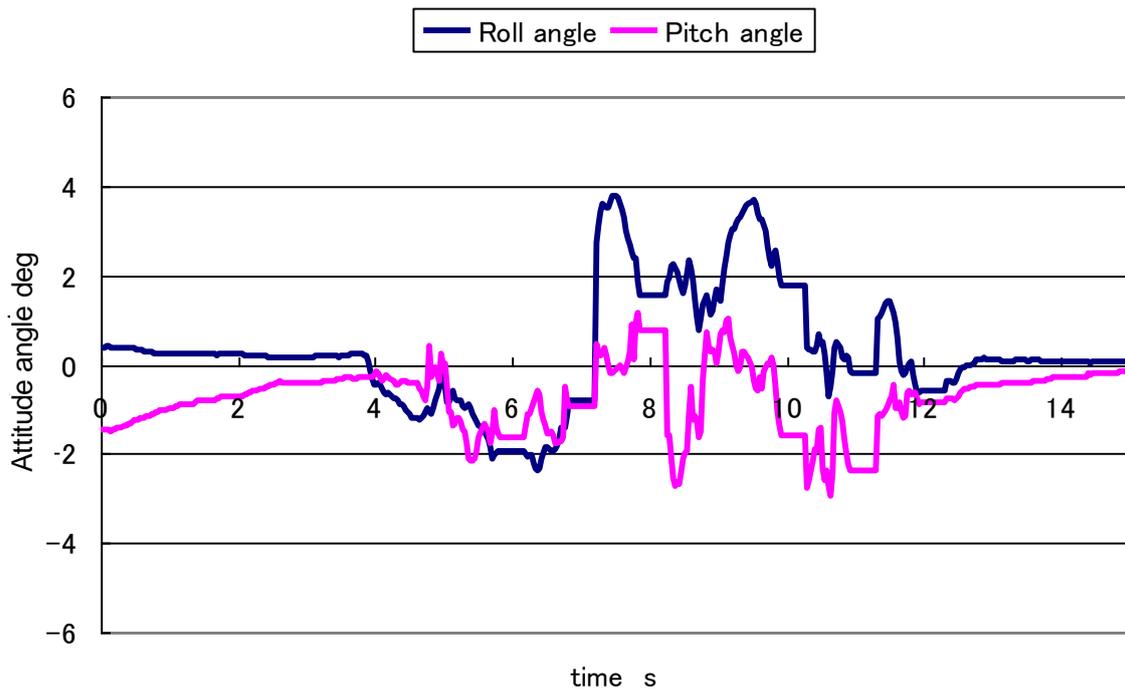


(b) ZMP trajectories

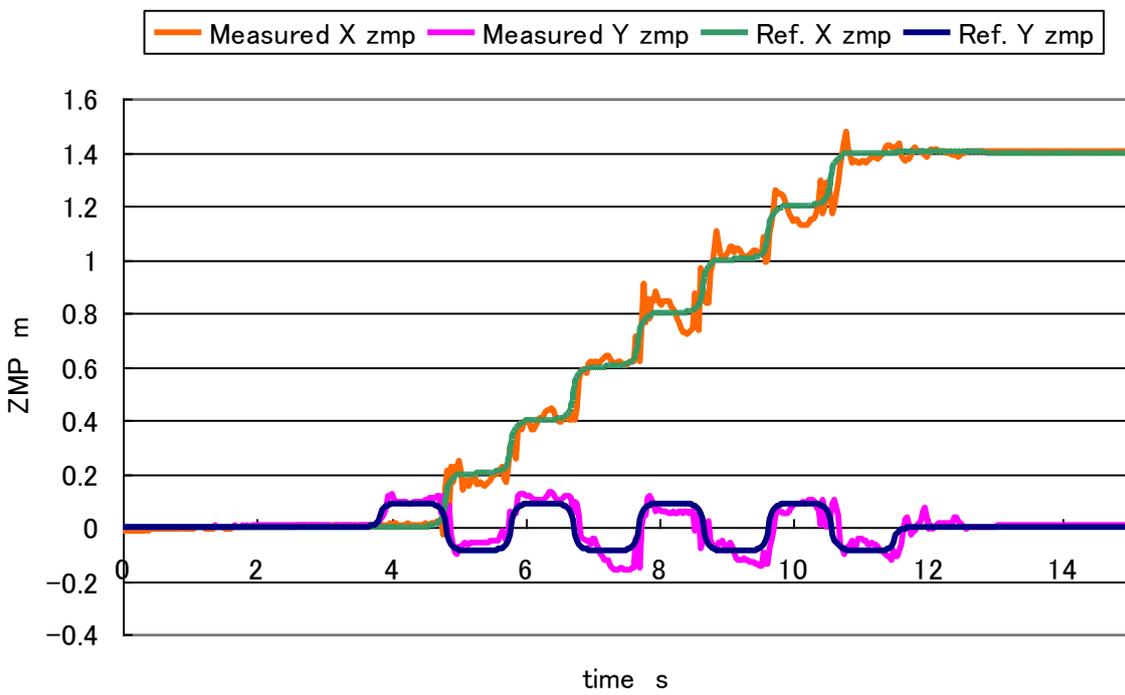
Figure 4.14 Experimental result on flat →slope of 3[deg].



Figure 4.15 ④ Walking experiment on slope of 5[deg] →flat.



(a) Attitude angle



(b) ZMP trajectories

Figure 4.16 Experimental result on slope of 5[deg] → flat.

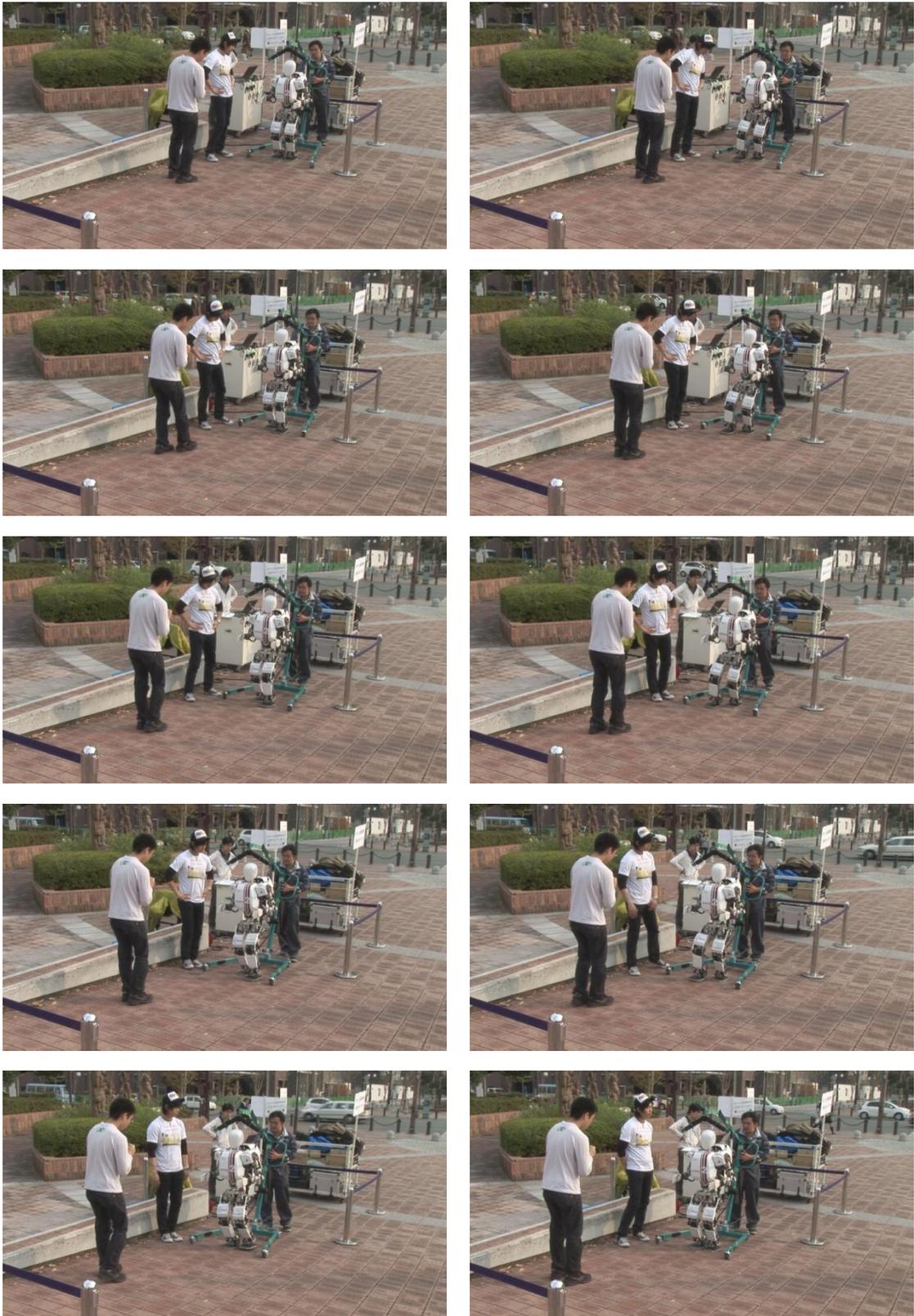
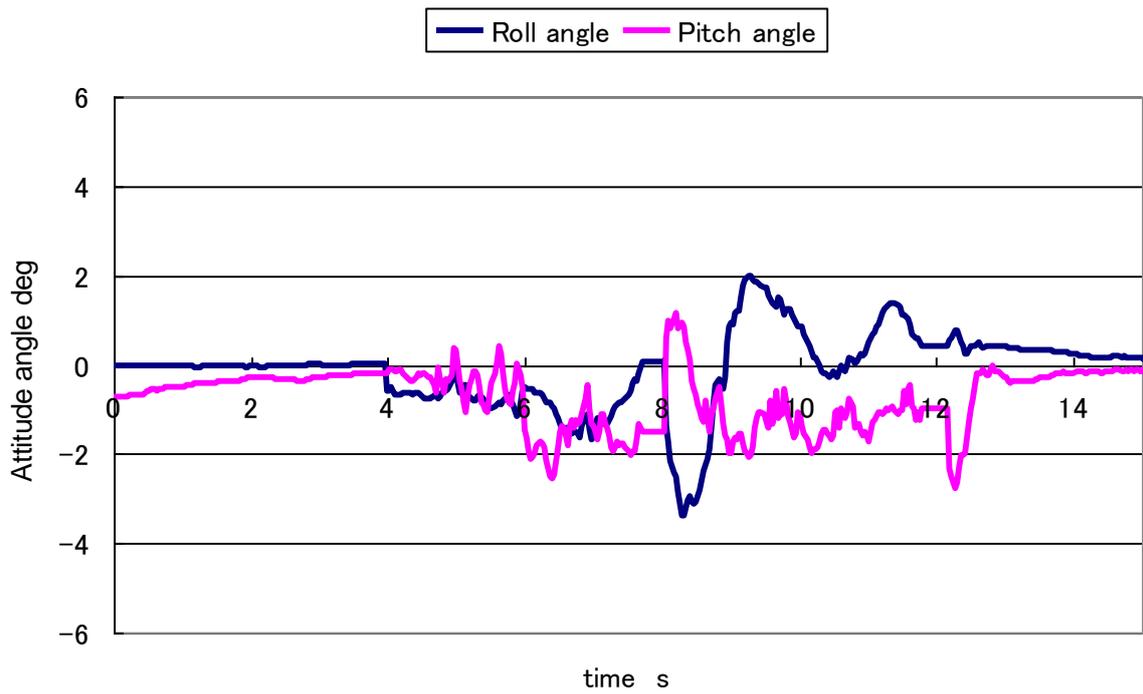
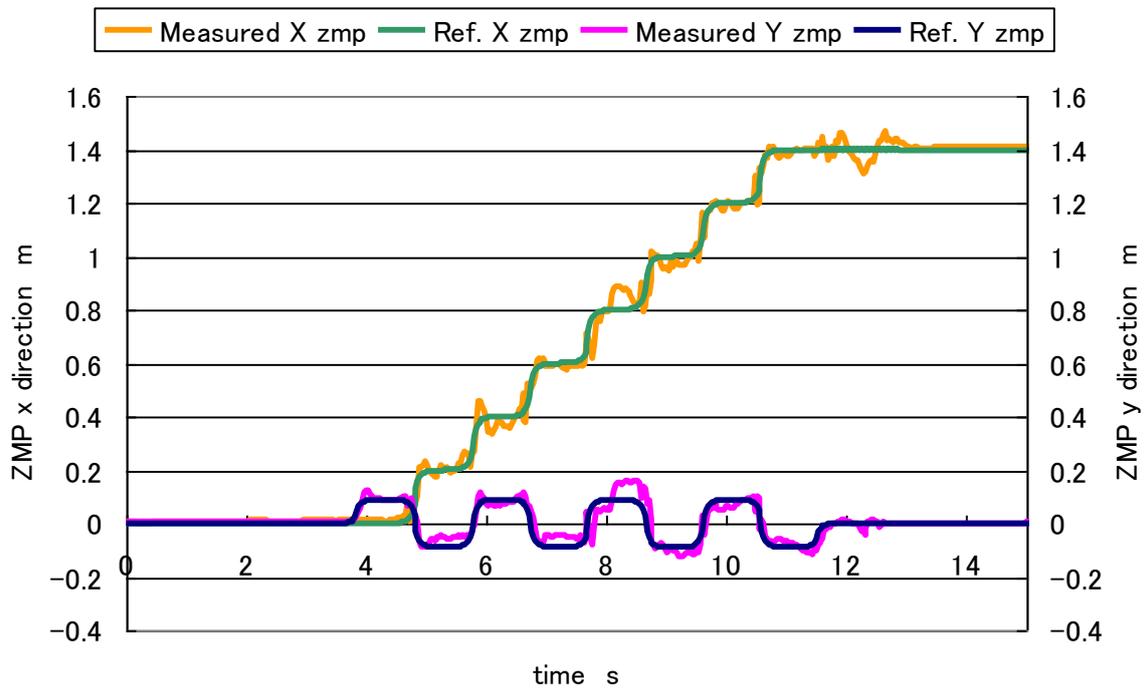


Figure 4.17 ⑤ Walking experiment on flat → slope of 5[deg].



(a) Attitude angle



(b) ZMP trajectories

Figure 4.18 Experimental result on flat \rightarrow slope of 5[deg].

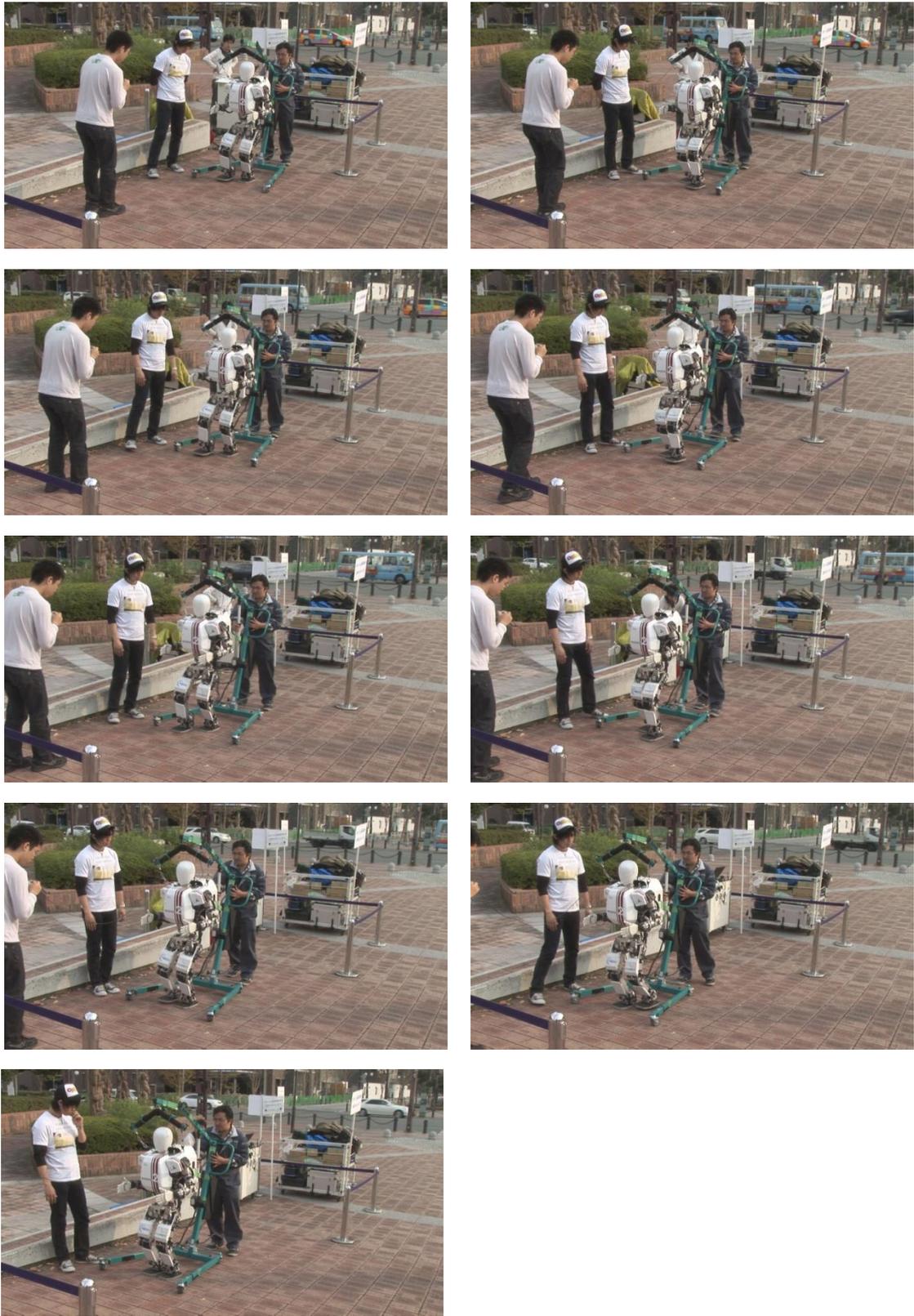
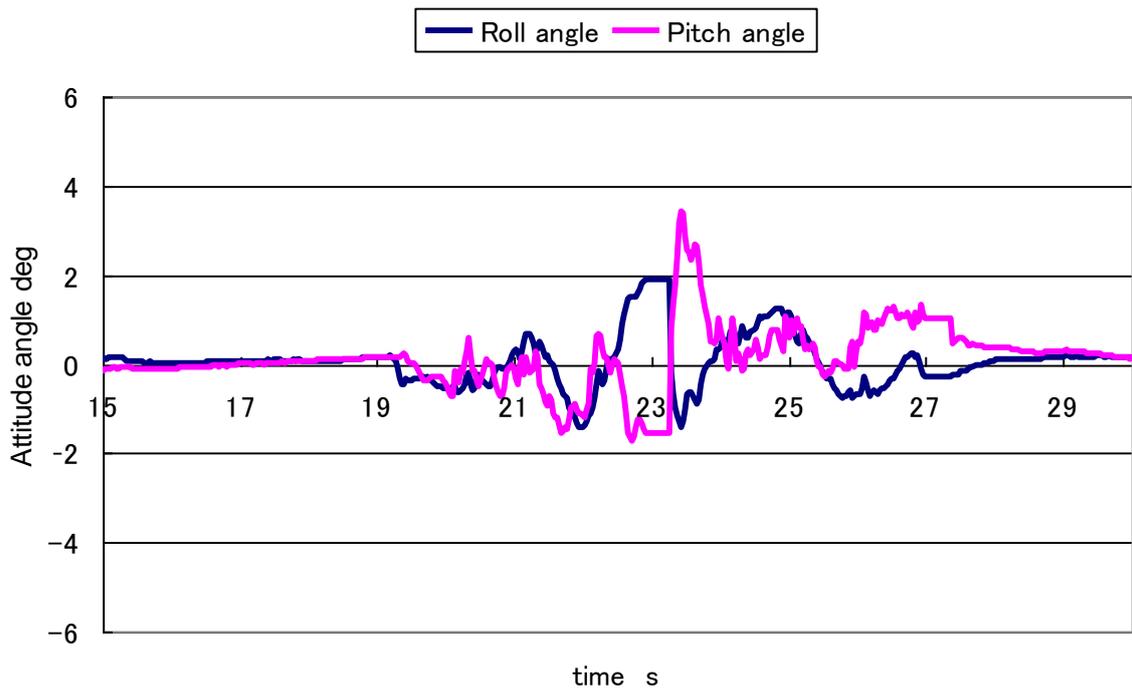
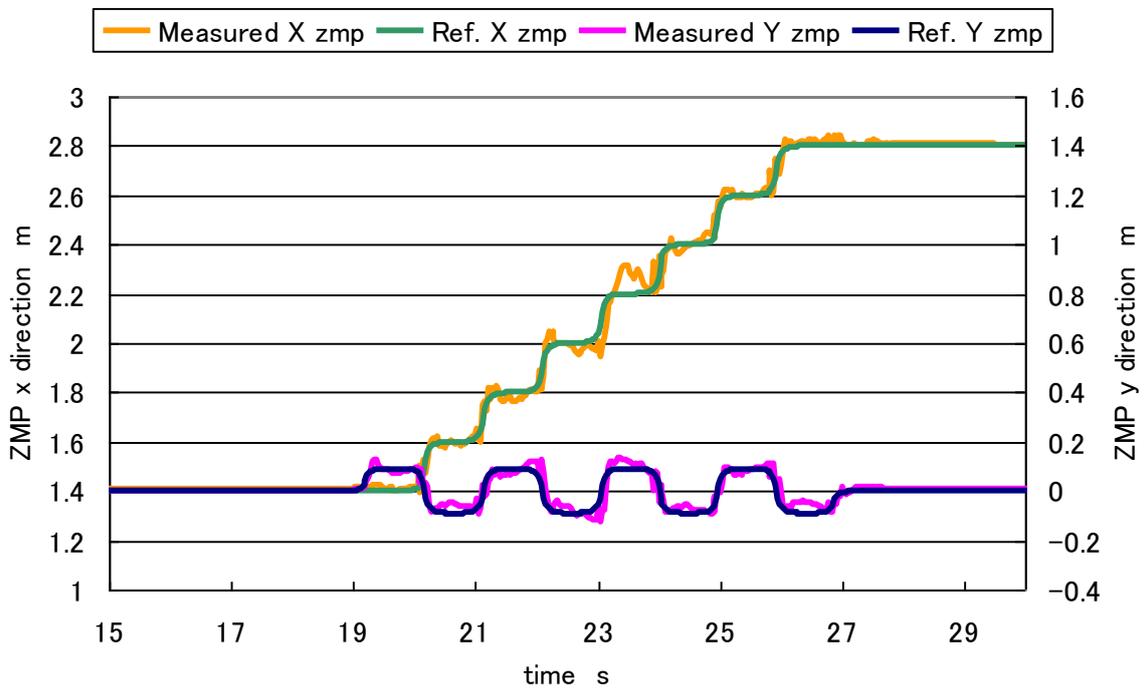


Figure 4.19 ⑤Walking experiment on flat → slope of 5[deg].



(a) Attitude angle

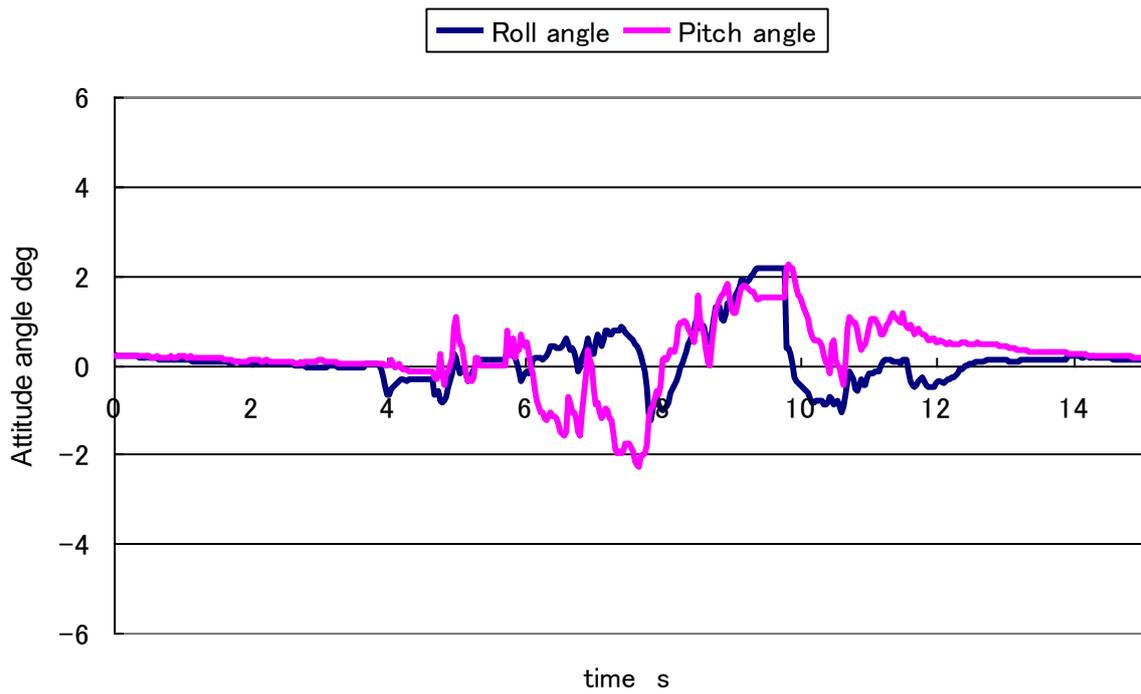


(b) ZMP trajectories

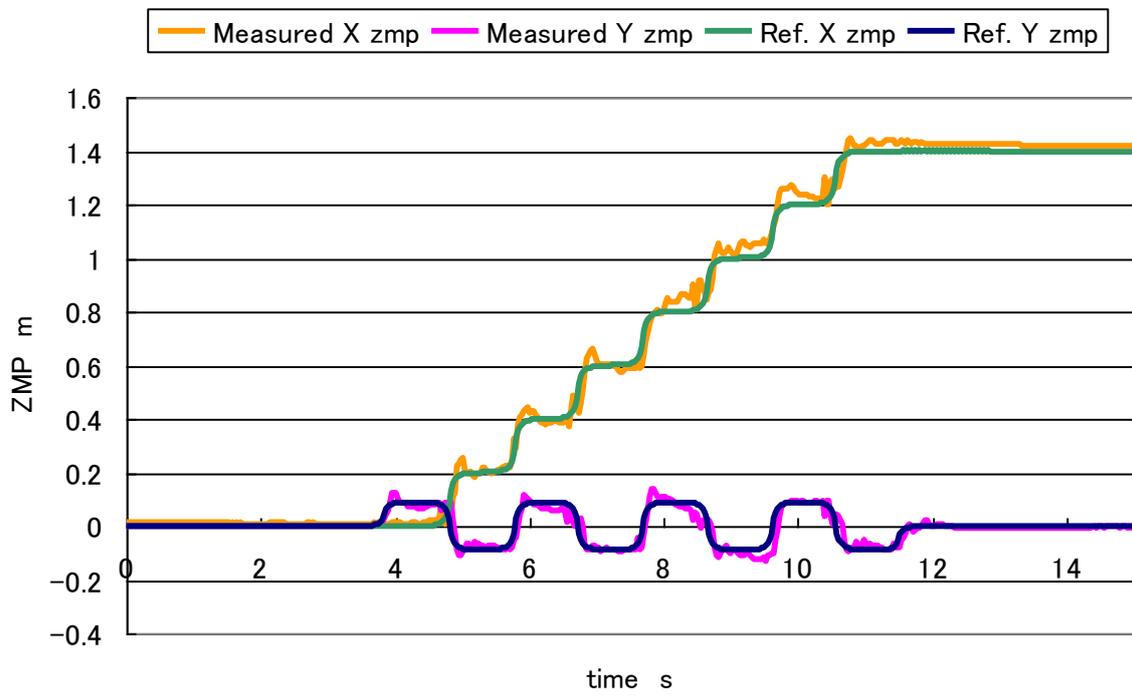
Figure 4.20 Experimental result on flat → slope of 5[deg].



Figure 4.21 ⑥Walking experiment on uneven ground.



(a) Attitude angle

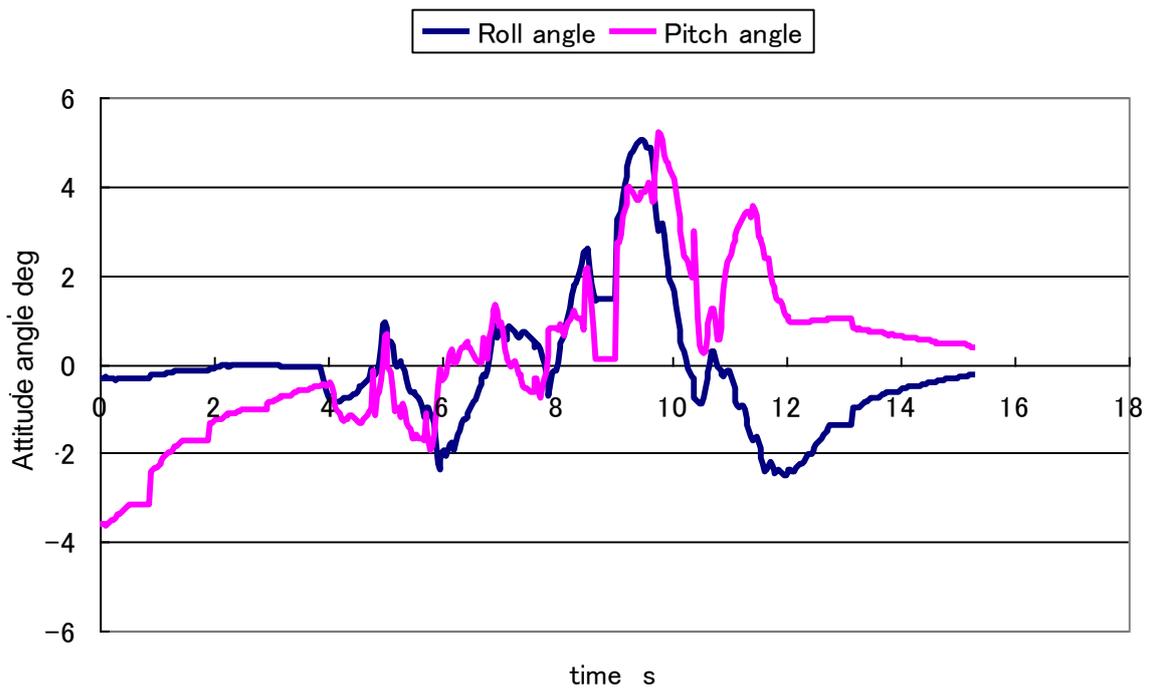


(b) ZMP trajectories

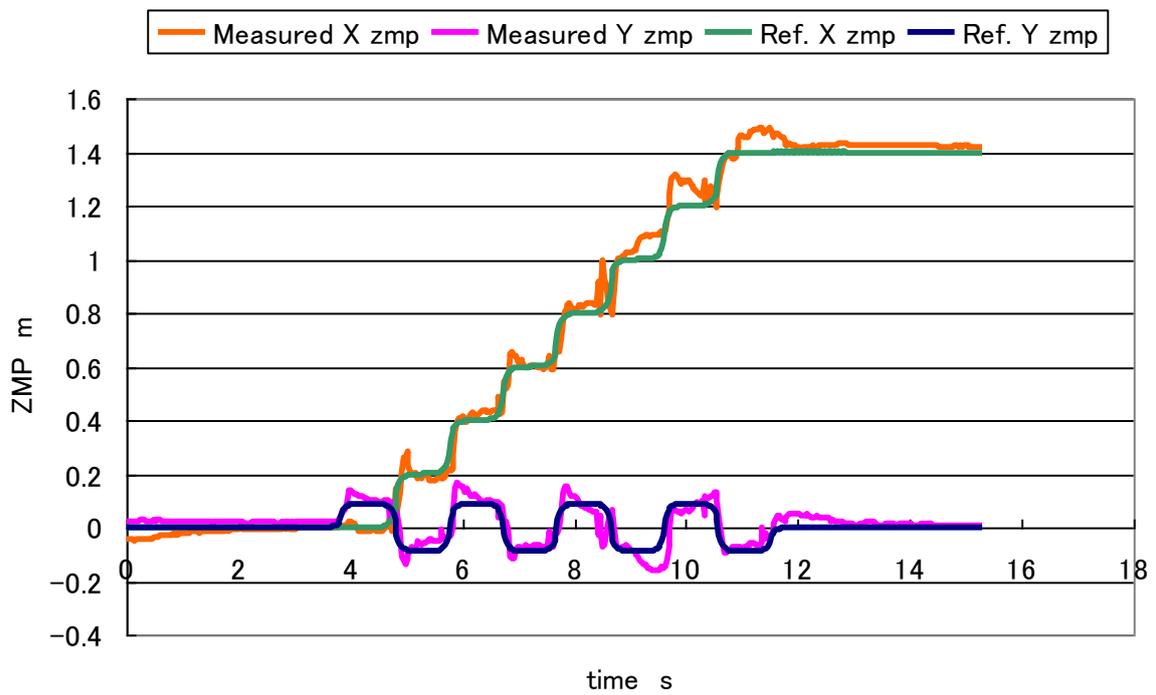
Figure 4.22 Experimental result on uneven ground.



Figure 4.23 ⑦ Walking experiment on uneven and slope 5[deg] ground.



(a) Attitude angle

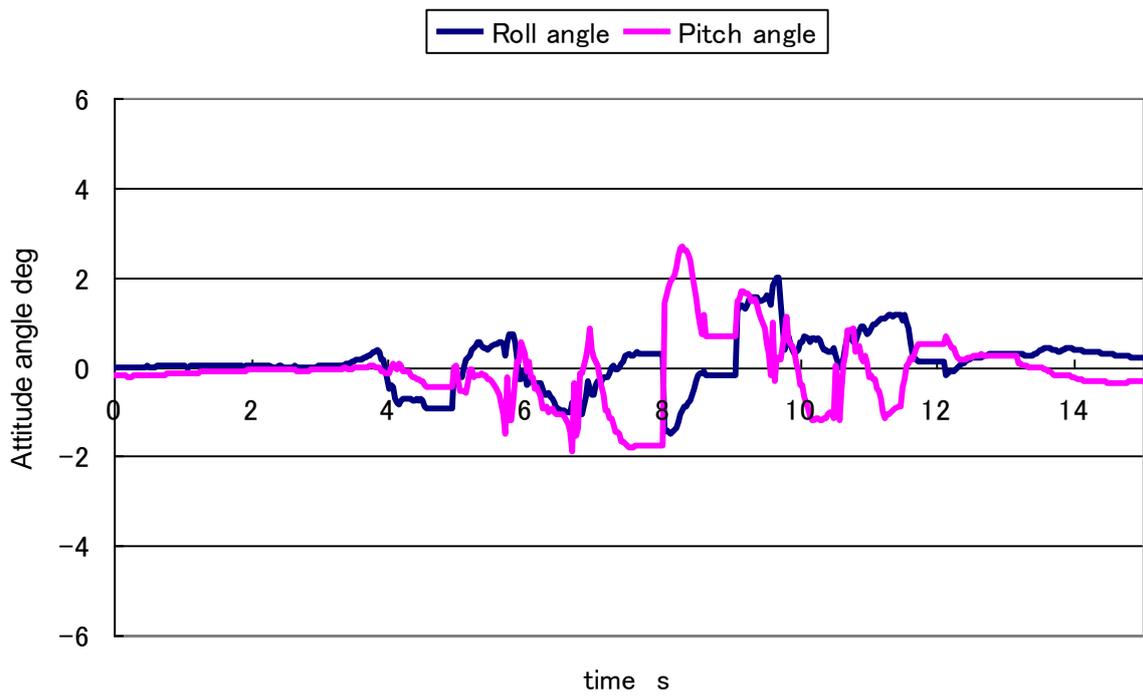


(b) ZMP trajectories

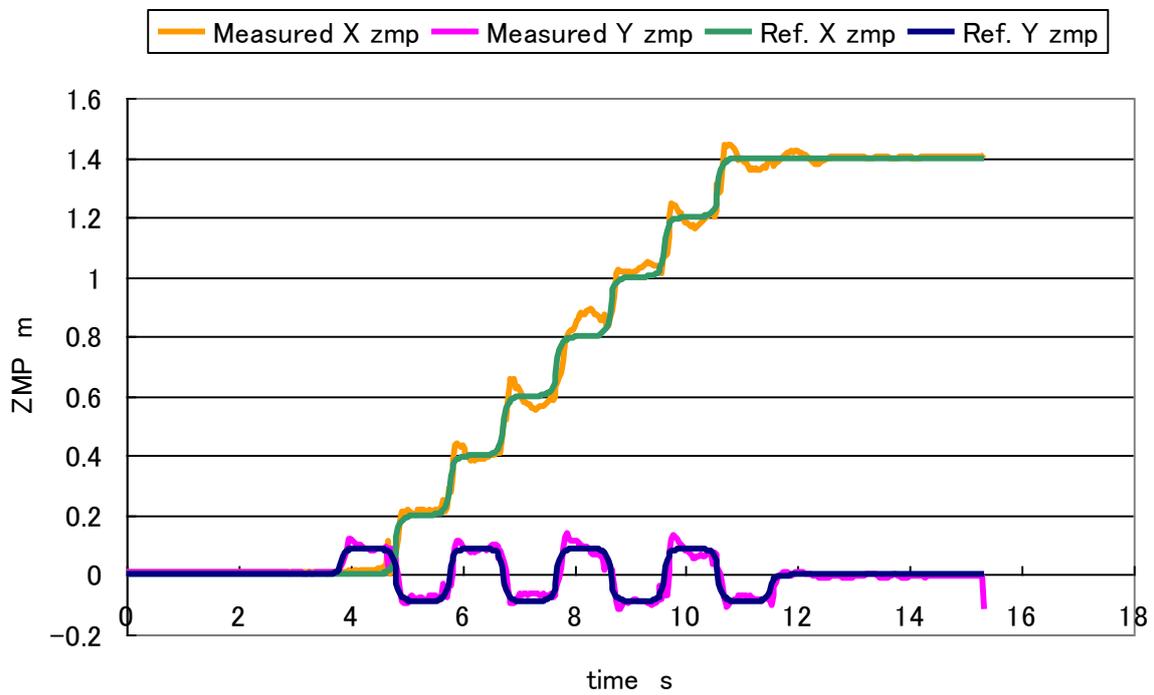
Figure 4.24 Experimental result on uneven and slope 5[deg] ground.



Figure 4.25 ⑧Walking experiment on flat ground.



(a) Attitude angle

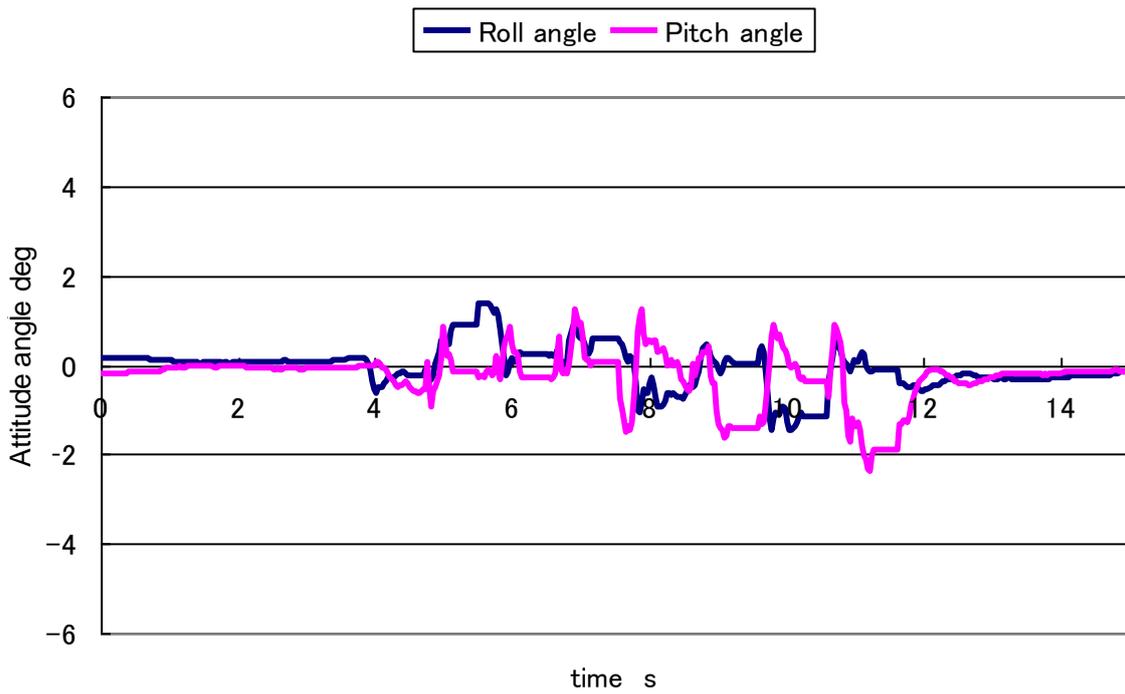


(b) ZMP trajectories

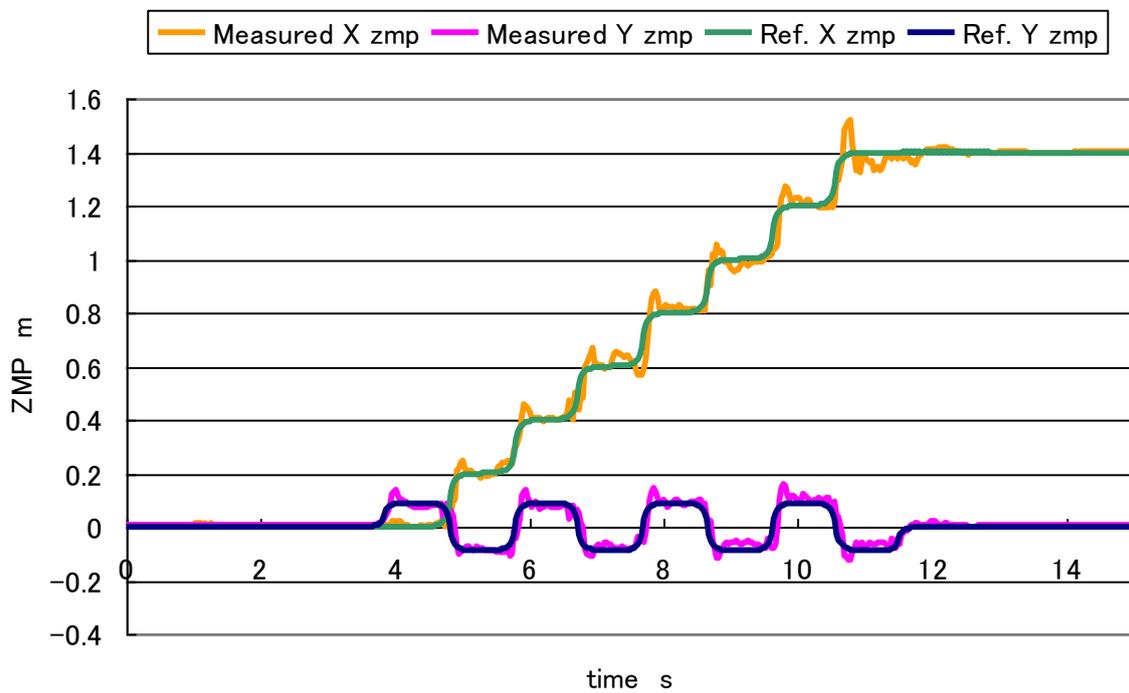
Figure 4.26 Experimental result on flat ground.



Figure 4.27 ⑨Walking experiment on flat ground.



(a) Attitude angle



(b) ZMP trajectories

Figure 4.28 Experimental result on flat ground.

4.4.2 考察

以上の実験結果より，開発した着地軌道修正制御と姿勢補償制御の統合により，Z軸方向，Pitch軸周り，Roll軸周りに足部軌道の修正が必要な未知の不整路面での歩行に成功した．特に，新たにジャイロセンサを搭載し，姿勢補償制御を行った．制御方法としてはPID制御を用いた制御を開発し，福岡市のロボット特区内の実環境路面において従来の剛体平板足部を用いて傾斜5[deg]の傾斜路面およびうねりと凹凸を含んだ傾斜2[deg]の路面に対して制御のみで歩行を実現した．また，実験室内において最大20[mm]の段差を乗り越えられることを確認した．これらにより，開発した姿勢補償制御の有効性を確認した．また，光センサが付着され，路面の情報が計測可能な足部を用いてRoll軸周りに15[mm]，Pitch軸周りに20[mm]を踏んでの歩行も実現し，路面適応性能の向上を確認した．

4.5 まとめ

新たにジャイロセンサを搭載し，PID制御を用いた姿勢補償制御を行った．福岡県のロボット特区の様々な不整路面において傾斜5[deg]の路面上と，実験室内で段差20[mm]を踏んでの，安定した腰高さ一定型歩行(0.20[m/step], 0.96[s/step])を実現した．また，路面情報を検出することが可能な足部機構を搭載することで，姿勢制御を使用した状態で，15[mm]の段差をRollに(約6.2[deg])，20[mm]の段差をPitchに(約5.7[deg])踏む歩行動作も実現し，歩行能力の向上を確認した．

しかし，膝伸展状態での実環境路面での歩行を実現できなかった．その理由としては，膝コンプライアンス制御の導入が失敗に終わったためである．失敗の原因としては重心の急速な移動に伴う立脚側の衝撃があげられる．運動学的には膝関節の追従不足を補うために腰を動かすことで解消しているが，腰関節を急速に動かすことは立脚側へ慣性力が反力として伝わり，立脚側にかかる力が1700[N]を超えることがあり，やむなく中止した．制御を変更するという以外の解決方法としては

A. 膝の最高速度を上げる

B. 腰を動かしても重心位置が変わらないように補償する

のどちらかである必要があるが，人体運動シミュレータとしてはA.が適切であるように思われる．現在のWABIAN-2Rは減速比の高い駆動機構を採用しているため高速な運動が出来ない．一方で人間は力を入れていない場合はフリー状態，力を入れた場合ロック状態となり，トルクを発生させることが出来る．この機構は今回開発した足部機構にも応用が出来ると考え，各ジョイントに搭載することでより人体運動シミュレ

一タとしての応用が可能になると考えられる。

また、WABIAN-2R は足部を用いた制御導入の場合、姿勢制御のみで歩行することができなかった。着地軌道修正制御導入時も姿勢角誤差がたまっていくことが確認されている。今後足部の改良を行いより路面適応能力を高めていく場合、姿勢崩れがより顕著になることが予想される。この崩れはロボットのモデル誤差が足がきれいに路面に倣うことによって姿勢角誤差としてあらわれていると考える。従って今後より路面適応性の高い足部を作成した場合、同時により性能のいい姿勢制御も不可欠になると考えられる。

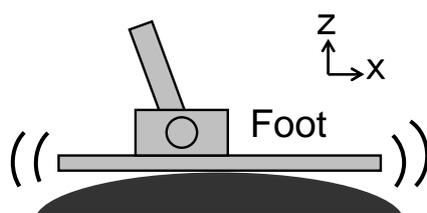
第5章 4点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御の開発

- 5.1 はじめに
- 5.2 基本設計
- 5.3 4点型路面検知足部機構の開発
- 5.4 4点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御
- 5.5 評価実験と考察
- 5.6 まとめ

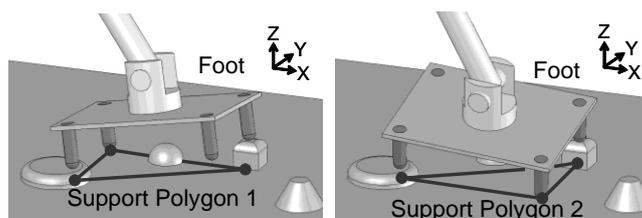
5.1 はじめに

第4章では制御のみの不整路面における2足ロボットの歩行能力向上に焦点を当ててきた。開発した着地軌道修正制御[139-141]と姿勢補償制御[152,153]の統合し、2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装することで、不整路面への適応性は向上したが、目標路面である20[mm]の段差に対してRoll軸周りに倣えなかった。さらに、剛体平板であったため、うねり路面では、安定した支持多角形を保つことが出来ないという問題があった。未知の不整地環境を移動する際には、レーザレンジファインダやCCDカメラなどの外界センサで障害物や路面形状を検出する方法が主に使用される[149,150]。しかし、計測精度は測定距離の1%程度であり、センサの取り付け位置から路面までの距離を考えると、外界センサを搭載した2足ロボットにおいても20[mm]程度の未知の凹凸に適応できる能力が必要であると考えられる。そこで本研究の目標路面を20[mm]の段差とし、剛体平板の足底では大きな支持多角形の確保が困難なうねり路面も対象とする。

ここで第5章では、ロボットが着地時に安定した支持多角形を確保できない状況に陥る可能性がある剛体路面全般をうねり路面として扱う。したがって、図5.1(a)のような連続した勾配のある一般的な路面のうねりだけでなく、図5.1(b)のように路面に勾配がなくても着地する領域内に凹凸が連続することによって支持多角形が定まらない可能性のある路面に関してもうねり路面として定義する。また、未知の環境における2足歩行ロボットの安定歩行の研究に関しては、シミュレーションによる報告や、実機を用いて室内で擬似的な実環境路面を歩行させる報告があるが、実際に実機を



(a) Surface shape with continuous gradient



(b) Surface condition where foot cannot settle support polygon

Figure 5.1 Definition of undulation

用いて屋外の不整路面を歩行させたという報告は多くない．そこで，本システムの有効性を確認する方法として，実際に屋外の不整路面を2足歩行ロボットに歩行させることとした．

これまでに，ロック機構を備え受動的に可動する支持点を足底4隅に配置した足部機構 **WS-5** を開発し，室内において高さ 20[mm]までの凹凸路面での歩行に成功している．しかし，ハードウェア単体で凹凸路面に倣うため，足部の重量が 3.0[kg]と重いという問題点があった．また，ソフトウェアのみで路面適応を行う着地軌道修正制御も開発しているが，大きな支持多角形の確保が困難なうねり路面には適応できないという問題点があった．

そこで，ハードウェアとソフトウェアの両側面から取り組むことでこれらの短所の克服を目指した．このアプローチを取ったものとして山口らの **WAF-3**[151]があるが，これは足底4隅の接地点すべてで接地することを前提としており，うねり路面への適応が難しい．本研究のポイントは，平地では4点接地を行い，不整路面では4点の支持点から3点を選択し，安定した支持多角形を確保する点にある．

本システムはハードウェアとソフトウェアを統合することで不整路面に適応するが，具体的には，2足歩行ロボットに搭載する路面検知が可能な足部機構と，足部機構から得られる路面の情報を元に着地動作を修正する制御系から成る．足部機構の役割は，着地を行う前に路面を検知し，路面の凹凸やうねりを足底の形状で回避するこ

とである。一方、制御系の役割は、足底の形状だけでは回避しきれない凹凸に対して倣い動作を行い、かつロボットが立脚中に不安定にならないような着地を実現することである。本システムの有効性を2足ヒューマノイドロボット WABIAN-2R を用いた歩行実験により確認したので、第5章では4点型路面検知足部機構およびそれを用いた不整路面適応制御、評価実験と考察について述べる。

5.2 基本設計

5.2.1 目標段差高さ

第1章で述べたように実環境には多様な路面が存在している。その中で、盛んに行っている変形しない剛体の不整路面を対象にした。また、前述の通りにレーザレンジファインダや CCD カメラなどの外界センサで障害物や路面形状を検出する際に、発生する1%程度誤差の計測精度に対応可能な20[mm]とした。センサの取り付け位置から路面までの距離を考えると、外界センサを搭載した2足ロボットにおいても20[mm]程度の未知の凹凸に適応できる能力が必要であると考え。そこで本研究の目標路面を20[mm]の段差とし、剛体平板の足底では大きな支持多角形の確保が困難なうねり路面も対象とする。

5.2.2 仕様

足部機構の仕様としては、前節で述べた路面を歩行可能であることとする。以下に要求仕様を列挙する。

- (a) ±20[mm]までの段差に倣えること。
- (b) 路面のうねりに対しても安定した支持多角形を確保できること。
- (c) 軽量であること。

5.3 4点型路面検知足部機構の開発

5.3.1 足部機構の検討

足部機構を検討するにあたり、先行研究に関して述べる。2005年度に開発された WS-5 は4隅に直動する爪を搭載し、くさびの原理を応用した摩擦によるロック機構によりハードウェア単体で凹凸に倣うことが可能である(図5.2)。

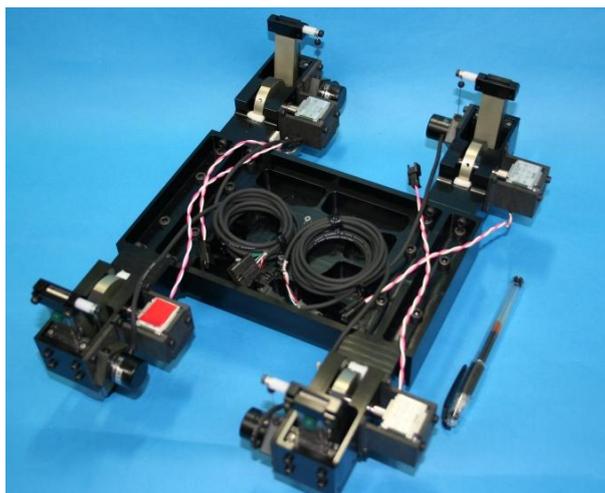


Figure 5.2 Photograph of WS-5[7]

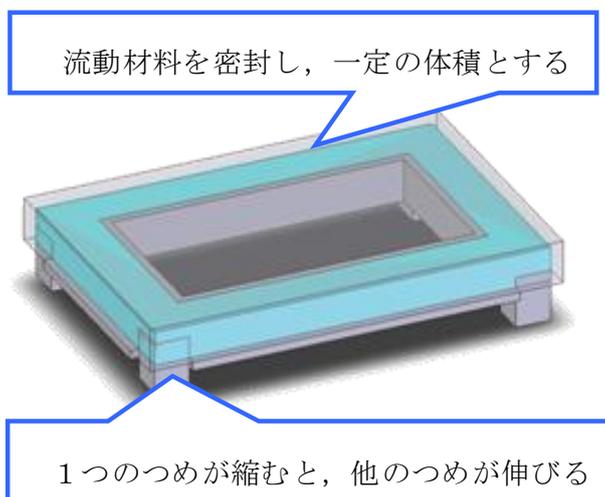


Figure 5.3 Foot mechanism with liquidity sealing material (流動材料密封足部機構)

WS-5 は $\pm 25[\text{mm}]$ までの凹凸に倣うことが可能であるが、総重量が約 $2.9[\text{kg}]$ と足部としては非常に重たいという欠点がある。

そのため、図 5.3 に示すように軽量かつドウェアのみで凹凸に倣える足部機構を検討した。

この足部機構は一定の体積になるように流動素材を密封し、1 つのつめが縮むと他のつめが伸び、路面の形状に4点で倣うことができる。この機構のメリットとしては、うねりを気にせず4点で接地することができるため、安定領域が広く、重量増加の要因となるロック機構を必要としない点がある。しかし、この機構の肝である流動材料は選定が難しく、流動材料であるため着地の際の安定感に不安があった。剛性の高い

BB 弾のようなものなどを流動材料として検討したが、材料次第では重くなる可能もあったため、廃案となった。

次に、着地軌道修正制御を用いることが前提になるが、図 5.4 のような固定つめと受動回転軸を持った足部機構を検討した。この機構のメリットは機構が簡単であり、うねり路面に対しても安定した支持多角形を確保できる上に、先ほどの足部機構と同様にロック機構を必要としないため、軽量に製作できることが望めた。しかしながら、この足部機構は4点で接地はするものの、受動回転軸のつめがあるため4点のつめの範囲内に ZMP が存在していても、ZMP の場所によっては軸を中心に回転してしまう可能性がある。軸を中心に回転しない ZMP の領域、すなわち安定領域は実際には四角形の半分の三角形に限定される。このため、実質3点接地と同等であり、4点接地を活かせないことから、この足部機構も廃案となった。

以上のように軽量化を計り、ロック機構を必要としない機構を考えてきたが、ハードウェアが主体となって凹凸に倣うにはやはりロック機構が必要であると考えた。ただし、ロック機構を搭載すればその分だけ重くなるため、WS-5 のように複数ロック機構を備えるのではなく、ロックする箇所を1つに限定できないかと考えた。そこで、図 5.4 に示す機構にロック機構を搭載することを検討した。この機構は、受動的に動く箇所が受動回転軸だけであるためロック機構は1つだけ搭載すればよく、元の機構が簡単で軽量であることから、総重量を重くすることなく製作できることが期待できた。

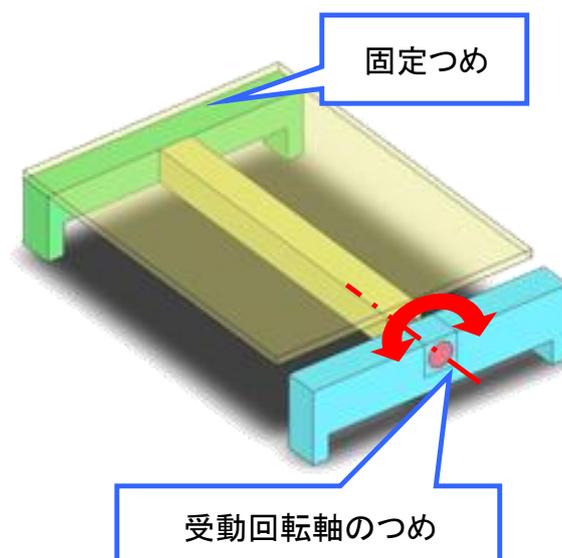


Figure 5.4 Foot mechanism with passive 1-DOF

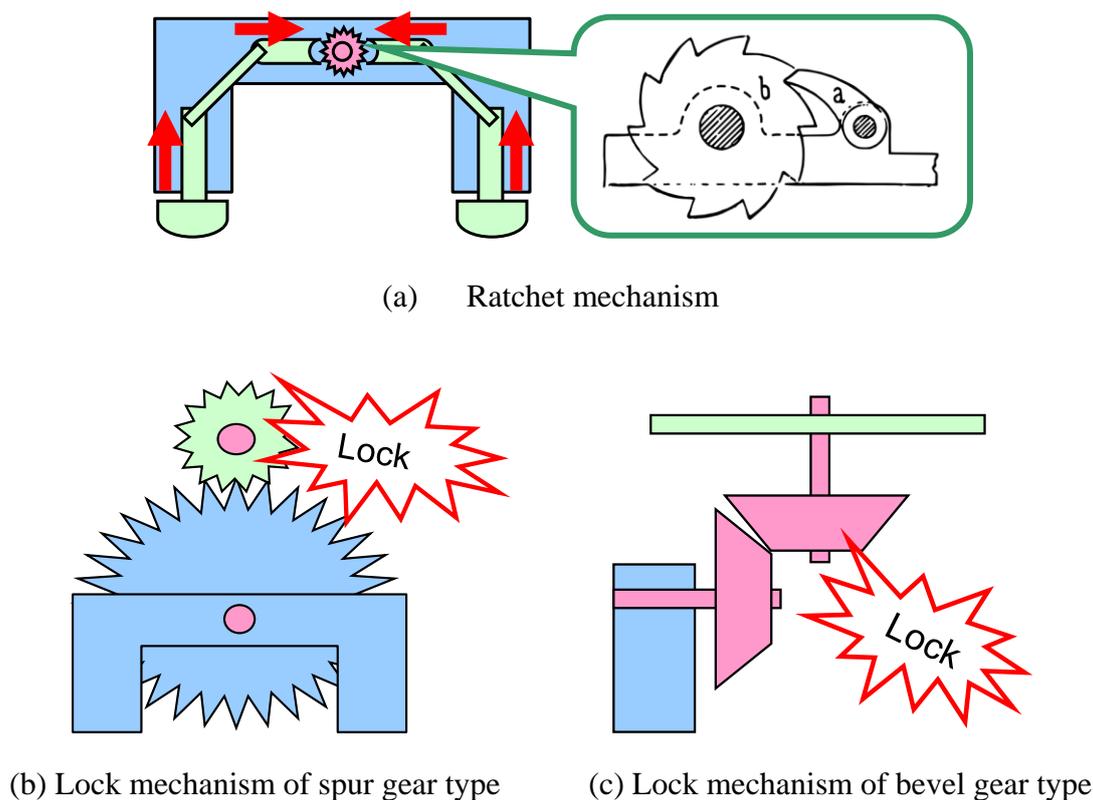


Figure 5.5 Lock mechanism

ここで、受動回転軸をロックする機構を図 5.5 に示す。

(a)の機構は地面に接地するとリンク機構により、つめが軸の歯車に引っかかり、左右それぞれがラチェットとして機能してロックする、軸上には歯の方向が左右それぞれに対応するよう軸方向にずれて2つの歯車が搭載されている。

(b)と(c)は接地時に軸とつめに搭載された歯車のかみ合いでロックする機構である。

(a)~(c)の機構はいずれも歯車を用いるため、歯のピッチによってロックする角度が決まってしまうリニアにロックすることが出来ない。また、搭載されるロック機構は1つだけではあるものの重量が相当に重くなることが予想されたため、ロック機構の搭載を諦めることにした。

以上の検討から、軽量な足部でかつハードウェア主体で凹凸路面に倣うのは難しいと判断した。そのため、ハードウェアとソフトウェアを協調させることで凹凸路面に倣うことを検討した。ここで、その先行研究として、2007年度に開発した足部機構(図 5.6)に着目した。

2007年度に開発したセンサ式足部機構と着地軌道修正制御を WABIAN-2R に実装

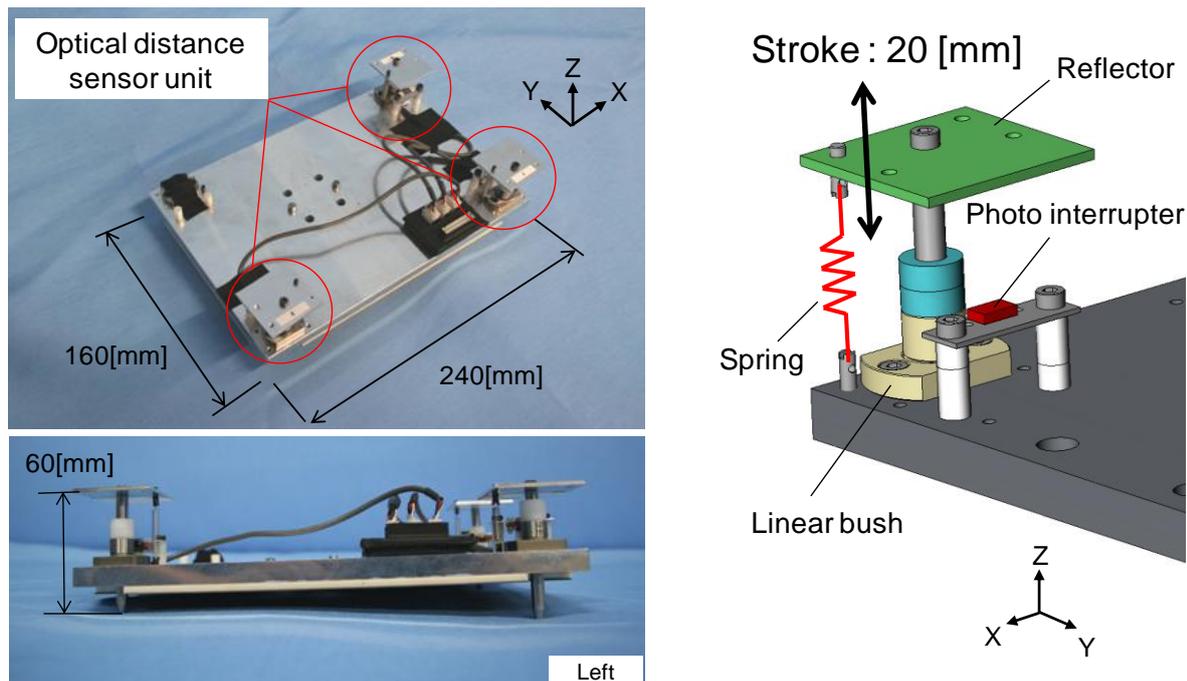


Figure 5.6 Foot mechanism with sensor in 2007

し、着地する前にセンサで路面を検知することで、着地前に足首関節の角度を修正して、目標路面である 20[mm]の凹凸路面に倣うことを可能になった。しかし、この足部機構は完成度が低いため、多くの問題点があった。20[mm]の段差に対して Pitch 軸方向に対して倣うことはできたが、Roll 軸方向に倣うことができなかった。また、この足部機構の最大の欠点として、路面を検知するために足底から突き出したシャフト以外の場所に凹凸があった場合、検知できないという問題があった。さらに、足底が剛体平板であったため、屋外のようにうねりがある路面では、安定した支持多角形を保つことが出来なかった。そこで、これらの問題点を解決するために改良することで、目標路面における歩行実現を目指す方針とした。

5.3.2 機構の評価実験

まず、図 5.7 のように足部機構のシャフト部分をつめ型に変更し、4隅に搭載することにより4点で接地するようにして、うねり路面に対応できるようにした。また Yaw 軸方向の力がつめにかかった際にセンサ反射板が回転してしまう問題があったため、簡易のガイドを設けることとした。さらに、センシング方法の変更や姿勢補償制御のパラメータを実験的に最適化したところ、段差 20[mm]に対して Roll 軸方向に



Figure 5.7 Improvement of sensor foot

対しても倣うことに成功した。

しかし、つめで4点接地していることに対して、足首関節のハーモニックドライブとの干渉から現状の足部機構ではセンサは3つしか搭載することができなかった。そのため、センサが搭載されてないつめで凸を踏んだ場合に検知することが出来ず、倣うことができない問題があった。また、屋外で実験をすることを想定した場合、使用している赤外線センサが日光によって誤作動してしまう可能性があるため、センサをカバーできる機構が必要であった。

5.3.3 新規センサ式足部機構の製作

前述の問題を解決するため、足部のハードウェアに干渉しないようにセンサの配置場所を調整し、従来の足部の寸法である 240×160 [mm]の領域内にセンサを4つ搭載できるような足部機構を製作した (図 5.8)。

センサを4つ搭載したことで、センサがある場所で4点接地するため、つめの厚さより低い高低差であれば、どのような路面も検知することが可能である。

製作した足部機構の有効性を確認するため、3歩目に4つのつめそれぞれに高さ 20 [mm]の凸を踏ませる評価実験を行ったが、この新規に設計した足部では凸を踏んだ後にほぼ毎回転倒してしまう結果となった。

その原因として挙げられるのはまず、足部のベースの剛性が低下していた点が挙げられる。これは、従来の足部の寸法に合わせて4つのセンサやカバーを搭載できるようにした影響でベースの形状に制約があったため、強度計算不足が招いた結果である。そこで、足部全体の剛性を向上させるために、図 5.9 に示すようにアルミの

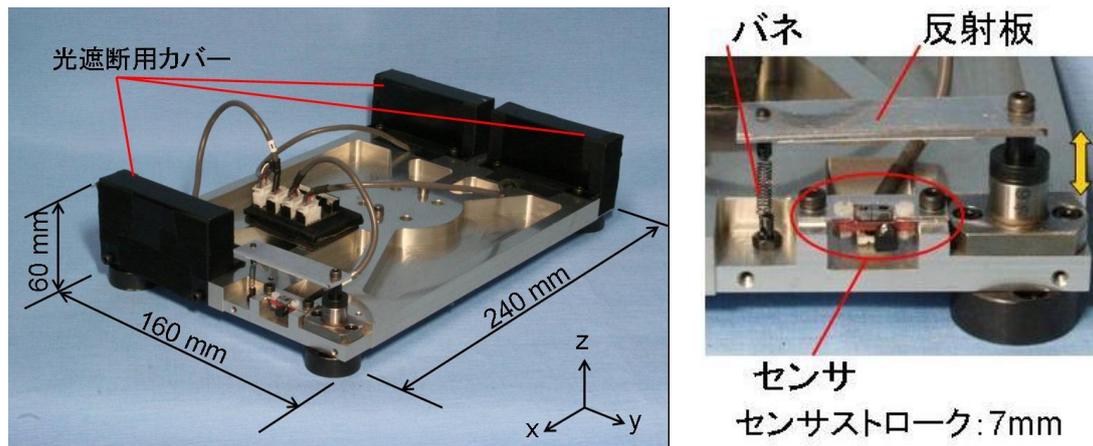


Figure 5.8 Foot mechanism with new sensor

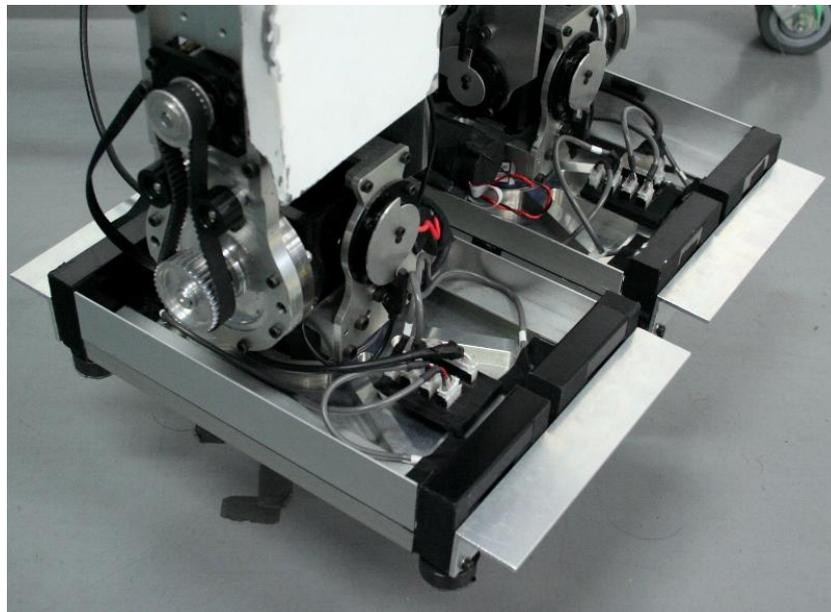


Figure 5.9 Strengthen with L-plate

L字部を加工して足部の周囲に取り付けた。これにより足部全体の剛性は増加し、歩行の安定性が向上したが、それでも 20[mm]の段差を越えることができなかった。

そして、歩行能力が減少した 2 つ目の原因として、両立脚時の Y 軸方向の安定領域が減少したことが考えられる。WABIAN-2R の ZMP の位置はパターン上では 6 軸力覚センサの中心に設定されているため、6 軸力覚センサが足部の中心になるのが好ましいと考えていた。そこで、取り付け位置を 5[mm]の内側になるように設計した。また、センサの位置を調整したことにより、つめの Y 軸方向の間隔が 5[mm]減少してしまった。これらの足部のベースの寸法が原因で Y 軸方向の安定領域が両立脚期に 15[mm]、遊脚期には 5[mm]減少した。これにより、改良した足部機構が凸を

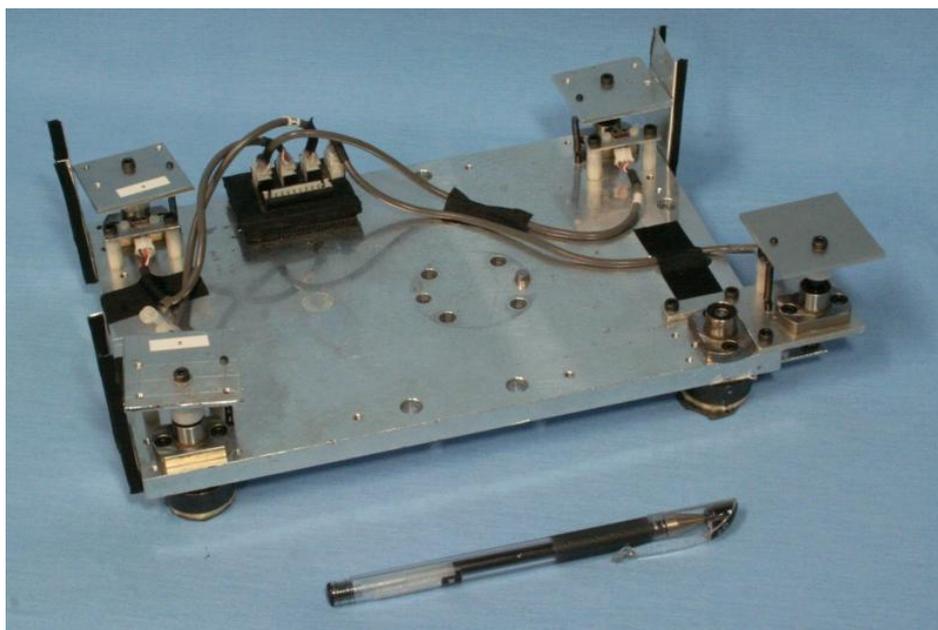


Figure 5.10 Improved foot mechanism with 4 sensors

踏んだ際に不安定になったと考えられる。その検証として、パターン状で、両足の間隔を寸法変更で減少した分広げて実験を行ったところ、大幅に歩行が安定することができたが、20[mm]の段差に対して Roll 軸方向に倣うことができないままであった。さらに、両足の間隔を広げても遊脚期における安定領域の減少は対応することができないことから、新規足部機構での歩行実験を断念し、4つのセンサをつけられるように、更なる改良を行うこととした (図 5.10)。

4つ目のセンサを搭載するために、ベースに加工したアルミ板を取り付け、足首関節のハーモニックドライブとの干渉を避けた。この足部を用いて、上記と同様の評価実験を行った。その結果、高さ 20[mm]の凸をどのつめで踏ませても歩くことに成功した。さらに、5[mm]~20[mm]の高さの段差が混在する擬似不整路面での歩行に成功した。

5.3.4 ベースの改良・再設計

改良した足部機構を用いて目標路面である 20[mm]の段差での歩行に成功したが、改良した足部機構はあくまでモックアップであり、ベースも 10[mm]厚の板に穴を開けただけのものであるため、再び新規に足部を設計・製作することとした。

前回の失敗を活かし、安定領域を考慮してモックアップの寸法はそのままに、より軽量で剛性の高い足部のベースを製作した。

また、図 5.11 にセンサ式足部機構の最終版を示す。開発した足部機構を用いて改良する際と同様に5[mm]~20[mm]の高さの段差が混在する擬似不整路面での評価実験を行ったところ、適応歩行に成功した。さらに、屋外における不整路面での歩行にも成功した。

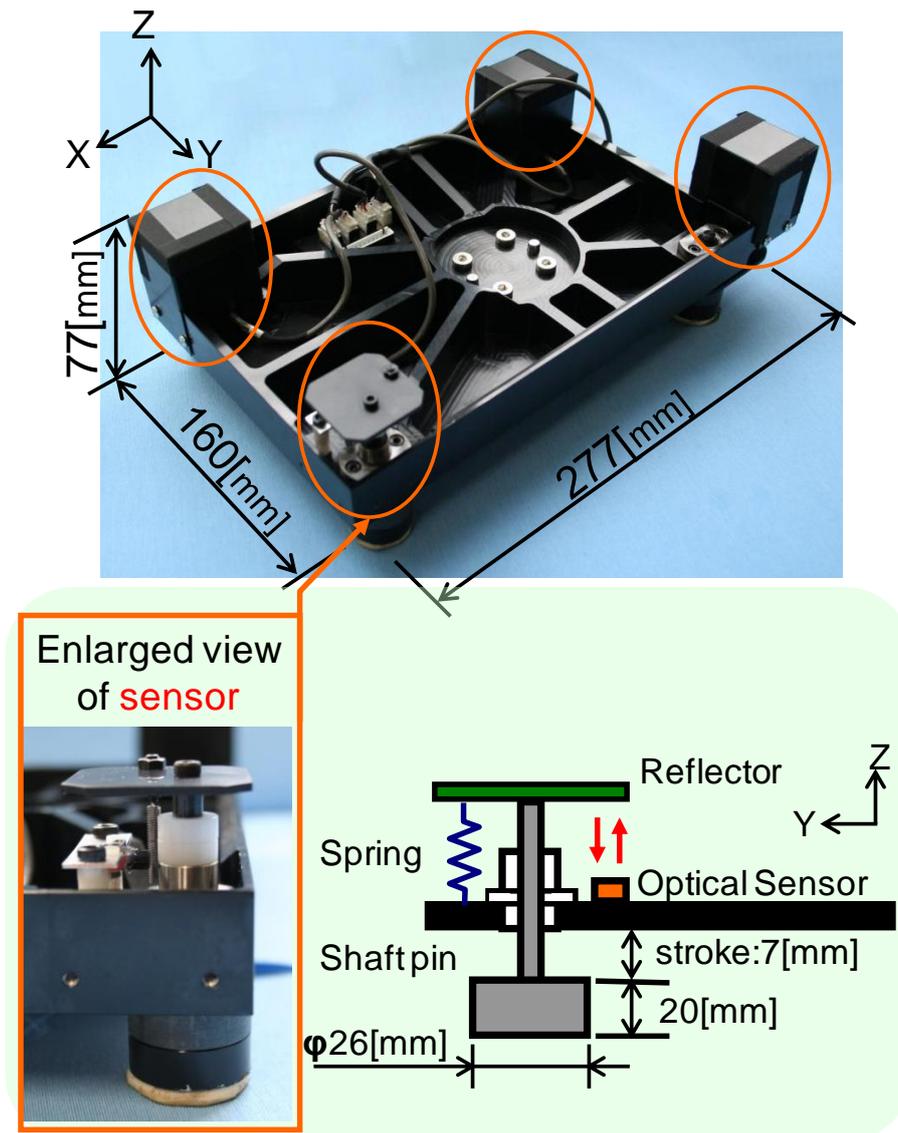


Figure 5.11 New foot mechanism with 4 sensors

5.4 4点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御

着地軌道修正制御が実装されたことによって不整路面に対する適応性は向上した。しかし、人間が生活する住環境に存在するすべての不整路面に適応できているわけではない。第4章で述べたように段差 20[mm]の凹凸路面における Pitch 軸方向には倣うことができたが、Roll 軸方向で倣うことは難しかった。そこで、Roll 軸方向 20[mm]の倣いが可能な不整路面適応制御の開発を目指した。前述したように高さ 20[mm]のつめ型のセンサを4つ搭載し、4点接地とする4点型路面検知足部機構を開発した。これにより、うねりや足部中央付近の凹凸の影響は受けづらくなると考えられる。また、4点型路面検知足部機構をに対する新たな路面適応制御を開発する必要があった。そこで、既存の着地軌道修正制御を改良し、センサ式足部機構を用いた新たな路面適応制御を開発した。

前述した新型足部機構により4点接地となったが、不整地路面においては4つのセンサのうち3つしか接地することができない。そのため、安定領域が確保されない可能性がある。それを解決するために、設定 ZMP の位置を後方に設定することにより、必ず安定領域が一意に定まるようにした。さらに、4つのセンサのうちどのセンサが最初に反応するかによって実際に接地する3つのセンサを決定し着地軌道の修正を行なうこととした。センサの振動やノイズの抑制のために、センサ値に移動平均を用いることで、より速い倣い動作を実現した。これにより、従来 20[mm]であったセンサのストロークを 7[mm]に変更することができ、ストロークが短くなったことによって、センサが凹凸に引っかかることが減少した。さらに、十分な倣い時間を確保するために、遊脚前期を短くし、遊脚後期を長くすることで、さらなる安定性の向上を図った。

以下に具体的な制御方法を述べる。

まず、センサ式足部を用いた着地軌道修正制御のタイムチャートを表 5.1 に示す。なお、本制御法は両足の Z 軸方向、Roll 軸周り、Pitch 軸周りの合計 3 軸にわたって適用する。

歩行中の状態を 5 つに分割して、その各々の期間で制御を行なっていく。その制御

Table 5.1 Timing chart.

Phase	Double Support Phase	Swing phase		Double Support Phase	Stance phase		Double Support Phase
		former	latter		former	latter	
z	Normal Period	Normal Period	Control Period	Keep Period	Return Period	Normal Period	Normal Period
Roll	Keep Period	Return Period	Control Period	Keep Period	Keep Period	Keep Period	Keep Period
Pitch	Keep Period	Return Period	Control Period	Keep Period	Keep Period	Keep Period	Keep Period

の種類には、以下のような3つが存在する。

- (a) 制御期 : 着地軌道修正制御を行なっている期間。
- (b) 保持期 : ひとつ前の修正量を保持して出力する期間。
- (c) 復帰期 : 基準パターンへの復帰動作を行なう期間。

以下、この3つの期間の動作について詳しく説明する。

5.4.1 制御期

この期間でセンサによる路面形状の検知、および着地軌道の修正を行なっていく。まず、4つのセンサの使用法について述べる。本来、3点が定めれば平面は1つに定義される。そのため、センサは片足3つ存在していればよいことになり、4つセンサが存在してしまうと1つセンサが冗長なセンサとなってしまふ。さらに、不整地の踏み方によってはその1つのセンサは地面に着かず、全く反応しない可能性もある。そこで、センサの値から足関節の角度を算出する際に、適切な3つのセンサを選択し計算する必要がある。これを解決するために、以下の方法をとった。

(1) 設定 ZMP の位置

基準パターンを作成する際、これまでは設定 ZMP の位置は足関節の中心となっていた。これにより、路面の倣い方によっては安定領域が1つに定まらず、不安定になる可能性がある。そこで、本制御では Y 軸方向に関しては足部中央、X 軸方向に関しては足部中央より後方に ZMP を設定することで、解決を図った。これにより、安定領域は必ず図 5.12 の安定領域①または安定領域②のどちらかに定まることになる。このようにして、安定領域を2つに絞った。

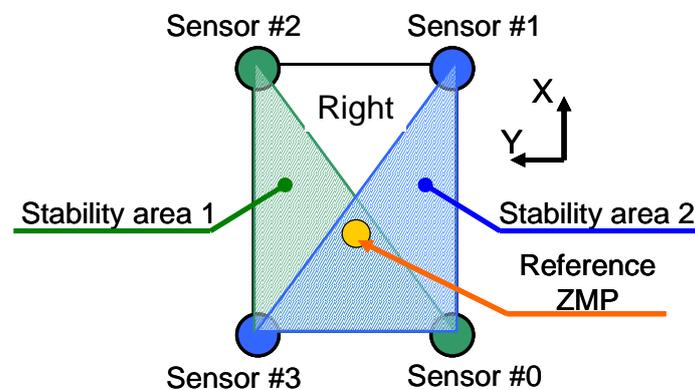


Figure 5.12 Determination of stability area and ZMP

(2) 3つのセンサの選定

設定 ZMP の位置を基準パターン上で工夫することによって、安定領域の種類は 2 つに絞られた。しかし、まだ 2 つ存在するために、どちらの安定領域になるように足関節を修正するか決定する必要がある。すなわち、算出する 3 つのセンサを選定しなければならない。

そこで、最初に路面を検知したセンサに応じて、実際に路面と支持多角形を形成する 3 つのセンサを決定することにした。センサが反応していない状態では着地軌道の修正は行わず、4 つのセンサのうち、どれかが反応してから修正を始める。このようにして、4 つのセンサを有効に活用した。

なお、これはセンサの数を 3 つにして、3 点接地とすれば問題とならないが、4 点接地の方が 3 点接地より 1 点増えるだけで安定領域 (平地に限る) が 2 倍となるため、今回 4 点接地という機構にした。

これから具体的な修正法について述べていく。センサのストロークを Δl とする。すると、WABIAN の足部の地面からの高さが Δl のときにセンサであるつめが接地することになる。この足部よりつめが早く接地し、つめが移動するときの移動量を「理論センサ移動量」として、以下の式を用いて予め算出しておく。

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad z_{leg} + \Delta l &\leq z_{waist} \\ \Delta x_t(t) &= 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \text{(ii)} \quad z_{leg} + \Delta l &\geq z_{waist} \\ \Delta x_t(t) &= z_{leg} + \Delta l - z_{waist} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$\Delta x_t(t)$: 理論センサ移動量

Δl : センサのストローク

z_{leg} : 足先軌道

z_{waist} : 腰軌道

この理論センサ移動量と、実際のセンサ移動量との差を誤差 (=路面の凹凸) としてとらえ、フィードバックすることによって着地軌道の修正を行なっていく。その際の計算式は以下の通りである。

$$e(t) = \Delta x_f(t) - \Delta x_t(t) \quad (5.3)$$

$$H(t) = H(t-1) - K_{error} \cdot e(t-1) \quad (5.4)$$

$e(t)$: 誤差

$\Delta x_f(t)$: 実際のセンサ移動量

$H(t)$: 修正量

K_{error} : 誤差修正ゲイン

以上のような方法により Z 方向に関する修正を行なっている。

続いて、Roll および Pitch 方向に関しては、以下のように修正を行なっている。

- (1) 足関節の修正量を算出するための3つのセンサを選定
 - (2) センサの値から足関節の修正量を算出
 - (3) 10msec かけて(2)で算出した角度になるように足関節を修正。このとき、5次関数補間で基準パターンに修正量を加えていく。
- (2)と(3)を繰り返し行なう。(すなわち、10msec ごとにセンサの値を取得し、修正することになる。)

以上のような方法により、Roll, Pitch 方向の修正を行なっていく。この方法の場合、センサの値から算出する角度は常に0で一定となる 때가理想的な状態であると言える。

また、基準パターンを作成するにあたり、時間/経路分離型軌道生成法を用いた。時間/経路分離型軌道生成法を使用することにより、遊脚前期を短くし、遊脚後期を長くすることで、十分な倣い時間を確保した。これによって、安定性はさらに向上した。

5.4.2 保持期

この期間は、制御期に路面形状を検知し軌道修正をおこなったのち、それをそのまま保持し続け、安定した歩行につなげていく。具体的には、1制御周期前の修正値の値（軌道修正後の値）を引き続き出力する。

なお、この際にもこの「センサ式足部を用いた着地軌道修正制御」以外の制御によっては、足先の修正は行なっている。

5.4.3 復帰期

この期間は、制御期に軌道修正したものを一步ごとにリセットすべく基準歩行パターンに復帰させていく。具体的には、復帰期に入る1周期前の修正値を復帰期の終わ

りの時刻までに0に戻るよう, 加速度まで連続になるような5次関数補間をして行う.

その際の初期条件は,

$$E_{zr}(0) = E_{zl} \quad E_{zr}(t_l) = 0$$

$$\dot{E}_{zr}(0) = 0 \quad \dot{E}_{zr}(t_l) = 0$$

$$\ddot{E}_{zr}(0) = 0 \quad \ddot{E}_{zr}(t_l) = 0$$

として, 5次関数

$$E_{zr}(t) = a_0 t^5 + a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t + a_5$$

を解くと,

$$E_{zr}(t) = -6 \frac{E_{zl}}{t_l^5} t^5 + 15 \frac{E_{zl}}{t_l^4} t^4 - 10 \frac{E_{zl}}{t_l^3} t^3 + E_{zl} \quad (5.5)$$

を得る.

ただし,

E_{zr} : 復帰変更量

E_{zl} : 立脚前期の初めの値 (修正後の値)

t_l : 立脚前期の時間

である.

5.5 評価実験と考察

5.5.1 各々つめで凹凸を踏んでの歩行実験

(1) 実験目的

路面検知可能な足部機構とセンサを用いた着地軌道修正制御が有効であることを確認する.

(2) 実験方法

路面検知可能な足部機構に搭載された4つのつめ (センサ) の1つずつに 20[mm]

の板を踏ませる。板を踏むタイミングとしては3歩目の右足とした。なお、実験に用いた歩行パターンのパラメータは以下に示す通りである。

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

歩数 : 8 step

歩幅 : 0.2 m/step

歩行周期 : 1.0 s/step

安定化制御：センサを用いた不整路面適応制御

ZMP 補償制御

姿勢補償制御

20[mm]の板を踏ませるつめ（センサ）の位置は次の通りである。

(a) 実験①

3歩目に20[mm]の板を Sensor[0]で踏む（図 5.13）。

(b) 実験②

3歩目に20[mm]の板を Sensor[1]で踏む（図 5.14）。

(c) 実験③

3歩目に20[mm]の板を Sensor[2]で踏む（図 5.15）。

(d) 実験④

3歩目に20[mm]の板を Sensor[3]で踏む（図 5.16）。

(3) 実験結果

実験の様子と結果を図 5.17 から図 5.36 に示す。どのつめで踏んだ場合においても、適応歩行に成功した。歩行中の ZMP グラフより測定値が目標値に追従していることが分かった。また、3歩目の ZMP を見ても、しっかりと狙った安定領域に入っていることがわかる。また、歩行中の姿勢角も実測値が目標値に追従していることがわかり、その時の足関節角のグラフより、段差に応じて足関節を修正したことがみられる。

以上の結果から開発した4点型路面検知足部機構と足部を用いた不整路面適応制御の有効性を確認した。

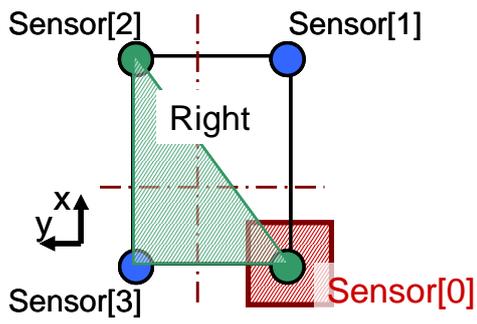


Figure 5.13 Sensor[0]

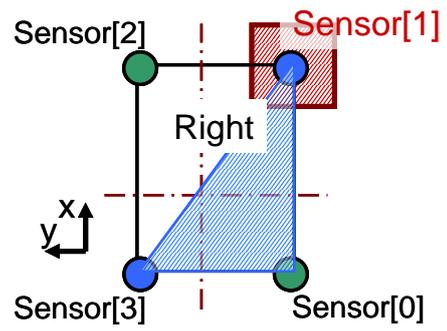


Figure 5.14 Sensor[1]

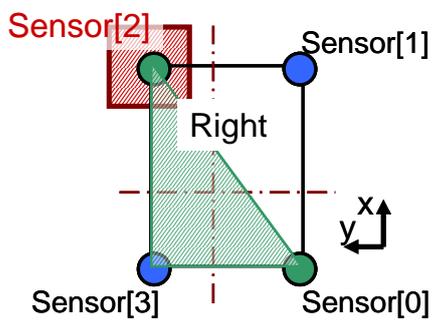


Figure 5.15 Sensor[2]

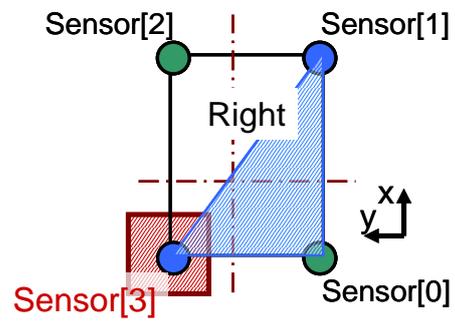


Figure 5.16 Sensor[3]

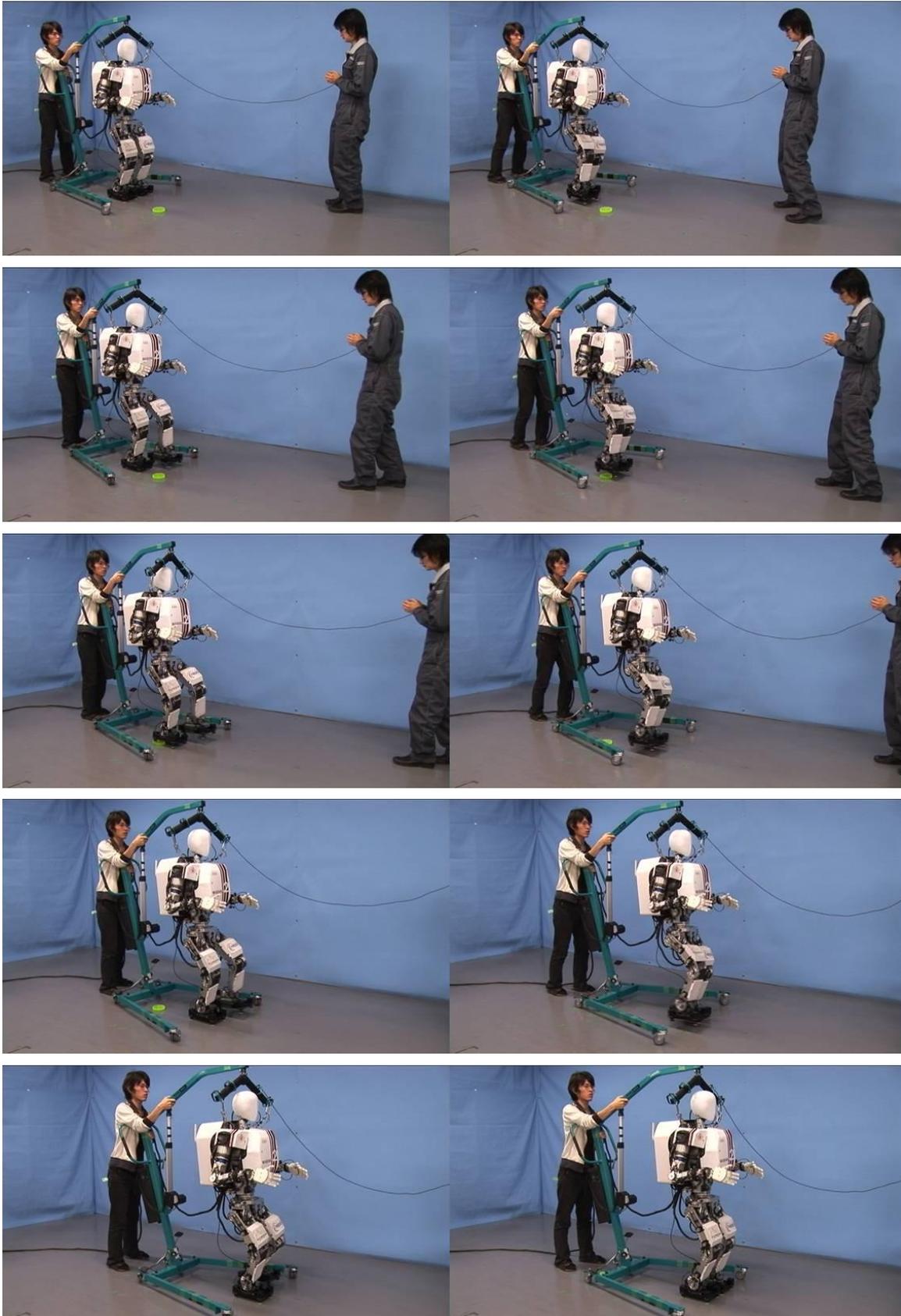


Figure 5.17 Walking experiment on uneven ground (experiment①)

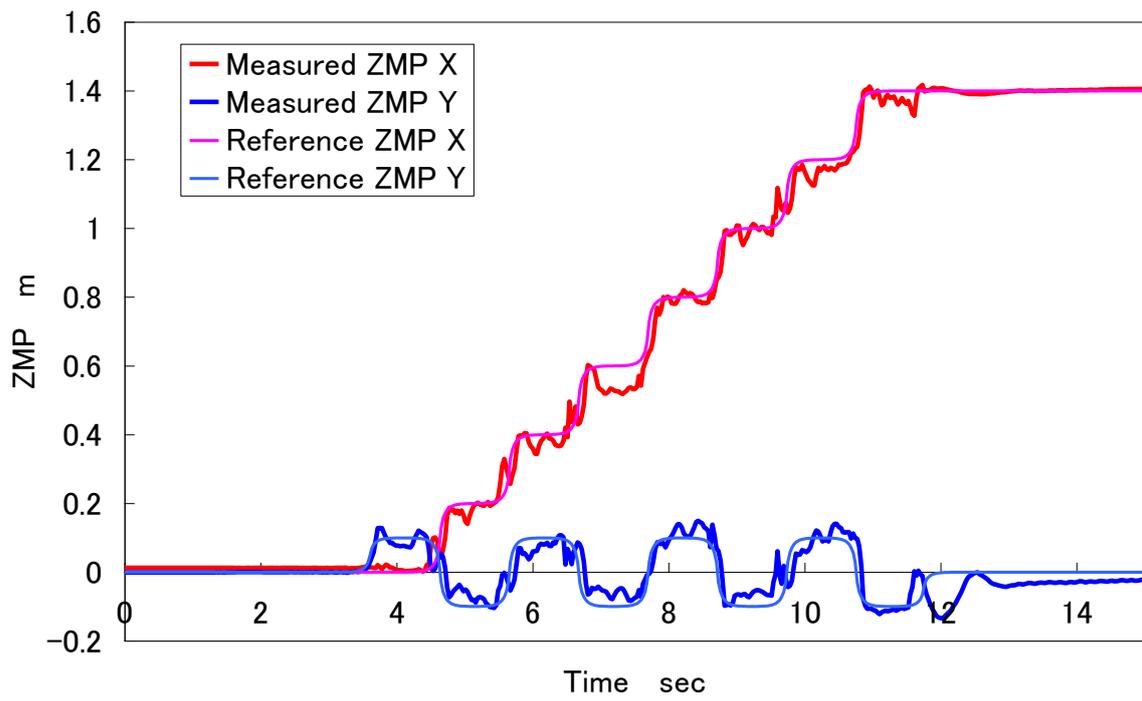


Figure 5.18 ZMP trajectories (experiment①)

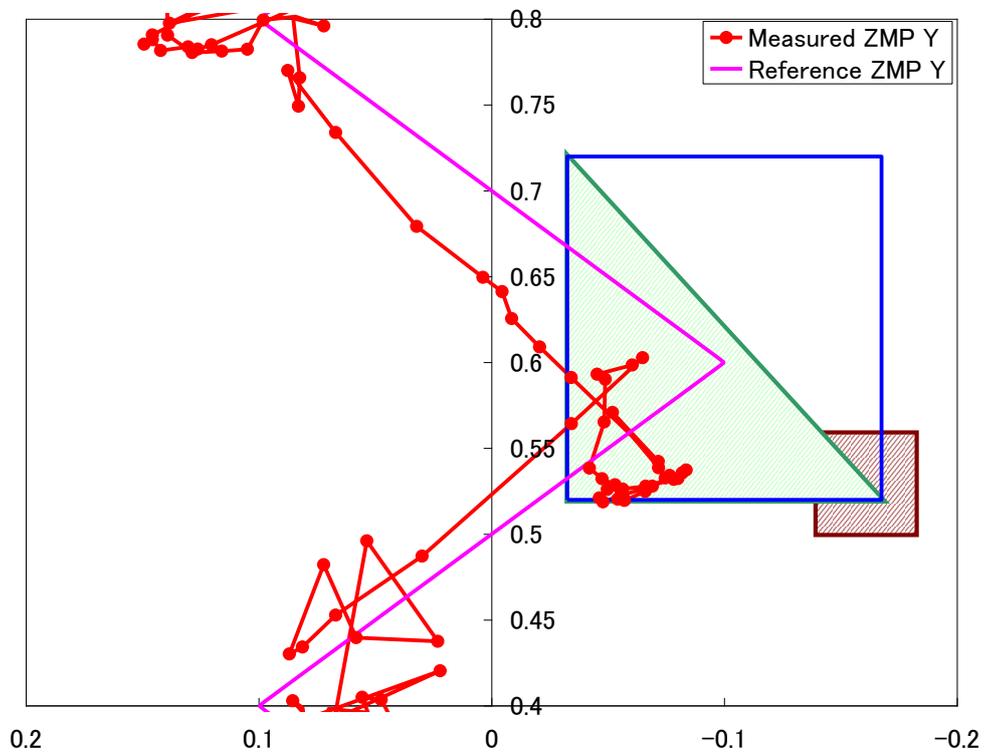


Figure 5.19 ZMP trajectories when walking on uneven ground (experiment①)

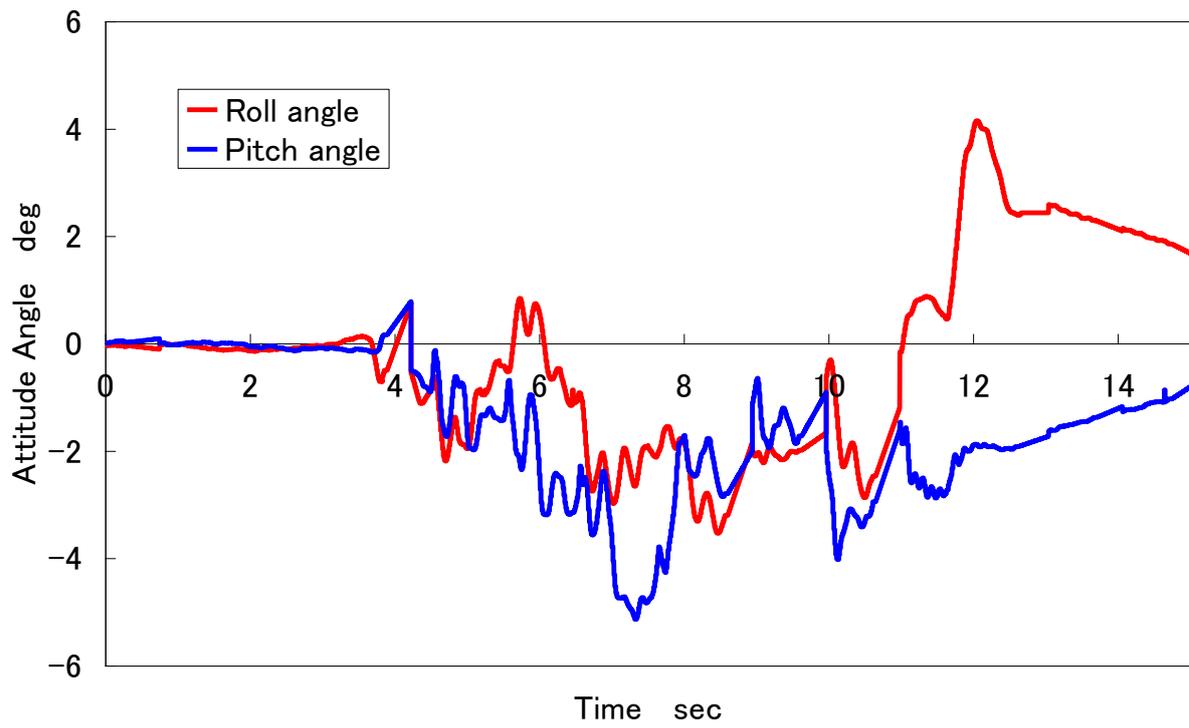


Figure 5.20 Attitude angle (experiment①)

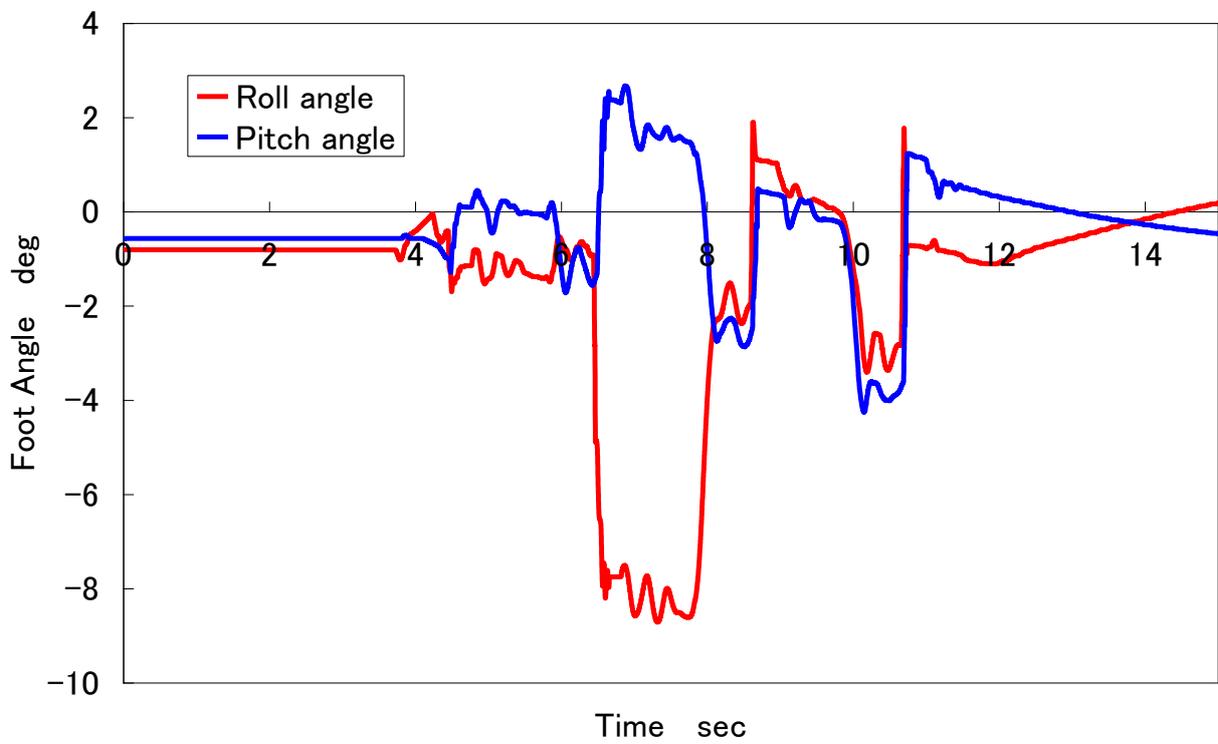


Figure 5.21 Foot joint angle (experiment①)

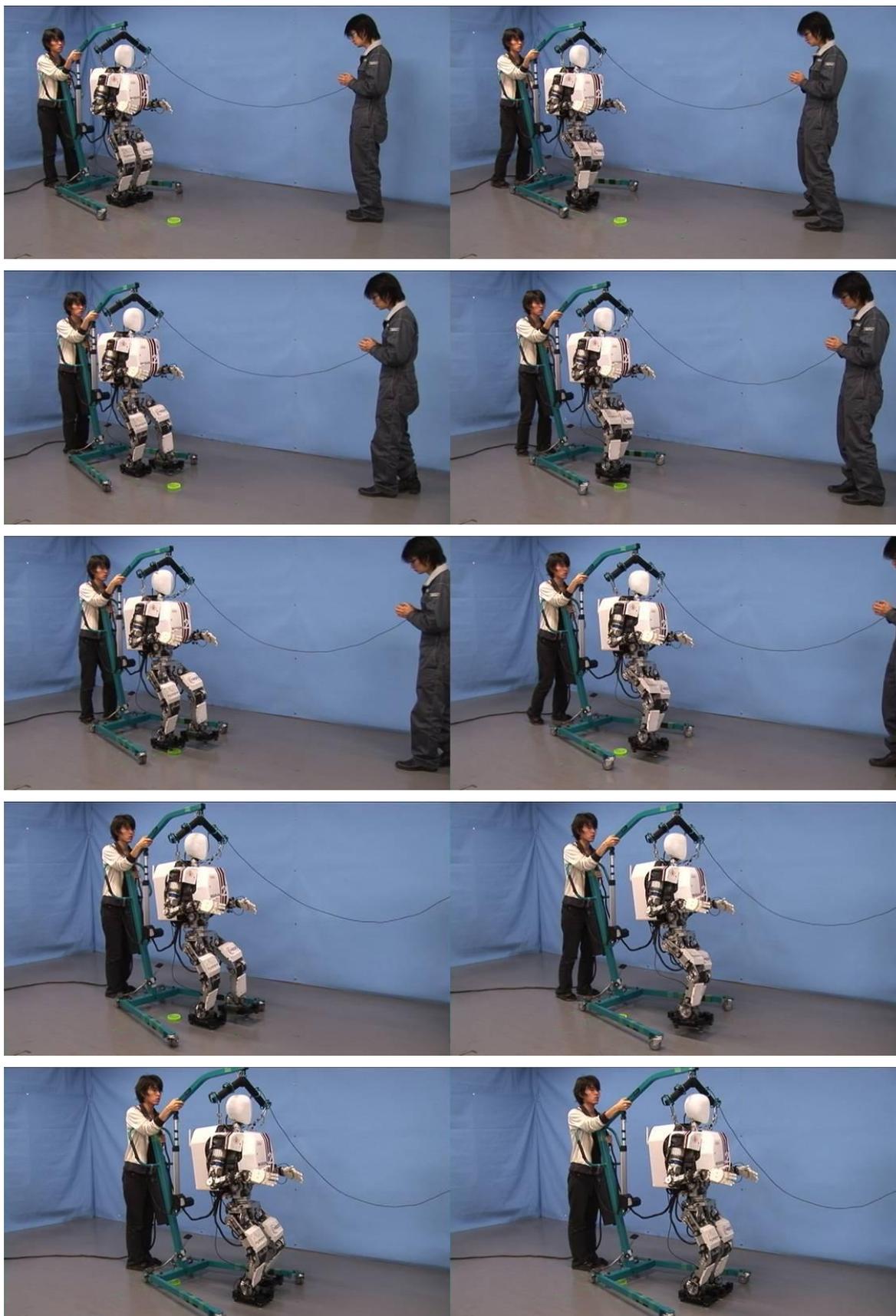


Figure 5.22 Walking experiment on uneven ground (experiment②)

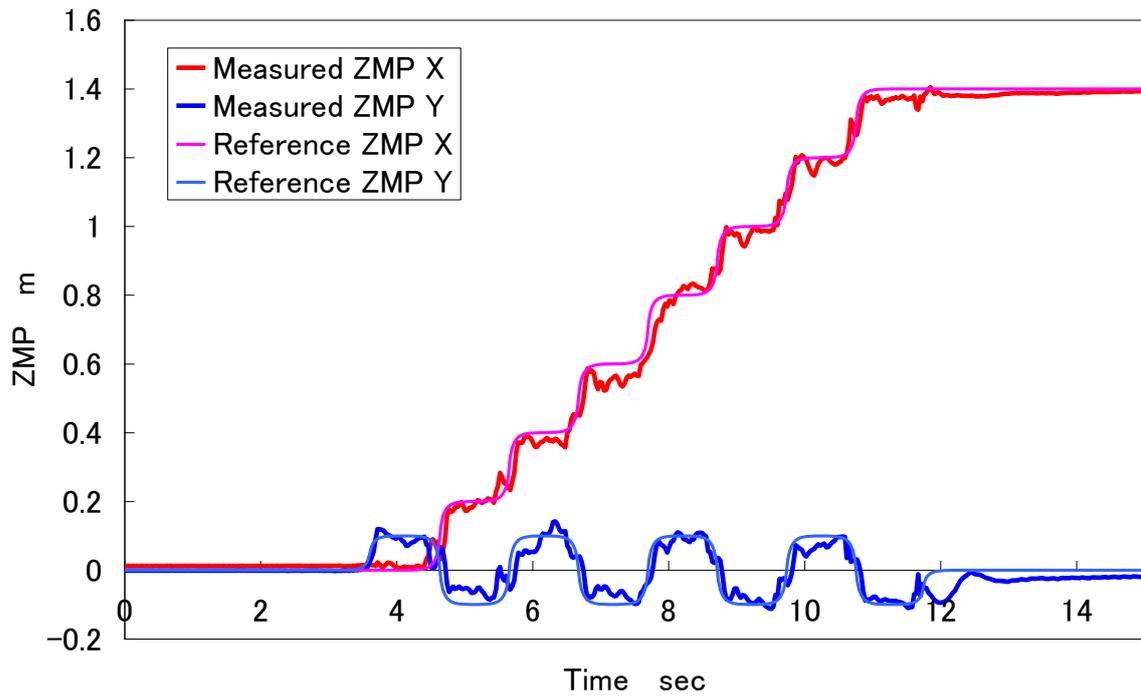


Figure 5.23 ZMP trajectories (experiment②)

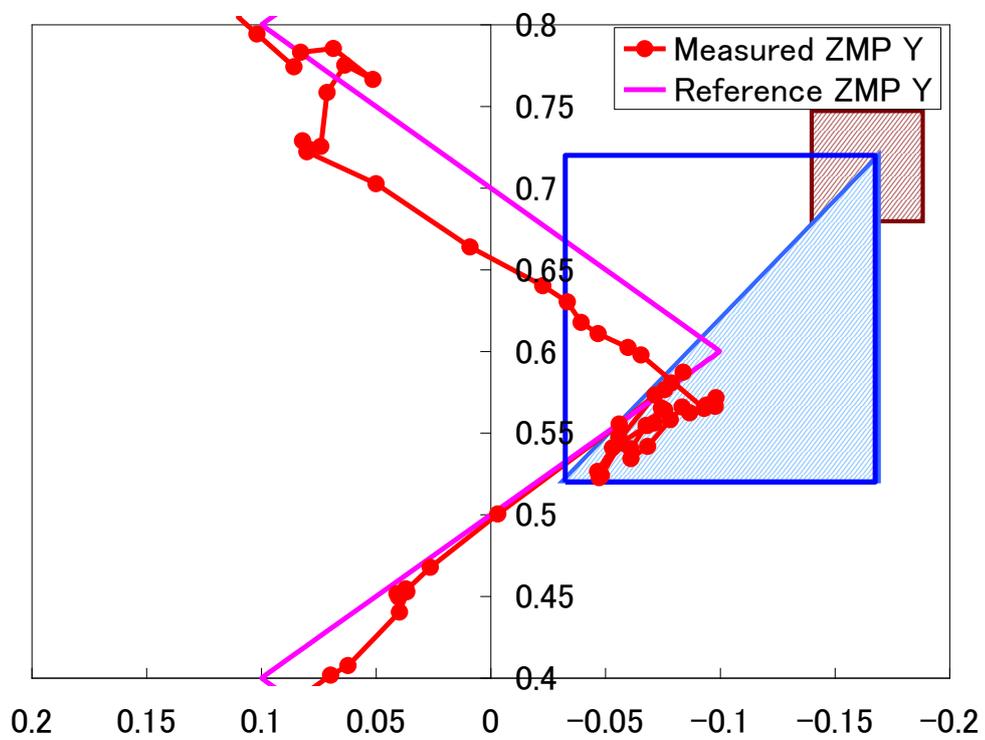


Figure 5.24 ZMP trajectories when walking on uneven ground (experiment②)

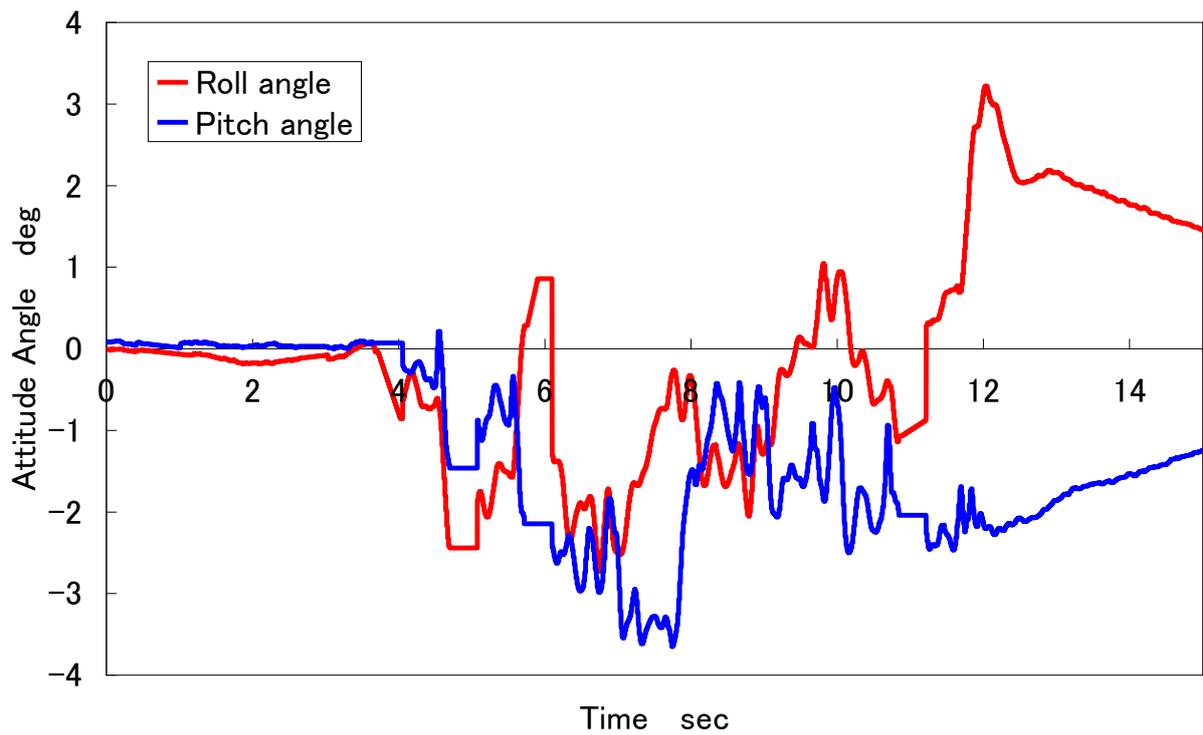


Figure 5.25 Attitude angle (experiment②)

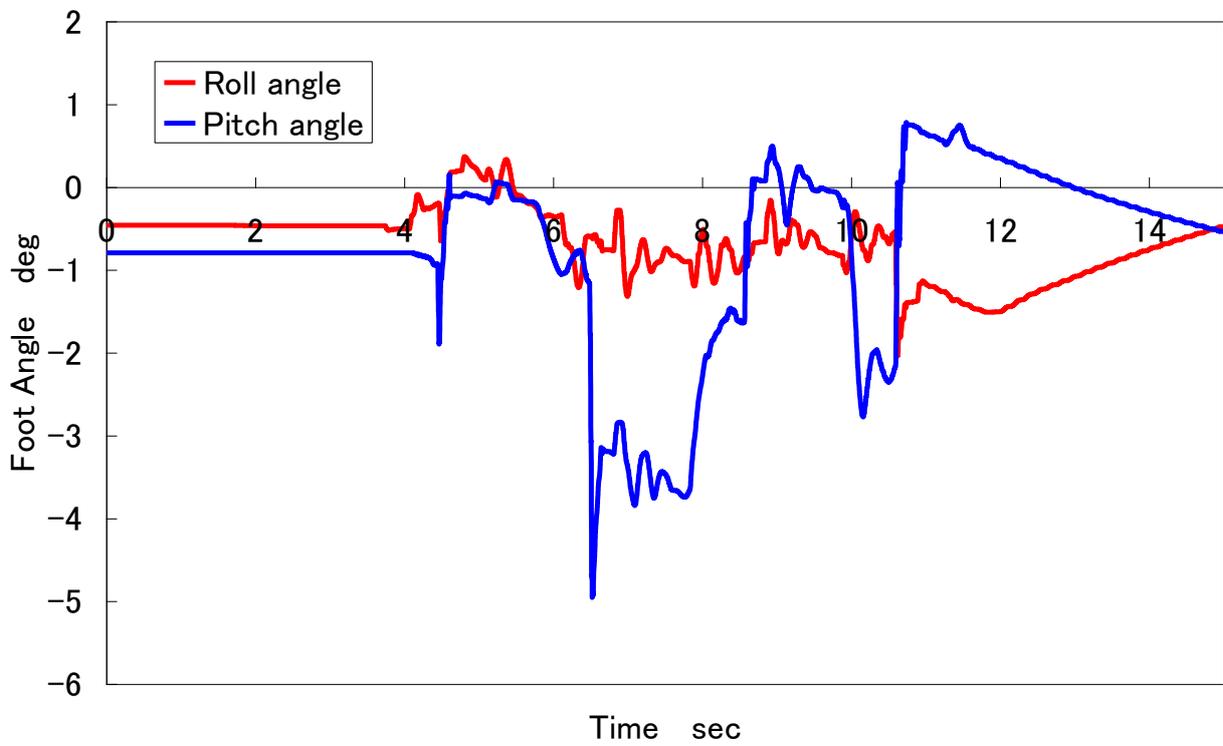


Figure 5.26 Foot joint angle (experiment②)

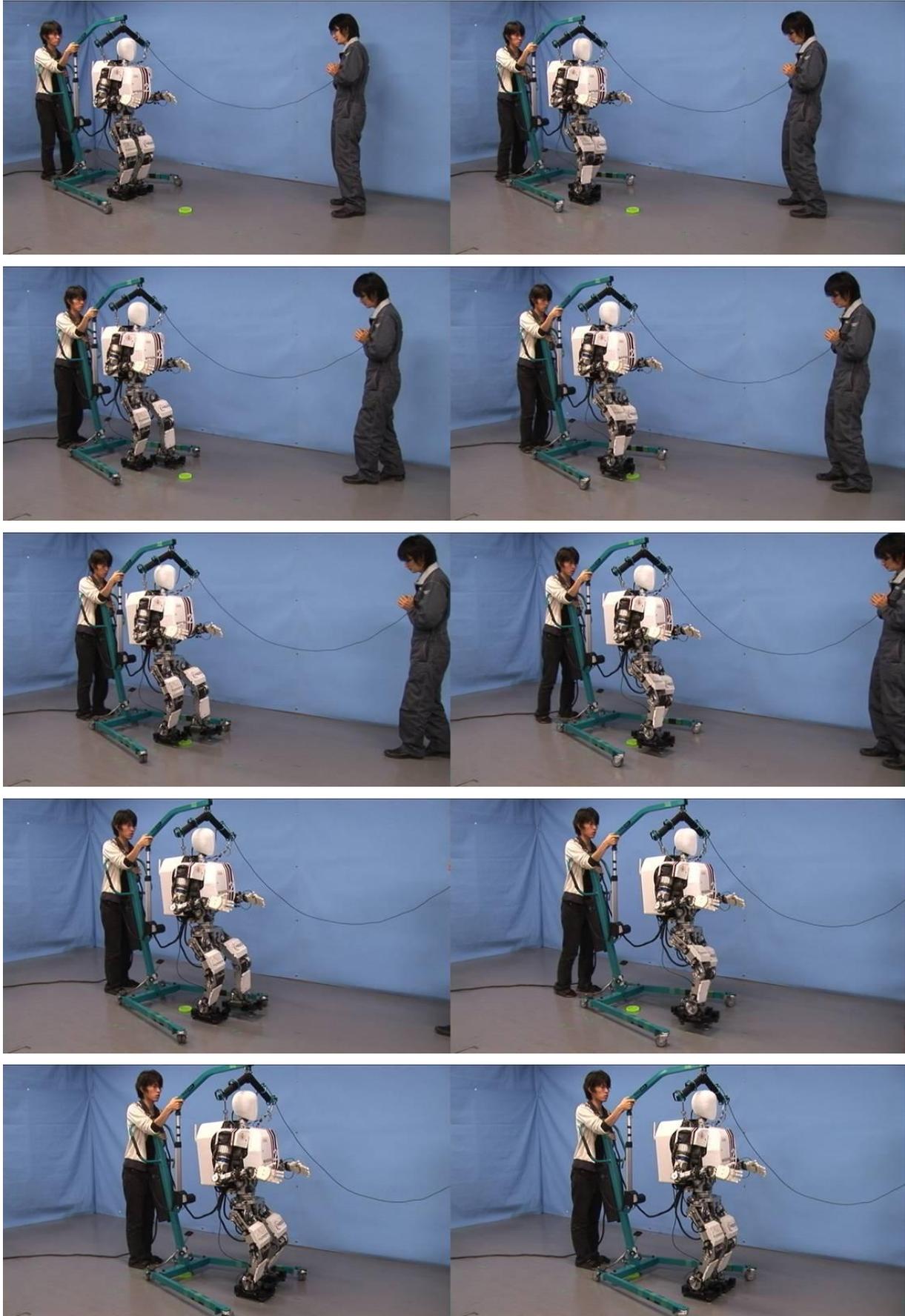


Figure 5.27 Walking experiment on uneven ground(experiment③)

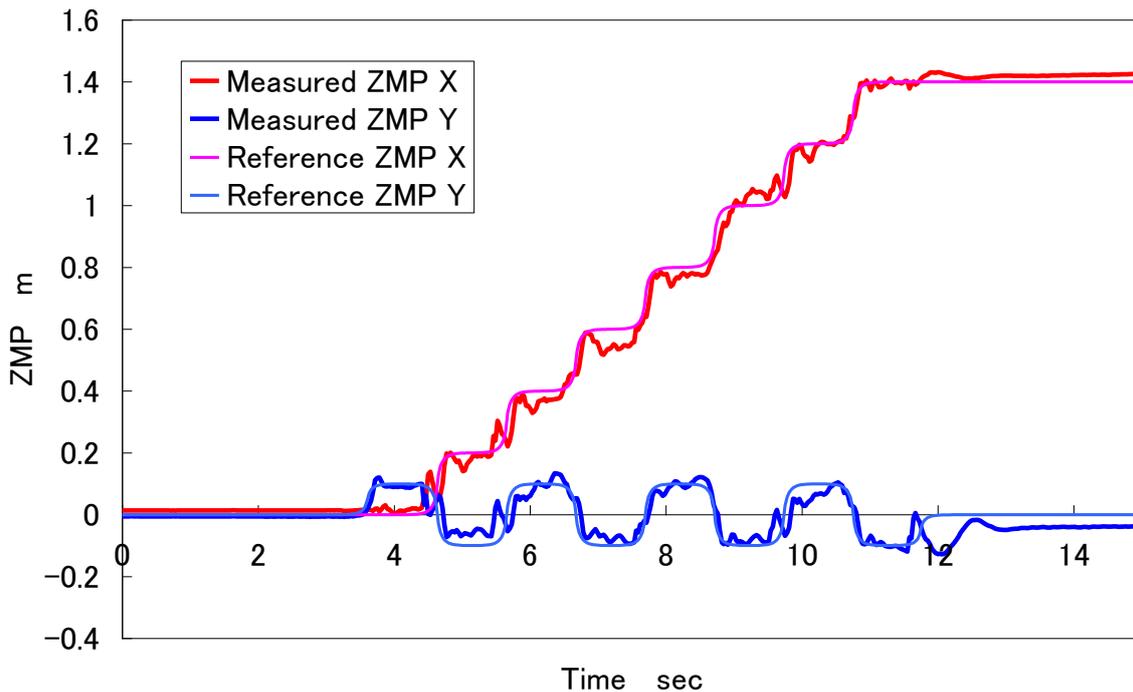


Figure 5.28 ZMP trajectories(experiment③)

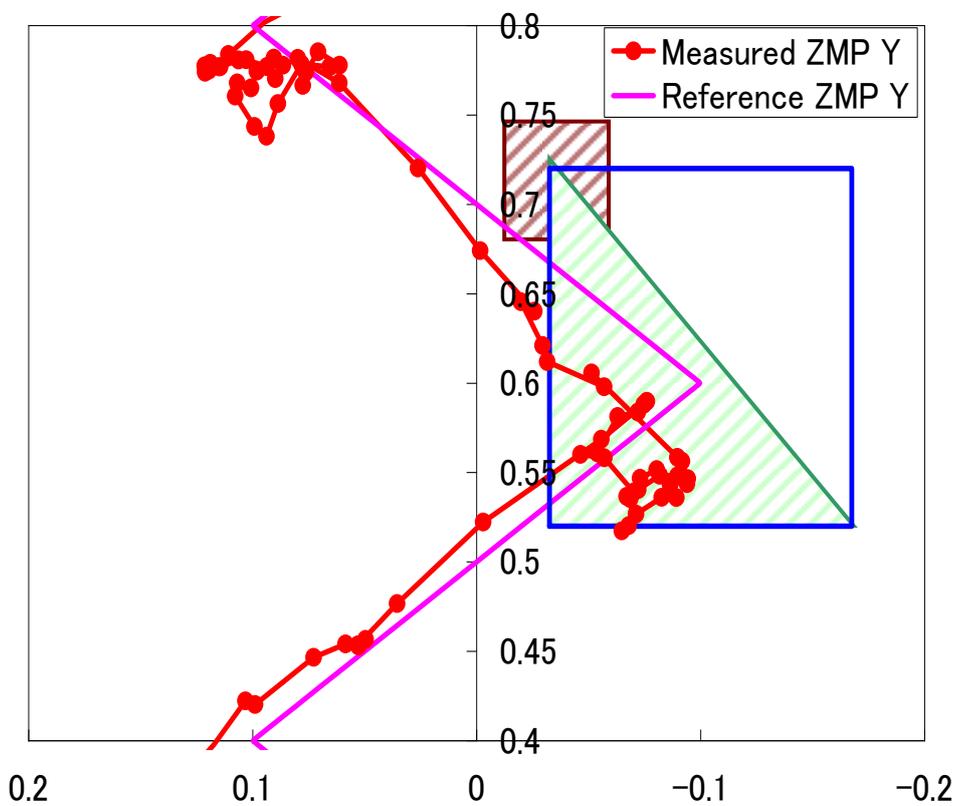


Figure 5.29 ZMP trajectories when walking on uneven ground (experiment③)

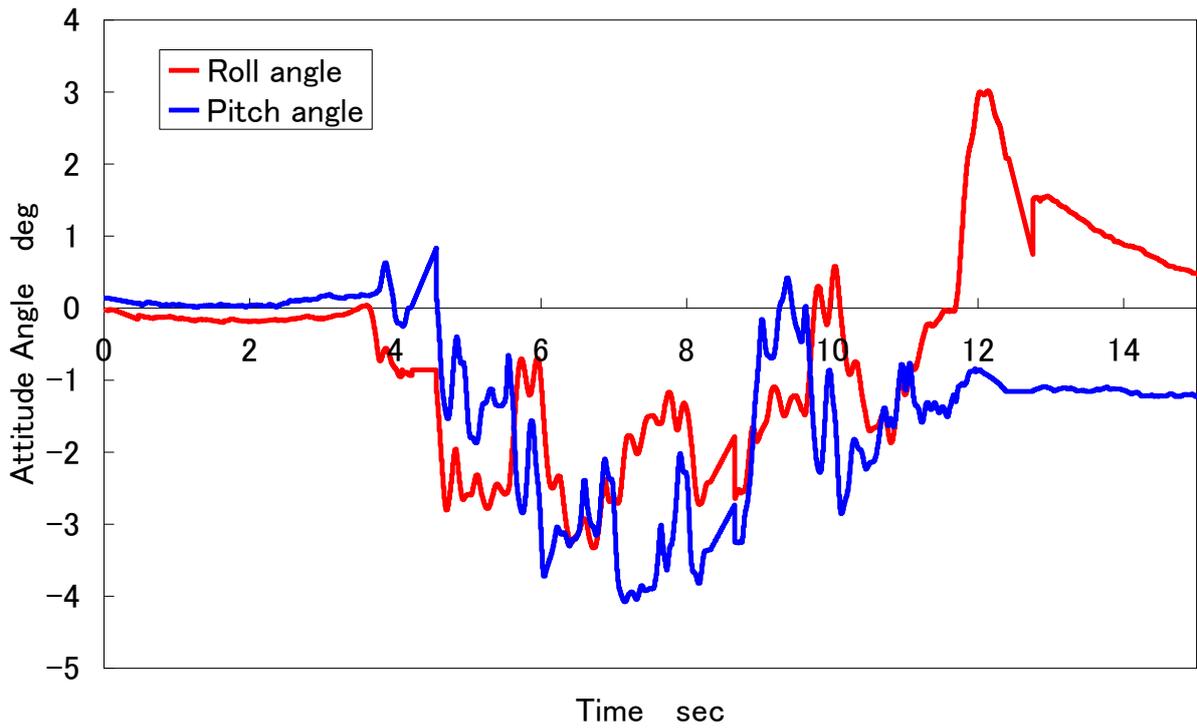


Figure 5.30 Attitude angle (experiment③)

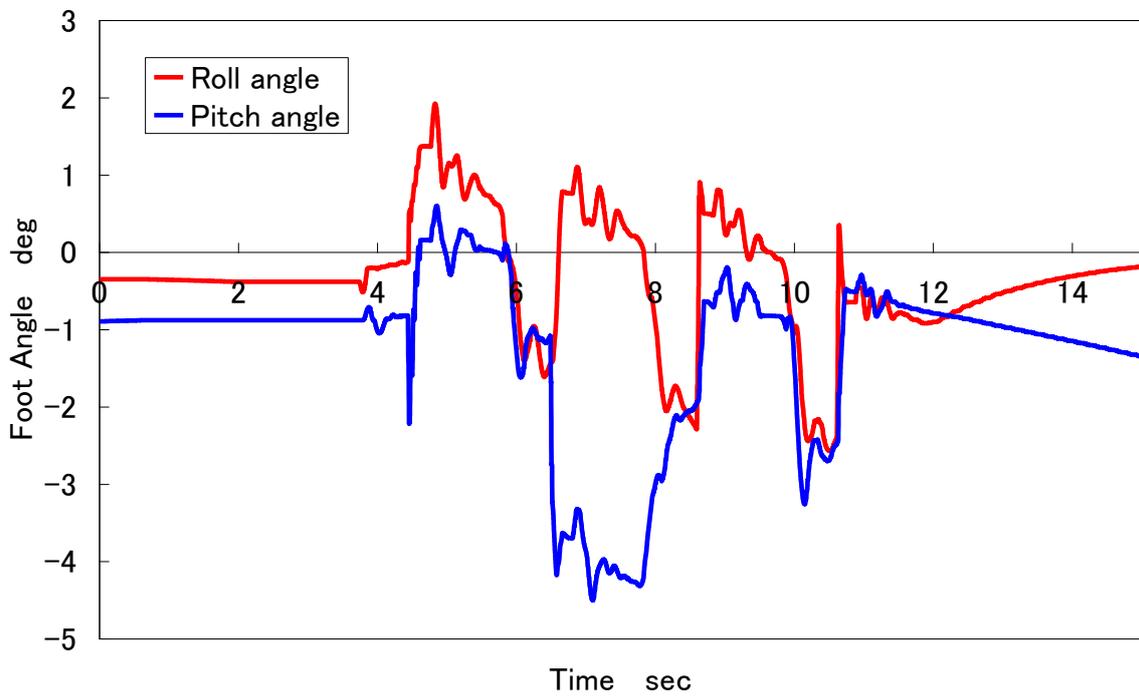


Figure 5.31 Foot joint angle (experiment③)

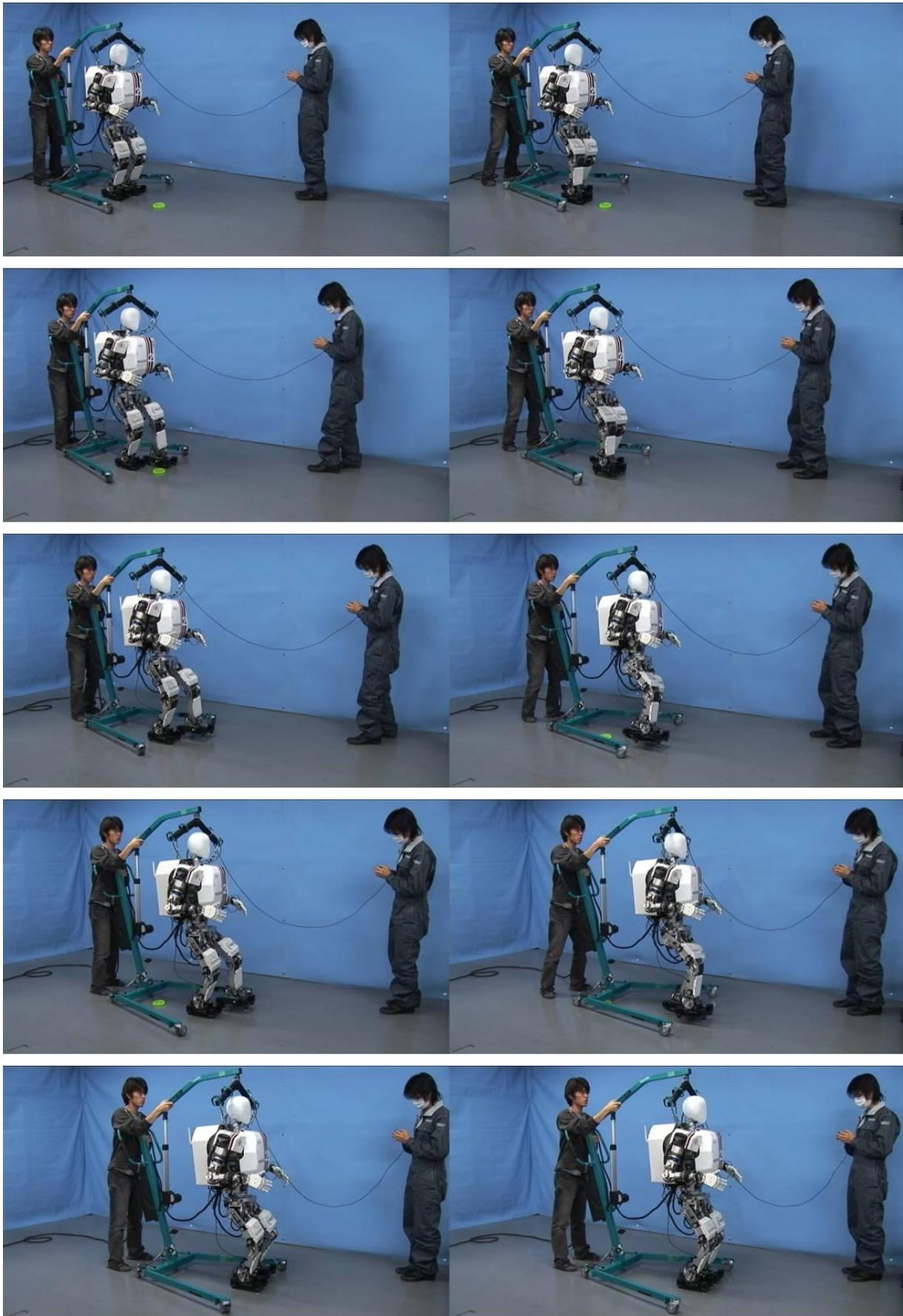


Figure 5.32 Walking experiment on uneven ground(Experiment④)

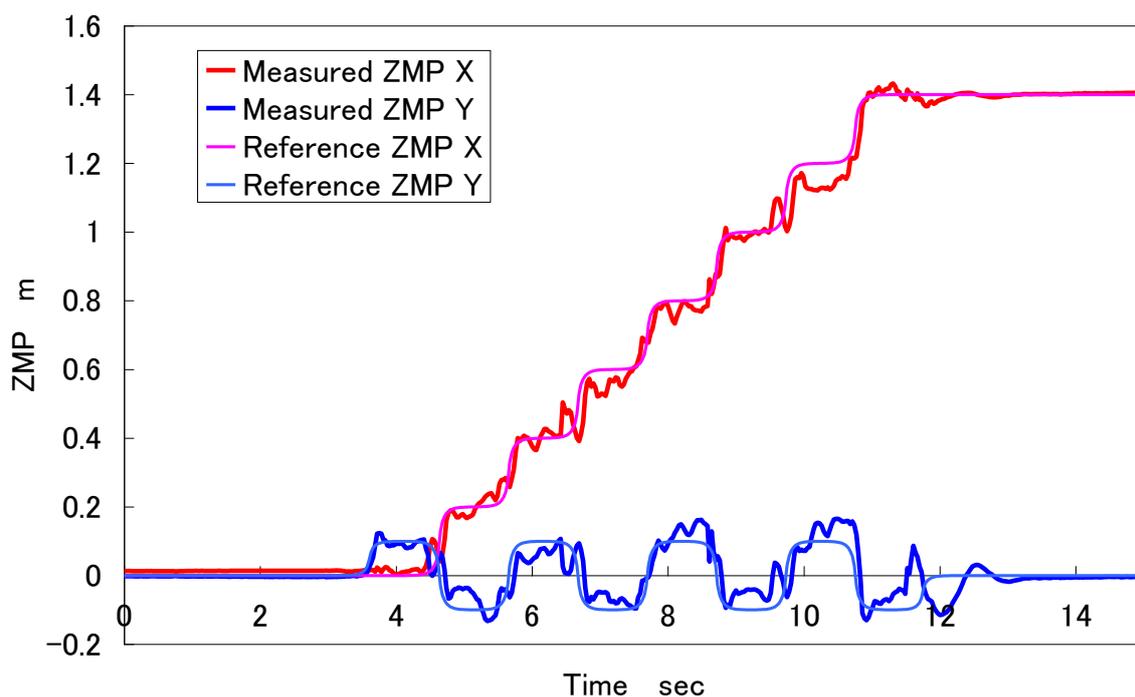


Figure 5.33 ZMP trajectories (experiment④)

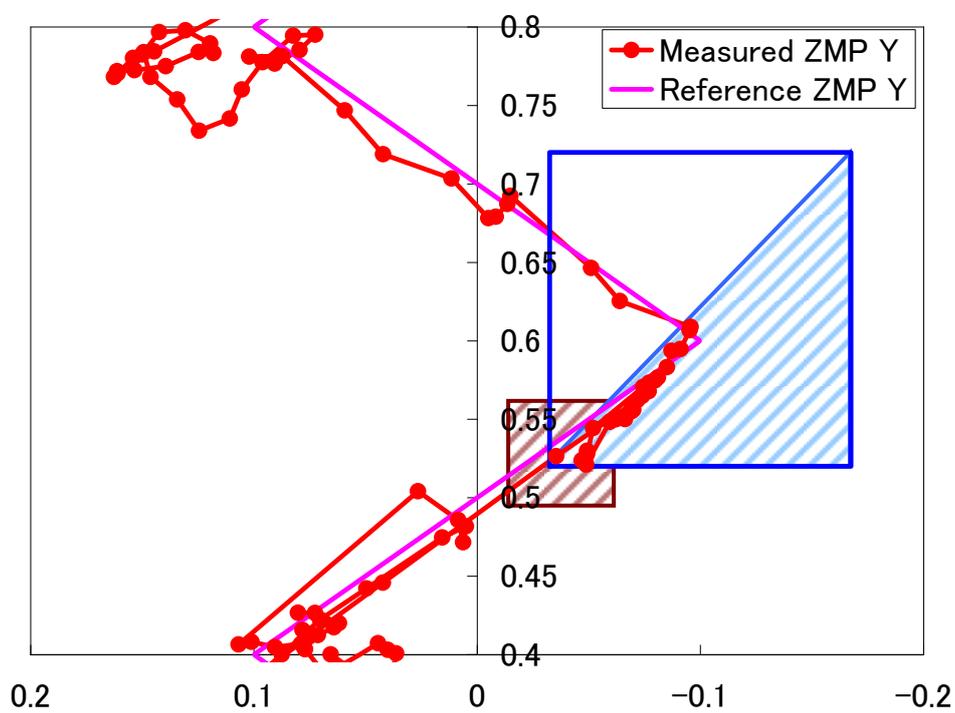


Figure 5.34 ZMP trajectories when walking on uneven ground (experiment④)

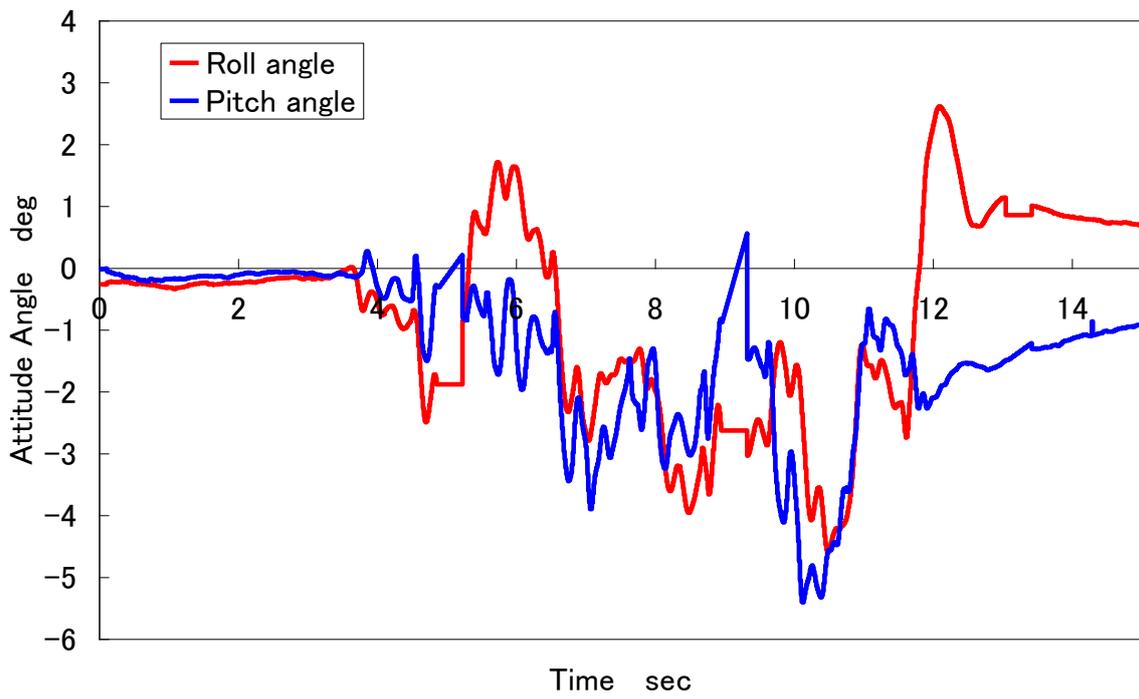


Figure 5.35 Attitude angle (experiment④)

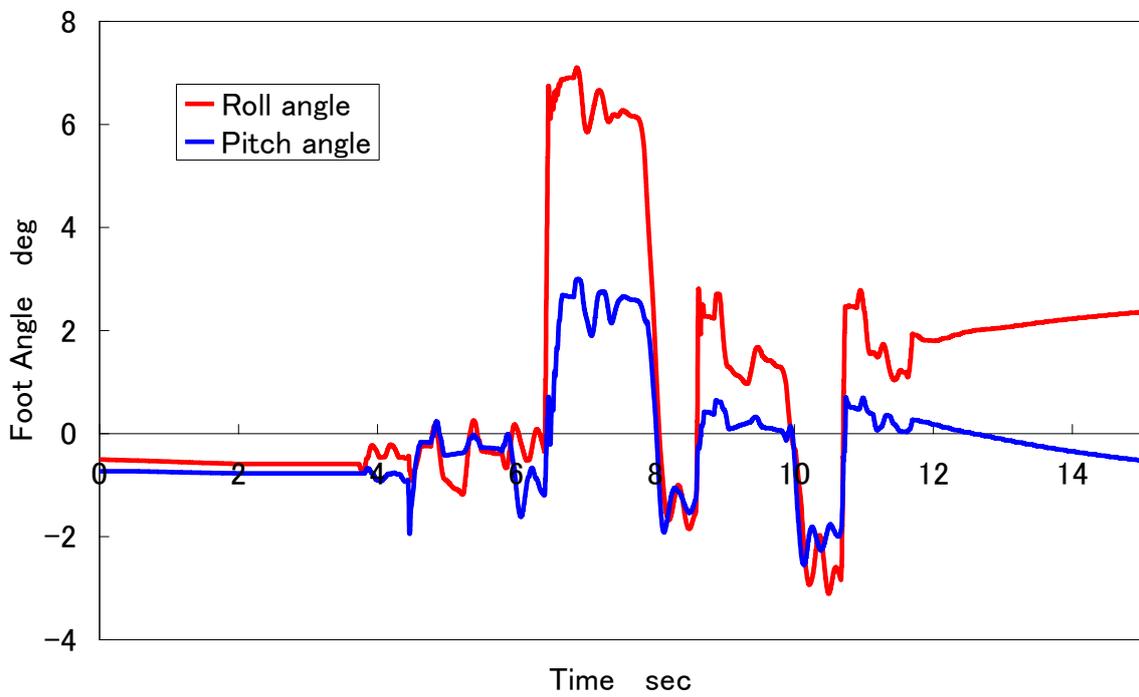


Figure 5.36 Foot joint angle (experiment④)

5.5.2 擬似不整地路面における歩行実験

(1) 実験目的

Roll 軸方向および Pitch 軸方向に倣う凹凸が混在している路面においても，路面検知可能な足部機構とセンサを用いた着地軌道修正制御が有効であることを確認する．

(2) 実験方法

5[mm]～20[mm]の板を実験室内に設置し，Roll 軸方向および Pitch 軸方向に倣う凹凸が混在する不整地路面を擬似的に作成する．その擬似不整地路面において歩行実験を行なう．なお，擬似不整地路面は図 5.37 のようになっている．

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

歩数 : 8 step

歩幅 : 0.2 m/step

歩行周期 : 1.0 s/step

安定化制御：センサを用いた着地軌道修正制御

ZMP 補償制御

姿勢補償制御

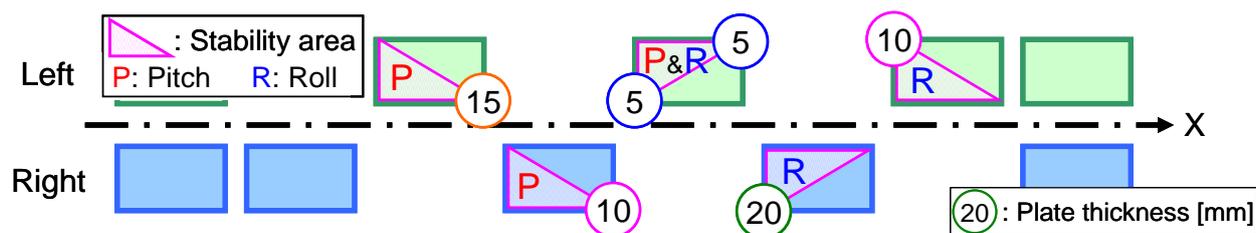


Figure 5.37 Arrangement plan of such uneven ground

(3) 実験結果

実験の様子と結果を図 5.38 から図 5.43 に示す．足底前盤にどのつめを踏んだ場合

においても，適応歩行に成功した．歩行中の **ZMP** グラフより測定値が目標値に追従していることが分かった．また，**X-Y** 平面上で **ZMP** の軌道見ると，しっかりと狙った安定領域に **ZMP** が入っていることがわかる．また，歩行中の姿勢角も実測値が目標値に追従していることがわかり，その時の足関節角のグラフより，段差に応じて足関節を修正したことがみられる．

以上の結果から開発した4点型路面検知足部機構と足部を用いた不整路面適応制御の有効性を確認した．

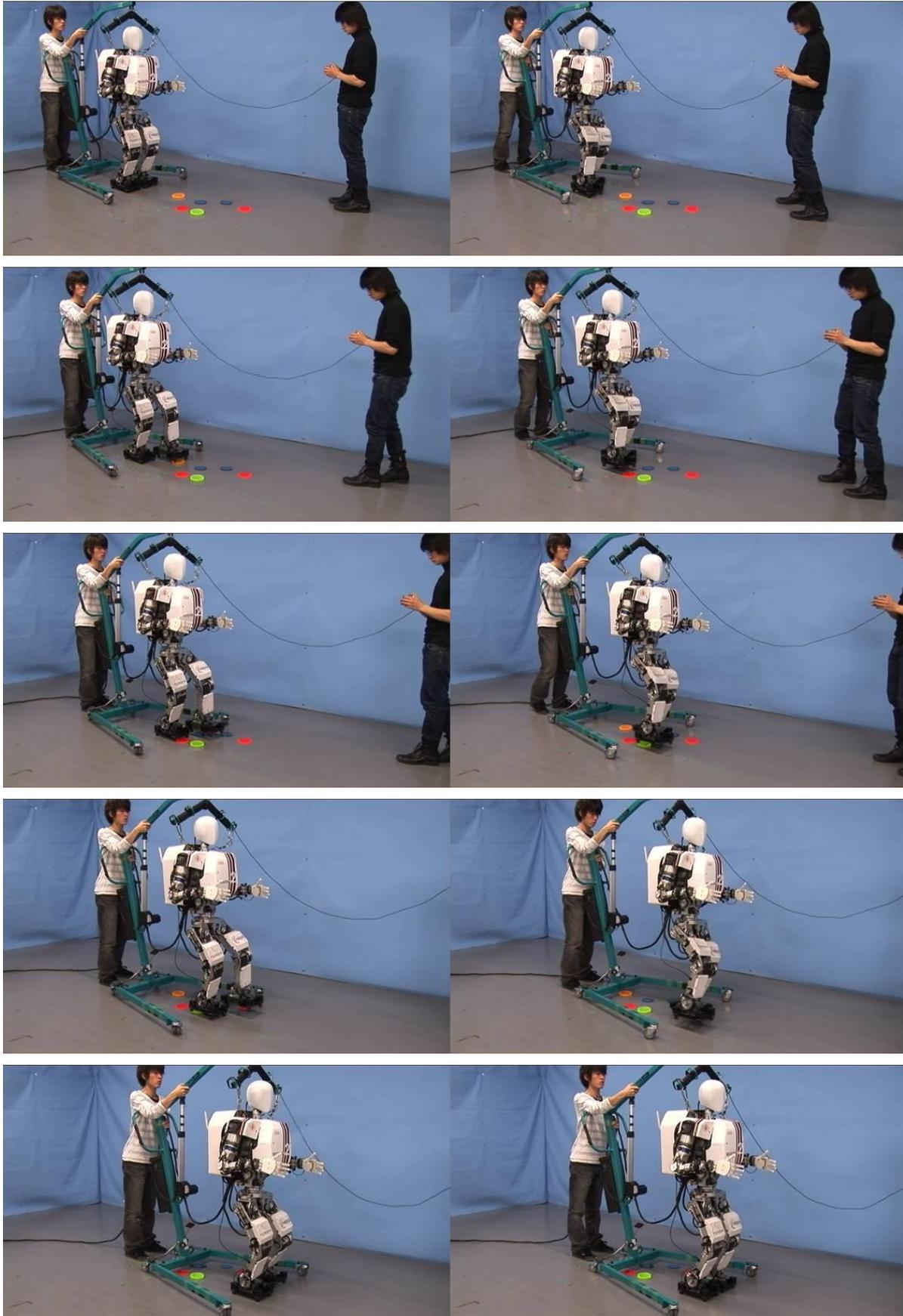


Figure 5.38 Walking experiment on uneven ground

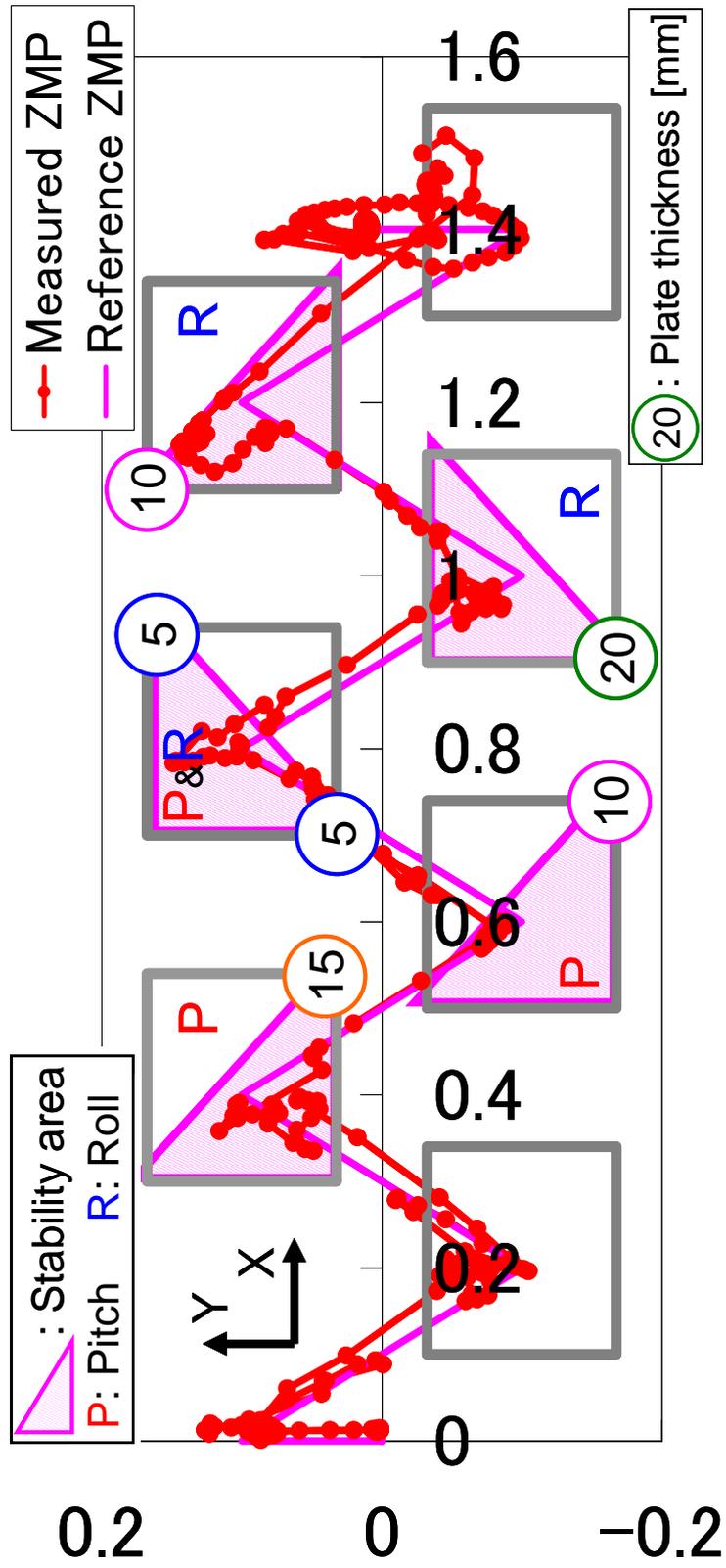


Figure 5.39 ZMP of X-Y plane graph

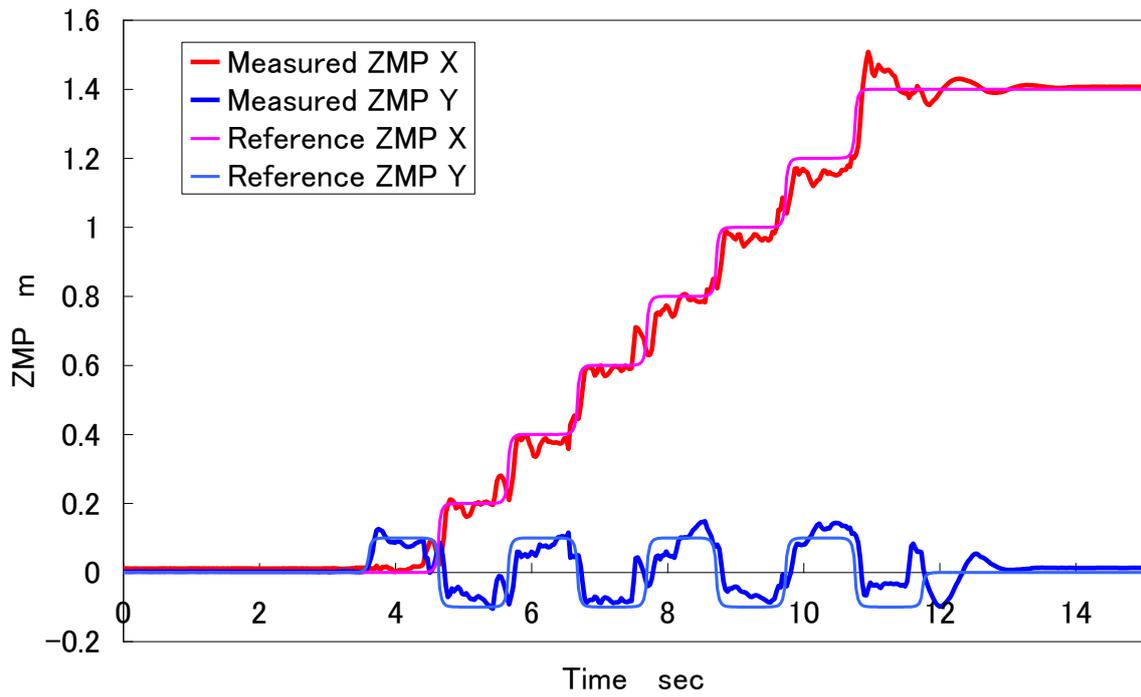


Figure 5.40 ZMP trajectories

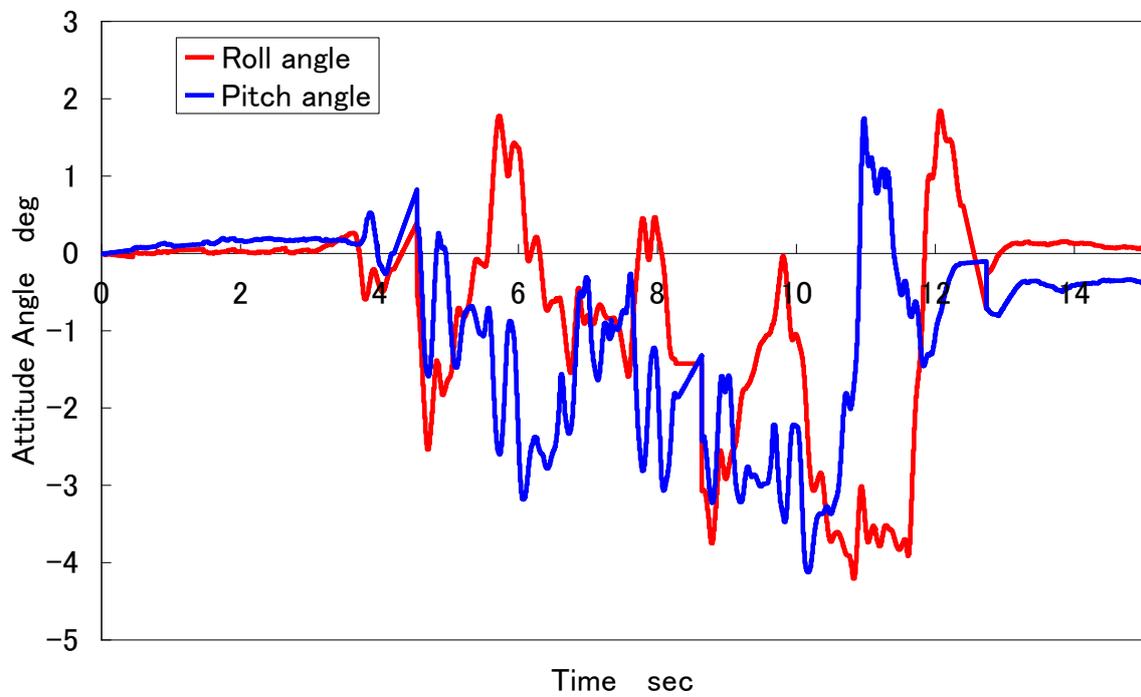


Figure 5.41 Attitude angle

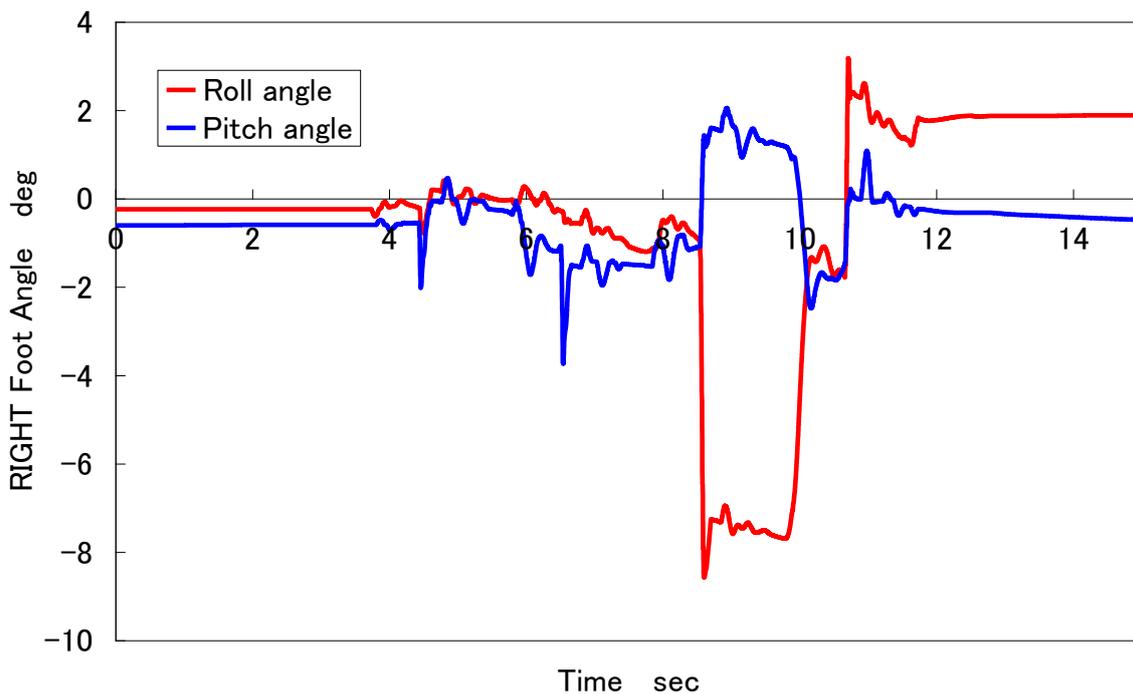


Figure 5.42 Foot joint angle (right)

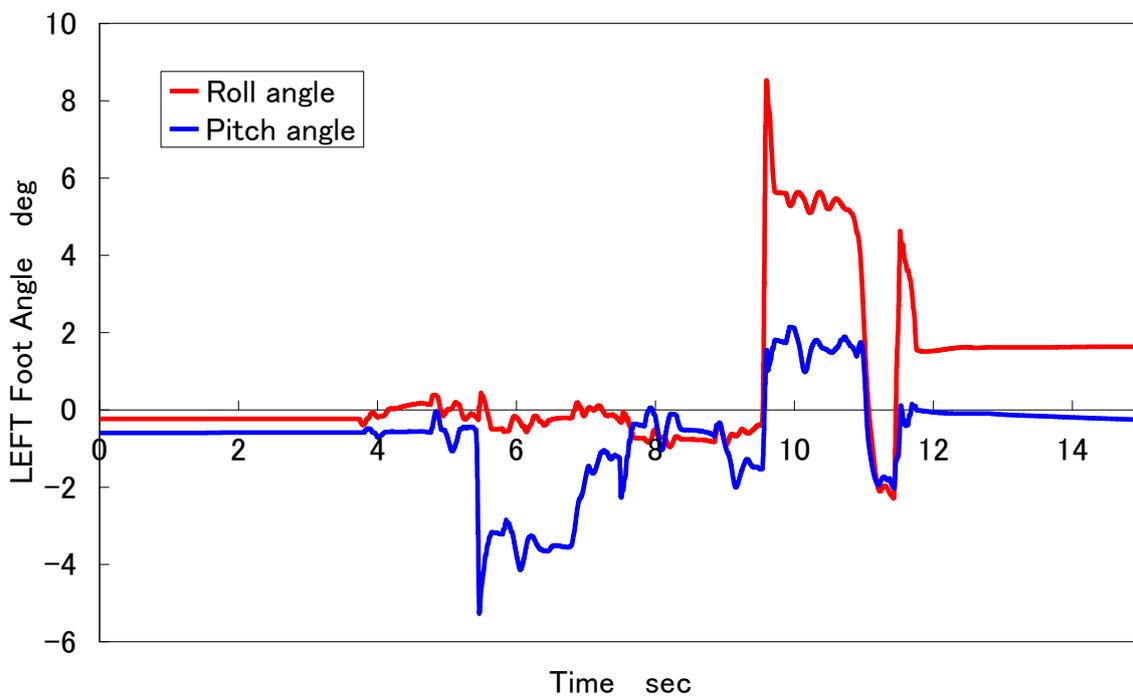


Figure 5.43 Foot joint angle (Left)

5.5.3 傾斜路面における歩行実験

(1) 実験目的

傾斜がある路面においても，路面検知可能な足部機構とセンサを用いた着地軌道修正制御が有効であることを確認する．

(2) 実験方法

傾斜 7[deg]の路面を実験室内に設置し，平地から歩行を開始し，3歩目から傾斜となり，最後7歩目，8歩目で平地にて停止するような歩行を行なう（図 5.44）．

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

歩数 : 8 step

歩幅 : 0.2 m/step

歩行周期 : 1.0 s/step

安定化制御：センサを用いた着地軌道修正制御

ZMP 補償制御

姿勢補償制御

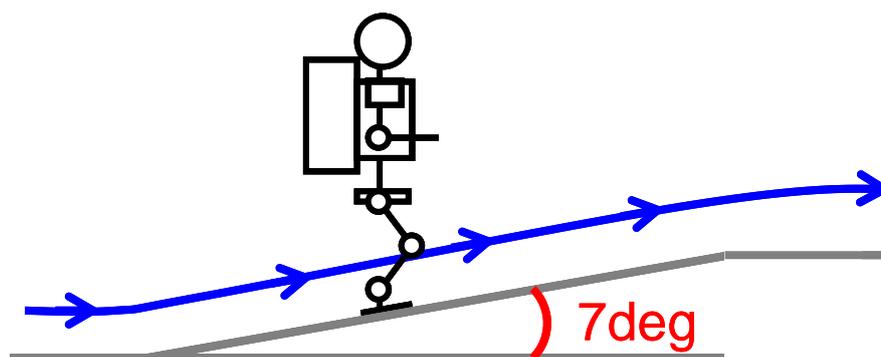


Fig 5.44 Image of inclined ground

(3) 実験結果

実験結果を図 5.45 から図 5.49 に示す. 実験の様子と結果を図 5.45 から図 5.49 に示す. 連続する傾斜路面においても適応歩行することに成功した. 歩行中の ZMP グラフより測定値が目標値に追従していることが分かった. また, 歩行中の姿勢角も実測値が目標値に追従していることがわかり, その時の足関節角のグラフより, 段差に応じて足関節を修正したことがみられる.

以上の結果から開発した 4 点型路面検知足部機構と足部を用いた不整路面適応制御の有効性を確認した.

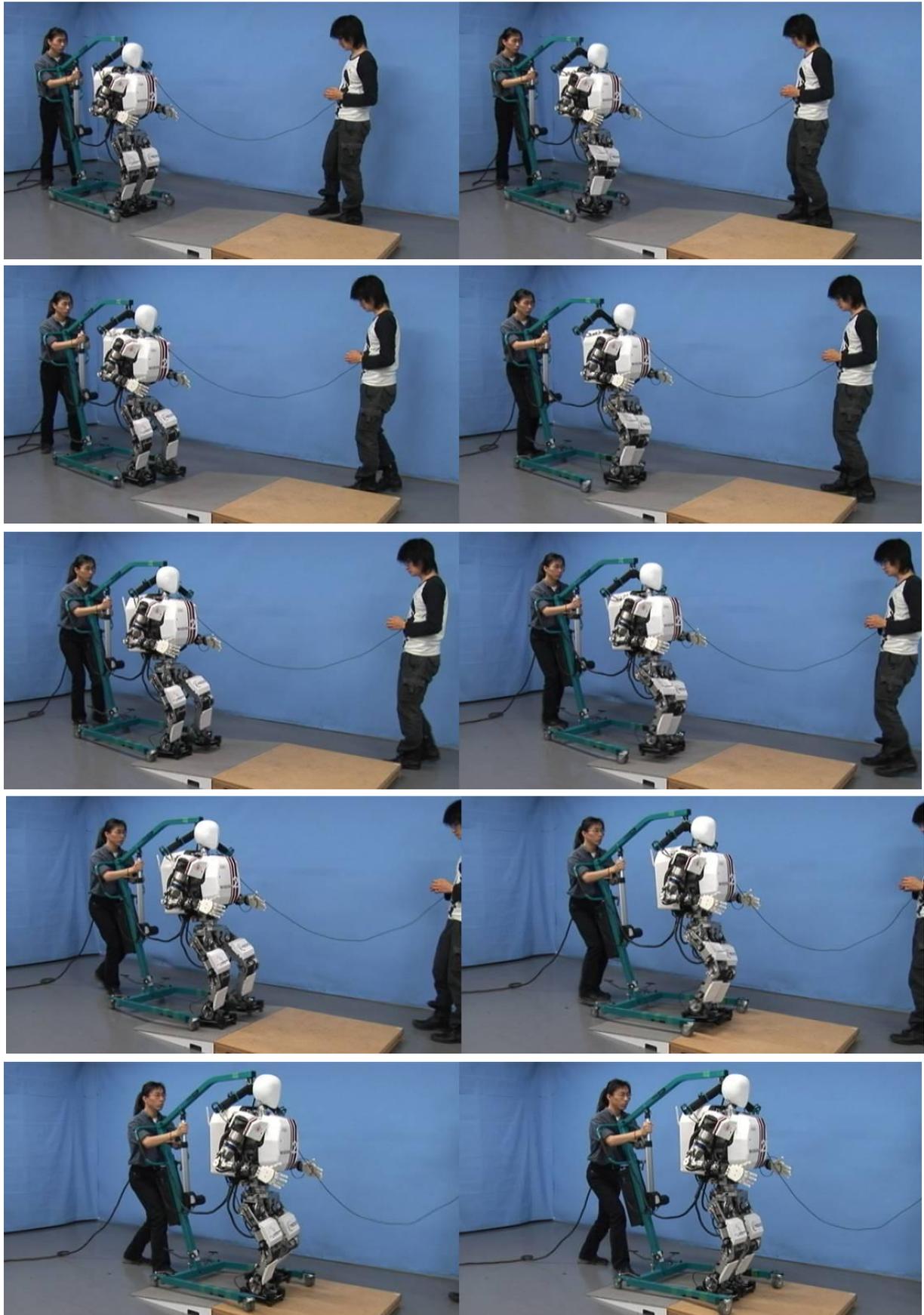


Figure 5.45 Walking experiment on slope of 7.0 degrees

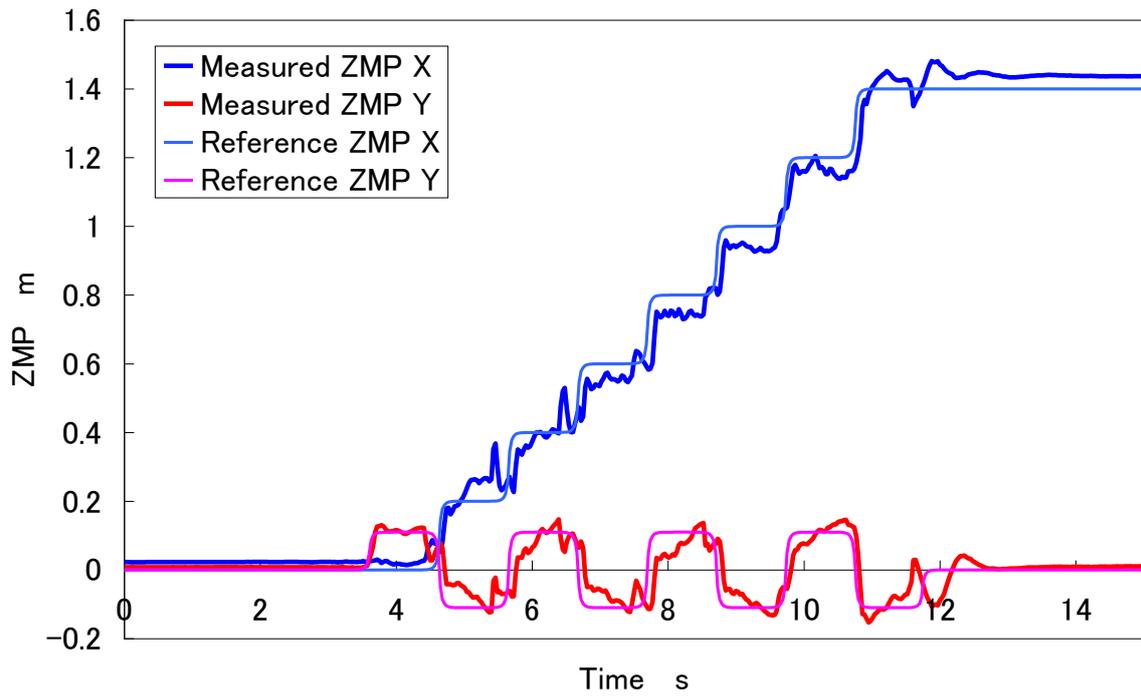


Figure 5.46 ZMP trajectories

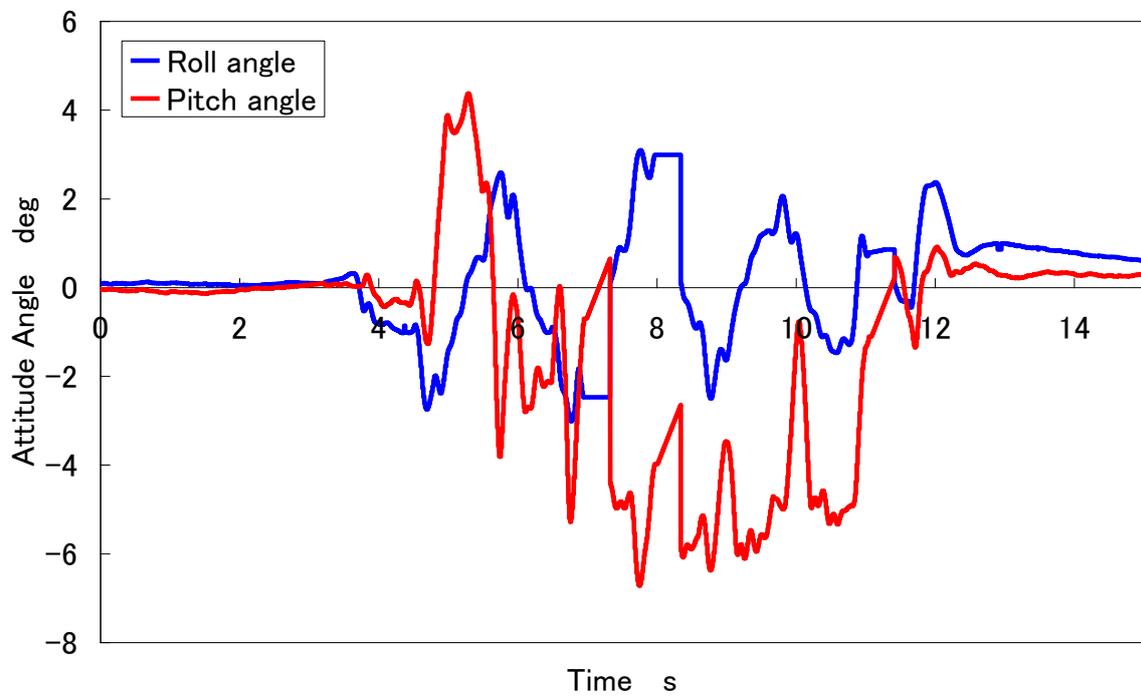


Figure 5.47 Attitude angle

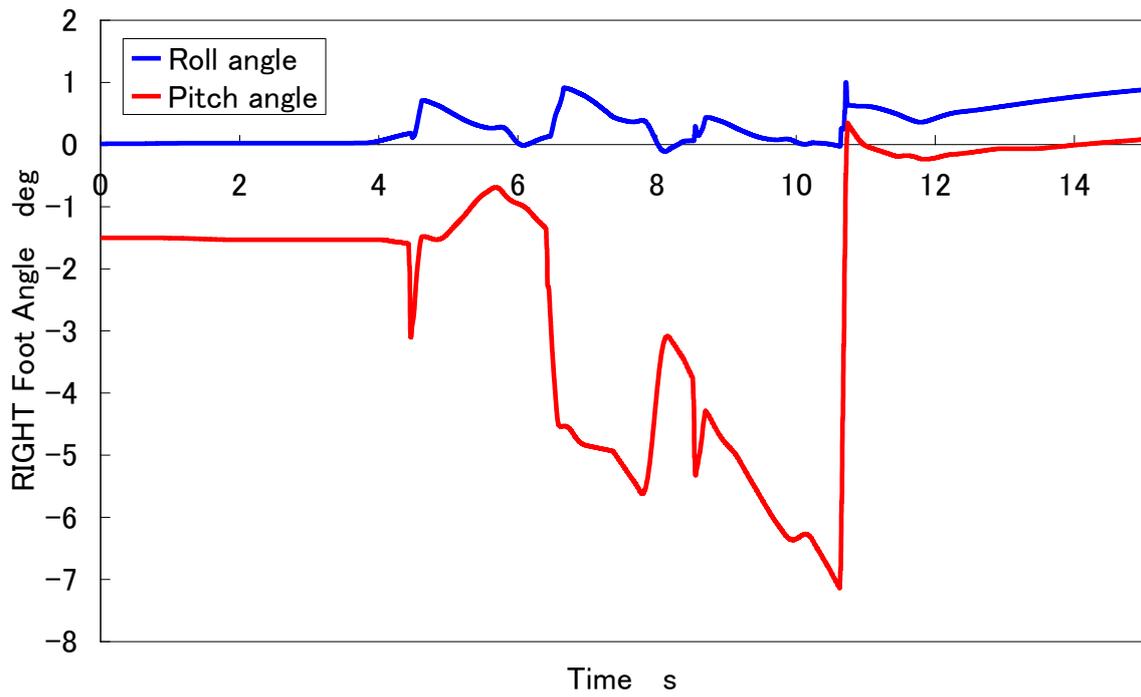


Figure 5.48 Foot joint angle (right)

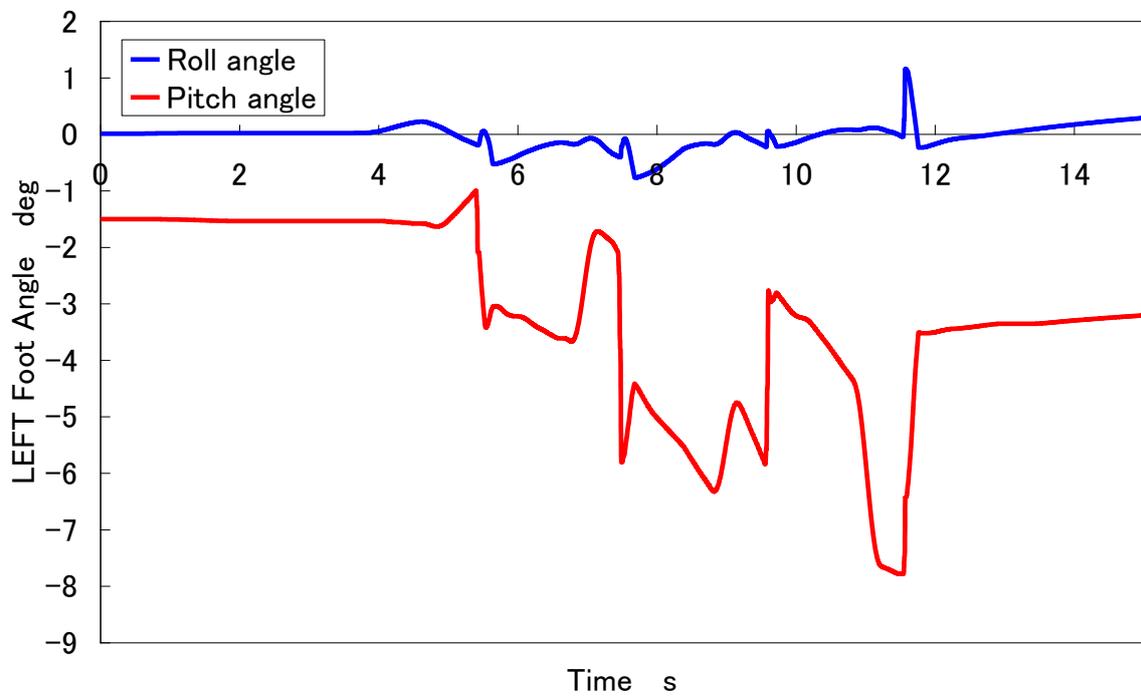


Figure 5.49 Foot joint angle (left)

5.5.4 屋外歩行実験

(1) 実験目的

実環境で歩行において、路面検知可能な足部機構とセンサを用いた不整路面適応制御が有効であることを確認する。

(2) 実験方法

屋外において、歩行実験を行なう。実験を行なった場所は図 5.50 に示す。なお、凹凸や傾斜は次のようになっている。

凹凸：最大 15mm

傾斜：約 8deg

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

歩数 : 8 step

歩幅 : 0.2 m/step

歩行周期 : 1.0 s/step

安定化制御：センサを用いた着地軌道修正制御

ZMP 補償制御

姿勢補償制御

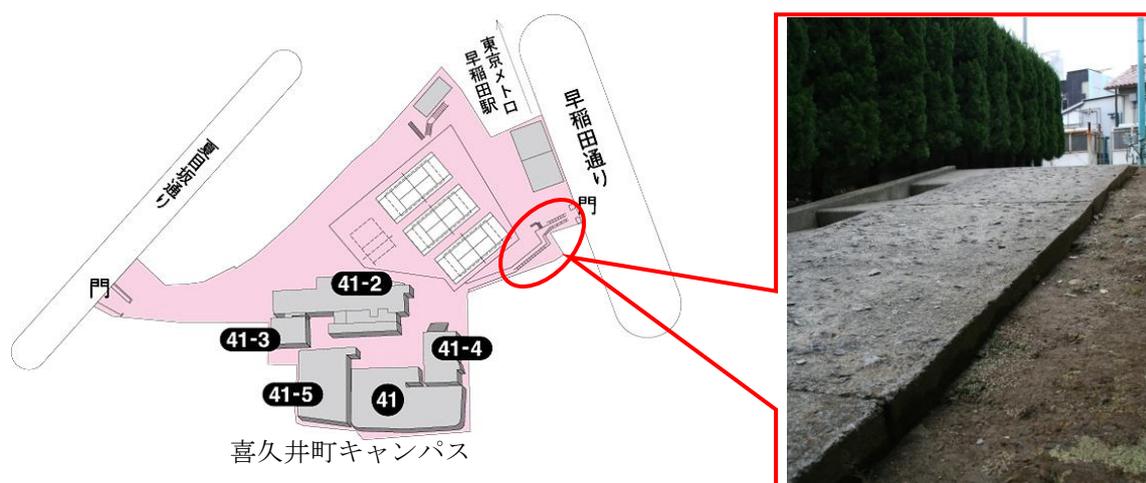


Fig 5.50 Experiment outdoors

(3) 実験結果

実験の様子と結果を図 5.45 から図 5.49 に示す。凹凸が多く、傾斜も大きい路面であったが、安定した歩行に成功した。歩行中の ZMP グラフより測定値が目標値に追従していることが分かった。また、歩行中の姿勢角も実測値が目標値に追従していることがわかり、その時の足関節角のグラフより、段差に応じて足関節を修正したことがみられる。

以上の結果から開発した4点型路面検知足部機構と足部を用いた不整路面適応制御の有効性を確認した。



Fig 5.45 Walking experiment outdoor

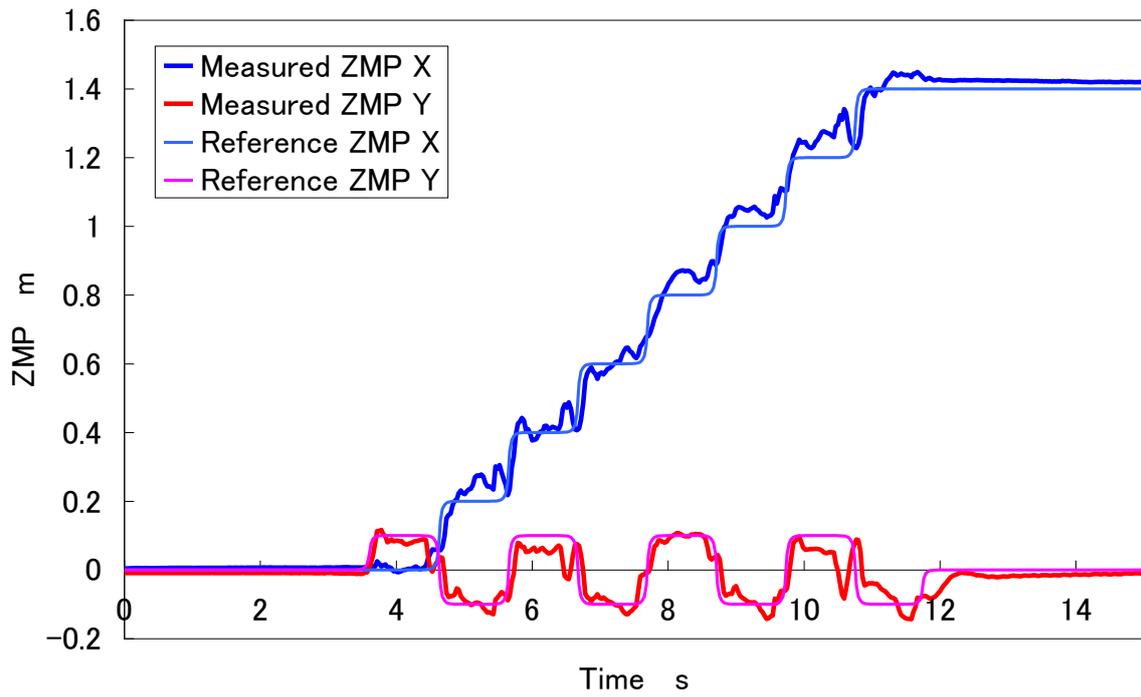


Figure 5.46 ZMP trajectories

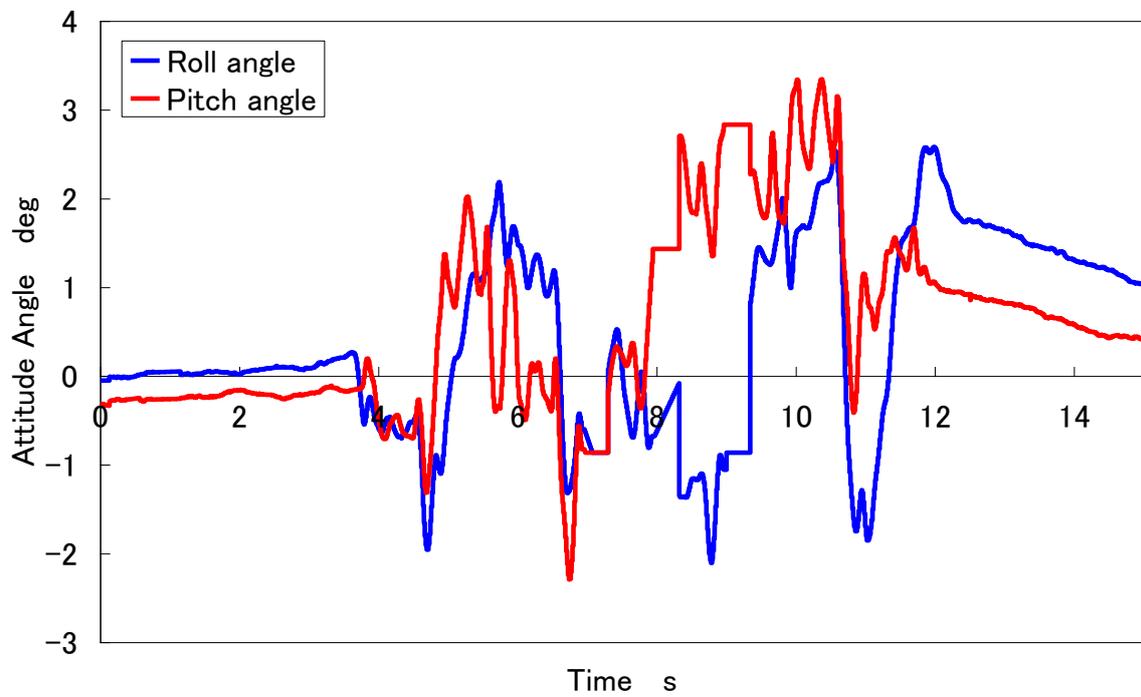


Figure 5.47 Attitude angle

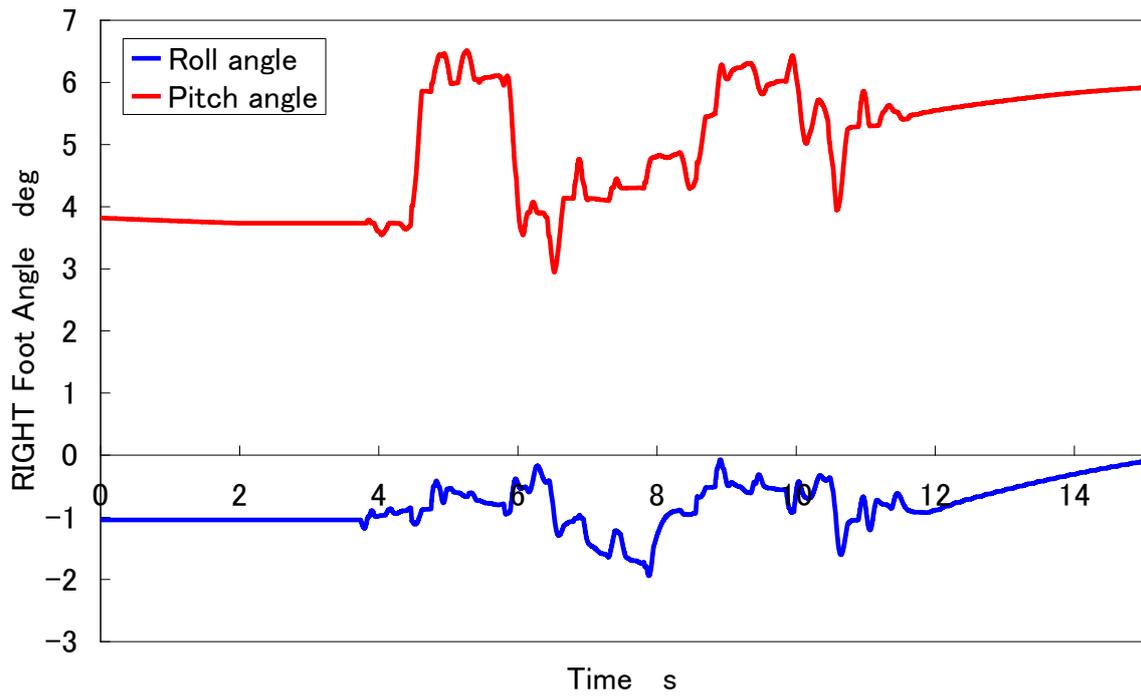


Figure 5.48 Foot joint angle (right)

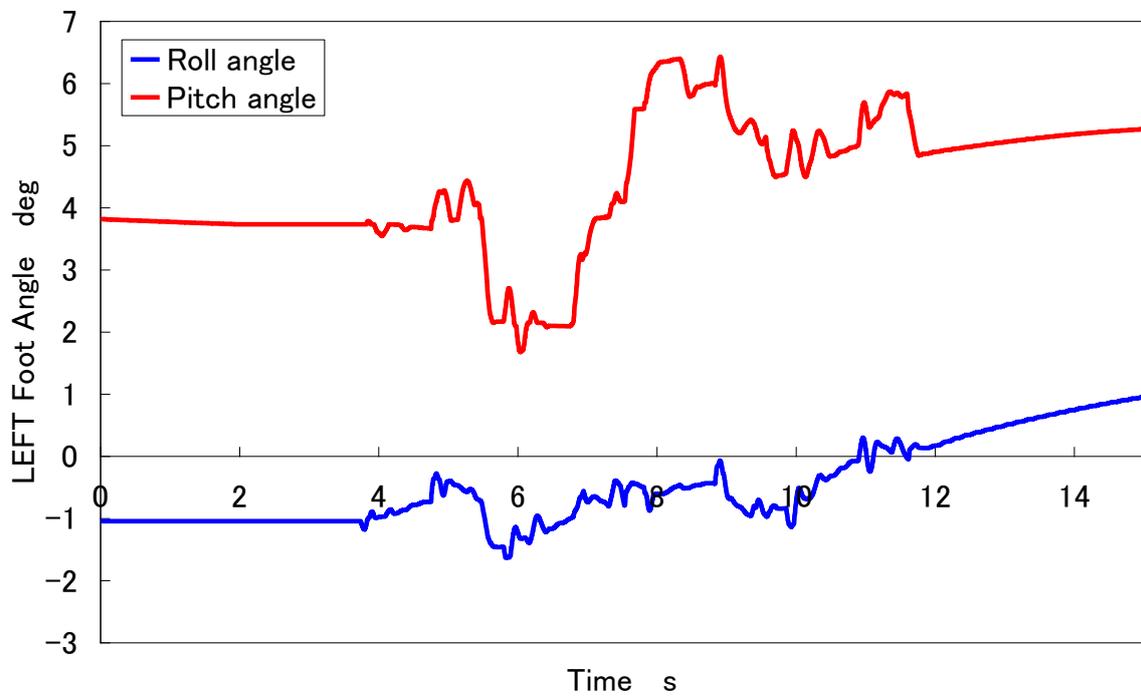


Figure 5.49 Foot joint angle (left)

5.5.5 考察

(1) 4点型路面検知足部機構

不整路面に対する適応性の向上として、路面検知可能なセンサを使用した不整路面適応制御を導入した。これにより、安定領域の確保が難しかった不整路面においても安定した歩行が可能となった。また、センサの値に移動平均を用いるなどして、ノイズやセンサの振動などの影響を抑制した。

この結果、これまでよりセンサの信頼性が向上し、Roll軸方向で20[mm]程度の大きな凹凸に倣うことに成功した。

しかし、問題点もまだ存在している。その1つがセンサのストロークである。2007年度20[mm]だったストロークを本年度は7[mm]まで短くすることに成功したが、それでもまだ凹凸に引っかかってしまう可能性がある。計算上では限りなく0[mm]まで近づけても歩行できることが確認され、ストローク3[mm]での歩行にも成功することができたが、歩行が不安定になってしまった。これを解決し、よりストロークを短くするにはセンサの変更を含めた再検討が必要であると考えている。例えば、小型のリニアエンコーダなど高い精度が保障されたものがよいと思われる。今回はリニアエンコーダの使用も検討したが、どうしても大きくなってしまったため使用を見送った。今後、小型で軽量なリニアエンコーダが手に入れば、リニアエンコーダに変更すると安定性が向上する可能性もあると考えられる。

(2) 4点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御

前述のように、不整路面に対する適応性の向上として、路面検知可能なセンサを使用した不整路面適応制御を導入した。これにより、安定領域の確保が難しかった不整路面においても安定した歩行が可能となった。また、センサの値に移動平均を用いるなどして、ノイズやセンサの振動などの影響を抑制した。この結果、これまでよりセンサの信頼性が向上し、Roll方向で20[mm]程度の大きな凹凸に倣うことに成功した。

しかし、成果であらゆる路面において歩行が可能となったわけではない。今回成功した20[mm]の凹凸は変形しないということが前提となっている。そのため、砂利道で石が踏んだときに転がってしまうような路面では歩行が困難となる。また、雪道などでは4点接地としたつめが刺さってしまう可能性もある。今後このような路面においても歩行可能な制御を開発していくことが必要であると言える。そして、それにはまずロボットの姿勢制御の向上が必要であると考えられる。第4章でも述べた姿勢角

センサの性能の向上が必須である。今後、姿勢角の値を 1msec で取得可能な姿勢角センサなどが開発されれば、ロボットの安定性は劇的に向上する可能性があると思われる。

5.6 まとめ

前述のように不整路面に関してはこれまでも多く研究がされてきており、ハードウェアでは4点接地となる各つめにロック機構を設けた WS-5(Waseda Leg – No.5)を開発し、20[mm]の凹凸がある路面の歩行に成功している。また、ソフトウェアでは、非線形コンプライアンス制御を用いた着地軌道修正制御を開発し、不整路面歩行に成功している。しかし、これらは一長一短であった。そこで、本年度はハードウェアとソフトウェアを統合することによって不整路面歩行の実現を目指した。

新型のハードウェアは、ソフトウェアとの統合を最初から考え、ロック機構を搭載せず、できるだけ軽量となる足部機構の開発を目指した。そして、足部中央付近の凹凸やうねり路面への対応のために点接地にすることによって、凹凸を避けることにした。このようにして、軽量（重量：約 1.5kg）かつ剛性が高く、ソフトウェアのために路面検知用のセンサを4つ搭載した足部機構を開発した。

ソフトウェアでは、ハードウェアに搭載されている4つのセンサを使用した着地軌道修正制御を考案した。これまでの不整路面歩行では、支持多角形を大きく確保しようと必ず4点で接地することを目指していた。しかし、今回は軽量化のためロック機構を搭載しなかったため、制御によって接地する3点を決定する必要があった。その方法としては、4つのセンサのうち一番早く路面を検知したセンサに応じて足関節の修正角度を算出する3つのセンサを決定した。また歩行パターンの変更により、十分な俵い時間を確保した。これによりセンサのストロークも短くなり、早い俵い動作を実現した。

以上のようなハードウェア、ソフトウェアを開発し、これまでには実現できていなかった 20[mm]の凹凸に Roll 方向で俵うことができるようになった。さらにうねり路面へも対応できるようになり、実環境不整路面（傾斜：8[deg]，最大凹凸：15[mm]）での歩行に成功した。

本年度の成果であらゆる路面において歩行が可能となったわけではない。今回成功した 20[mm]の凹凸は変形しないということが前提となっている。そのため、砂利道で石が踏んだときに転がってしまうような路面では歩行が困難となる。また、雪道などでは4点接地としたつめが刺さってしまう可能性もある。今後はこのような路面においても歩行可能な足部機構を開発していくべきである。それには、今回の製作した

ような4点接地する剛体の足部ではなく、路面を吸収するような柔らかい足部機構が必要であると考える。

本研究にてうねり路面を含む凹凸 20[mm]の不整路面の歩行に成功した。しかし、これは路面が十分に硬く、変形しないことを前提としている。そのため、砂地や雪道、柔らかいクッションの上などは歩行できない。また、砂利道なども接地した瞬間に石が動いてしまったら転倒する可能性が高い。今後はこのような路面においても安定した歩行ができるようにしていかなければならないと考える。

また、より大きな凹凸にも倣えるようにビジョンセンサとの統合も考えられる。ビジョンセンサは1%程度の誤差があるため、ビジョンセンサの情報のみで不整路面を歩行することは困難であると考えられる。そのため、ビジョンセンサと本研究で開発した不整路面歩行制御を統合することにより、これまで以上に大きな凹凸に倣える可能性がある。

また、不整路面歩行のための歩行パターンを作成してわかったことであるが、安定した歩行を行なうには、着地衝撃をできるだけ発生しないように、遊脚前期は速くし、遊脚後期は遅くすることで低速で足を下ろした方がいいということが分かった。現在の WABIAN-2R の関節には、全てハーモニックドライブを採用し減速比が非常に高くなっているため、そのような動きが不可能となっている。そこで、Pitch 軸方向に関して、減速比等の再検討をする必要があると考える。もしそれにより、股関節等の Pitch 軸の減速比を低くすることができれば、安定した歩行ができるようになる可能性がある。また、ロック・フリー機構などにより、実際の人間のような振子運動ができるようにする方法もある。いずれにしても、本研究を通して、今後の WABIAN-2R の発展には構造の再検討が必要であると感じた。

以上のようにして、いかなる路面でも歩行できるような制御系を開発していくべきである。

第6章 3点型路面検知足部機構を用いた 不整路面適応制御の開発

- 6.1 はじめに
- 6.2 基本設計
- 6.3 3点型路面検知足部機構の開発
- 6.4 3点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御
- 6.5 評価実験と考察
- 6.6 まとめ

6.1 はじめに

第5章で4点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御の開発について述べた通りに、足底4隅に路面検知センサを兼ねた直動の爪部を有するセンサ式足部機構を開発した。この足部機構により、Pitch軸方向とRoll軸方向ともに20[mm]の段差に対して扱うことが可能となり、屋内の擬似不整地における歩行に成功した。さらに、屋外の実環境下における不整地での歩行にも成功した。しかし、センサの信頼性不足により誤検知が発生する問題があり、さらに屋外の不整地においては、凹凸路面上から爪部が滑落することがあり、歩行成功率が低かった。

2009年度の研究では、まず、2008年度、足底4隅にある路面検知を行なう直動の爪部から3点選択して使用していたことが原因である安定余裕の小ささを改善するために、はじめから3点型の爪部に変更することで安定性向上を図る。また、センサについて改良を行い、誤検知の発生を防ぐ。特に、爪部の直動軸を強化し、路面との衝突などによる軸の曲げに起因する動作不良の防止を図る。さらに、爪の大きさや形状、底面素材などを見直して滑落防止を図り、実環境下での歩行成功率向上を目指す。加えて、将来の歩行高速化に備えて踵接地歩行に対応した改良を行う。

6.2 基本設計

6.2.1 目標路面

最初に、本研究にて対象とする目標路面を確認する。本研究で目標とするのは、実環境下の不整地における安定歩行である。不整地と一言と言っても、点字ブロックのような凹凸路面から、砂地のように足場が変形する脆弱路面めで、様々な路面が考えられる。しかし、我々の生活環境を見回してみると、後者のような脆弱路面は少なく、固く整備された路面が多い。したがって、本研究で対象とする路面は、前者のような凹凸や傾斜の存在する路面とする。また、2008年度のように点接地型の足部にとっては、凹凸も傾斜も高低差のある段差に還元できるため、本研究で対象とする路面は一定の高さの段差を含む路面とする。第4章、第5章にて述べたように未知の不整路面での歩行を実現するためにはビジョンセンサをよく使うが、このようなセンサも1%程度の誤差があり、仮にロボットの全長が1.5[m]だとすると10[mm]~20[mm]の段差に適応できない問題がある。そこで、定量的な目標値を ± 20 [mm]の段差がある路面を目標路面と設定する。

6.2.2 4点型路面検知足部機構の問題点

2008年度の問題点として、まず、足底4隅にある路面検知を行う直動の爪部から3点選択することによって使用していたことが原因で安定余裕が小さいこと。路面検知センサの信頼性が低いこと。実環境下の凹凸路面からの爪部の滑落に対する対策が考慮されていないことが上げられる。したがって、2009年度はこれらの問題点に対して対策を行なった上で、実環境下における20[mm]までの段差を含む路面での歩行成功率向上を目指す。

対策としては、安定余裕に関しては3点接地型の爪部への変更、路面検知センサに関しては、機構の再考と直動軸の強化、滑落対策は爪の形状や表面素材の検討を行なう。

6.3 3点型路面足部機構の開発

6.3.1 3点型の爪部への変更

2008年度のセンサ式足部機構は足底4隅の爪部から、どの点をはじめに接地したかによって3点選択をして接地を行っていた。その仕様が原因で、図6.1のように設定ZMPをそれぞれの支持多角形が形成する安定領域の共通部分にしか設定できず、さらに、安定領域の境界までの距離、すなわち安定余裕が小さか

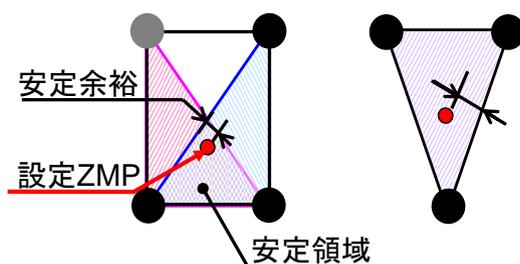


Figure 6.1 comparison of 4-point contact and 3-point contact

った。

そこで、はじめから3点型の爪部に変更した。この変更により、制御に関しても3点選択の部分が省略され、簡易なものとなった。3点の配置は倣い動作のときに異方性がないように二等辺三角形型にした。

6.3.2 路面検知センサ機構

(1) 直動型と回転型

2008年度の路面検知センサは誤検知が発生し、倣い動作を不完全なものにしてしまうという問題があった。その原因として、遊脚期におけるセンサ爪部の凸面との衝突や、着地時における路面との衝突によってセンサの直同軸が曲がったり、リニアブッシュに押し込まれることによってボール痕ができたりし、それによりセンサの動作不良が発生するという問題があった。これには、センサ部が直動であるために、横からの荷重を逃がすことができないことが原因であった。したがって、まずは直動型センサの妥当性を検討した。

直動型センサの別案として、回転型センサへの変更を検討した。図6.2のように爪先側の爪部のみ接地を行なう爪部と検知を行なうセンサが分離した回転型センサへ変更し、凸面に引っかかった場合に前方からの荷重を受け流す機構を考案した。

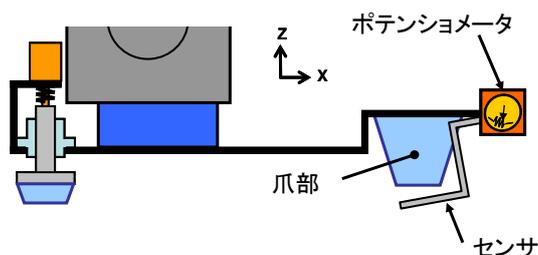
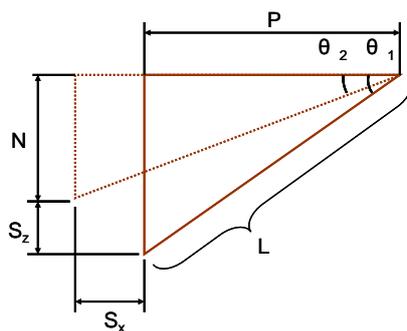


Figure 6.2 Change to rotation sensor



- L: センサ腕長さ[mm]
- S_z: センサ先端のZ軸方向変位量[mm]
- S_x: センサ先端のX軸方向変位量[mm]
- P: ポテンショメータのx方向への張り出し[mm]
- N: 爪の高さ[mm]

$$P = L \cos \theta_1$$

$$N = L \sin \theta_2$$

$$S_z = L(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) = 7$$

$$S_x = L(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) = 2$$

$$L = \sqrt{P^2 + (N + S_z)^2}$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{N}{L}\right)$$

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{N + S_z}{L}\right)$$

$$S_x = \sqrt{P^2 + (N + S_z)^2} \left(\cos\left(\arcsin\left(\frac{N}{\sqrt{P^2 + (N + S_z)^2}}\right)\right) - \cos\left(\arcsin\left(\frac{N + S_z}{\sqrt{P^2 + (N + S_z)^2}}\right)\right) \right)$$

Sz=7mm, Sx=2mm, N=30mmのとき

L ≒ 89でP ≒ 100mm

つま先が約80mm前へ出っ張る

Figure 6.3 Calculation to axis position of rotation sensor

しかし、この機構は爪の前側と後側で検知できる距離が違うこと、距離が小さい側で十分なストロークを確保するためには軸の位置を前方へ配置しなくてはならず、ハードウェア全体が大きくなってしまいうことが問題となった。計算上、2008年度同様に爪部の高さが20[mm]、センサのストロークが7[mm]の場合、爪部の位置は前方に80[mm]突き出されることとなるため（図6.3）、大幅にハードウェアの寸法を変更しなくてはならない。また、詳しくは後述するが、センサが爪部と分離しているために爪裏全体の凹凸を検知できないという問題もあった。また、根本的な問題として、前方からの荷重は受け流せるが、左右方向からの荷重には弱く、問題を完全に解決できないことが危惧されたため、回転型は廃案となり、今年度は直動型を改良することに決定した。

(2) 一体型と分離型

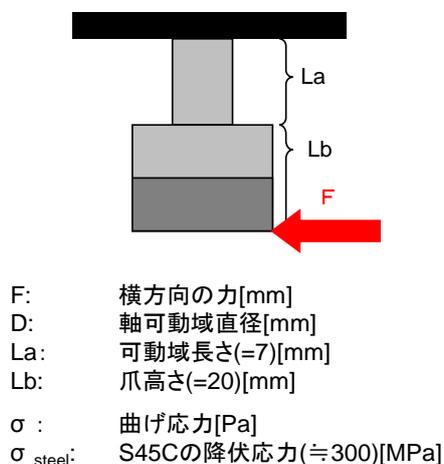
次に、2008年度のセンサは接地を行なう爪部と検知を行なうセンサが一体であるため、着地時の爪部に対する荷重がセンサ部にも伝わり、直同軸の曲げやボール痕の問題が発生して動作不良が起きたのではないかと問題に対して考察を行った。

この問題に対する対策として、センサを爪部と分離することを検討した。これにより、センサへの荷重が急激に弱まり、問題が解決するのではないかと考えた。また、センサが爪の中心で直動するような機構にした場合、センサに荷重がかかった場合のモーメントアームが短くなることも、耐久性向上に向いているのではないかと考えた。

しかし、今回目標とするのは実環境下における不整地への適応であることを考えると、



Figure 6.4 Comparison of integral sensor and separation sensor



$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{M}{I} y \\ M &= F(L_a + L_b) \\ I &= \frac{\pi d^4}{64} \\ \therefore \sigma_{steel} &= \frac{F(L_a + L_b)}{\frac{\pi d^4}{64}} \cdot \frac{d}{2} = \frac{32F(L_a + L_b)}{\pi d^3}\end{aligned}$$

F = 1000[N]のとき必要な直径は約 10[mm]

Figure 6.5 Diameter of axis

センサを分離することは問題であった。分離型はセンシング可能域が狭く、爪部のセンサ以外の部分で凸面に接地した場合、倣い動作を行えないからである（図 6.4）。室内に段差をつくった擬似不整地と違い、2008 年度より屋外歩行の実験に使用している早稲田大学喜久井町キャンパス内の凹凸路面は細かい凹凸も多く、センシングを逃す可能性は十分に考えられた。従って、今年度も爪部とセンサは一体型とするのが妥当であると結論した。

(3) 直同軸の強化

直動型を改良するにあたって、まずは直動軸の強化のために、曲げの起こらない軸の直径を検討した。軸に対してせん断方向にかかる荷重は安定歩行時に 50[N]ほど、転倒時でも 200[N]ほどであった。計算上、2008 年度の直径 6[mm]の炭素鋼 S45C の軸だとぎりぎりなのであった。さらに、瞬間的には 800[N]出ているデータもあった。この場合は 2008 年度の軸では耐えられない。そのため、2009 年度は 1000[N]のせん断方向の荷重に耐えられることを目安とした。2008 年度のように足部のベース部分にリニアブシュの先端がある場合、必要な軸の直径は 10[mm]であることが図 6.5 の計算より導かれたため、2009 年度の軸の直径は 10[mm]となった。また、設計時、市販の内径 10[mm]リニアブシュが長かったため、リニアブシュおよび荷重を受けるための部品の先端をベースの下へ 10[mm]突き出すようにした。このことにより、モーメントアームが短くなり、さらにせん断方向の荷重に対して耐久性が増した。

次に、ボール痕に対する対策を検討した。原因としては、2008 年度の直同軸は炭素鋼 S45C であり、表面性状の指定や焼入もされていなかった。そのため、表面の硬度や耐摩耗性に不安があることが考えられた。そのため、2009 年度は

材質を軸受鋼 SUJ2 とし，さらに表面正性状を Ra0.4 に指定し高周波焼入れを入れた．これらにより硬度や耐摩耗性が上昇した．

ボール痕対策の検証のために以下のような実験を行った．図 6.6 のように 20[cm]間隔で配置した台の間に直径 10[mm]の S45C の丸棒および対策を施した SUJ2 の丸棒を渡し，垂直荷重(約 100[N])を加えたりニアブシュを通し，左右に 10 往復させた．その結果が図 6.7 である．S45C では 1 往復目からボール跡が残ったのに対し，対策ありの SUJ2 ではボール痕が見受けられなかった．また，この実験以上の荷重を加えた場合については検証していないが，ハードウェア完成後に数多くの実験を行い，転倒して軸に負担がかかることも何度もあったが，ボール痕は残っていないところを見ると，対策の効果は十分発揮されたと思われる．

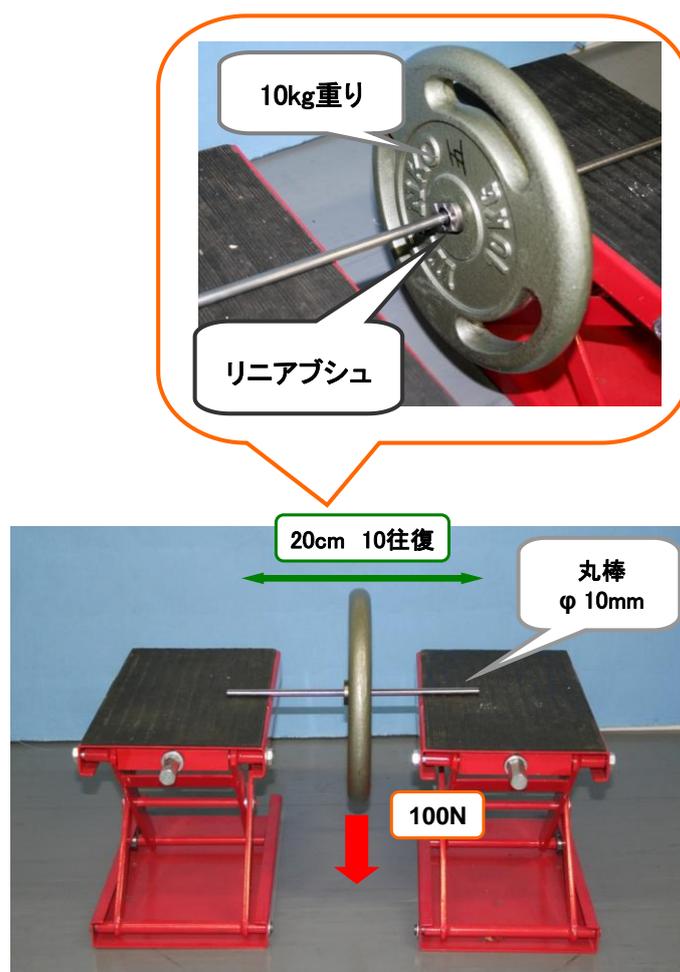


Figure 6.6 Experiment of reinforced axis



Figure 6.7 Experiment result of reinforced axis

(4) センサ上部の小型化

誤差動の問題以外にも問題点は存在する. 3点接地のためのセンサ位置変更後のスペースの問題である. センサ上部の距離を測定する赤外線センサを覆った遮光カバーの部分は, 2008年度の機構では横に広く, 3点接地のためにセンサを踵に配置した場合, WABIAN-2Rの足関節の部品と接触してしまう. そのため, センサ上部の小型化が必要であった.

2008年度の赤外線センサや爪部を下に下ろすためのばねは図6.8のように並列に配置されており, このことが横にスペースをとる原因となっていた. よって, これらを縦に配置し, 省スペース化し, さらに反射板や遮光カバーを小さく設計することで小型化することとした

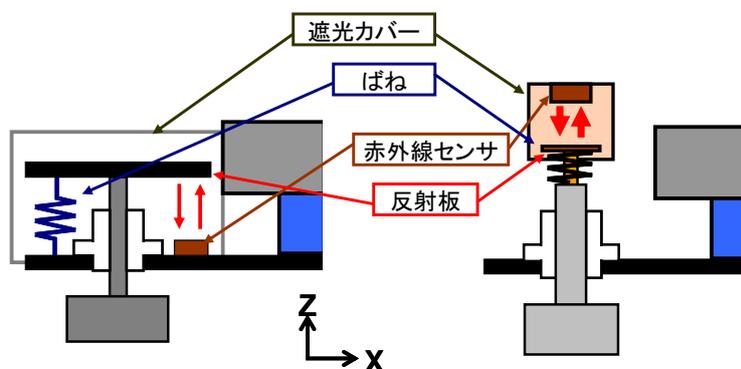


Figure 6.8 Structure of sensor

(5) 基板の変更

2008年度まで使用していた赤外線センサの基板，および距離情報をWABIAN-2RのPC内に送るための2008年度まで使用していたケーブルの中継基板は，コネクタの抜き差し回数が限界であり，接触不良が起きていた．よって，基板を再設計した．製作した基板を図6.9～図6.11に示す．



Figure 6.9 Part of sensor foundation

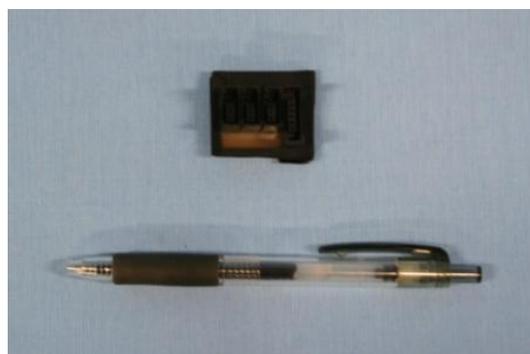


Figure 6.10 Relay part of foot



Figure 6.11 Relay part of rear

(6) その他の改善点

その他に、距離を測定するための赤外線センサの遮光カバーと赤外線センサの反射板が接触することで動作不良を起こす問題もあった。この問題の原因は爪部の Yaw 回転を抑制するものが遮光カバー以外になかったことが原因であり、対策については、後述する Yaw 回転抑制機構の項にて解説する。

赤外線センサ自体も検知距離にあったものに変更した (図 6.12, 図.6.13)。また、この変更により、使用する検知距離の違いから赤外線センサと反射板の距離も短くなり、前述のセンサ上部の小型化に貢献した。



AS-PROX(浅草ギ研)

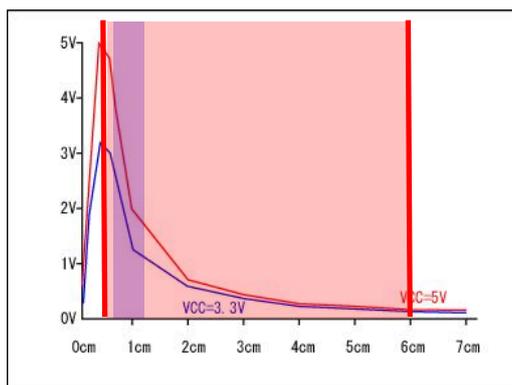


Figure 6.12 Infrared sensors in 2008



KR1210(新光電子)

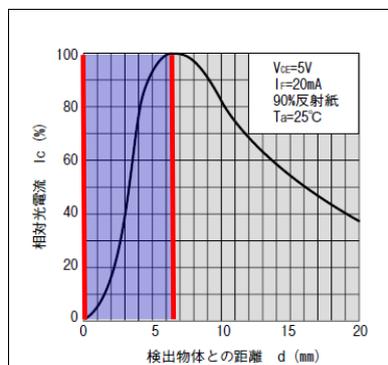


Figure 6.13 Infrared sensors in 2009

6.3.3 Yaw 回転抑制機構

2008年度は爪部のYaw回転を抑制するものが遮光カバーと接触する可能性のある反射板以外になかったため、遮光カバーと反射板の接触により動作不良が起きる可能性があった。また、遮光カバーは固定がそれほど完全になされていなかったため、爪部はYaw回転方向に動くことができ、それが原因で凹凸路面上において滑落が起きたり、Yaw回転により直接転倒したりする可能性があった。また、2008年度は起きなかったが、爪部の直動軸と反射板を固定しているボルト(図6.14)が外れ、回転の抑制が効かなくなり、そのまま転倒する可能性や、遮光カバーが破壊される可能性もあった。したがって、2009年度の足部機構にはYaw回転を抑制する機構が必要であった。

機構として図6.15のような2つの案を考案した。しかし、案2の並列軸はリニアブッシュが2つ必要であるため機構が大きくなること、軸の位置の精度によっては動作が悪くなることを懸念したため、簡素でスペースのとらない案1の金属壁のガイドを設ける方法を採用した。

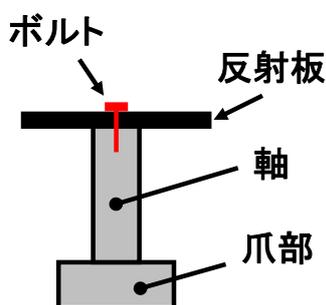


Figure 6.14 Direct acting axis and fixed part of reflected plate on 2008

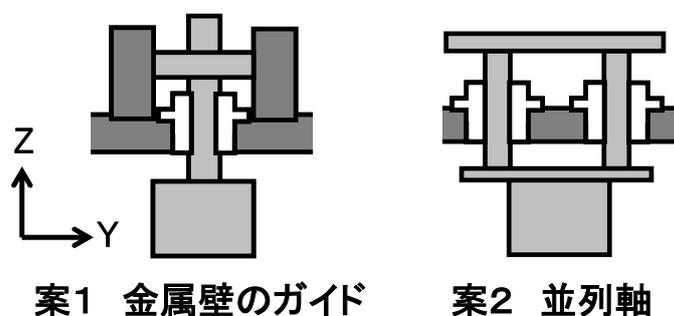


Figure 6.15 Inhibition mechanism of rotation about yaw axis

6.3.4 爪部の改良

(1) 爪部の大きさ

爪部の大きさは制御に影響を及ぼす。倣い動作の回転軸は、理想的には爪部の中心を結んだ直線になるが、実際は外周上の点を結んだ直線になるため（図 6.16）、爪部の大きさが小さく点に近いほうが制御の誤差が少ない。また、接地した部分が回転軸上にある場合、接地点が変わり、凹凸路面を踏み外したり、滑落を起こしたりすることも考えられる。従って、倣い動作を考えると、爪部は小さいほうが有利である。

また、爪部が大きい場合は爪部の端を結んだ三角形で支持多角形が形成されるため、設定 ZMP が、爪の両端それぞれで形成される支持多角形の共通部分にしか設定できなくなる。こちらの視点からも、爪部は小さいほうが有利である。

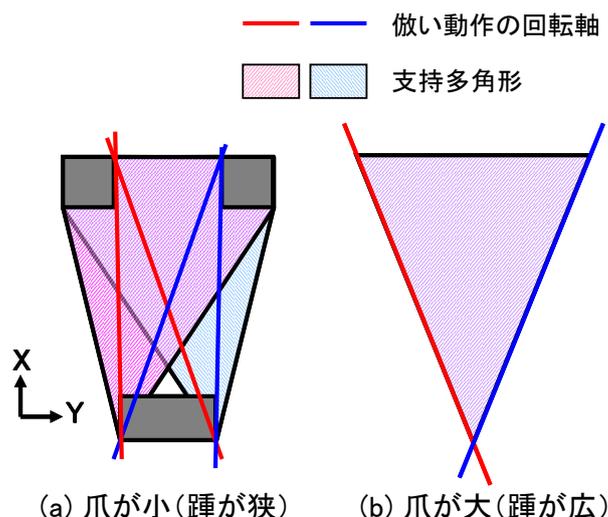
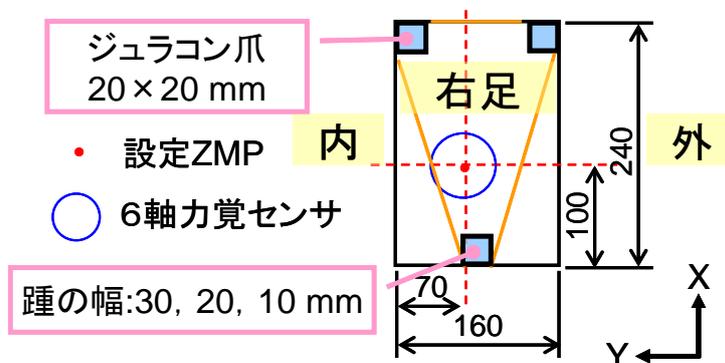


Figure 6.16 Contact point size

しかし、安定性を考えると、小さい爪部は逆に不利である。3点接地型の場合、爪先側2つの爪部についてはそれほど問題ではないが、踵側の1つの爪部は幅が狭いとRoll方向の安定性が悪くなる。また、踵側の幅の広さは平地に近い路面の場合、安定領域の大きさにも直接関わってくる。将来的に踵接地に対応することを考えると、最初に必ず踵側の爪部1点のみで接地するため、踵側の安定性の歩行への影響は大きい。

よって、まず平地での踵接地歩行にて安定した歩行が可能な踵側の爪部の幅

の狭さを決定するための歩行実験を図 6.17 のような実験条件で行った。結果、表 6.1 のように 20[mm]までは安定した歩行が可能であったため、踵の幅をそのように決定した。爪先側の爪の大きさも、この結果に従うこととした。



実験条件: 踵接地・足底離地歩行,
歩幅200mm,
歩行周期1.0s/step,
コンプライアンス制御,
ZMP制御

Figure 6.17 Experiment of heel width

Table 6.1 Experimental result of heel width

踵の幅 mm	歩行成功率
10	2/5
20	5/5
30	3/3

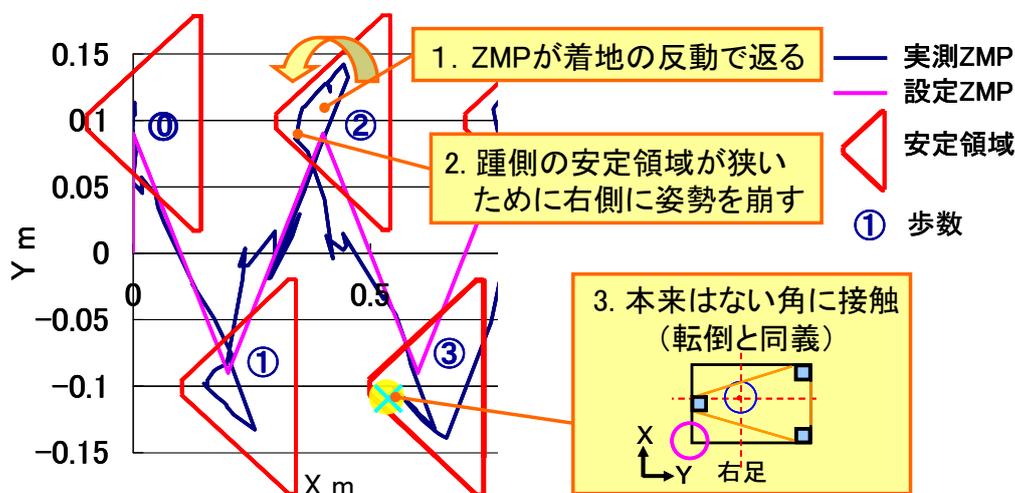


Figure 6.18 ZMP trajectories when fall down

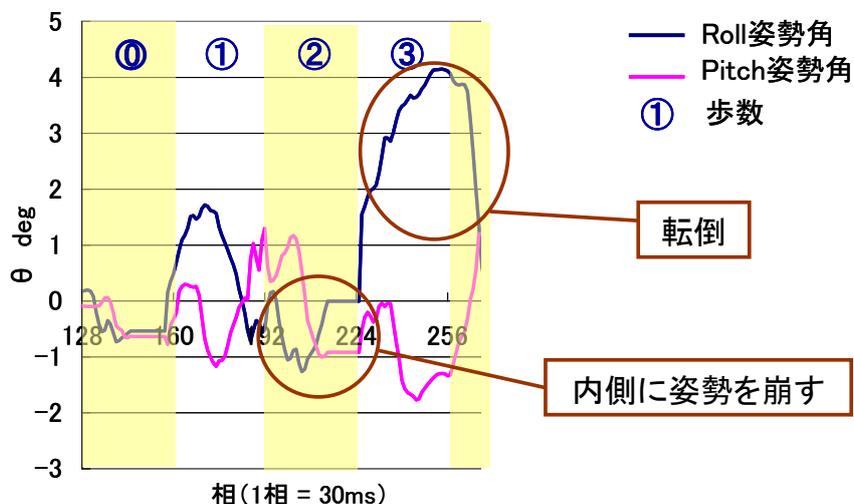


Figure 6.19 Attitude angle when fall down

踵の幅が 10[mm]のときの転倒原因を考察したのが図 6.18, 図 6.19 である. ZMP 軌道は外側にオーバーシュートした後, 着地の反動で後方に戻り, このとき踵側の安定領域の大きさが小さい場合は内側にバランスを崩す. 10[mm]の場合は安定領域の大きさが不十分であるようだ. 不整地の場合は踵側前面が接地できるとは限らないため, 20[mm]でも転倒する可能性がある. そのため, ここまでは設定 ZMP を足関節直下にしてはいたが, ここからは前方に変更することも考慮することとした. とはいえ, ZMP の話を抜きにしても踵の幅 10[mm]の安定性には不安があるので, 爪の大きさはこれで決定とした.

(2) 爪部の形状

次に, 滑落しにくい爪部の形状について考察した. 踵側については踵接地歩行への対応についても考慮した.

まず, 先端の形状が平面と球形の状態について考察した. 図 6.20 のように平面の場合は爪部のどこで接地しても同一角度で接地するのに対し, 球形の場合は端にいくほど接地角度が急になり滑落しやすくなる. したがって, 平面を採用することとした.

次に, 側面の形状について考察した. 図 6.21 のように, 角柱形の場合, 角で接地した場合に安定性が極端に悪く, また, 応力集中するので耐久性も悪くなる. 対して, 円柱形の場合は接地の状態に異方性がないため, 角柱形の際の問題は起こらない.

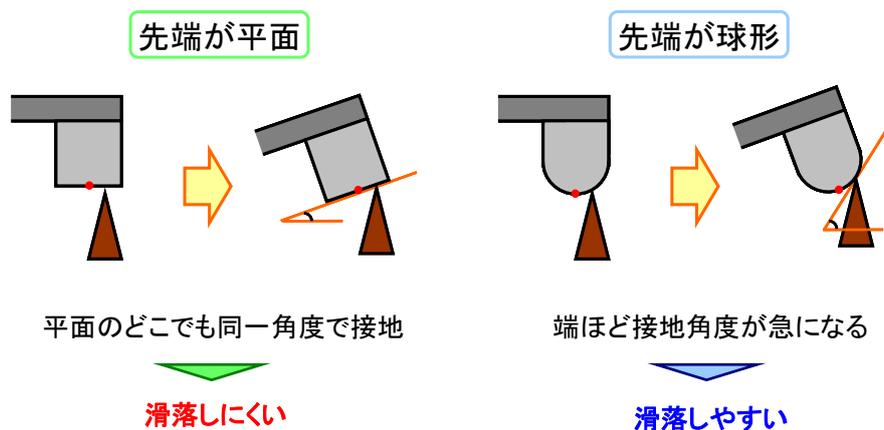


Figure 6.20 Form of contact point

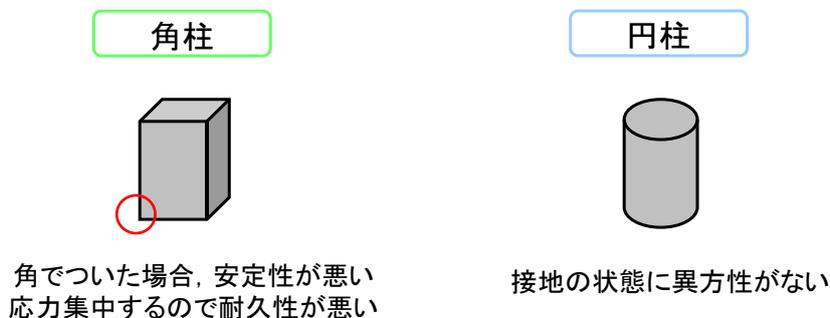


Figure 6.21 Form of side contact point

また、爪部の下面には図 6.22 のように、凸面を捉えることで滑落を防ぐことができるように窪みをつくった。当初は凹面状に削る予定だったが、表面に貼付する摩擦確保や着地衝撃緩和のための素材の変形により同様の形状になるため、このような簡単な切削で設計した。

爪部の考察を総合すると図 6.23 のようになった。爪部の高さは 2008 年度同様、爪部以外の部分で 20[mm]の段差を踏むことがないように 20[mm]とした。踵側についてはこれらに加えて踵接地への対応のために踵側にフィレットを付け、さらに線状にして着地時の Yaw 回転を防いだ。また、踵接地時の大きな衝撃による姿勢の崩れを防ぐために衝撃吸収材（ソルボセイン）を使用した。表面に貼付する素材の検討については次項で解説する。

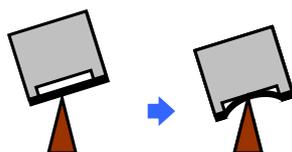


Figure 6.22 Scoop of contact bottom

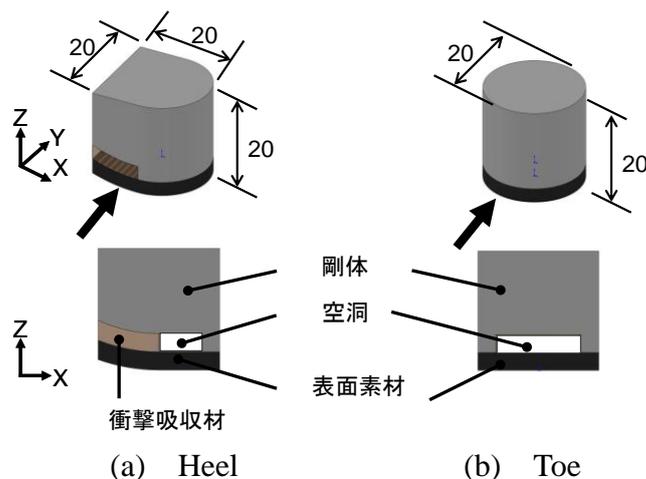


Figure 6.23 Scoop of contact bottom

(3) 爪部の表面素材

2008 年度に屋外歩行を行ったとき、爪部の表面には摩擦シートを貼付していた。しかし、摩擦シートでは滑落が発生してしまっていたため、2009 年度は表面素材を変更した。

素材としては、摩擦・耐久性・着地衝撃緩和の点ですぐれた素材が望ましい。しかし、着地衝撃緩和に優れた素材は軟らかいものであると考えるが、安定歩行のためには極力、足底は硬い方がよいので、以上の 3 点のうち前者 2 点に注目して素材を選定した。調査を行ったところ、図.6.24 のスタッドレスシートという車のスタッドレスタイヤと同様の素材の靴用ソールが条件を満たしていた。この素材は強度が通常のゴムの 2 倍であり、表面の細かい模様の窪みにより摩擦も大きい。したがって、この素材で滑落が起きないかどうかを調べるために簡単な実験を行った。

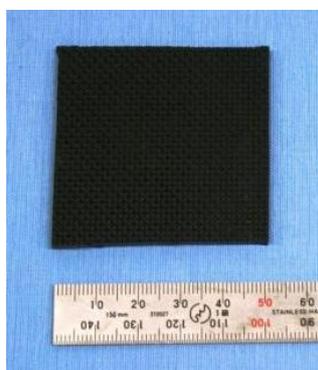


Figure6.24 Studless seat

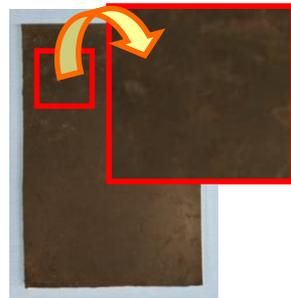


凹凸20mm, 傾斜7deg

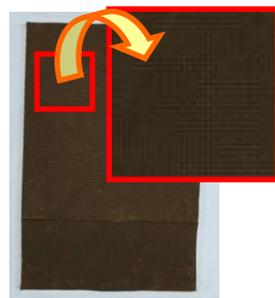
Figure 6.25 Target ground



(a) Friction seat of 0.5[mm] thickness



(b) Natural rubber seat of 3[mm] thickness



(c) Studless seat of 3[mm] thickness

Figure 6.26 Walking experimental result

予備実験は去年の摩擦シート，比較用の天然ゴムシート，2009 年度に選定したスタッドレスシートについて行った．実験方法としては，図 6.25 の目標路面を人間がそれぞれの素材を貼り付けた板を履いて踵接地・足底離地歩行をした．その結果，図 6.26 のように摩擦シートは 20 歩ほどで破けてしまったが，他の 2 つの素材は 100 歩歩行しても問題なかった．また，後者 2 つの素材については起きず，摩擦シートも破けるまでは起きなかった．そのため，摩擦は元から問題はなく，去年度の滑落は耐久性不足により摩擦シートが破け，効力を発揮しなくなったために起こっていたのではないかと推測された．したがって，より耐久性の高いスタッドレスシートを選ぶのが妥当だと考えられたため，2009 年度の爪部の表面軟素材はスタッドレスシートに決定した．

6.3.5 2009 年度の足部機構

以上の改良を統合し，2009 年度のセンサ式足部機構である 3 点型路面検知足部機構を設計・製作した．完成した足部機構を図 6.27 に示す．当初，外形は WABIAN-2R の標準の足部機構の外形である 240×160 [mm]とする予定であった．しかし，市販の内径 10[mm]のリニアブシュの外形が爪部の直径よりも大きく，リニアブシュに合わせて足部を設計すると爪部が内側に配置され，安定領域が狭くなってしまったため，当初の外形内に爪部の外形が収まるような外形で設計した．そのため，外形が 2008 年度よりも大きくなっている．

また，路面検知センサとその周辺について図 6.28 に示す．なお，センサのストロークは，遊脚期における凸路面との引っかかりを防ぐために 7[mm]から 5[mm]へと短くした．

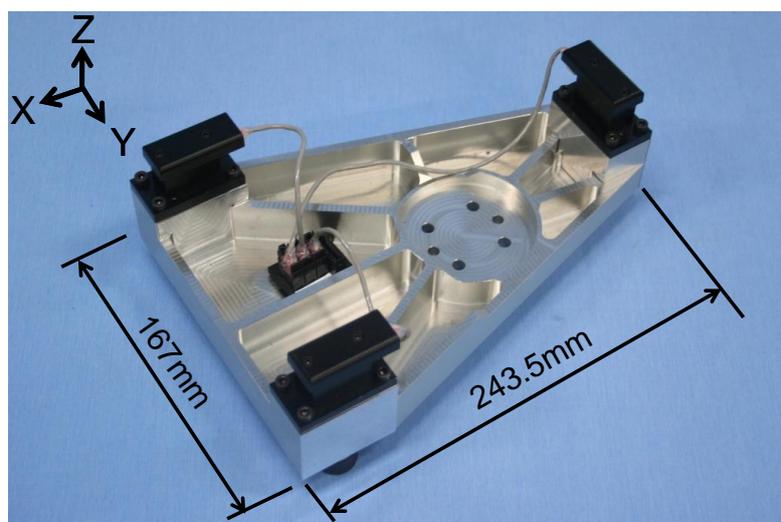


Figure 6.27 Foot mechanism with 3-point contact

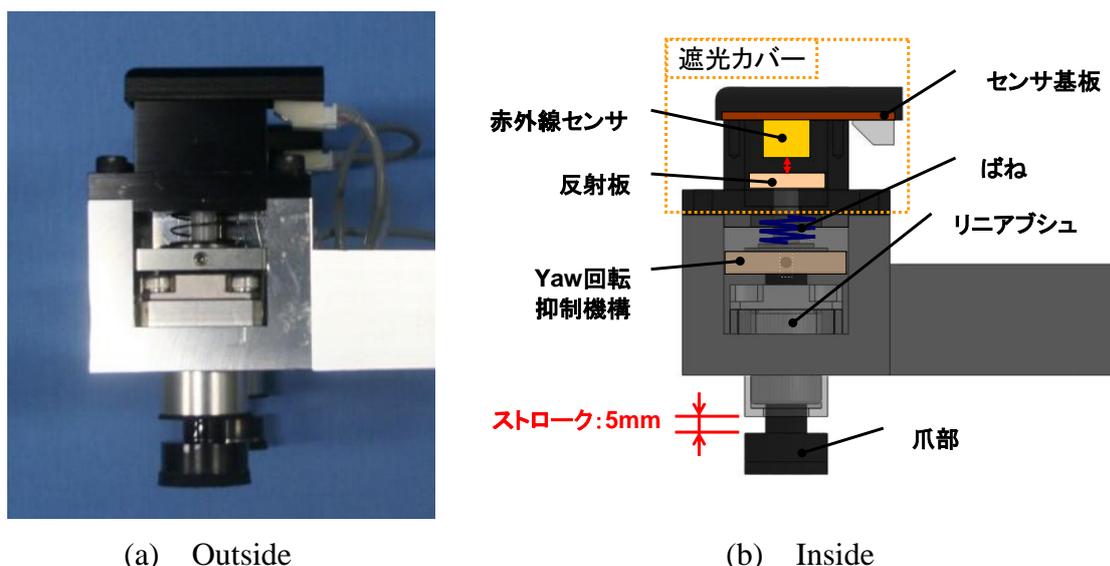


Figure 6.28 Sensor of detecting ground surface

6.3.6 まとめ

2009年度の研究では、まず、2008年度、足底4隅にある路面検知を行なう直動の爪部から3点選択して使用していたことが原因である安定余裕の小ささを改善するために、はじめから3点型の爪部に変更することで安定性向上を図った。

また、センサの構造について再考を行い、去年と同様の路面検知を行なうセンサと接地を行なう爪部が一体となった直動型のセンサの改良型を製作することとした。具体的には、直動軸を強化することで着地衝撃や遊脚中の路面との衝突による軸の曲げやリニアブシュのボール痕を防ぎ、動作不良を改善した。また、基板を再製作して接触不良を改善し、赤外線センサを変更して検知距離が適切なものにした。さらに遮光カバーを小型化し、設置スペースの問題を解決した。

爪部のYaw回転による転倒やセンサの動作不良への対策として、金属壁によるガイドを付け、Yaw回転を抑制した。爪部については、大きさは、安定して歩行可能な最小の大きさとして20[mm]とした。また、滑落しにくい形状として、円筒型の形状で底面に窪みのある形状とした。さらに踵側については踵接地に対応した形状と着地衝撃緩和のための素材にて踵接地に対応させた。底面素材は耐久性がよく摩擦の大きいスタッドレスシートに変更した。

以上の改良によって、実環境下における歩行成功率向上を目指した。

最後に、2009年度開発した3点型路面検知機構を実装したWABIAN-2Rの写真を図.6.29に示す。

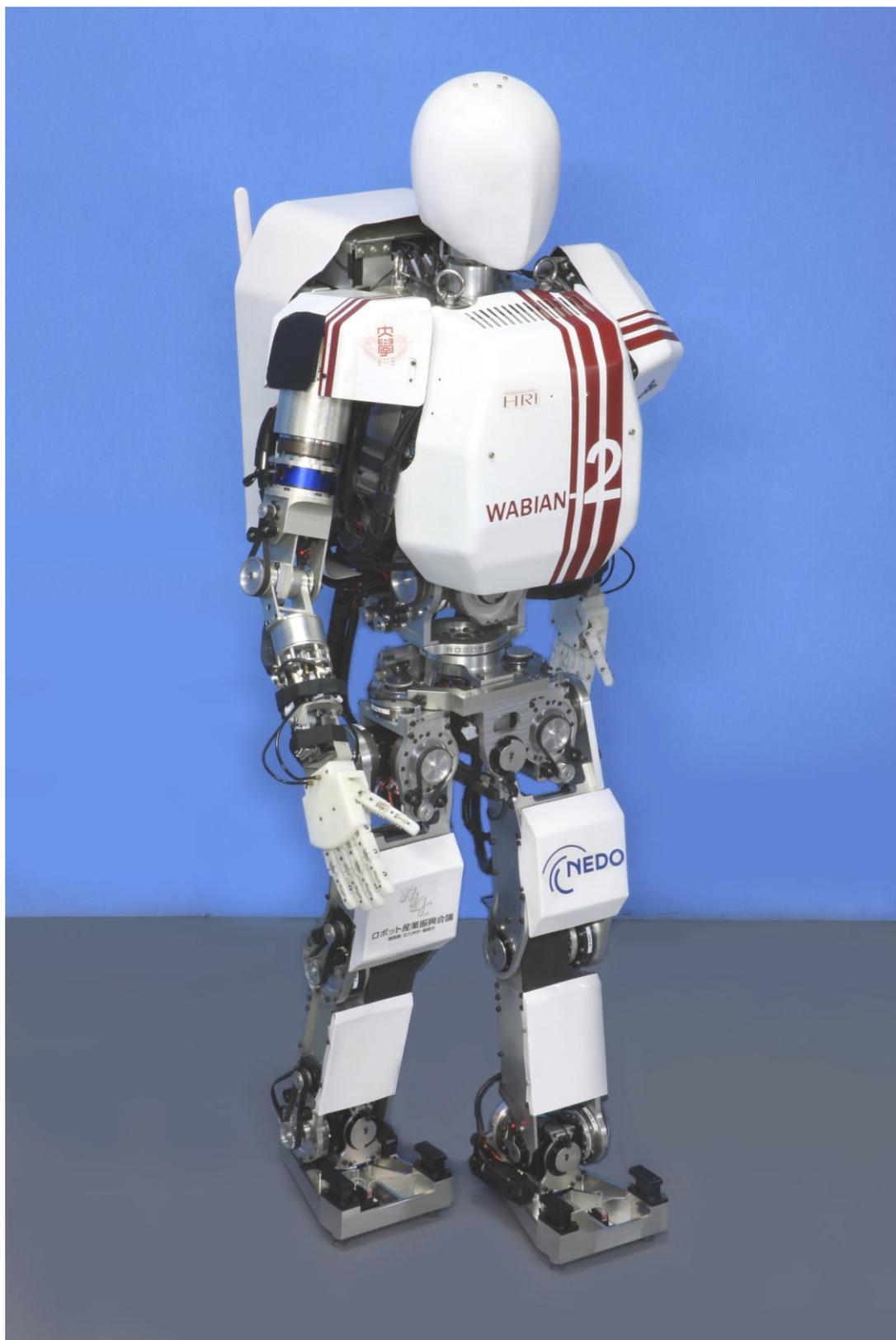


Figure 6.29 WABIAN-2R with 3-point contact foot

6.4 3点型路面検知足部機構を用いた不整路面適応制御

着地軌道修正制御が実装されたことによって不整地に対する適応性は向上し、2008年度には困難であった Roll 方向での 20mm 程度の大きな凹凸に倣うことができた。しかしながら、実環境の不整地における歩行成功率が 5%以下であった。そこで、今年度は実環境の不整地における歩行成功率の向上を目指し、それに対する新たな足部機構と路面適応制御の開発を行った。

先述した新型足部機構の3つの路面検知センサの値から足部の姿勢の修正量が算出できるよう、路面適応制御の改良を行った。この際、安定領域が確保されない可能性がある。それを解決するために、設定 ZMP の位置を足部の中心位置になるように前方に設定することにより、必ず安定領域が一意に定まるようにした。

また3つのセンサのうちどのセンサが最初に反応するかによって、その接地点を回転中心にし、着地軌道の修正を行なう。このとき、センサの振動やノイズの抑制のために、センサの値に移動平均を用いることによって、より速い倣い動作を実現した。これにより、2008年度 AS-PROX センサであり、センサのストロークを 20mm のうちに 7mm 使っていたのを KR1210 センサに変更し、ストロークを 5mm にすることができた。ストロークが短くなったことによって、センサが凹凸に引っかかることが減少した。またセンサのレンジを全部使えることにより、既存のセンサであったセンサ測定レンジと必要レンジにギャップをなくすことができた。さらに、十分な倣い時間を確保するために、遊脚前期を短くし、遊脚後期を長くすることで、さらなる安定性の向上を図った。

まず、センサ式足部機構を用いた路面適応制御のタイムチャートを Table 4.2 に示す。なお本制御は Table 4.2 に示すように、両足の z 軸方向、Roll 軸周り、Pitch 軸周りの合計 3 軸にわたって修正する。

ここで、Table 4.2 に示したように歩行中の状態を 5 つに分割して、その各々の期間で制御を行なっていく。その制御の種類には、以下のような 3 つが存在する。

(a) 制御期

路面適応制御を行なっている期間。

(b) 保持期

ひとつ前の修正量を保持して出力する期間。

(c) 復帰期

基準パターンへの復帰動作を行なう期間。

以下、この3つの期間の動作について詳しく説明する。

6.4.1 制御期

この期間で、センサによる路面形状の検知、および着地軌道の修正を行なっていく。

まず、3つのセンサのうちどのセンサが最初に反応するかを検知し、そのときのセンサ移動量と平地を歩行したときの理論上のセンサ移動量の差を用いて Z 軸方向の着地軌道の修正を行なう。また踵側と爪先側のセンサ値の差を用いて Pitch 軸周りの修正量を求め、爪先側の2つのセンサの値を用いて Roll 軸周りの修正量を算出する。

また、これまでは足部姿勢を修正する際に、足関節の真下の点を回転中心としていたが、それでは爪が並進方向にずれ、爪部の凹凸路面からの滑落や路面検知センサの誤動作の原因になっていた。そこで、路面適応動作の回転中心を路面との接地点に変更し、問題の解決を図った。

これを解決するために、以下の方法をとった。

(1) 設定 ZMP の位置

基準パターンを作成する際、これまでは設定 ZMP の位置は足関節の中心となっていた。

それでは、三角形の足部の安定領域が小さくなり、不安定になる可能性がある。そこで、本制御では Y 方向に関しては足部中央であるように ZMP を設定することにより、解決を図った。これにより、ZMP が足関節の中心にあるときより、足部の中心にあるのが安定領域は広くなり、より安定して歩行できるようにした。

(2) 回転中心の変更

これまでは足部姿勢を修正する際に、足関節の真下の点を回転中心としていたが、それでは着地し、足部の姿勢を修正するとき爪が並進方向にずれてしまい、爪部の凹凸路面からの滑落や路面検知センサの誤動作の原因になっていた。そこで、図 6.30 のように路面適応動作の回転中心を3つのセンサのうちどのセンサが最初に反応するかを検知し、そのセンサの爪と路面との接地点に変更することにより、問題の解決を図った。また、2点接地時 Roll 軸周りの修正を行う回転軸を図 6.31 のように2点の線軸周りに修正することで、修正時のずれを防止するようにした。

これから具体的な修正方法について述べていく。センサのストロークを Δl とすると、WABIAN の足部の地面からの高さが Δl のときにセンサであるつめが接地することになる。この足部よりつめが早く接地し、つめが移動するときの移動量を「理

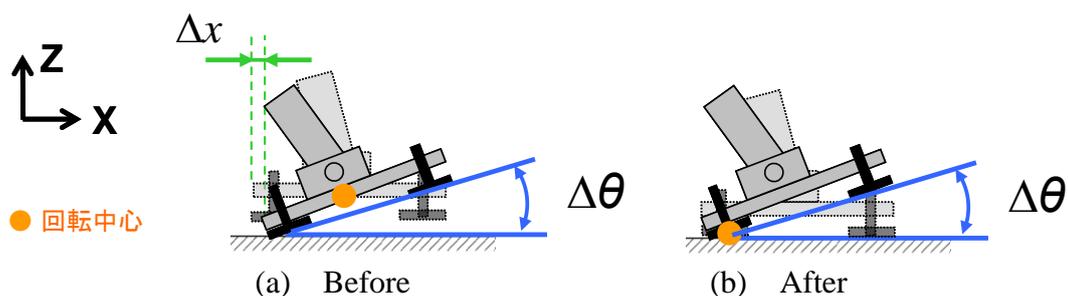


Figure 6.30 Rotation center

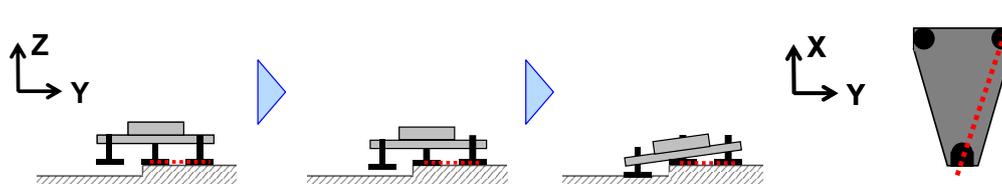


Figure 6.31 Change of rotation axis

論上のセンサ移動量」として、以下の式を用いて予め算出しておく。

$$(i) \quad z_{leg} + \Delta l \leq z_{waist} \quad \Delta x_t(t) = 0 \quad (6.1)$$

$$(ii) \quad z_{leg} + \Delta l \geq z_{waist} \quad \Delta x_t(t) = z_{leg} + \Delta l - z_{waist} \quad (6.2)$$

ただし、

$\Delta x_t(t)$: 理論上のセンサ移動量

Δl : センサのストローク

z_{leg} : 足先軌道

z_{waist} : 腰軌道

である。

この理論上のセンサ移動量と、実際のセンサ移動量との差を誤差 (=路面の凹凸) としてとらえ、フィードバックすることによって着地軌道の修正を行なっていく。その際の計算式は以下の通りである。

$$e(t) = \Delta x_f(t) - \Delta x_t(t) \quad (6.3)$$

$$H(t) = H(t-1) - K_{error} \cdot e(t-1) \quad (6.4)$$

ただし,

$e(t)$: 誤差値

$\Delta x_f(t)$: 実際のセンサ移動量

$H(t)$: 修正量

K_{error} : 誤差修正ゲイン

である.

以上のような方法により Z 方向に関する修正を行なっている.

続いて, Roll および Pitch 方向に関しては, 以下のように修正を行なっている.

(1) 3つのセンサのうち最初反応するセンサに応じて足関節の修正量を算出するための回転中心を変更する.

(2) センサの値から足関節の修正量を算出

具体的には, まず Pitch 方向に関しては踵と爪先側のセンサ値の差を用いて Pitch 軸周りの修正量を算出する.

$$\Delta\theta_{Pitch} = \sin^{-1}\left(\frac{Z_{th} - Z_{ac}}{L_1}\right) \quad (6.5)$$

ただし,

$\Delta\theta_{Pitch}$: Pitch 方向の修正角

ΔZ_{th} : 理論上のセンサ移動量

ΔZ_{ac} : 実際のセンサ移動量

L_1 : 足部の幅

である.

また Roll 方向に関しては爪先側の 2 つのセンサの値の差を用いて Roll 軸周りの修正量を算出する.

$$\Delta\theta_{Roll} = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta Z}{\sqrt{\Delta Z^2 + L_2^2}}\right) \quad (6.6)$$

ただし,

$\Delta\theta_{Roll}$: Roll 方向の修正角

ΔZ : センサ移動量

L_2 : 足部の長さ

である.

(3) 10msec かけて(2)で算出した角度になるように足関節を修正. このとき, 5次関数補間で基準パターンに修正量を加えていく.

(2)と(3)を繰り返し行なう. (すなわち, 10msec ごとにセンサの値を取得し, 修正することになる.)

以上のような方法により, Roll, Pitch 方向の修正を行なっていく. この方法の場合, センサの値から算出する角度は常に0で一定となるときが理想的な状態であると言える.

また, 基準パターンを作成するにあたり, 時間/経路分離型軌道生成法を用いた. 時間/経路分離型軌道生成法を使用することにより, 遊脚前期を短くし, 遊脚後期を長くすることで, 十分な倣い時間を確保した. これによって, 安定性はさらに向上した.

6.4.2 保持期

この期間は, 制御期に路面形状を検知し軌道修正をおこなったのち, それをそのまま保持し続け, 安定した歩行につなげていく. 具体的には, 1制御周期前の修正値の値(軌道修正後の値)を引き続き出力する.

なお, この際にもこの「センサ式足部機構を用いた路面適応制御」以外の制御によっては, 足先の修正は行なっている.

6.4.3 復帰期

この期間は, 制御期に軌道修正したものを, 一步ごとにリセットすべく基準歩行パターンに復帰させていく. 具体的には復帰期に入る1周期前の修正値を, 復帰期の終わりの時刻までに0に戻るよう, 加速度まで連続になるような5次関数補間をして行う.

その際の初期条件は,

$$E_{xr}(0) = E_{xd} \quad E_{xr}(t_l) = 0$$

$$\dot{E}_{xr}(0) = 0 \quad \dot{E}_{xr}(t_l) = 0$$

$$\ddot{E}_{xr}(0) = 0 \quad \ddot{E}_{xr}(t_l) = 0$$

として, 5次関数

$$E_{zr}(t) = a_0 t^5 + a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t + a_5$$

を解くと,

$$E_{zr}(t) = -6 \frac{E_{z_l}}{t_l^5} t^5 + 15 \frac{E_{z_l}}{t_l^4} t^4 - 10 \frac{E_{z_l}}{t_l^3} t^3 + E_{z_l} \quad (6.7)$$

を得る.

ただし,

E_{zr} : 復帰変更量

E_{z_l} : 立脚前期の初めの値 (修正後の値)

t_l : 立脚前期の時間

である.

6.5 評価実験と考察

6.5.1 各つめで凹凸を踏んでの歩行実験

(1) 実験目的

2009 年度製作した 3 点型路面検知足部機構とセンサを用いた回転中心の変更を行った不整路面適応制御が 20[mm]の凹凸に対して有効であることを確認する.

(2) 実験方法

前進歩行中の WABIAN-2R に対して, 3 歩目に足部機構の爪部に 20[mm]の段差を模した板を踏ませ, Roll, Pitch, Z 方向の倣い動作を確認する. 実験条件とそれぞれの踏ませ方を以下に示す.

腰高さ一定型歩行 (膝曲げ歩行)

歩数 : 8 step

歩幅 : 0.2 m/step

歩行周期 : 1.0 s/step

安定化制御 : センサを用いた不整路面適応制御

ZMP 補償制御

姿勢補償制御

20mm の板を踏ませるつまめ（センサ）の位置は次の通りである。

- ① Roll 方向の倣い動作の確認
3 歩目に 20[mm]の板を Sensor[1]で踏む。
- ② Pitch 方向の倣い動作の確認
4 歩目に 20[mm]の板を Sensor[5], Sensor[6]の 2 つで同時に踏む。
- ③ Z 方向の倣い動作の確認
4 歩目に 20[mm]の板を Sensor[0], Sensor[1] , Sensor[2]の 2 つで同時に踏む。

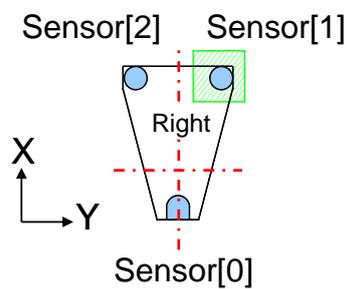


Figure 6.32 About roll axis

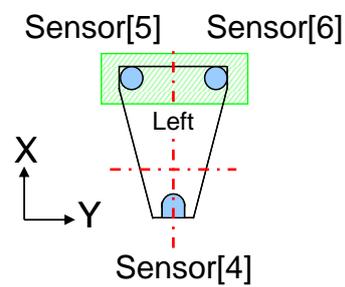


Figure 6.33 About pitch axis

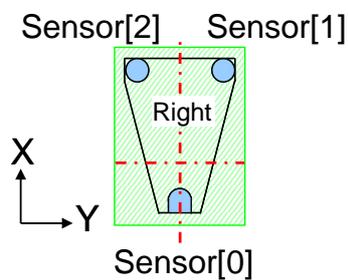


Figure 6.34 Along the vertical axis

(3) 実験結果

実験結果を図 6.35 から図 6.49 に示す. どの爪部で踏んだ場合においても, 歩行に成功した. この結果より, 2009 年度製作した 3 点型路面検知足部機構とセンサを用いた不整路面適応制御が, あらゆる 20[mm]の凹凸に対して有効であることが確認された.

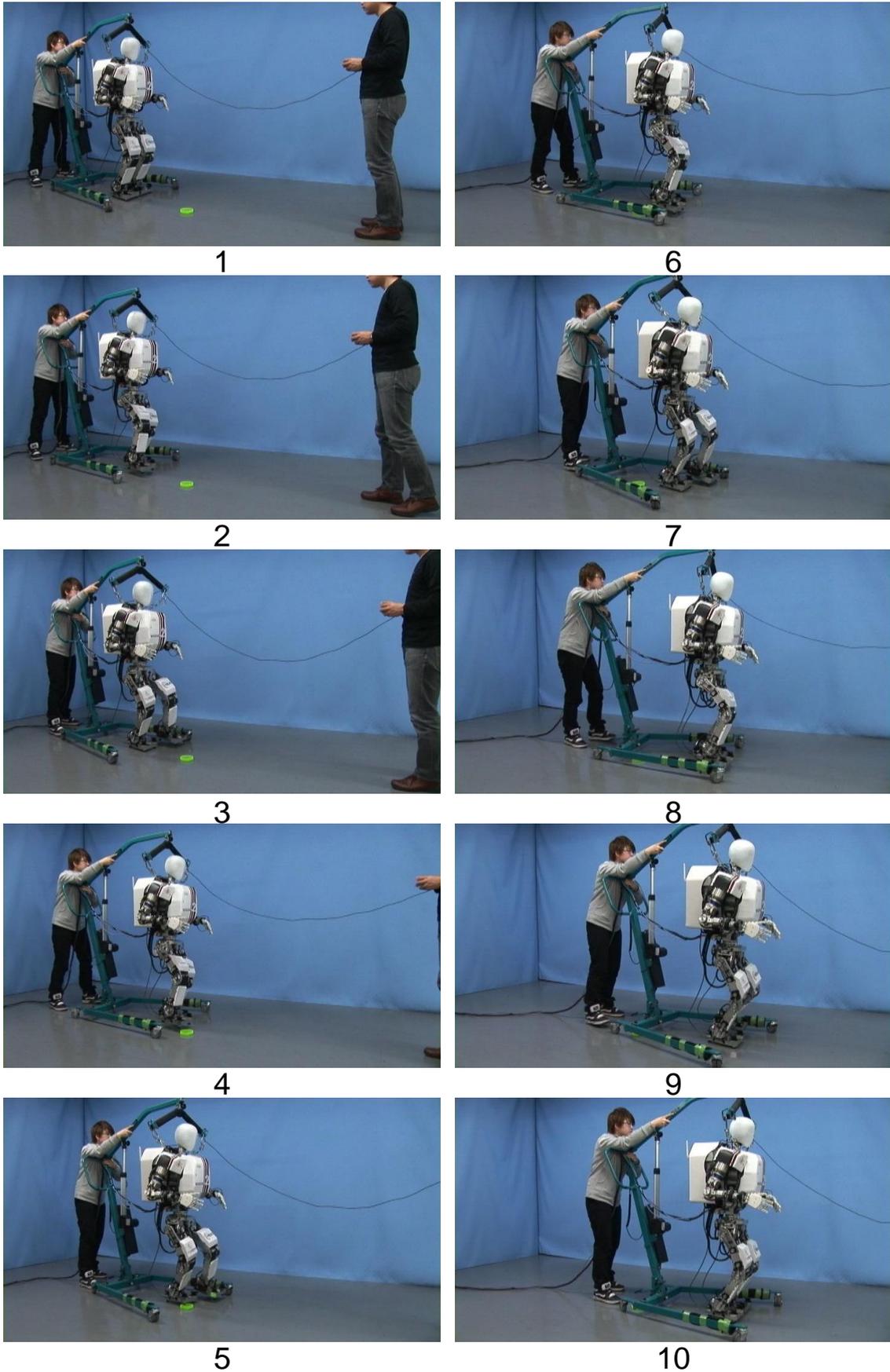


Figure 6.35 Walking experiment on uneven terrain (About roll axis)

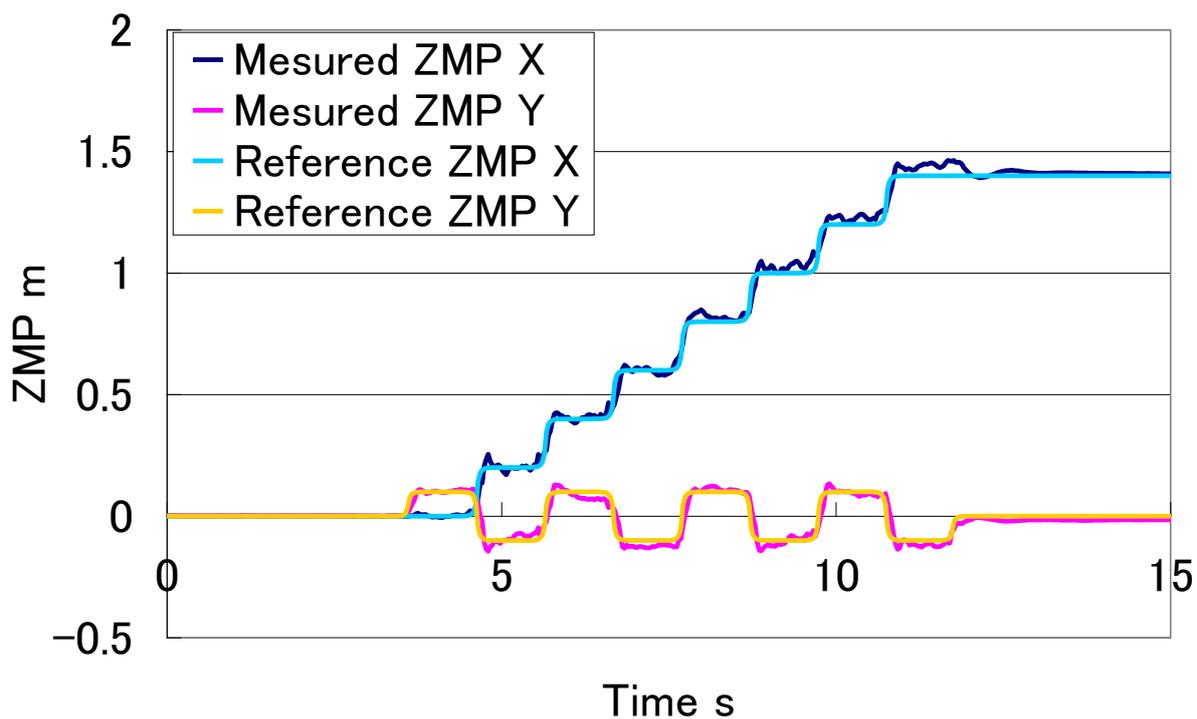


Figure 6.36 ZMP trajectories

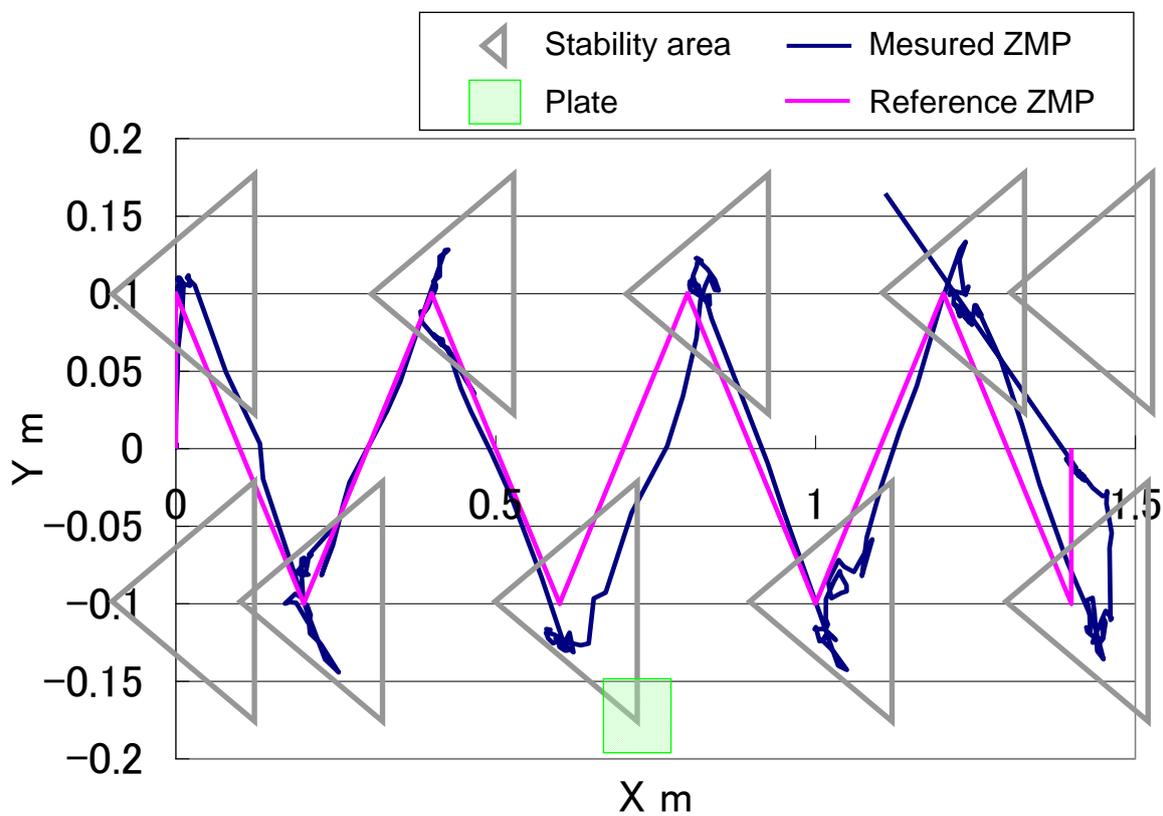


Figure 6.37 ZMP trajectories of X-Y plane

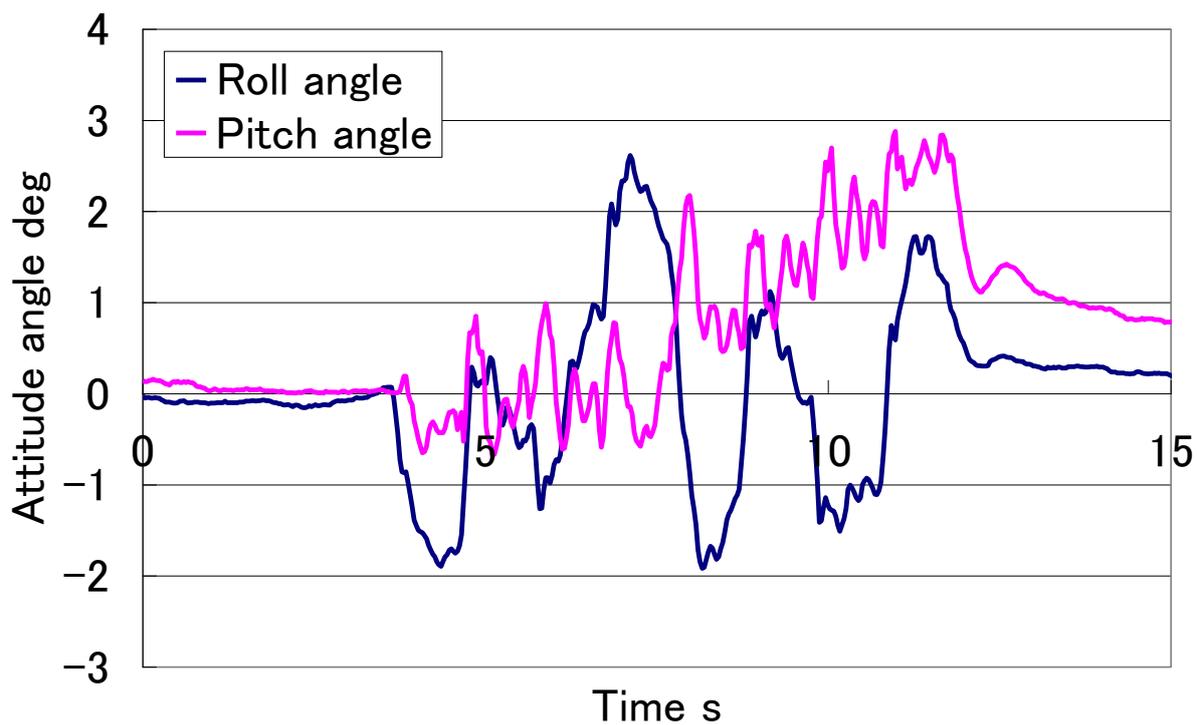


Figure 6.38 Attitude angle

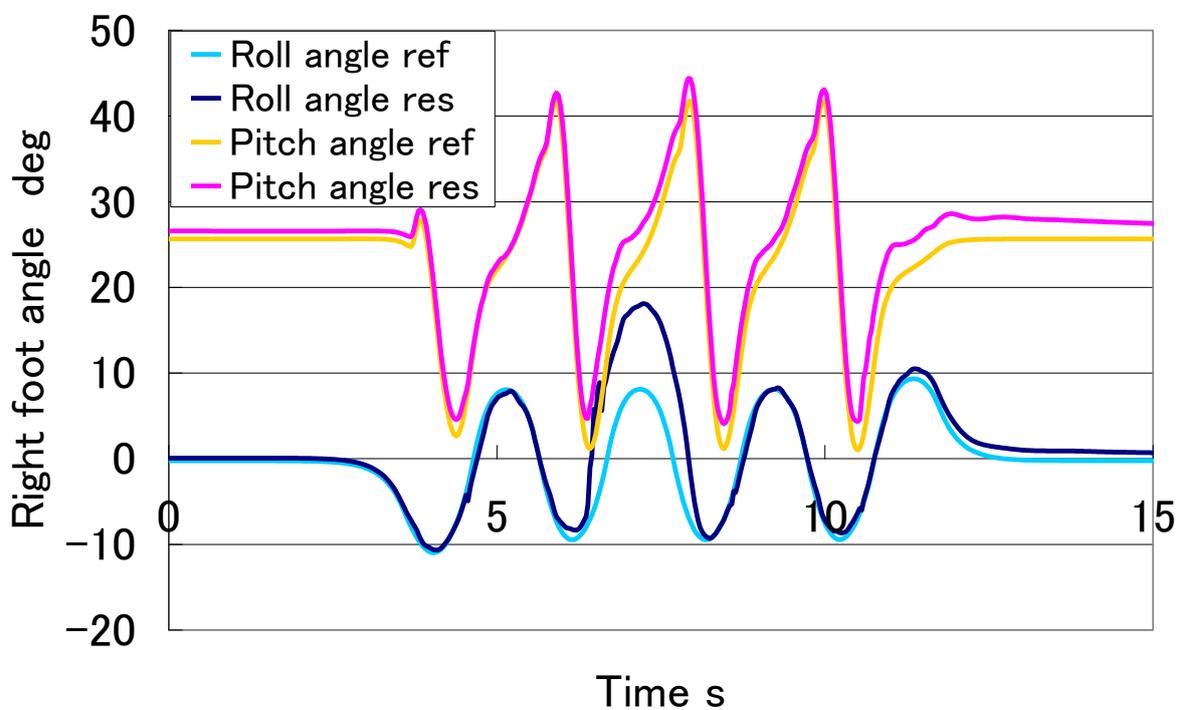


Figure 6.39 Foot joint angle

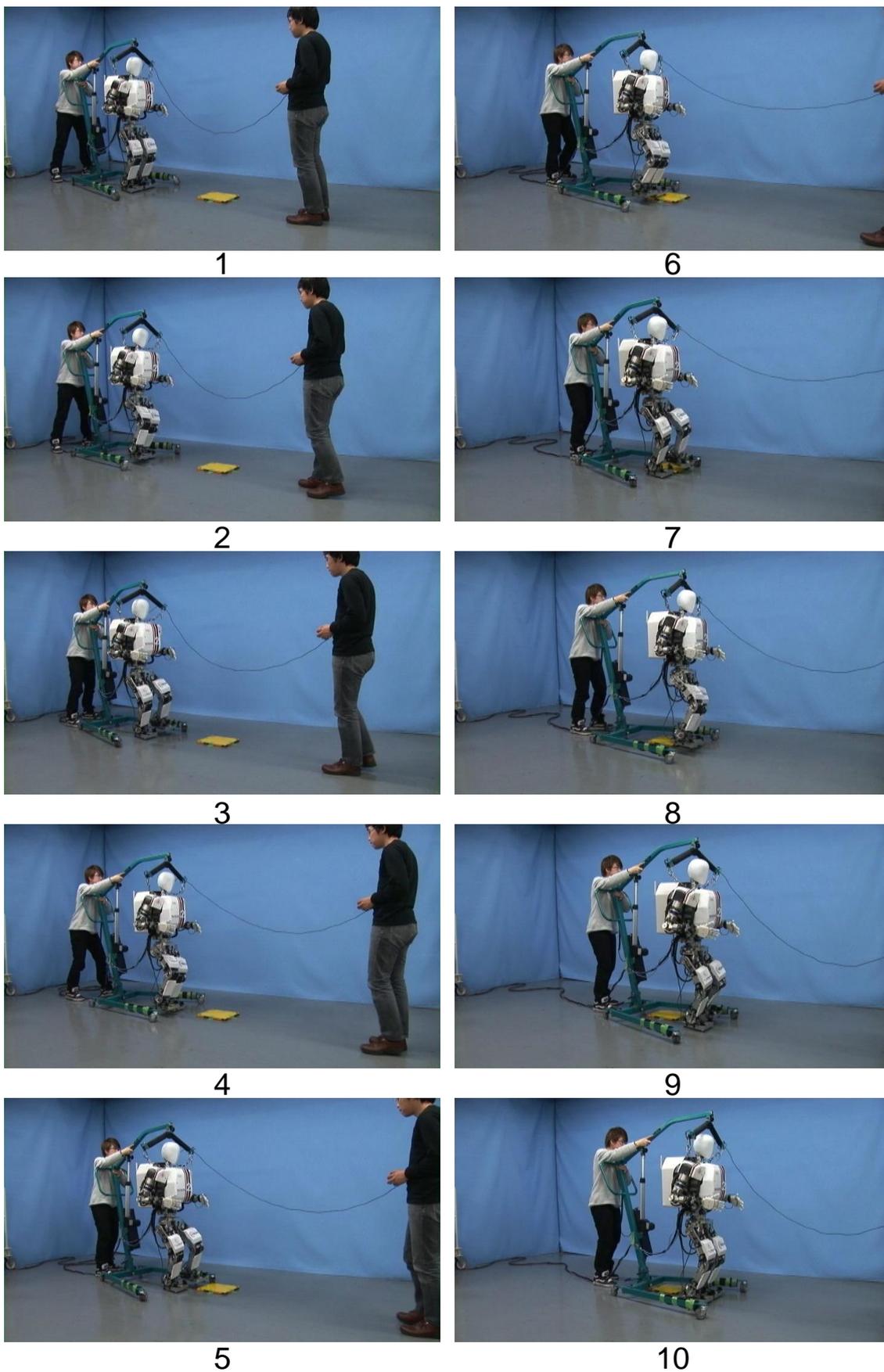


Figure 6.40 Walking experiment on uneven terrain (About pitch axis)

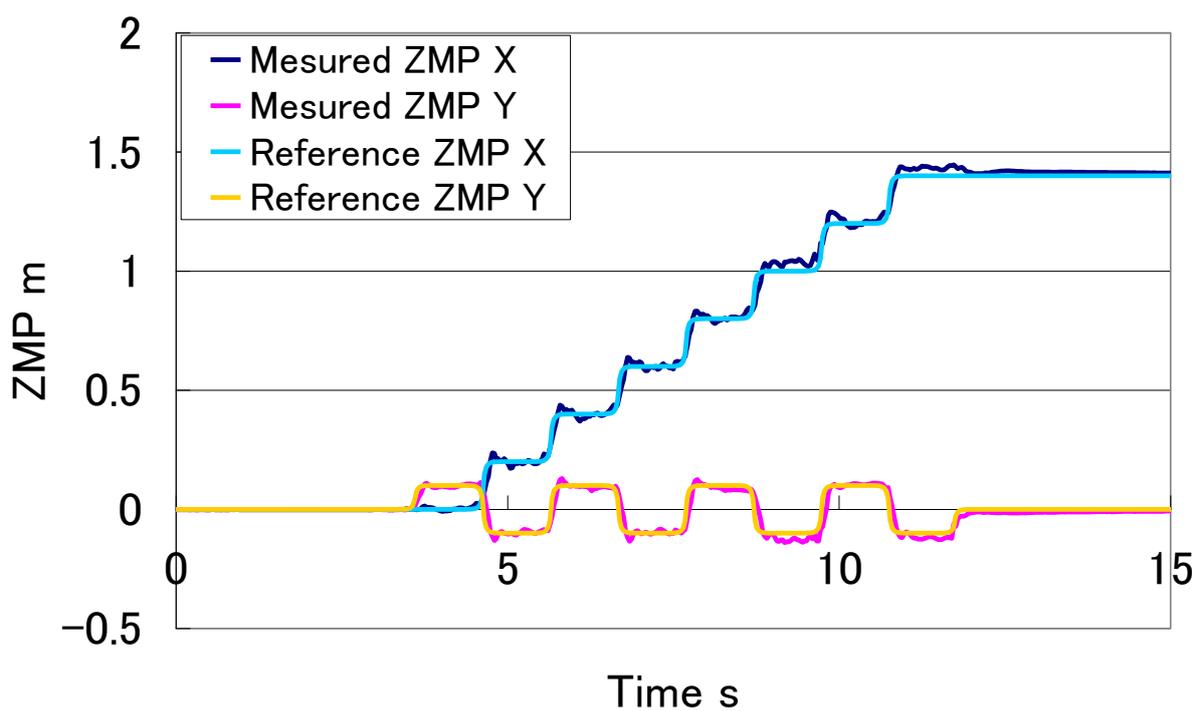


Figure 6.41 ZMP trajectories

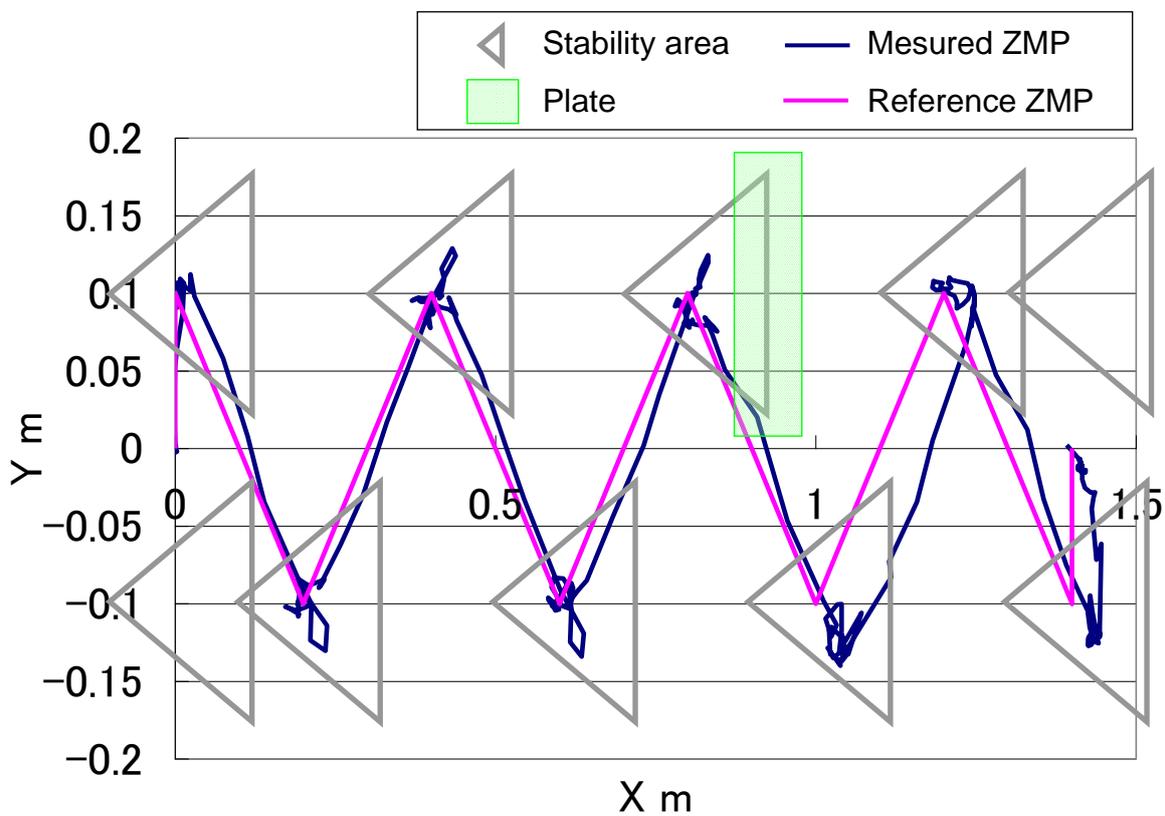


Figure 6.42 ZMP trajectories of X-Y plane

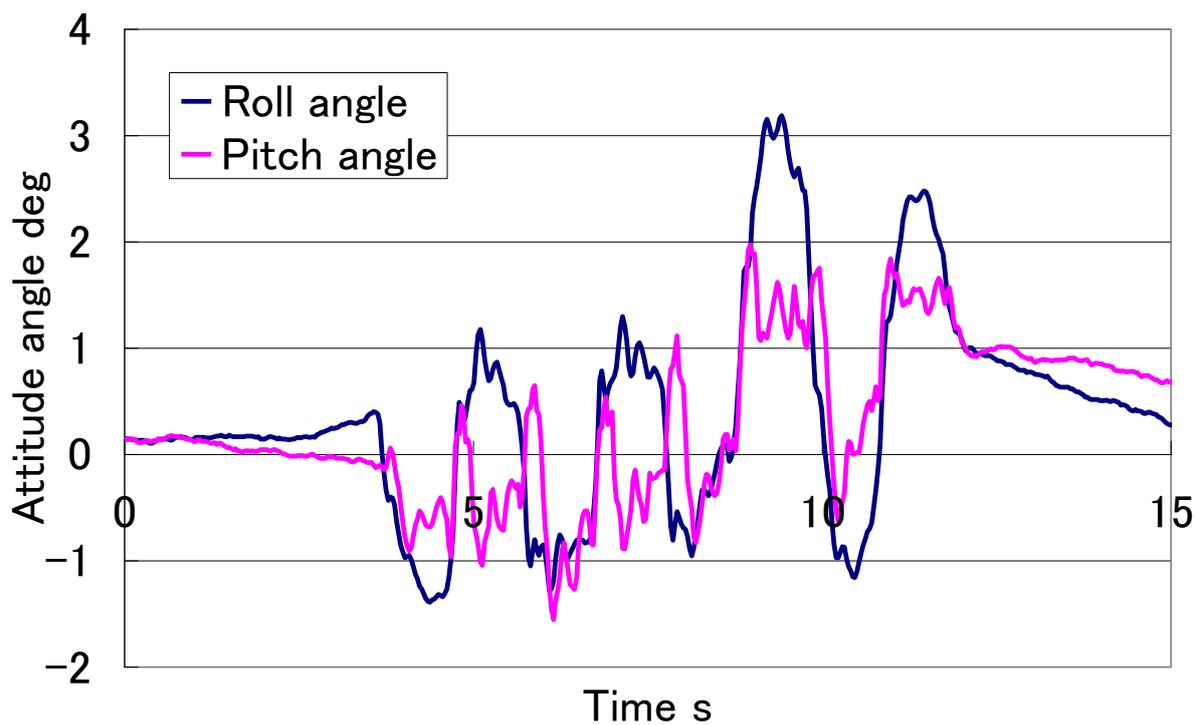


Figure 6.43 Attitude angle

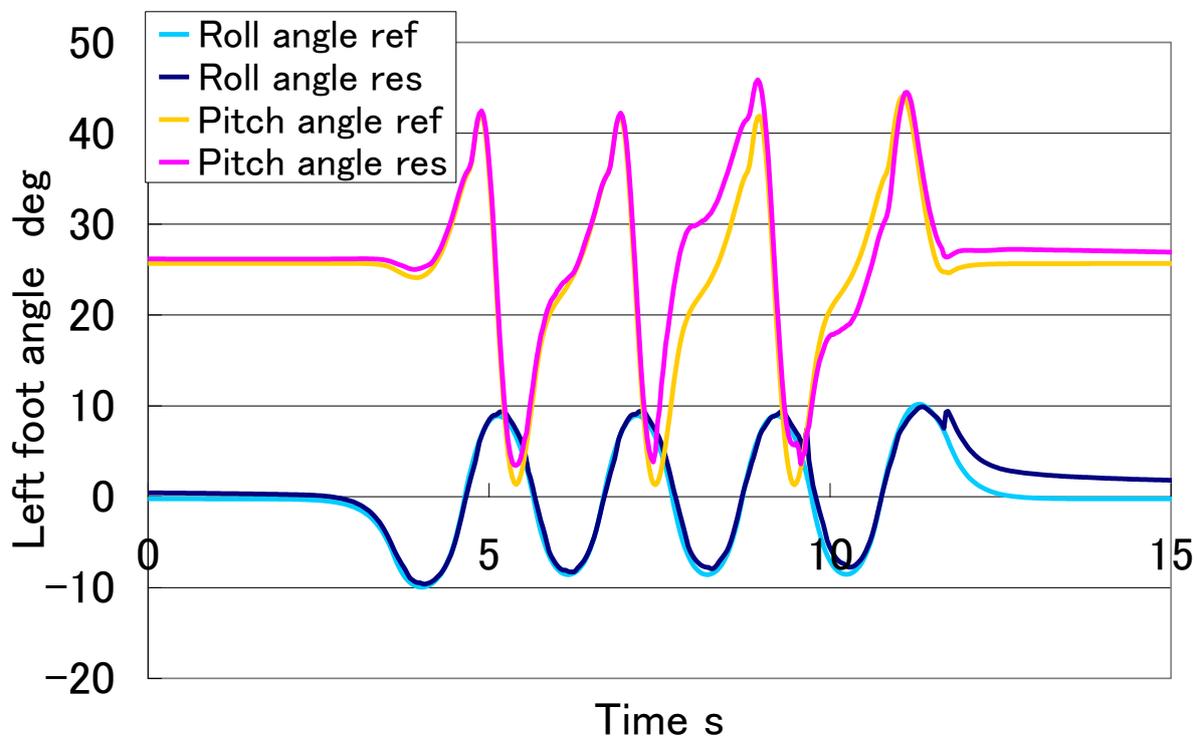


Figure 6.44 Foot joint angle

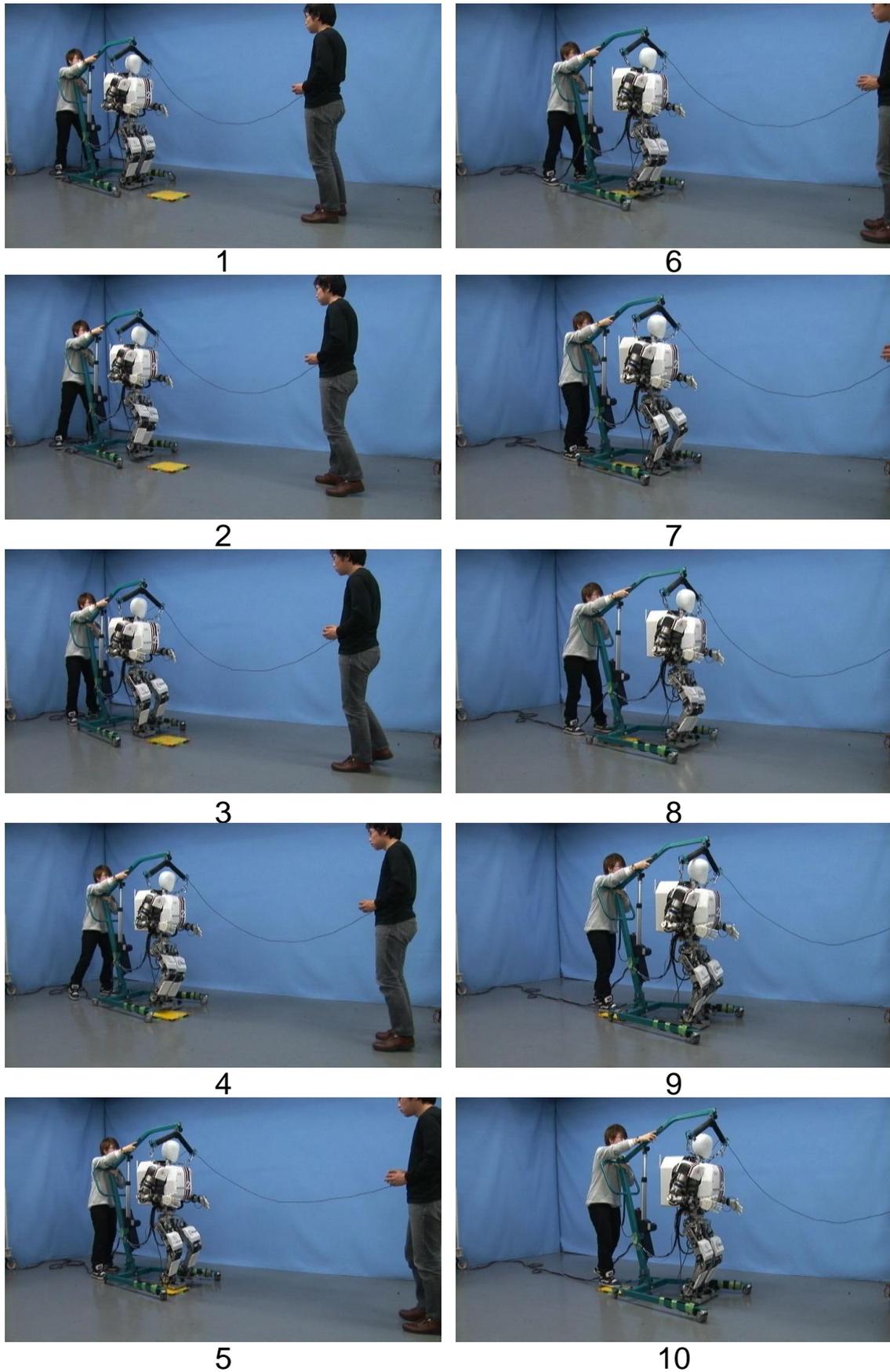


Figure 6.45 Walking experiment on uneven terrain (Along the vertical axis)

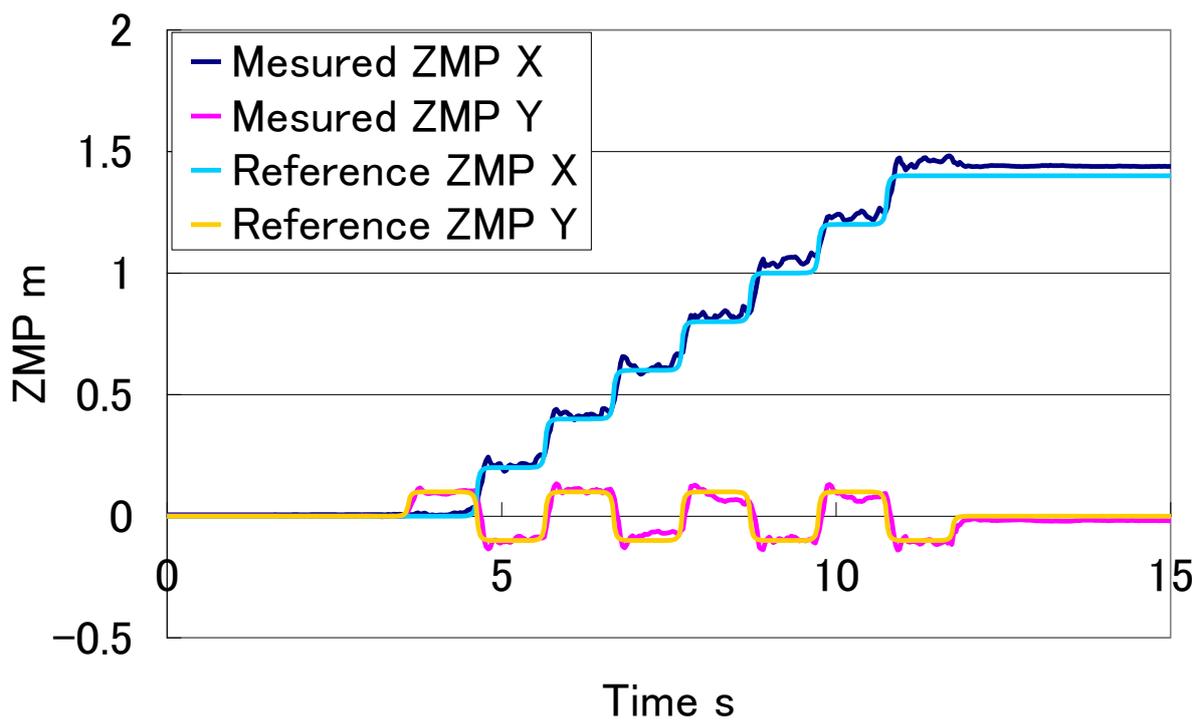


Figure 6.46 ZMP trajectories

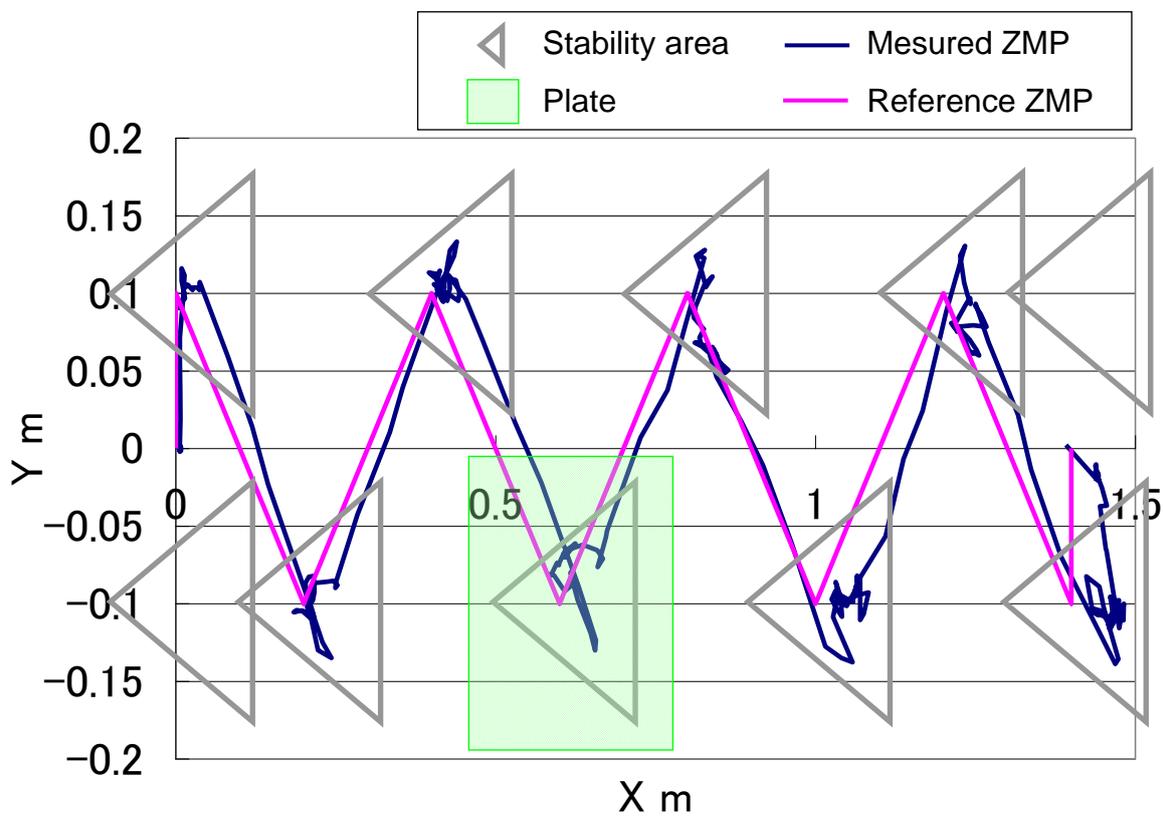


Figure 6.47 ZMP trajectories of X-Y plane

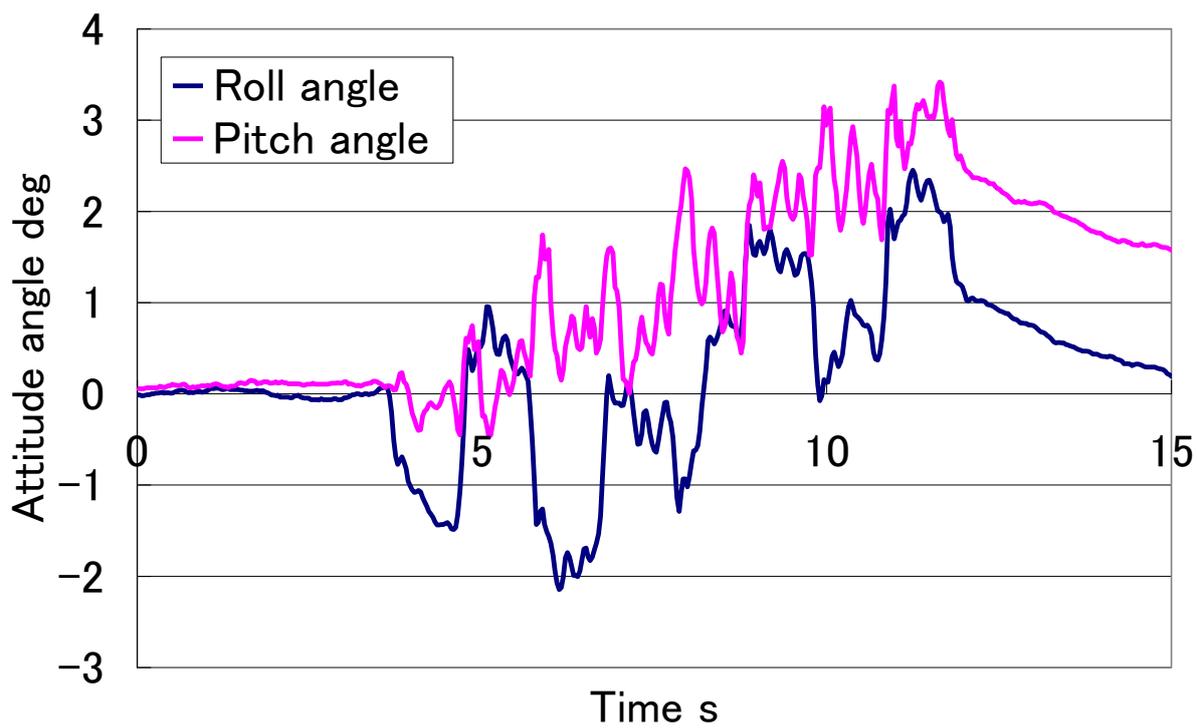


Figure 6.48 Attitude angle

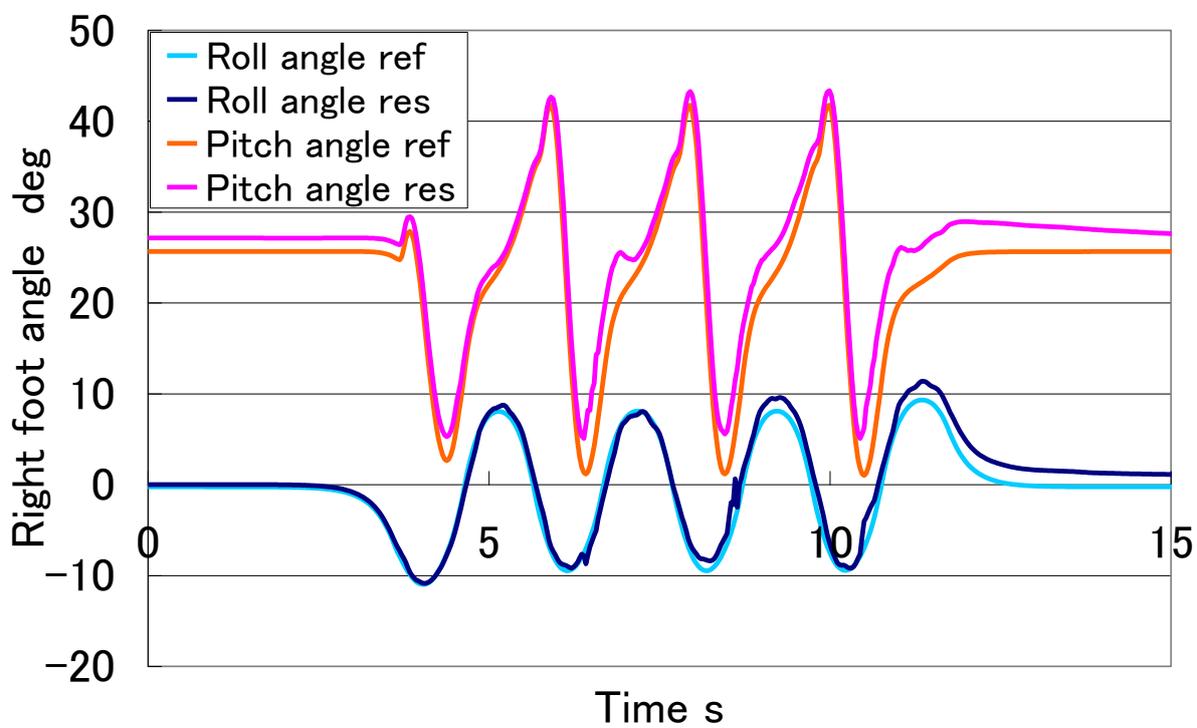


Figure 6.49 Foot joint angle

6.5.2 滑落対策の評価実験

(1) 実験目的

倣い動作における回転中心の変更が，滑落対策として有効であることを確認する．

(2) 実験方法

従来の回転中心（足関節直下），新しい回転中心（爪部の接地点）のそれぞれの状態で，前進歩行中の WABIAN-2R に対して，足部機構の爪部に 20[mm]の段差を模した板の滑落しやすい隅の部分をつまませ，滑落が起きるかどうかなを確認する．実験条件と板のつまませ方を以下に示す．

膝曲げ前進歩行

歩数 : 8[step]

歩幅 : 200 [mm/step]

歩行周期 : 1.0 [s/step]

安定化制御：センサを用いた不整路面適応制御

ZMP 補償制御

姿勢補償制御

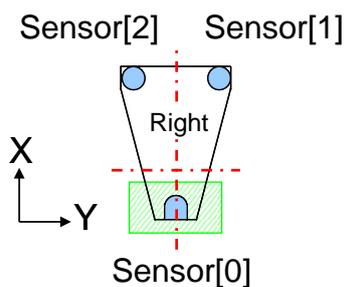


Figure 6.50 Step plan

(3) 実験結果

実験結果を図 6.51 から図 6.52 に示す．従来の回転中心では滑落が起きているが，新しい回転中心では同様のつまませ方で滑落が起きていない．この結果より，回転中心の変更が滑落対策として有効であることが確認された．

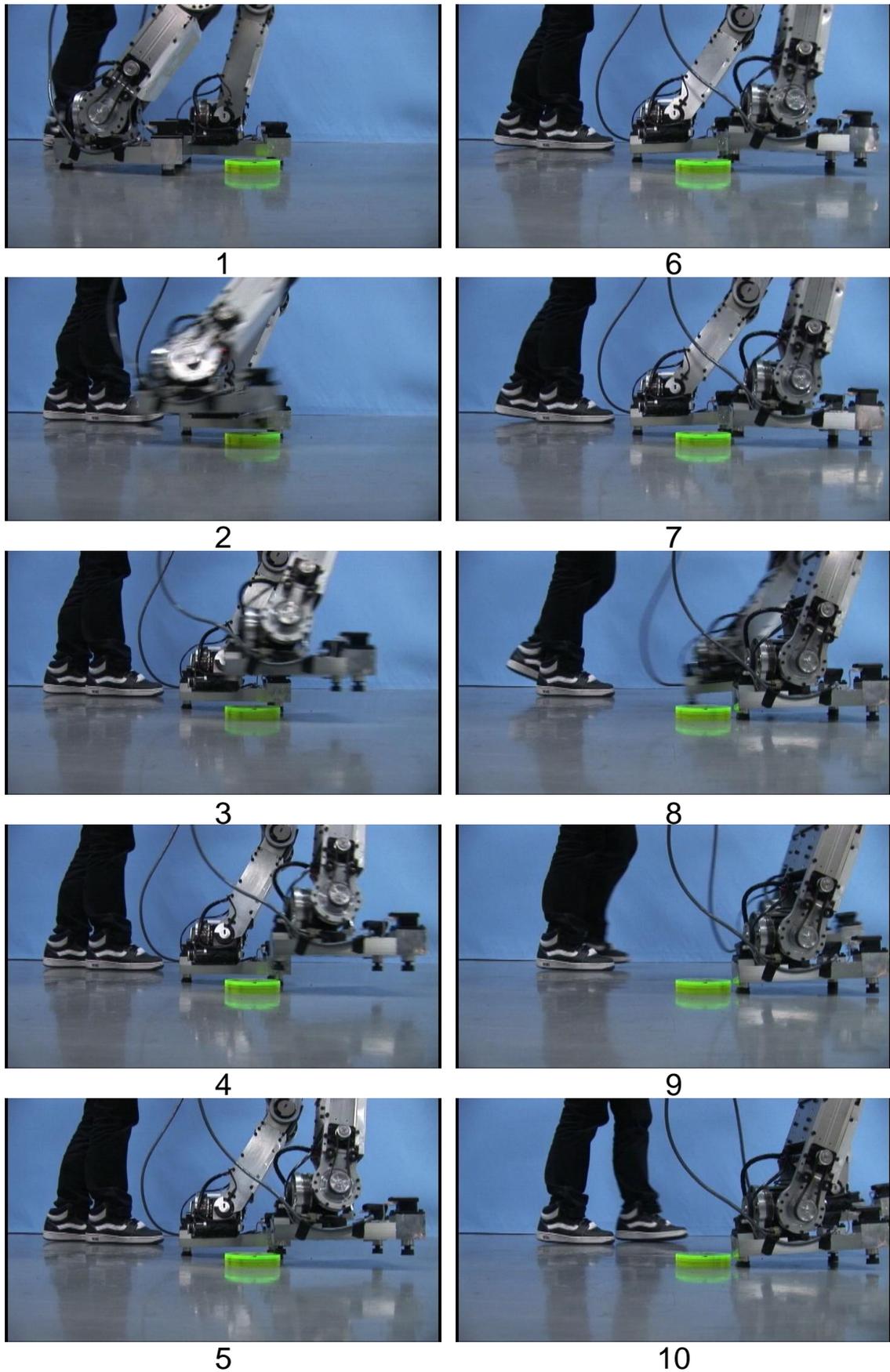


Figure 6.51 Rotation center in the past (under the foot joint)

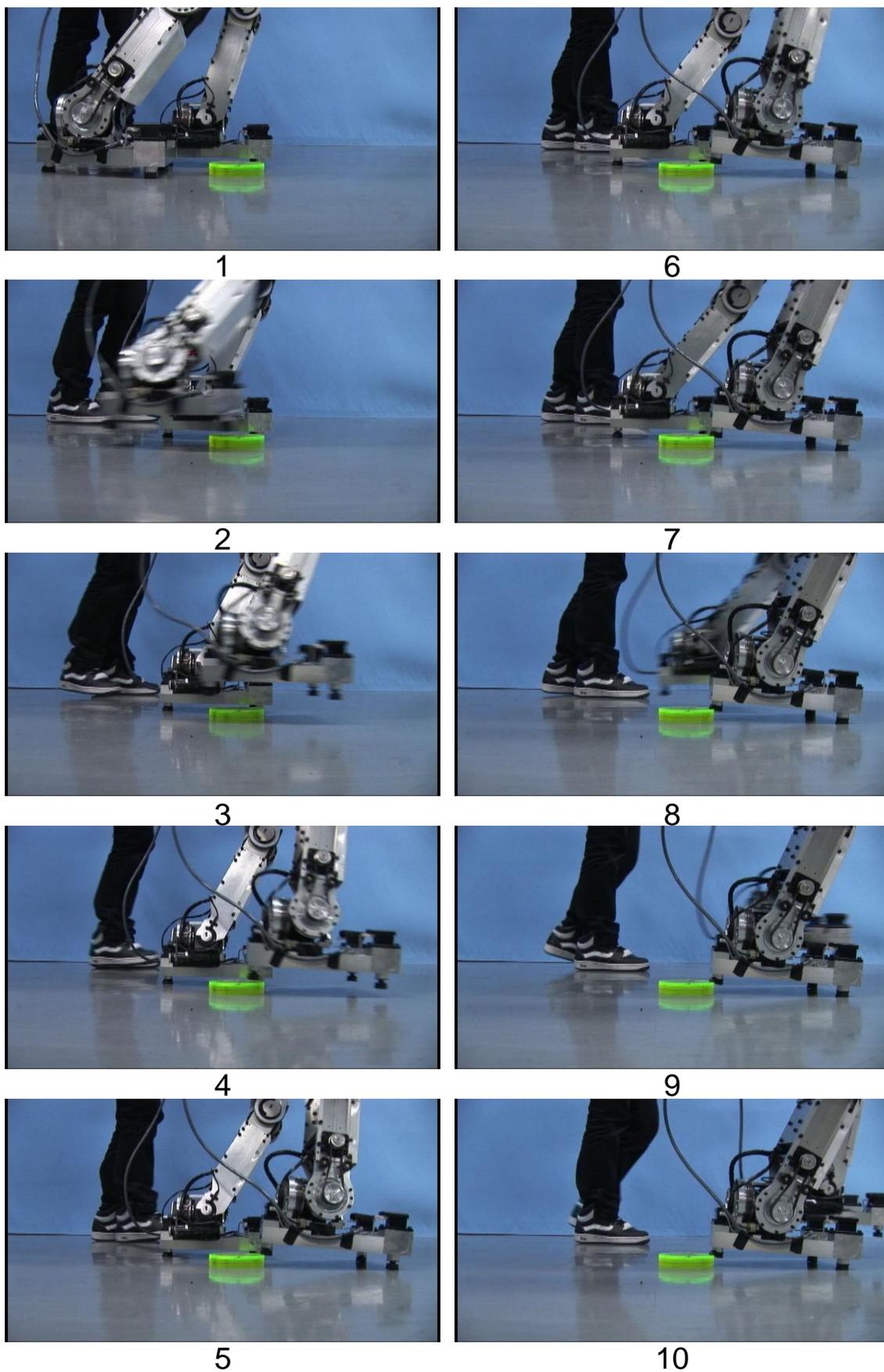


Figure 6.52 New rotation center (contact point)

6.5.3 擬似不整地歩行実験

(1) 実験目的

開発した3点型路面検知足部機構とセンサを用いた不整路面適応制御の有効性を検証する。

(2) 実験方法

図 6.53 のように 5[mm]から 20[mm]の板を実験室内に設置し, Roll および Pitch 方向に倣う凹凸が混在する不整地路面を擬似的に作成する. その擬似不整地路面において歩行実験を行なう. なお, 足部が板を踏む位置は図 6.54 のようになっている.

膝曲げ前進歩行

歩数 : 8[step]

歩幅 : 200 [mm/step]

歩行周期 : 1.0 [s/step]

安定化制御 : センサを用いた不整路面適応制御

ZMP 補償制御

姿勢補償制御

(3) 実験結果

実験結果を図 6.55 ~ 図 6.71 に示す. 歩行は 100%に近い成功率であった. 2009 年度の足部機構が, Roll および Pitch 方向への倣い動作が可能であり, 高い路面適応性をもつことが証明された.



Figure 6.53 Such uneven ground

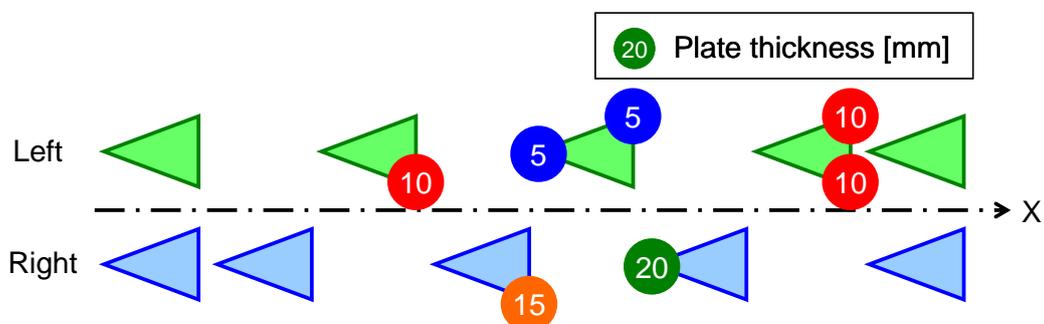


Figure 6.54 Arrangement plan of such uneven ground

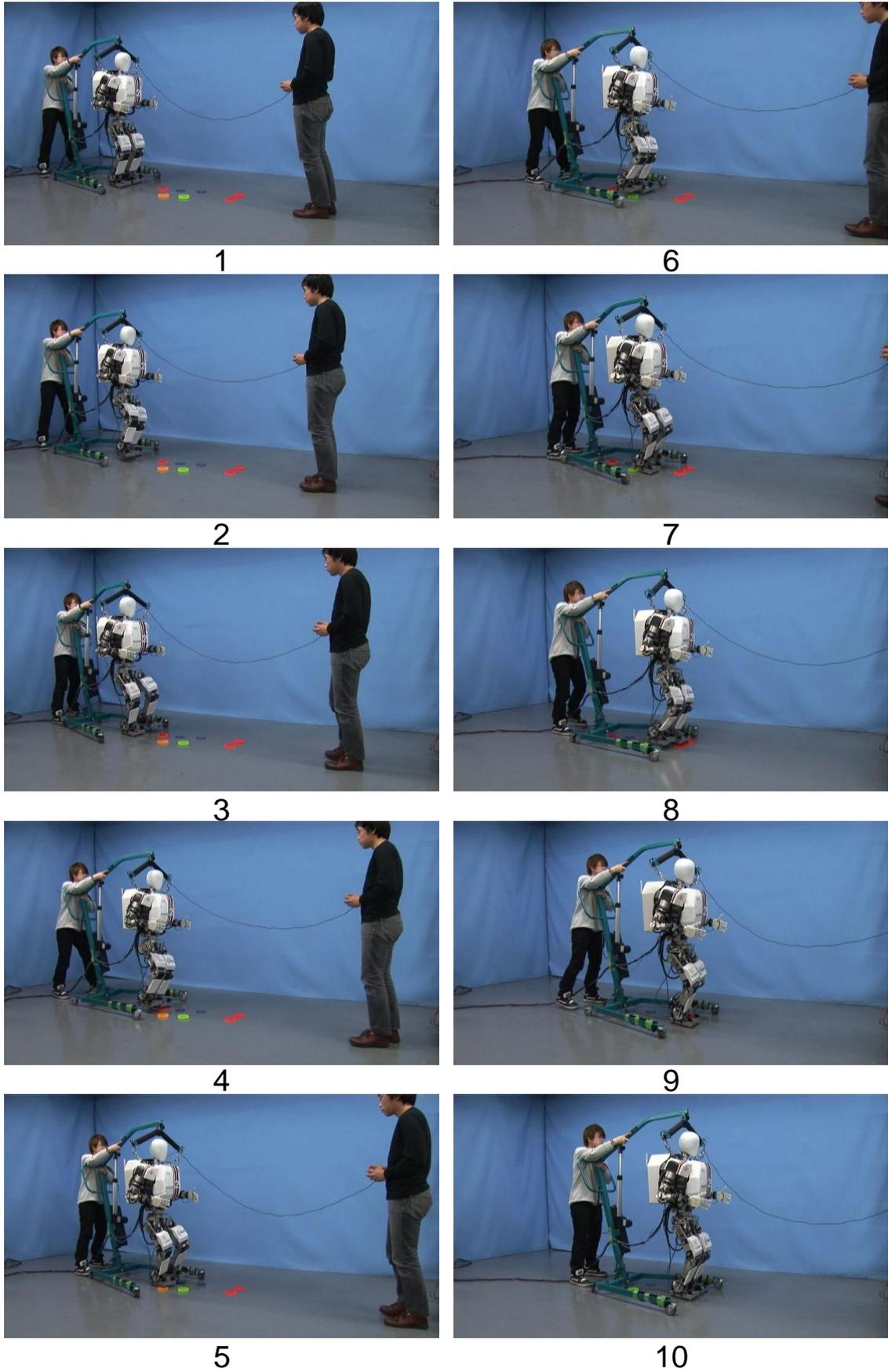


Figure 6.55 Walking experiment on uneven ground

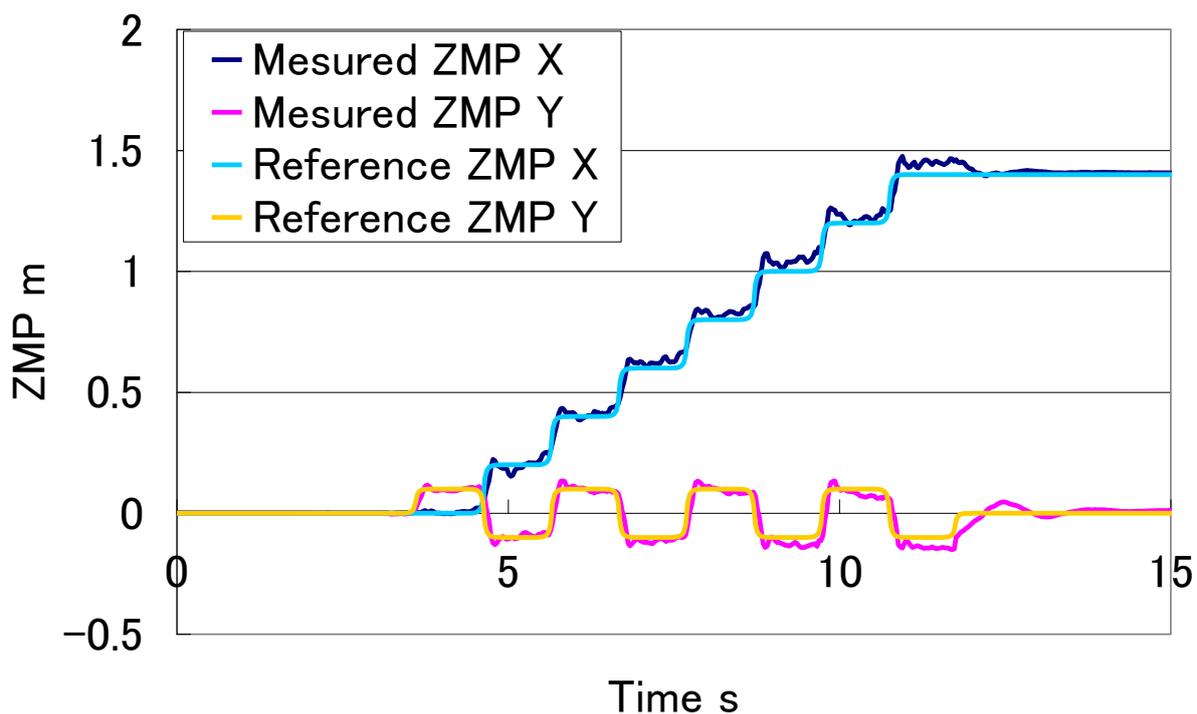


Figure 6.56 ZMP trajectories

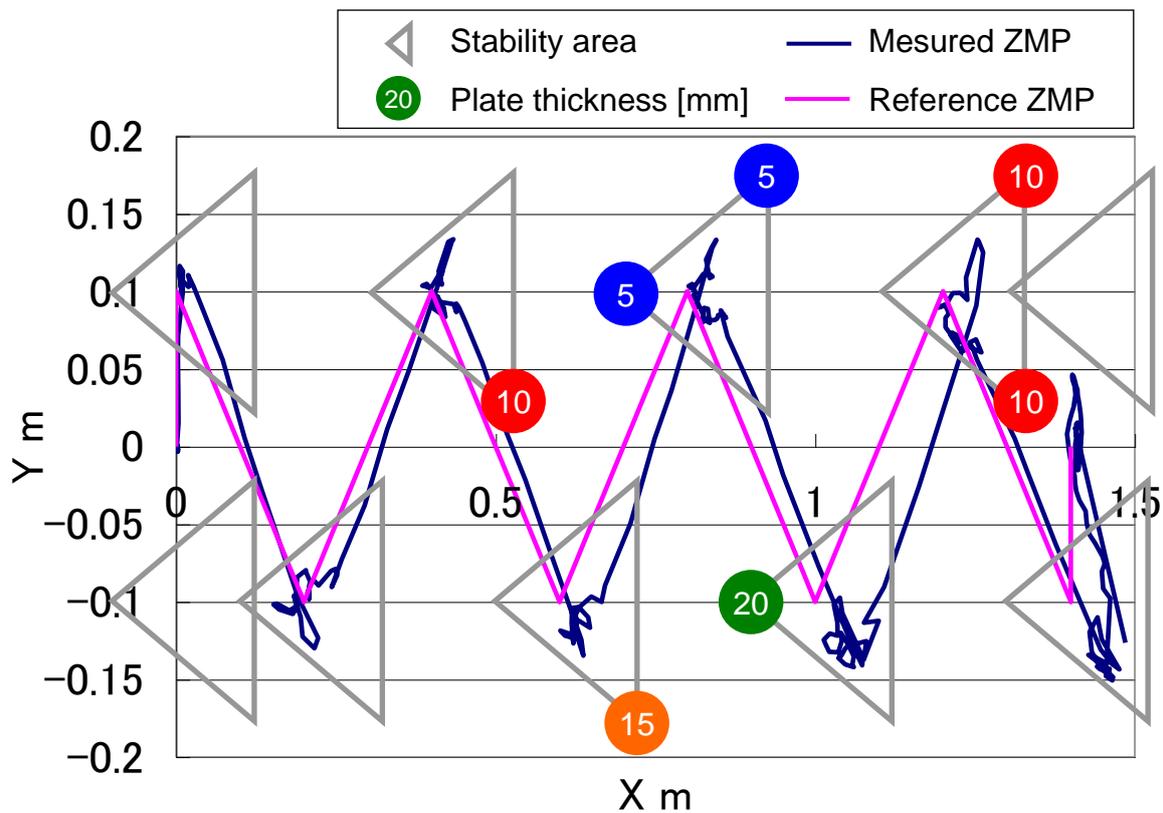


Figure 6.57 ZMP trajectories of X-Y plane graph

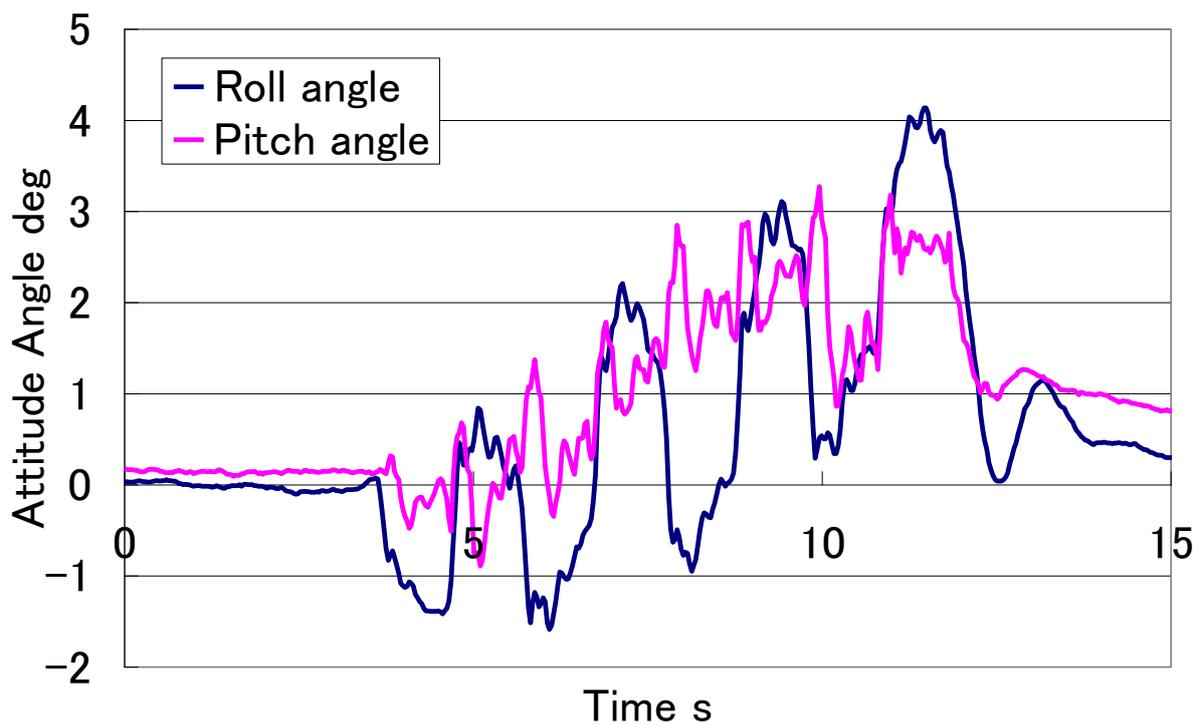


Figure 6.58 Attitude angle

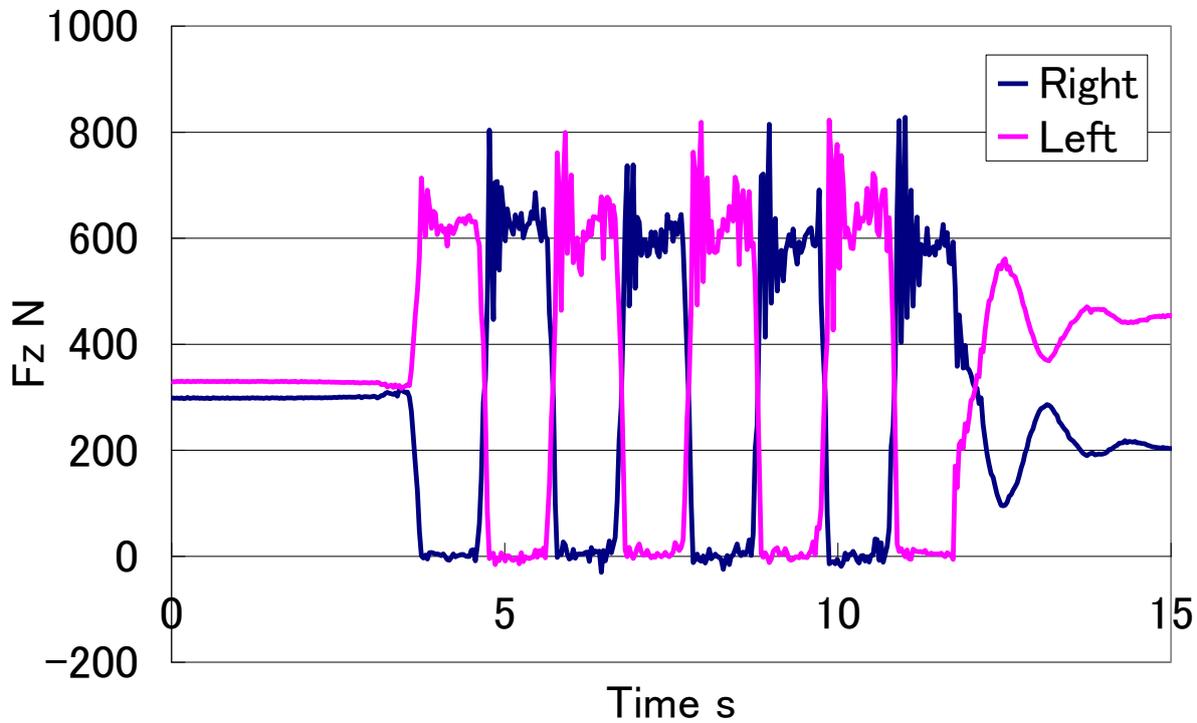


Figure 6.59 Ground reaction force

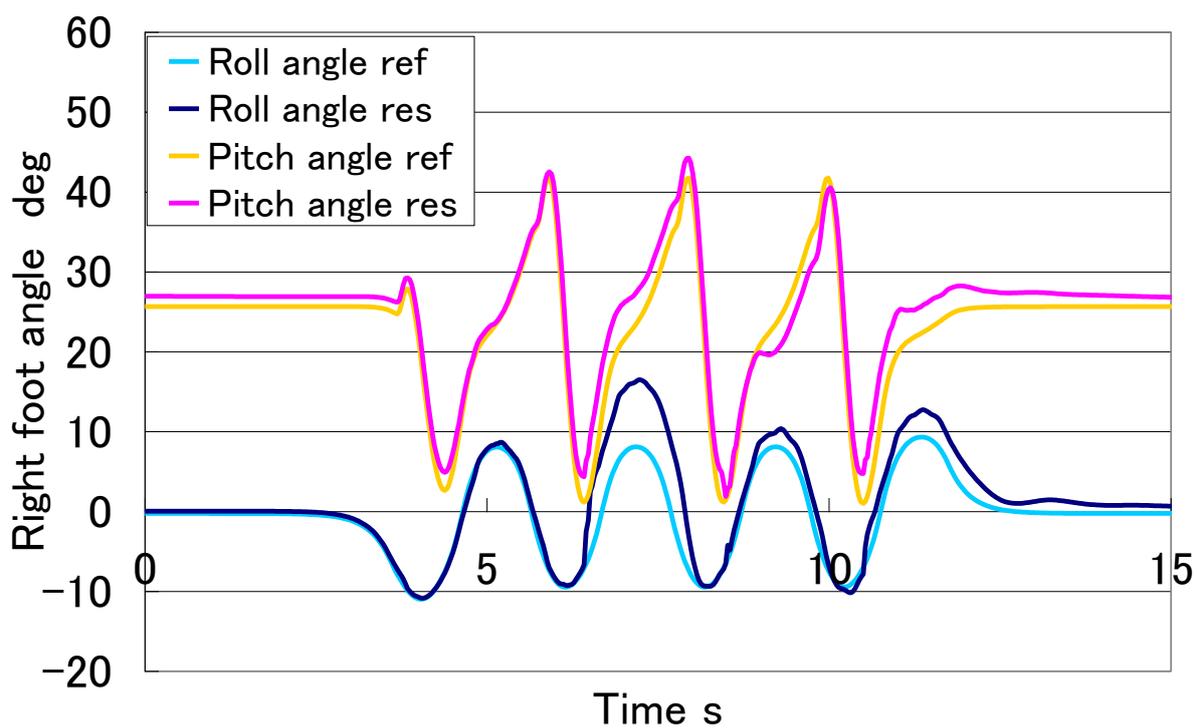


Figure 6.70 Foot joint angle (right)

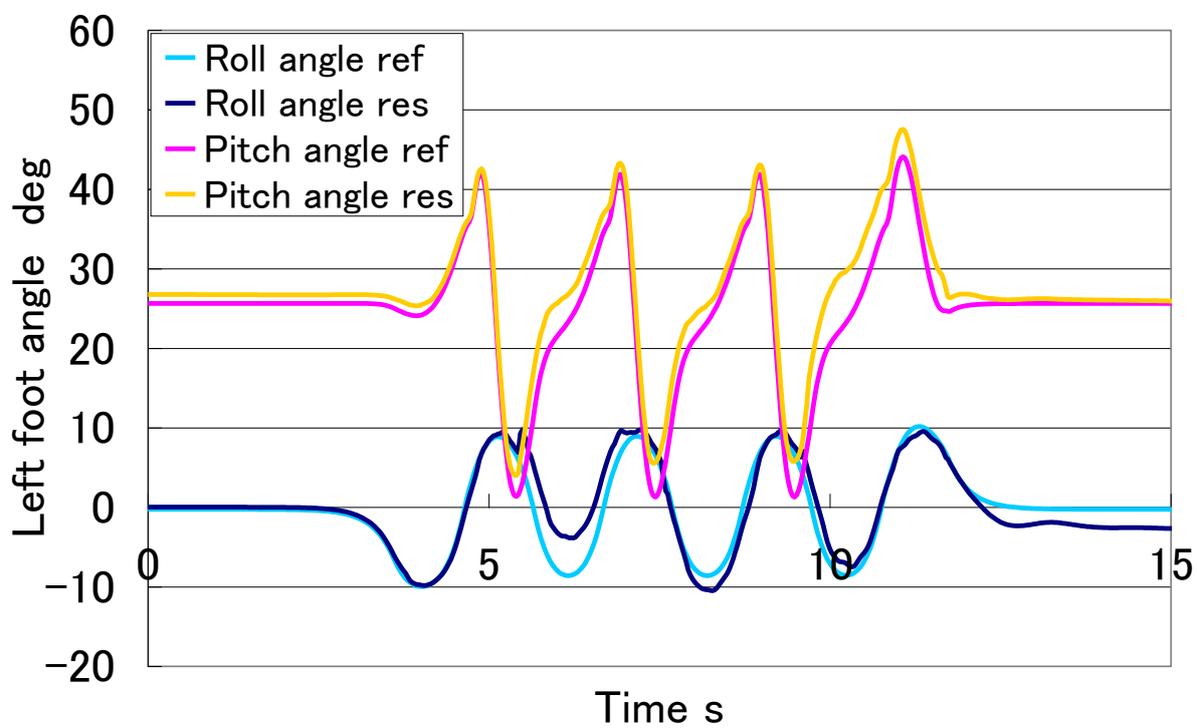


Figure 6.71 Foot joint angle (left)

6.5.4 傾斜路面歩行

(1) 実験目的

傾斜がある路面においても，路面検知可能な3点接地型センサ足部機構とセンサを用いた不整路面適応制御が有効であることを確認する．

(2) 実験方法

傾斜 7[deg]の路面を実験室内に設置し，平地から歩行を開始し，3歩目から傾斜となり，最後7歩目，8歩目で平地にて停止するような歩行を行なう（図 6.72）．

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

歩数 : 8[step]

歩幅 : 200[mm/step]

歩行周期 : 1.0[s/step]

安定化制御：センサを用いた不整路面適応制御

ZMP 補償制御

姿勢補償制御

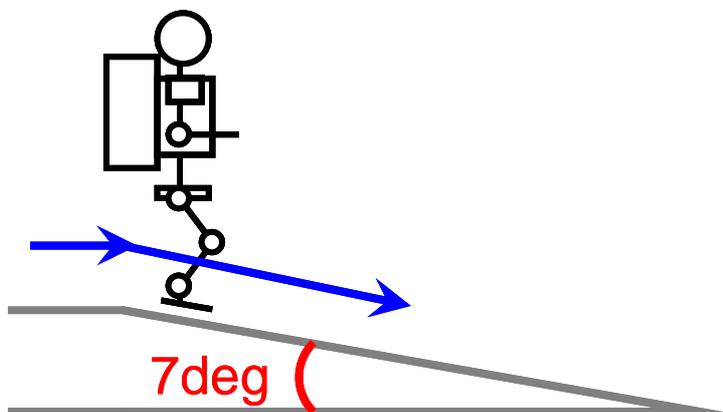


Figure 6.72 Image of inclined ground

(3) 実験結果

実験結果を図 6.73 から図 6.77 に示す．連続する傾斜路面においても歩行することに成功した．

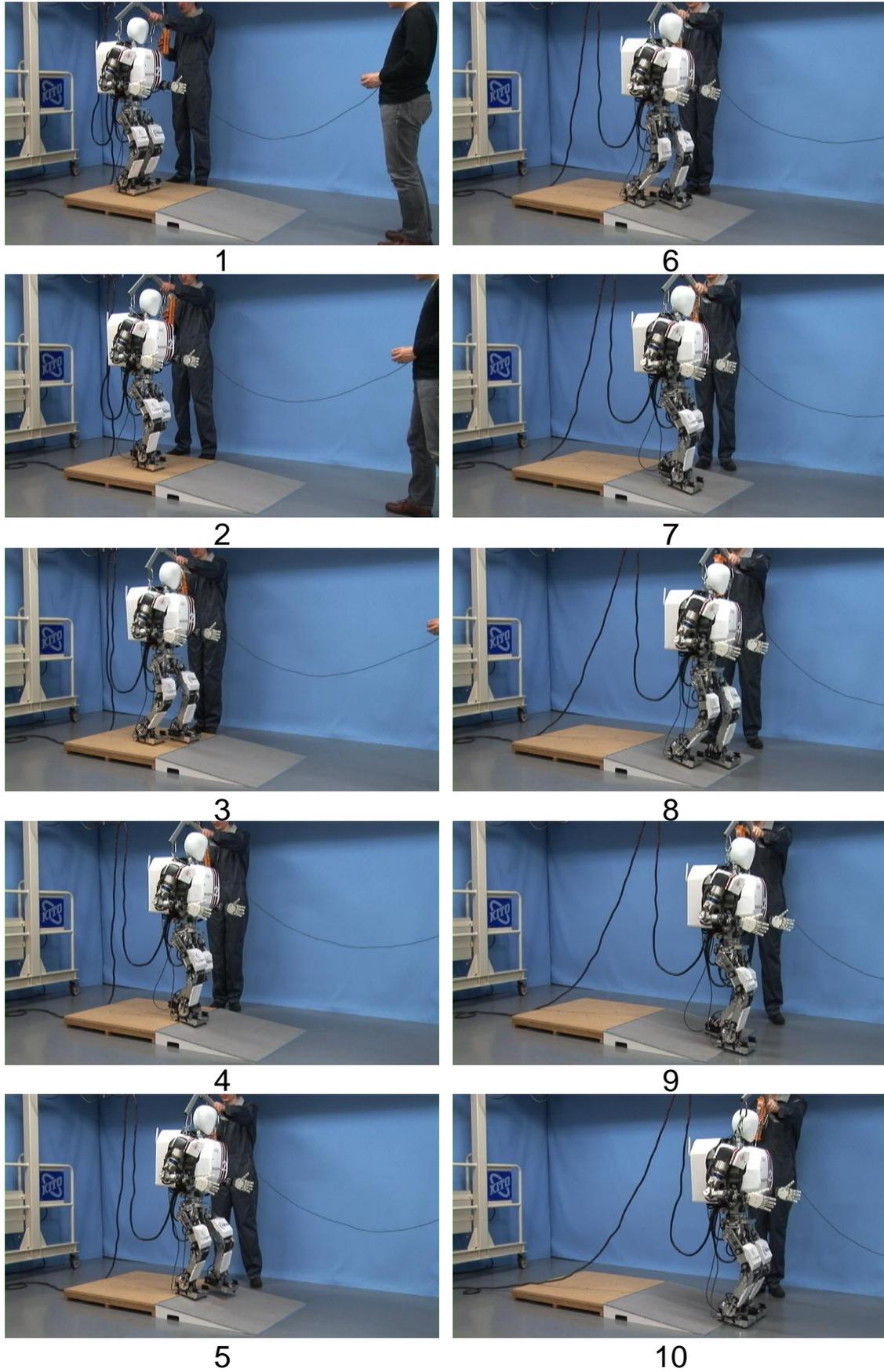


Figure 6.73 Walking experiment on slope of 7.0 degrees

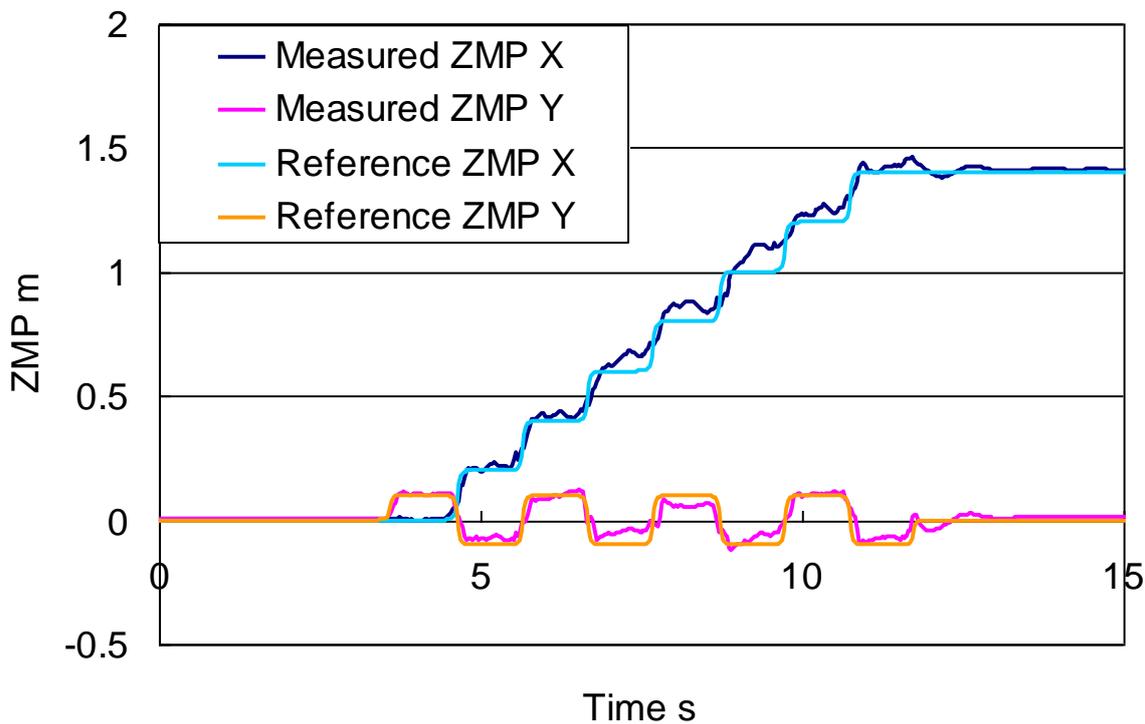


Figure 6.74 ZMP trajectories

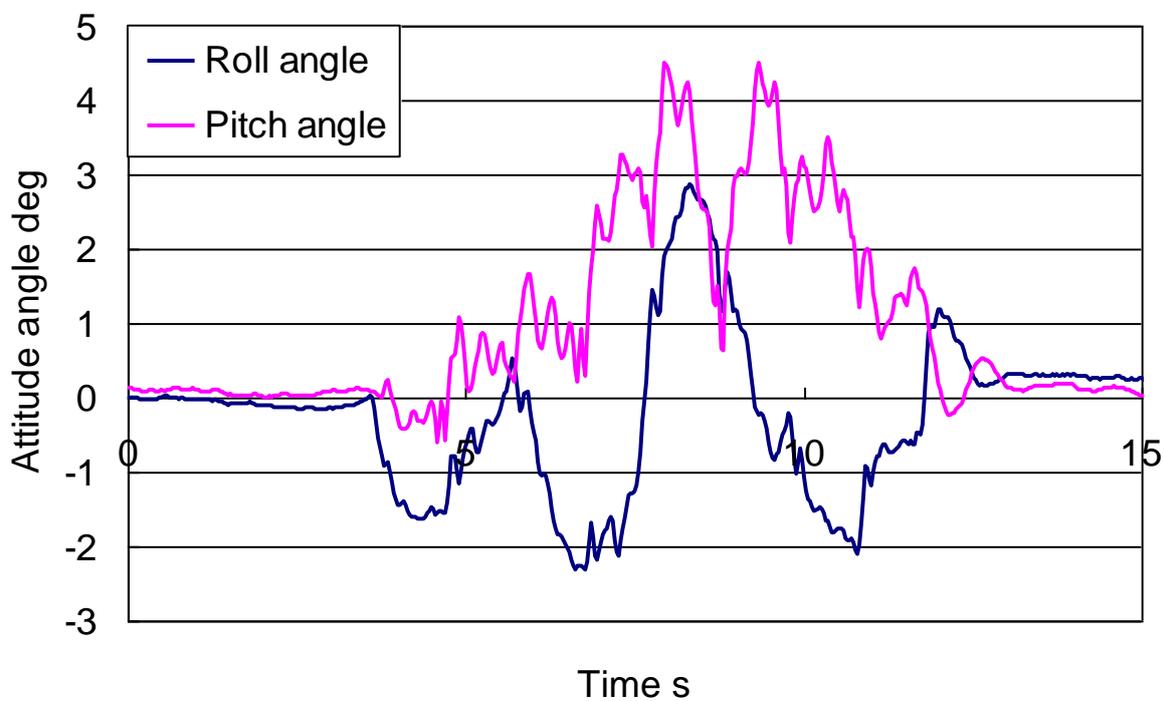


Figure 6.75 Attitude angle

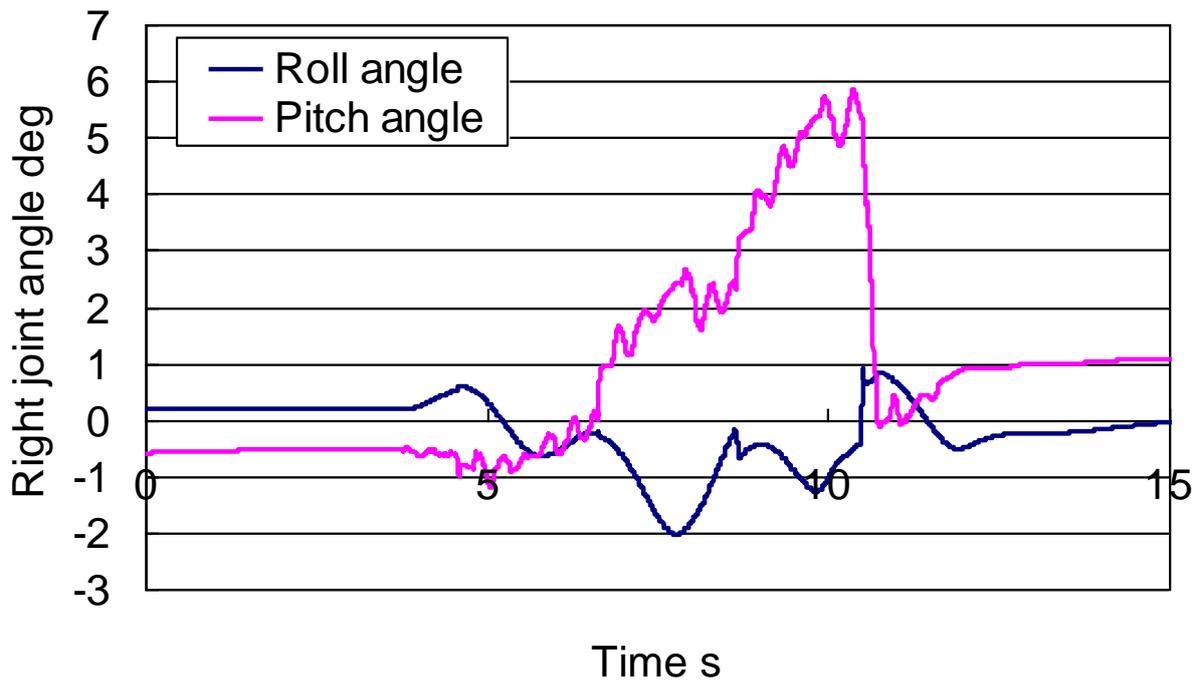


Figure 6.76 Foot joint angle (right)

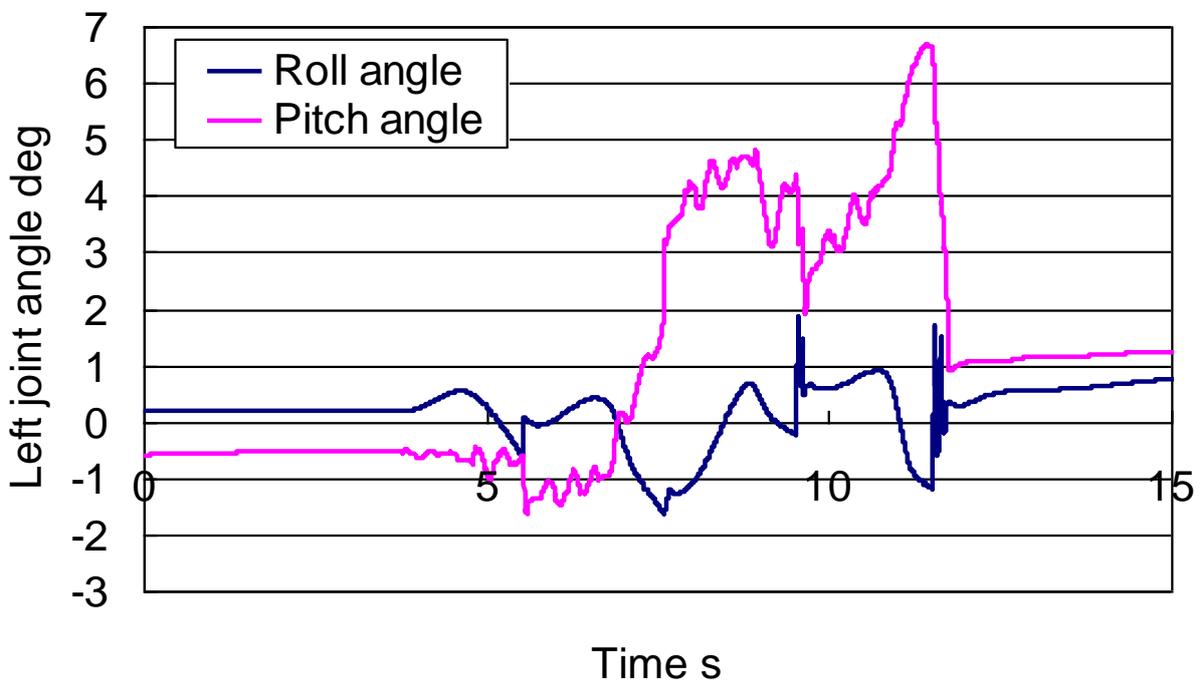


Figure 6.77 Foot joint angle (left)

6.5.5 考察

不整地における歩行成功率の向上を目的として、安定余裕の増大と滑落防止、センサの信頼性向上を図った3点型センサ式足部機構の開発、および、3点接地に対応し、接地点や接地線周りの倣い動作が可能な着地軌道修正制御の改良を行った。本章では、前述の4つの歩行実験を通じてその有効性を確認した。

実験結果より、Z方向、Pitch軸周り、Roll軸周りにそれぞれ20[mm]の段差に対して適応可能であることを確認した。さらに、それらが複合的に要求されるような5[mm]から20[mm]までの段差が混在する擬似不整地路面においても安定した歩行を実現した。特に、爪部の改良や路面適応動作の回転中心の変更により、転倒の原因のひとつであった滑落を抑制する効果があること、およびそれによる歩行成功率向上を確認した。また、開発した足部と制御は凹凸路面のみならず、傾斜路面にも有効であることを、平地から7[deg]の傾斜に変化する路面における歩行実験を通じて確認し、目標路面において安定歩行を実現した。

一方で、センサ部の機構の改良やセンサの変更により路面検知の信頼性が向上し、誤作動による転倒が大幅に減少し、歩行成功率向上に繋がった。さらに、センサの変更などによりセンサ部のストロークを2008年度の7[mm]から5[mm]まで短縮することが可能となった。それにより、路面の凹凸と爪部の引っかかりや、着地・離地時の足部軌道の足上げ高さの低減などに繋がった。

しかしながら、擬似不整地路面における歩行のZMP軌道に着目すると、歩行の後半において計測ZMPは設定ZMP軌道から大きく外れており、不安定な状態であると考えられる。また、姿勢角の実験データに着目すると、ZMP同様に歩行の後半において姿勢角の偏差が増大していることが見てとれる。不整路面適応制御は歩行パターンから得られる理論上のセンサ移動量と実際のセンサ移動量の差から路面の凹凸を検知しているため、正しく検知するためには姿勢角を適切に維持されていることが前提となる。そのため、路面適応能力の更なる向上のために現状の姿勢補償制御を再度検討し、改良する必要があると考えられる。

また、図6.78のような最大15[mm]の凹凸や7[deg]の傾斜が混在している実環境下での屋外不整地においては歩行の実現が難しかった。その原因として、「路面適応能力の不足」と「安定余裕の不足」の2点ではないかと考える。

まず前者の路面適応能力の不足については、斜面に対する路面適応のための倣い動作が着地時まで十分にわたっておらず、それにより転倒してしまうことが実験時の動画から確認された。そこで、倣い動作の速度を上げるために制御ゲインを上げたが、逆に路面を強く蹴るため大きな着地衝撃が発生し、現状では対応が難しいことが確認

された。

また、後者の安定余裕の不足については、2008年度は4点接地型足部を用いて、そのうちの3点により形成される安定領域を能動的に選択していたが、設定ZMPに対して安定余裕が少なく、足部の対角線周りに転倒する問題があった。そのため、今年度は安定領域の面積は変わらないが、設定ZMPに対する安定余裕が大きく取れるような逆二等辺三角形型の3点接地型足部を開発し、この問題を解決することとした。しかしながら、その結果として、2008年度では5%以下と成功率は非常に低かったが歩行に成功したのに対し、安定余裕は増加しているにも拘わらず、今年度は歩行の実現ができなかった。その原因として考えられるのは、2008年度の足部において対角線周りに転倒する際、実際は接地に利用していない残りの1点が路面に接地し、実質的な安定余裕が広がっていた場合があった可能性が考えられる。

今後の方針としては、路面適応能力については、現状足部の修正量はP制御を用いて決定しているので、PD制御などを用いて制御性の向上を図ることで解決したいと考える。また、姿勢補償制御の改良を行うことで、路面適応能力の向上も図る。一方、安定余裕については、前述の仮説を検証し、実質的に必要な安定余裕を確認する必要があると考える。前者の問題に対する対策と合わせて、再度、屋外路面での歩行実験を行い、評価する

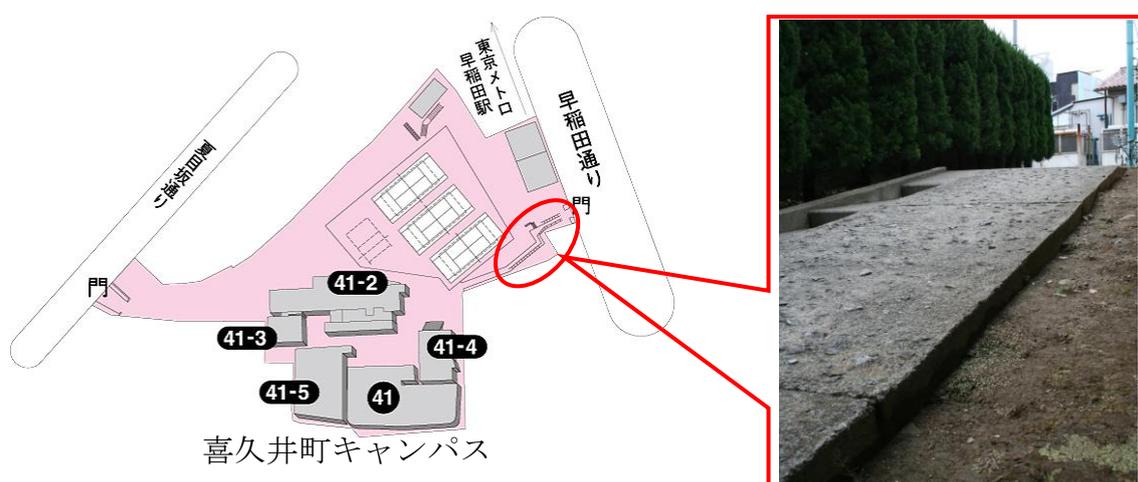


Figure 6.78 Experiment Outdoors

6.6 まとめ

不整地に対する適応性の向上として、センサ式足部機構の改良を行い、また従来の足底中心であった回転中心を路面と接地した点にした不整路面適応制御を導入した。これにより、安定領域の確保が難しかった不整地においても安定した歩行が可能になり、2008年度成功率を多めに下げる原因であった滑落の防止も可能となった。また、センサの値に移動平均を用いるなどして、ノイズやセンサの振動などの影響を抑制した。この結果、これまでよりセンサの信頼性が向上し、Pitch, Roll 軸と Z 方向で 20mm 程度の大きな凹凸に扱うことに成功した。

さらに、2008年度 7mm だったストロークを 2009年度は 5mm まで短くし、また信頼性が高いセンサを変更した。しかし、それでもまだ凹凸に引っかかってしまう可能性がある。計算上では限りなく 0mm まで近づけても歩行できることが確認され、ストローク 3mm での歩行にも成功することができたが、歩行が不安定になってしまった。これを解決するため、よりストロークを短くする必要があると考えている。

開発した 3 点型路面検知足部機構にて 5[mm]から 20[mm]までの段差を含む擬似不整地の歩行に高い成功率で成功した。しかし、ZMP 軌道を見ると、不整地上では設定 ZMP から大きく離れており、不安定な状態であると考えられる。安定化制御のさらなる向上が必要である。それにはまずロボットの姿勢補償制御の向上が必要であると考えられる。よって、姿勢角センサの性能の向上が必須である。今後、姿勢角の値を 1msec で取得可能な姿勢角センサなどが開発されれば、ロボットの安定性は劇的に向上する可能性があると思われる。

また実環境下での屋外不整地においては歩かない問題があった。斜面において脚が届かなく、倣いきらずに転倒してしまうことがその原因であった。そこで P 制御のゲインをあげて脚をもっと伸ばすようにしたが、それに従って着地衝撃が大きく発生してしまう現象が起こった。そこで、速度成分を用いた D 制御を考えた。D 制御により足部の発振が減少すると P 制御のゲインをもっと上げることが可能である。現在、D 制御を開発中であるので実際の PD 制御の有効性の確認がまだできてない。

今後の方針としては、PD 制御の開発を完成させ、実環境下での屋外不整地における歩行成功率を上げることと高速歩行を目指して踵接地での歩行を行うこと、さらなる高低差や脆弱路面への適応を目指すことなどが考えられる。

第7章 軟弱路面歩行安定化制御の開発

- 7.1 はじめに
- 7.2 足型センサを用いた適応制御歩行制御法
- 7.3 重心位置補償制御法
- 7.4 歩隔修正制御および足底姿勢修正制御法
- 7.5 床反力調整制御法
- 7.6 評価実験と考察
- 7.7 まとめ

7.1 はじめに

第1章で述べたように、多くの機関と企業のロボットに関する研究が盛んに行われている。特に、多くのところでは2足歩行ロボットの第一報として変形しない剛体路面における歩行に関して主に研究を進めている。高西研究室では2006年度に人間搭乗型2足歩行ロボットを用いて凹凸と傾斜が混在する屋外の剛体路面での歩行に成功した事例がある。しかし、これまでに開発されてきている2足歩行ロボットの歩行能力は、人間と比べると程遠いものであり、人間の住環境下で実用化されるまでにはまだ大きな技術の発展が必要である。

また、前述したように人間が生活する住環境には平坦な路面だけでなく不整路面も存在している。しかし不整路面といっても、脚接地面に変形を伴わない剛体路面以外に、砂地や草地、雪道といった加重により脚接地面が変形する軟弱路面も多く存在する。

雪道のようにすべりやすい路面に関しても2足歩行ロボット HRP-3 を用いて適応歩行に成功した事例がある。しかし、砂漠やカーペットのような柔らかい路面に関しては多脚歩行ロボットを用いて成功した事例はあるが、2足歩行ロボットに関しては基礎的な理論だけあり、実際に成功した事例がない[154-157]。軟弱路面は加重により路面自体が変形してしまうため、剛体路面のように ZMP (Zero moment point) を制御に生かせることが不可能である。そのため、軟弱路面における安定化歩行に関する先行研究が大変少ない[158-167]。

そこで、本研究は2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行の実現するために、路面の力学的特性に基づいたモデル化とその制御法について明らかにすることを目的

とした。まず、前述した剛体の不整路面における歩行能力の向上を図るため、路面検知可能なセンサ式足部機構と路面適応制御の開発を行う。また、軟弱路面における安定した歩行を実現する際に必要な路面の工学的なパラメータがない点に着目し、住環境に存在する様々な路面を調査し、工学的観点からばね・ダンパ系でモデル化し、路面の分類を行う。そして、路面パラメータを取得可能な路面性状測定装置を開発した。路面のモデルに基づいた歩行安定化制御の開発を目指す。

7.2 足型センサを用いた適応制御歩行制御法

現在2足歩行ロボットに関する研究が盛んに行っており、それに従って実環境下での不整地における2足歩行ロボットの歩行能力は上がってきた。しかしながら、実環境では砂利道、砂地、芝生などのように足部が接地すると加重により変形が生じるような路面も多く存在しているにも関わらず、現在行っているロボットの研究は変形しない剛体路面に限っており、そのような路面での歩行安定化に関する先行研究は少なく、まだ実現されていない。そこで今年度では、脆弱路面での歩行を実現するためには、路面を適切にモデル化し、それに応じた歩行安定化制御系を構築する必要があると考える。そこで、脆弱路面のモデル化とそれを利用した歩行安定化制御系の開発を目標とした。

変形する脆弱路面における安定化制御は、以下の3つが考えられる。

- (1) Roll と Pitch 軸周りの修正
- (2) Z 軸方向の修正
- (3) すべりに対する修正

以下、これらについて詳しく説明する。

7.2.1 Roll 軸と Pitch 軸周りの修正

脆弱路面のもうひとつの特徴として路面のあるところに変形してしまうとその周りの表面も一緒に押し込まれることである。それによりロボットの姿勢が崩れ、転倒してしまうことが発生する。そこで路面計測装置に搭載されている足部型センサを用いて Roll と Pitch 軸周りの修正を行う。このセンサは WABIAN-2R の足部に付け替えができるように設計・製作されているので、このセンサを WABIAN-2R の足部につけられ、歩行中に発生する路面に対する床反力を検知し、それぞれの差分を用いて修正を行う。

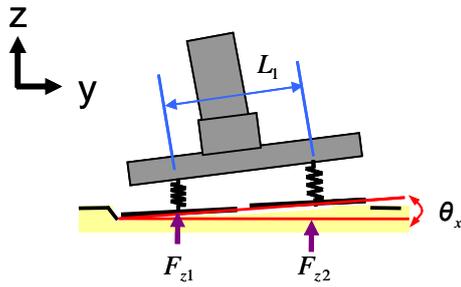


Figure 7.1 Modification about roll axis

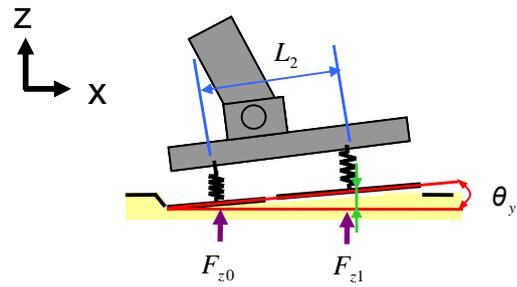


Figure 7.2 Modification about pitch axis

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{F_{z1} - F_{z2}}{K}}{L_1} \right) \quad (7.1)$$

θ_x : Roll 軸の修正量

F_z : 床反力

K : 路面の弾性係数

L : 足部の左右センサ間の距離

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{F_{z0} - F_{z1}}{K}}{L_2} \right) \quad (7.2)$$

θ_y : Pitch 軸の修正量

L : 足部の前後センサ間の距離

7.2.2 Z 軸方向の修正

足部が接地すると加重により変形が生じる脆弱路面の体表的な特徴は変形しない剛体路面と違い、踏み動作をするとき路面の沈み込み量が発生することである。そこで、脆弱路面における歩行に関して主に影響を及ぼすのはこの沈み込み量だと考え、それに対する Z 軸方向の補償修正を考案した (図 7.3)。この概要について説明すると 2009 年度高西研究室で開発した路面のパラメータを測定するために製作した路面計測装置からとられた路面の弾性のパラメータを用

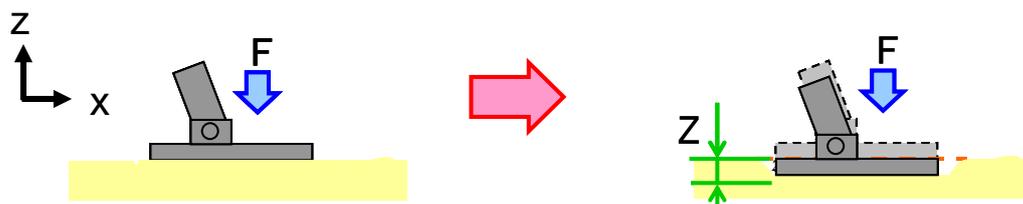


Figure 7.3 Modification along the vertical axis

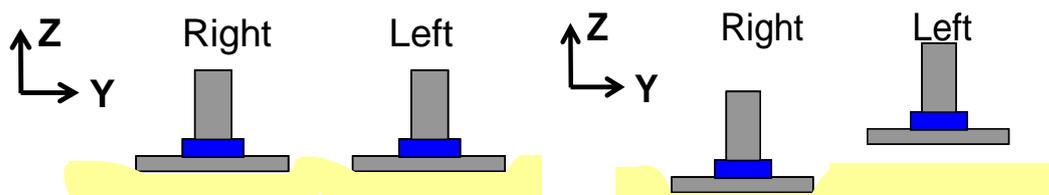


Figure 7.4 Outline of modification in double support phase and single support phase

いて修正を行う。また装置からえられた沈み込み量を推定し、歩行中にロボットの足部を路面側が押し込みきれるところまで押し込みきるようにする。まず、図 7.4 のように立脚期のときは左右の足部がうける床反力が等しいと考え、次のように算出する。

$$\Delta z = \frac{F}{k} \quad (7.3)$$

また、遊脚期になると同じだった反力が課立脚期の片足に移していく。それにより路面の変形が起こる可能性が高いため、図 7.5 のように力の変形量に対して修正を行う。

$$\Delta z = \frac{F + \Delta F}{k} \quad (7.4)$$

このとき、路面の Z 方向に対する修正がうまくできるように踏み動作が倣いきるように歩行周期の変更を行なうことにした。歩行周期の変更方法を以下に示す。

今回、歩行周期の変更には補間点数の値を変化させることで実現した。しかし、これは補償計算の結果を無視していることになり、本来ならすべき方法ではない。今回はまだオンラインパターン生成法が完成しておらず、また現在研究しているオンラインパターン生成法はすぐに歩行周期を変更することは難しいため、補間点数を変更するという方法を取った。

7.2.3 すべりに対する修正

様々な脆弱路面には他の剛体路面が持ってないすべりも持つ。すべりに関しては X 軸方向と Y 軸方向に対してすべった量だけ次の一步に加えて修正を行う手法である(図 7.6, 図 7.7)。今年度はすべりに関しては修正を行わないが, 今後 Z 方向と Roll 軸, Pitch 軸周りの修正と統合していく。

7.3 重心位置補償制御法

軟弱路面における人間の歩行解析より得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 路面と足底のクリアランスは一定以上に保たれる。
- (2) 軟弱路面では足底 CoP 軌道が外側に振れず, 内側よりになる。
- (3) 剛体路面において遊脚に床反力が発生しない期間でも軟弱路面においては床反力が発生する。
- (4) 水平方向の重心の軌道が維持される。

これらに知見に対して, 現状の WABIAN-2R の軟弱路面における歩行は,

- (i) 路面と足底のクリアランスに余裕なし
- (ii) 設定 ZMP 軌道は剛体路面と同じ
- (iii) 遊脚中に発生する反力への対応なし
- (iv) 左右方向の重心の動きを安定させる制御なし

といった問題点がある。

そこで, (i), (ii)に関しては歩行パターンにおいて設定 ZMP 軌道を内側よりにし, 足上げ高さを増加させることで対応する。また, (iii), (iv)については, 姿勢の崩れや床反力による外乱に対して重心位置の偏差を補償する制御を開発する。ここで, 前述のように軟弱路面での安定した静止立位が実現できていないため, まずはこれを制御により実現する。人間の静止立位における先行研究の多くは人間を倒立振子でモデル化しており, その中でも人間は足関節のモーメントに基づいて外乱に適応しているという報告があった。そこでこの知見を基に, 次のような制御モデルを開発した。

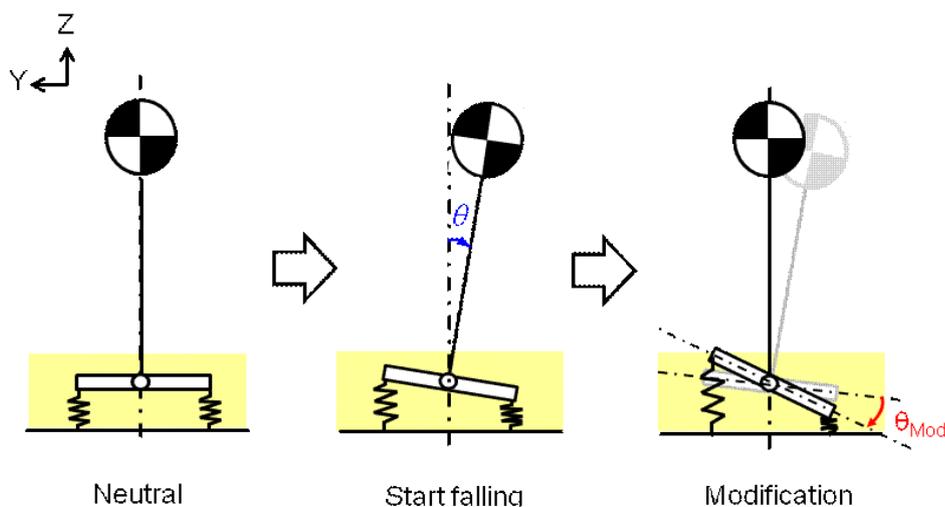


Figure 7.6 Outline of the walking stabilization control on a soft ground

7.3.1 制御モデル

図 7.6 のようにロボットを倒立振り子，路面を並列のばね要素としてモデル化を行った．本制御は重心の角度偏差をロボットに搭載された姿勢角センサから取得し，路面のばね要素を考慮して足底を回転させることで，重心の角度偏差を補償するものである．

7.3.2 修正量の計算方法

図 7.7 のようにロボットの姿勢が θ 傾いたとすれば，倒立振り子の軸に発生するトルク T は，

$$T = mgL\sin\theta - J\ddot{\theta} \quad (7.5)$$

で求められる．

このとき，足底では，図 7.8 のようになっており，軸に発生するトルク T は，

$$\begin{aligned} T &= F_2 a - F_1 a \\ &= ak_g(d_2 - d_1) \approx 2a^2 k_g \theta \end{aligned} \quad (7.6)$$

で求められる．

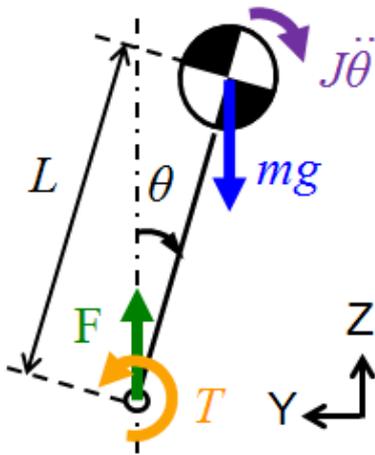


Figure 7.7 Inverted pendulum model

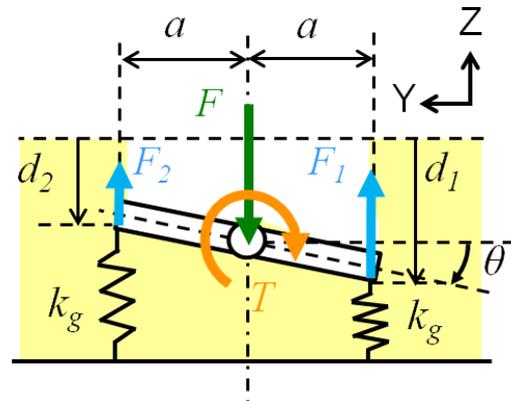


Figure 7.8 Deformation of soft ground

ただし、 k_g は予め路面性状計測装置により計測した路面のばね定数である。

ここで、図 7.7 の重心を復帰させるにあたり、ばね・ダンパ系のモデルより、以下の式を満たすときに安定になる。

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + K\theta = 0 \quad (7.7)$$

ただし、 D は速度ゲイン、 K は比例ゲインである。

式(7.7)を式(7.5)に代入することで、重心の復帰に必要な軸トルク T_{ref} が求められる。

$$T_{ref} = mgL\sin\theta + D\dot{\theta} + K\theta \quad (7.8)$$

また、力センサの値から、実際に軸トルクに発生している T を取得し、重心の角度の補償に必要なトルク ΔT を計算する。

$$\Delta T = T_{ref} - T \quad (7.9)$$

そして、式(7.6)と式(7.9)より、修正量である足底の回転角 θ_{Mod} を導出する。

$$\theta_{Mod} = \Delta T / 2a^2k_g \quad (7.10)$$

7.3.3 制御期

本制御はロボットに両足の足底に実装されている力センサの値大きさから立脚期および遊脚期を判断し、立脚期においては前述の修正量を出力し、遊脚期にパターンに復帰する。

本制御のブロック図を図 7.9 に示す。本制御は回転中心を左右の足底の中央に移動しているため、Roll 軸、Pitch 軸の修正量だけでなく、x 軸、y 軸、z 軸にも修正量が入る。また、タイミングチャートを表 7.1 に示す。両立脚期は両足の力センサの値の大きさを比較して、より力がかかっている足のみ修正量を出力し、反対側の足はパターンに復帰する。ただし、 T_{th} は力のスレッシュホールド、 ΔT は右脚の力センサの値と左脚の力センサの値の差分である。

Table 7.1 Timing chart of the walking stabilization control

	Stance phase	Double support phase			Swing phase
		$F_{Th} < \Delta F$	$-F_{Th} < \Delta F < F_{Th}$	$\Delta F < -F_{Th}$	
Roll,Pitch	Modification control	Modification control	Returning motion	Returning motion	Returning motion

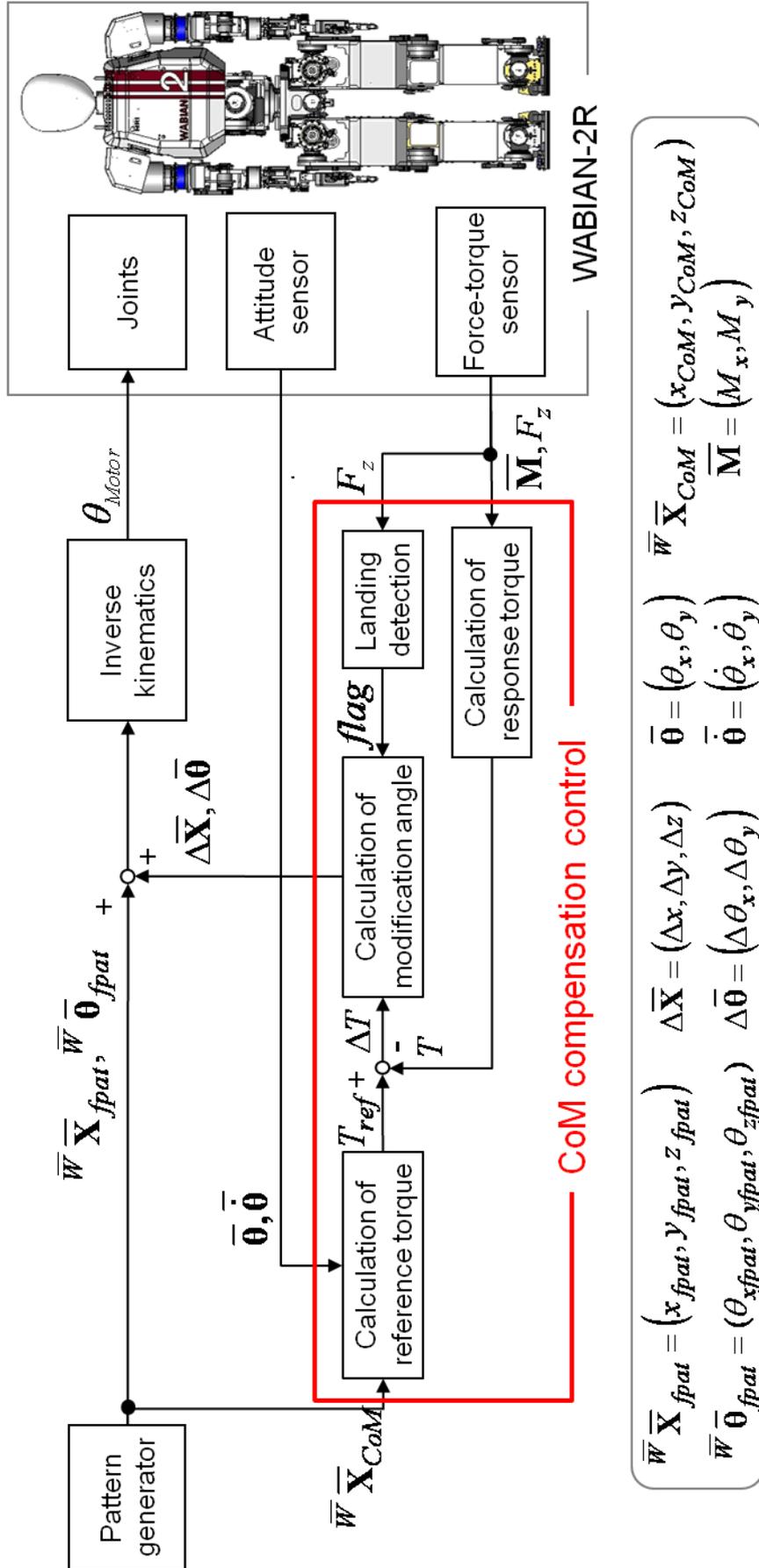


Figure 7.9 Block diagram of the walking stabilization control on a soft ground

7.4 歩隔修正制御および足底姿勢修正制御法

現在、多くの大学や企業において、様々な目的で2足歩行ロボットが研究されている。しかし、開発されてきている2足歩行ロボットの歩行能力は、人間と比べると程遠く、課題が数多く存在している。まず、2足歩行特有の弱点として、歩行中に外へ振れてしまうと復帰が困難であることが挙げられる。次に足部が変形してしまうとロボットモデルが変わってしまうため歩行が難しいというのが挙げられる。本研究室では、2008年度より人間に近い足部を開発し、ロボットにてその足を評価することで人間の足部機能の解明につながるのではと考え研究を開始した。2008年度の成果として、足幅を人間と同等にまで狭められた人間形足部にて踵接地爪先離地歩行に成功したことが挙げられる。しかし、歩行中にRoll軸周りに十分なトルクが発生できず、立脚側の足部でロボットの姿勢の修正が困難なことであるため、わずかな路面のうねりさえも歩行に悪影響をもたらし、外へ転倒してしまうという問題点があった。また、2010年度は人間の足裏の機械的特性を人間形足部に取り入れることを目指したため、足裏自体が変形し姿勢の維持が困難であることが想定された。そこで本研究では、幅狭で足底に弾性要素を持つ足部での歩行安定化を目標とした。

7.4.1 歩隔修正制御

幅が狭い足部で安定した歩行を実現する方法として、以下の4つが考えられる。

- (1) ZMPの追従性の向上
- (2) 姿勢の崩れを防止
- (3) 姿勢の崩れを利用
- (4) 姿勢の崩れを事前に推定

ここで、(1)の手法は2005年に実装した体幹位置コンプライアンス制御により実現されている。また、(2)の手法は2007年度に姿勢制御として実装済みの技術である。そして、姿勢制御など立脚を修正する制御は転倒が始まってしまうと有効に働かないという予備実験の結果を得た。(3)の手法は姿勢の崩れを積極的に利用する方法だが、足部ハードウェアによって、意図的に内側に倒れやすい状態でないと適応できない。そこで、本研究では(4)の手法を採用することとした。

具体的には、力学的エネルギーを用いることで次の1歩の姿勢が崩れるかど

うかを事前に推定し、転倒を抑制することとした。その際に、しきい値を設け、その範囲を越えた場合のみ修正量が発生するようにした。力学的エネルギーは以下の式にて導出した。

まず、着地後の力学的エネルギー E_2 、リミットポテンシャルエネルギー E_{lim_max3} 、 E_{lim_min3} はそれぞれ

$$E_2 = \frac{m}{2} (l_2 \dot{\theta}_2)^2 + mgl_2 \cos \theta_2 \quad (7.11)$$

$$E_{lim_max3} = mgl_2 \cos(\theta_{lim_max3}) \quad (7.12)$$

$$E_{lim_min3} = mgl_2 \cos(\theta_{lim_min3}) \quad (7.13)$$

で表すことができる。この時の未知数 $\dot{\theta}_2$ 、 l_2 は角運動量保存則および着地時における左右の Z 方向の高さは等しいことにより θ_2 で表すことができる。

角運動量保存則より

$$\begin{aligned} ml_1 l_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) &= ml_2^2 \dot{\theta}_2 \\ \Leftrightarrow \dot{\theta}_2 &= \frac{l_1}{l_2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \end{aligned} \quad (7.14)$$

着地時は左右の Z 方向の高さは等しいため

$$l_1 \cos(\theta_1) = l_2 \cos(\theta_2) \Leftrightarrow l_2 = \frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2)} l_1 \quad (7.15)$$

よって、エネルギー E_2 、 E_{lim_max3} 、 E_{lim_min3} はそれぞれ下記のような式に変形できる。

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{m(l_1 \dot{\theta}_1)^2}{2} \cos^2(\theta_1 + \theta_2) + mgl_1 \cos(\theta_1) \\ E_{lim_max3} &= mgl_1 \cos(\theta_{lim_max3}) \frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2)} \\ E_{lim_min3} &= mgl_1 \cos(\theta_{lim_min3}) \frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2)} \end{aligned} \quad (7.16)$$

上記までがエネルギーの導出である。ここで、

$$E_{lim_min3} \leq E_2 \leq E_{lim_max3} \quad (7.17)$$

の時は修正量が発生しないのは前述したが,

$$E_2 > E_{lim_max3} \tag{7.18}$$

$$E_2 < E_{lim_min3} \tag{7.19}$$

の際の修正量算出方法に関して, $E_2 > E_{lim_max3}$ を例に説明する.

遊脚の修正角を $\Delta\theta_{2_modif}$ と置くと E_2 , E_{lim_max3} はそれぞれ

$$E_2 = \frac{m(l_1\dot{\theta}_1)^2}{2} \cos^2(\theta_1 + \theta_2 + \Delta\theta_{2_modif}) + mgl_1 \cos(\theta_1) \tag{7.20}$$

$$E_{lim_max3} = mgl_1 \cos(\theta_{lim_max3}) \frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2 + \Delta\theta_{2_modif})} \tag{7.21}$$

と表される. $\Delta\theta_{2_modif}$ が増加すると E_2 は単純に減少, E_{lim_max3} は単純に増加するので繰り返し計算により関係が逆転するまで $\Delta\theta_{2_modif}$ を増加させ, 関係が逆転した際の値を最終的な修正量として加えている. E_{lim_min3} の場合はその逆を行うことで修正量を算出できる.

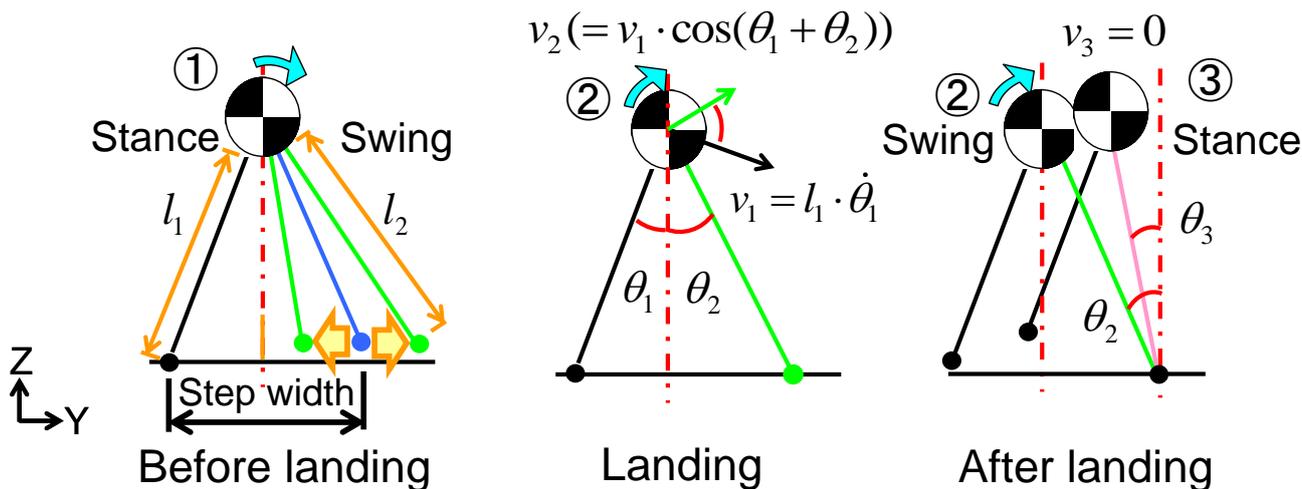


Figure 7.10 Outline of the step width adaptation control

7.4.2 足底姿勢修正制御法

人間形足部の足底には人間の皮膚の弾性を模擬するため人間の皮膚と同じ縦弾性の人肌ゲルという軟素材が貼られている。足底に軟素材が貼られていると、歩行中に軟素材が変形してしまう歩行が不安定になることが予想された。そのため、足底が変形しても歩行ができる制御開発を目指した。

まず、新しい制御を考案するにあたり注意した点は、なぜ足底が柔らかいと歩行が不安定になるかである。床反力を得られにくいことも原因として挙げられるが、単純に足底が変形してしまうと姿勢が崩れ、重心が傾き、ZMPの安定余裕が減るためだと考えた（当然、設定ZMPと実測ZMPの偏差も大きくなり不安定になる）。そこで、足底の変形をキャンセルしてやるような制御を考案した。足底の変形を算出するためのモデルとして一番単純なのは人肌ゲルが一般的な弾性ばねとして仮定した場合である。本来、軟素材であれば加重に応じて弾性が非線形に変化するためモデルとして妥当かどうか議論を呼ぶところではある。しかし、姿勢が崩れやすいのは片立脚時であり、 F_z はほぼ一定であると見なせるため弾性ばねとモデル化しても問題という結論に至った。踵接地爪先離地歩行の際には F_z は片立脚時全体を見ると一定とはいいづらいが、足底接地期にはほぼ一定であると考えられる。この時が一番重要な期間であるため踵接地爪先離地歩行に対しても適応可能であると考えた。具体的な計算方法をPitch方向について述べていくとする（Roll方向はPitch方向と全く同じなため省略）。

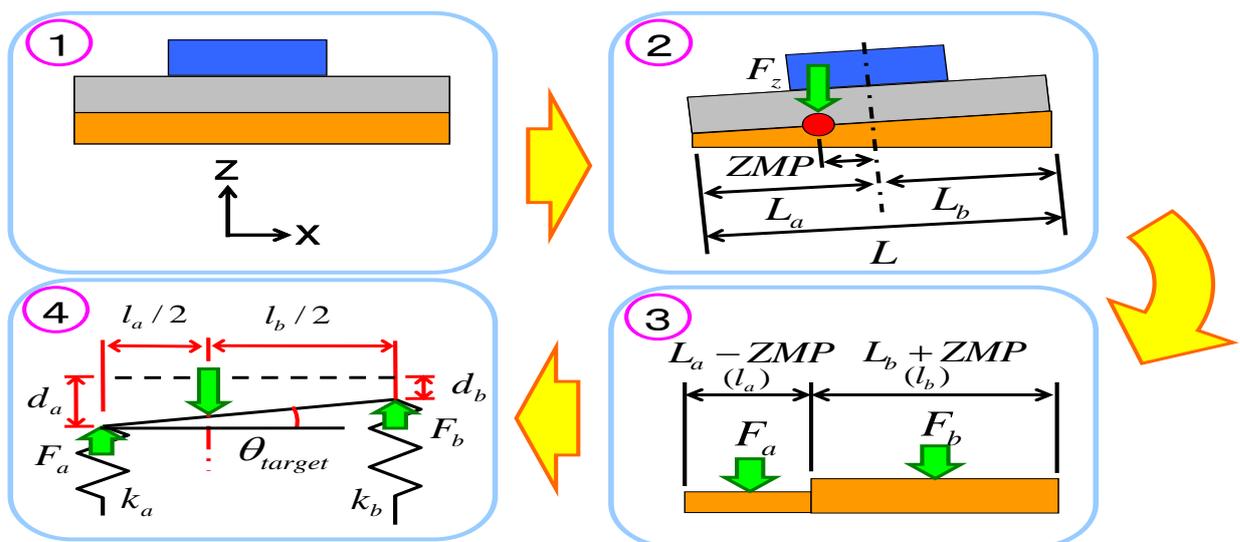


Figure 7.11 Model of soft ground with compressionsprins

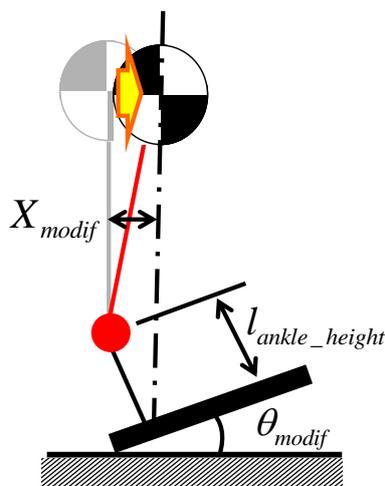


Figure 7.12 Waist trajectory is modified based on the deformation amount of the soft ground.

ばね定数を一定にすることにより，図 7.11 のようにモデル化することができる（かなり単純化して求めることが可能というのもばね定数を一定にした理由である．ばね定数を 1 次の変数にしただけで手計算するにはかなり厳しくなるが解けなくはない）．

図 7.12 の④より， θ_{target} は

$$\begin{aligned}\theta_{modif_ankle} &= \arctan\left(\frac{2 \cdot (d_a - d_b)}{l_a + l_b}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{2F_z \cdot (2ZMP + L_b - L_a)}{K \cdot (L_a - ZMP) \cdot (L_b + ZMP)}\right)\end{aligned}\tag{7.22}$$

と求めることが出来る．足関節への修正量は θ_{target} とその時刻における修正量の総和との差分に比例ゲインをかけた P 制御にて修正を行う．

$$\Delta\theta_{modif} = kp_{gain} \cdot (\theta_{target} - \theta_{modif})\tag{7.23}$$

※式の変形に用いた際の式を下記に示す．

l_a , l_b はそれぞれ

$$\begin{aligned}l_a &= L_a - ZMP \\ l_b &= L_b + ZMP\end{aligned}\tag{7.24}$$

全体の加重は F_z より

$$F_z = F_a + F_b = k_a d_a + k_b d_b$$

軟素材を一様ばねと仮定しているため図 7.11 より

$$K = \frac{L}{L_a - ZMP} k_a = \frac{L}{L_b + ZMP} k_b \quad (7.25)$$

ZMP はモーメントのつり合い点より

$$\begin{aligned} F_z &= F_a \cdot \frac{l_a + l_b}{l_b} = F_b \cdot \frac{l_a + l_b}{l_a} \\ &\Leftrightarrow F_a \cdot l_a = F_b \cdot l_b \end{aligned} \quad (7.26)$$

ここで、注意したいのが足関節を修正しただけでは腰に偏差が残っている点である (図 7.12). X 方向に関しては θ_{target} の移動平均を取ったものを下記の式により腰の偏差を算出し補正することとした.

$$X_{modif} = l_{ankle_height} \cdot \sin\left(\int \theta_{target}(t) dt / T\right) \quad (7.27)$$

θ_{target} の移動平均をもとに修正を行った理由としては、腰が動くと当然加速度が発生する. すると動的安定性が損なわれる危険性が非常に高かったため移動平均を取ることとした (さらに速度リミットが 1[mm/sec] と強めに入っているが仕様上十分な速度である).

実装で用いられているパラメータ

L_a : 6 軸センサ中心から踵までの長さ

L_b : 6 軸センサ中心から爪先までの長さ

K : 足底全体の Z 方向ばね定数

ZMP : 実測 ZMP

F_z : Z 方向の力

T : 移動平均の時間

l_{ankle_height} : 足関節の回転中心から 6 軸底面

7.4.2 遊脚軌道修正制御との統合

歩隔修正制御はもともと 2008 年度開発した遊脚軌道修正制御の Y 方向の修正方法がまだ不十分であったために開発された制御である。よって、Y 方向を修正する関数をそのまま置き換えたものと考えてもらえば良い。

足底姿勢修正制御に関しては、新規に導入したものであり、統合ではなく全く違う思想の制御が平衡して動いていると捉えて良い。まず、足関節に修正を加えるタイミングとしては、単立脚期には常に修正、遊脚前期に復帰し、遊脚後期には次の着地に備えて修正量を 0 に復帰させている。腰の修正に関しては、足底の変形により発生した腰の定常偏差をキャンセルするのが目的である。よって、腰の修正は立脚期、遊脚期間問わず、移動平均の目標値が更新される度にその目標値に向かって修正をする。

具体的な方法としては、次のように歩行中の状態を分割して各々の期間によって制御を行なう。

- (1) 立脚前期 (単立脚)
立脚である単立脚期を 2 分割した前半部。
- (2) 立脚後期 (単立脚)
立脚である単立脚期を 2 分割した後半部。
- (3) 遊脚前期
遊脚期を 2 分割した前半部。
- (4) 遊脚後期 (遊脚着地前)
遊脚期を 2 分割した後半部、かつ遊脚が地面に接地する前の状態。
- (5) 遊脚後期 (遊脚着地後)
遊脚期を 2 分割した後半部、かつ遊脚が地面に接地した後の状態。
- (6) 両立脚期

尚、踵接地・爪先離地歩行時は足部が地面から完全に離れた時から踵が接地している状態までを遊脚期、足底接地から足部が地面から離れた瞬間までを立脚期として制御を行なう。

また、設定した動作期としては以下の 6 つに分けられる。

- (a) 遊脚修正期
姿勢角センサの値に応じて遊脚軌道を修正する期間。
- (b) 保持期
ひとつ前の修正量を保持して出力する期間。
- (c) 復帰期

基準パターンへの復帰動作を行なう期間.

(d) 通常期

基準パターン通りの位置指令を出力する期間. ただし, 他の安定化制御は適応される.

(e) 仮想コンプライアンス制御期

仮想コンプライアンス制御を行なう期間.

(f) 両立脚期

すべての修正制御は保持される期間.

※ 足底姿勢修正制御

足底姿勢修正制御の修正時期の概要

以下, 具体的にそれぞれの動作期について詳述する.

(a) 遊脚修正期 : 歩行中の状態

Roll : (3) 遊脚前期

(4) 遊脚後期 (遊脚着地前)

Y-axis : (4) 遊脚後期 (遊脚着地前)

姿勢角センサにより取得した値によって, Roll, Y 方向の修正を行なう期間である. Roll に関しては, 姿勢角センサの値を 10msec ごとに取得し, その値になるように5次関数補間で修正を行なう. このとき, 歩行状態が変わった瞬間に修正の目標値が非常に大きくなってしまう可能性があるため, ゲインをかけることによって徐々に修正するようにした. ゲインの値については, 「(3) 遊脚前期」中に, 以上より計算式は次のようになる.

$$\theta(t) = K_{\theta} \left[\theta(t-t_c) + \Delta\theta \left\{ 6 \left(\frac{t_c}{T_c} \right)^5 - 15 \left(\frac{t_c}{T_c} \right)^4 + 10 \left(\frac{t_c}{T_c} \right)^3 \right\} \right] \quad (7.28)$$

$\theta(t)$: 修正量

T_c : 修正時間 (10msec)

t_c : T_c 期間内の時間

$\Delta\theta$: $t_c = 0$ のときの $\theta(t)$ と目標値の差

K_{θ} : 修正ゲイン (0 から 1 に変化)

Y 方向に関しては、「(5) 遊脚後期」中に 1msec で逐次修正量を計算し、修正を行っている。具体的な計算式は式 (7.11) ~ (7.21) にて前述したため省略する。

(b) 保持期 : 歩行中の状態

Roll : (5) 遊脚後期 (遊脚着地後)

(6) 両立脚期

Y-axis : (1) 立脚前期

(2) 立脚後期

(5) 遊脚後期 (遊脚着地後)

(6) 両立脚期

ひとつ前の修正量を保持している。なお、他の安定化制御は行なっている。

(c) 復帰期 : 歩行中の状態

Roll : (1) 立脚前期 (単立脚)

Y-axis : (5) 遊脚前期

この期間は、Roll に関しては「(a) 遊脚修正期」および後述の「(e) 仮想コンプライアンス制御期」で変更した歩行軌道を、Y 方向に関しては「(a) 遊脚修正期」で変更した歩行軌道をそれぞれ基準歩行パターンに復帰させる。具体的には、復帰期に入る 1 周期前の修正値を、復帰期の終了の時刻までに復帰するよう、加速度まで連続になる 5 次関数補間を行なう。以下の式で復帰量を求める。

$$\theta(t) = \theta_{modif} \left\{ -6 \left(\frac{t}{T} \right)^5 + 15 \left(\frac{t}{T} \right)^4 - 10 \left(\frac{t}{T} \right)^3 + 1 \right\} \quad (7.29)$$

$$Y(t) = Y_{modif} \left\{ -6 \left(\frac{t}{T} \right)^5 + 15 \left(\frac{t}{T} \right)^4 - 10 \left(\frac{t}{T} \right)^3 + 1 \right\} \quad (7.30)$$

$\theta(t)$: Roll 方向の復帰変更量

θ_{modif} : 0 へ復帰させるべき修正量 (Roll)

$Y(t)$: Y 方向の復帰変更量

Y_{modif} : 0 へ復帰させるべき修正量 (Y)

T : 復帰期の時間

(d) 通常期 : 歩行中の状態

Roll : (2) 立脚後期
(6) 両立脚期

基準歩行パターン通りに位置指令を出力する期間。この期間において、歩隔修正制御によって足先の位置・姿勢が変更されることはない。なお、他の安定化制御を同時に用いた場合は、その制御によって足先の位置・姿勢が変更されることになる。

(e) 仮想コンプライアンス制御期 : 歩行中の状態

Roll : (4) 遊脚後期 (遊脚着地前)
(5) 遊脚後期 (遊脚着地後)

Y-axis : 動作期間なし

人間形足部での踵接地・爪先離地歩行は歩行中に Roll 軸周りに十分なトルクが発生できず、立脚側の足部でロボットの姿勢の修正が困難である。そのため、基準パターンより早く接地してしまうことになり、その際に非常に大きな着地衝撃が発生すると考えられる。この着地衝撃緩和のために 2005 年度に開発された粘性項のみの仮想コンプライアンス制御を用いることにした。(通常仮想コンプライアンス制御については「5.4 WABIAN-2R に実装されている歩行安定化制御」を参考にしていきたい。) このとき、以下のような式が成り立つ。

$$\bar{\mathbf{F}} = \mathbf{C} \cdot \dot{\bar{\mathbf{x}}}_f \quad (7.31)$$

$\bar{\mathbf{F}}$: エンドエフェクタ座標原点に加わる力・モーメント

$\dot{\bar{\mathbf{x}}}_f$: エンドエフェクタ座標原点における速度 (並進・回転)

\mathbf{C} : 仮想粘性係数行列

これをコンプライアンス中心における式として離散化すると以下の式を得る。

$$\Delta \bar{\mathbf{x}}_{fcc}(t + \Delta t) = \left[\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \bar{\mathbf{F}}_{cc} + \bar{\mathbf{x}}_f(t) \quad (7.32)$$

$\Delta \bar{\mathbf{x}}_{fcc}(t + \Delta t)$: 現制御周期における、基準パターン位置・姿勢からの、コンプライアンス中心まわりのエンドエフェクタ座標原点における偏差の指令値

$\Delta \bar{x}_{fcc}(t)$: 1 制御周期前における, 基準パターン位置・姿勢からの, コンプライアンス中心まわりのエンドエフェクタ座標原点における偏差の指令値

Δt : 制御周期 (現在は 1[ms])

尚, この粘性項のみを用いた仮想コンプライアンス制御は **Z-axis**, **Pitch** に関しても行なわれており, **Roll** と同じタイミングで基準パターンに復帰している.

(f) 両立脚期

遊脚軌道修正制御では遊脚側で発生した **Y** 方向の修正量を立脚側に移すということが行われていた. しかし, 歩隔修正制御では **Y** 方向に修正量が発生することで脚長が変わり, 図 7.10 の状態における位置エネルギーが変更されることで外への転倒の抑制を図っている. よって, 歩隔修正制御においては **Y** 方向の修正量は保持されている.

なお, 歩行が終了時の両立脚期においては, 両足の中央に腰が来るように設定している.

以上をまとめると, 表 7.2 のような制御タイミングチャートになり, フローチャートは図 7.13 のようになる.

※足底姿勢修正制御

修正期

Roll : (1) 立脚前期 (単立脚)

(2) 立脚後期 (単立脚)

Pitch : (1) 立脚前期 (単立脚)

(2) 立脚後期 (単立脚)

X-AXIS : (1)~(6)全期間

復帰期

Roll : (3) 遊脚前期

Pitch : (3) 遊脚前期

保持期

Roll : (3) 遊脚前期

Pitch : (3) 遊脚前期

Roll, Pitch 方向に関しては単純に立脚中に足関節を修正し, 遊脚中に復帰する形となっている. 腰の修正であるが, こちらは腰に大きな修正量が入ると動的な安定性が崩れることが想定された. 経験上, 1[mm/sec]程度であれば問題ないだろうという曖昧な基準で速度リミットが決定されているので改善の余地が十分にあると考えられる. また, θ_{target} の 2sec ごとの移動平均をもとに修正量を計算しているがこちらももう少し改善の余地があると思われる. 具体的には2sec というのも2歩分の平均をもとにすれば歩行中に悪さをすることはないだろうという根拠のない経験則にもとづいた値なのでもう少し検討してみても良いと思われる.

Table 7.2 Timing chart

	Swing Phase			Double Support Phase	Stance Phase		Double Support Phase
	First half	Last half			First Phase	Last Phase	
		Before Landing	After Landing				
Y	Returning Motion	Modification Control	Holding Modified Orientation				
Roll	Modification Control	Modification Control	Holding Modified Orientation	Holding Modified Orientation	Returning Motion	Preset Pattern	Preset Pattern
Z, Pitch	Preset Pattern	Compliance Control		Holding Modified Orientation	Returning Motion	Preset Pattern	Preset Pattern

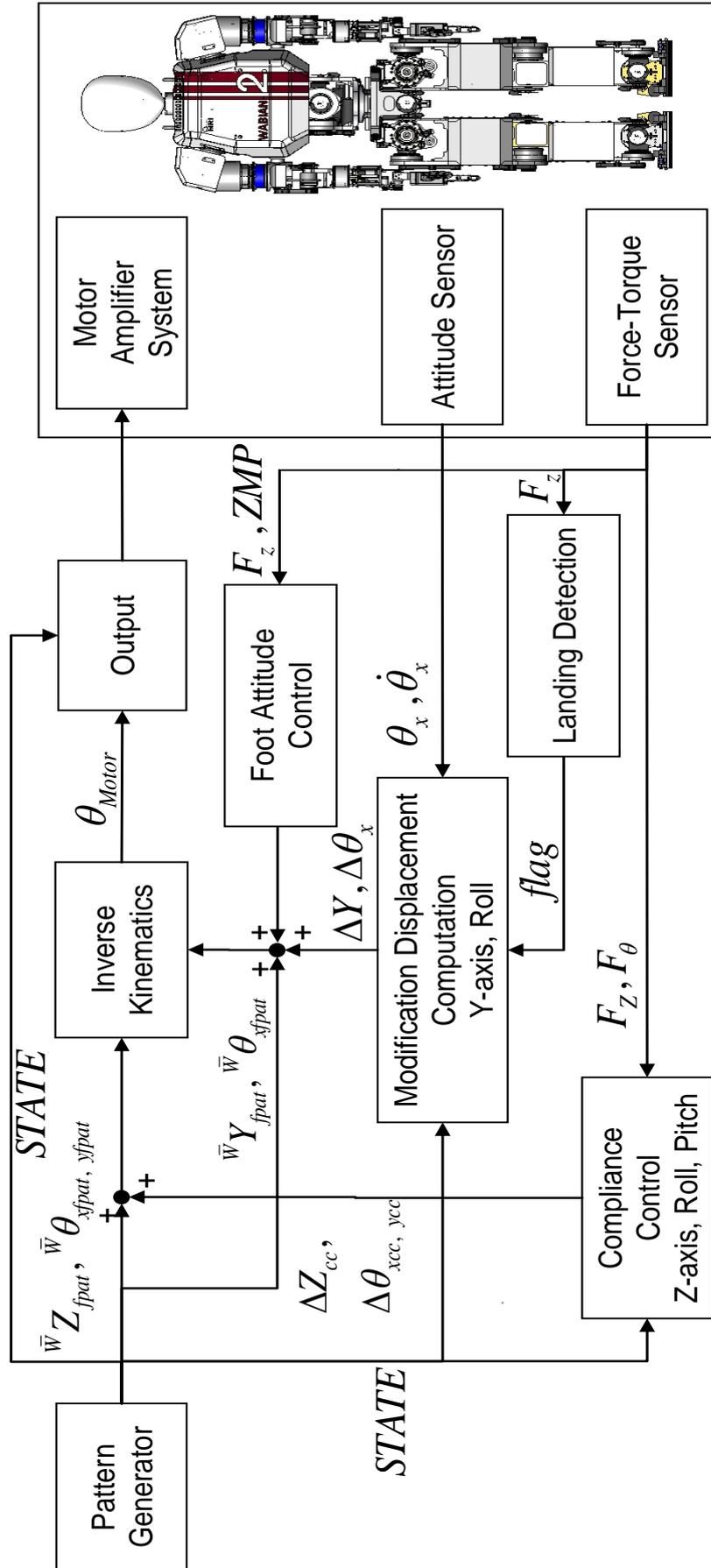


Figure 7.13 Block diagram of the walking stabilization control on a soft ground

7.5 床反力調整制御法

布団のような変形量の大きな軟弱路面上での歩行はパターン上での遊脚が実際より早く接地してしまため、図 7.14 のように遊脚側にパターン生成時には想定されない床反力が発生し歩行の安定性に多大な影響を及ぼす。

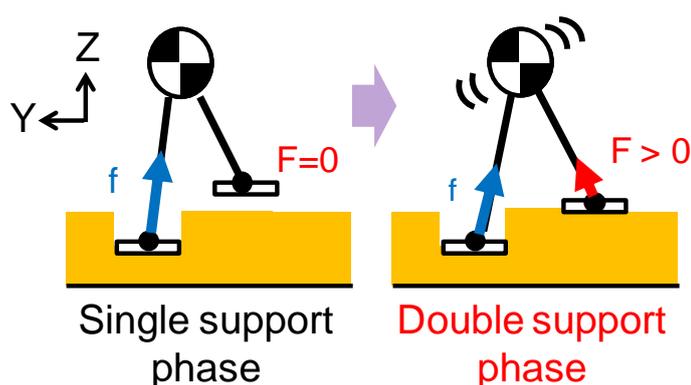


Figure 7.14 Ground reaction forces in double support phase

そこで、人間の歩行解析に基づく新たな安定化制御開発を目標に軟弱路面における人間の歩行について剛体路面上と軟弱路面上の歩行動作の比較を行った。特に人間の歩行を重心と足先に動きに注目して、解析を行った結果、以下のような知見を得た。

- (1) 足上げ高さが路面の変形量に応じて増加する。
- (2) 変形量の大きい路面では足先軌道が垂直に上げ下ろされる。
- (3) 重心 (CoM) の振幅が左右方向で路面の変形量に応じた有意差がない
- (4) 歩幅と歩隔について路面の変形量に応じた有意差がない。

この知見をもとに、人間の軟弱路面での歩行戦略について次のような仮説が考えられる。

- (i) (1), (2)の知見より人間は軟弱路面上における歩行の際に路面との接触を防ぐため足先軌道を変更し路面と足底とのクリアランスを一定に保とうとする。
- (ii) (3), (4)の知見より遊脚に発生した床反力の影響を着地位置変更以外の方

法で低減し姿勢を安定化している。

ここで、(i)の仮説より人間の歩行を参考に足あげ高さの増加などの足先軌道の変更を含む歩行パターン改良を行った。また、(ii)の仮説については立脚による安定化制御開発が解決策の一つとして考えられる。ここで、立脚側の制御としては、2010年度に足底回転によりトルクを発生させ姿勢を安定化する重心位置補償制御が開発されているが、制御モデルでは単立脚期のみを考慮しており両立脚期の安定性が十分には考慮されていない。そこで、脚長操作によって両立脚期に床反力を制御する床反力調整制御を新たに開発することとした。

7.5.1 制御理論

本制御は、両立脚期中に鉛直方向の脚長操作により床反力を目標値に収束させることで両立脚期中に足先に生じる床反力をパターン上で本来生じるべき床反力に近づけパターンとのモデル誤差を減らすことで姿勢を安定化するものである。図 7.15 に床反力調整制御の概念図を示す。

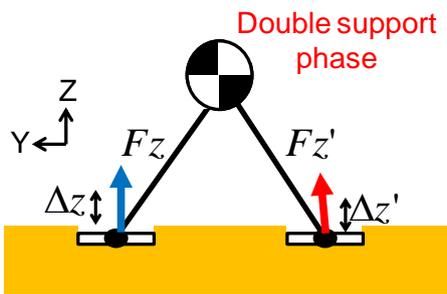


Figure 7.15 Grand reaction force modification control

本制御では、静止立位時には両脚を歩行時には後脚のみを制御対象とする。また、歩行時は前脚側については重心位置補償制御を行う。

ここで脚長の修正量 Δz については以下のように算出した。

$$\Delta z = K_P(Fz_{ref} - Fz) + K_I \int (Fz_{ref} - Fz) dt + K_D \dot{Fz} \quad (7.33)$$

K_P : 比例ゲイン

K_I : 積分ゲイン

K_D : 微分ゲイン

Fz : 1ms 毎の力センサの値

ただし,

$$K_P = 2.0 \times 10^{-7}, K_I = 2.5 \times 10^{-9}, K_D = 5.0 \times 10^{-8} \quad (7.34)$$

各ゲインは実験より求めた. ここで, 床反力の目標値 $F_{z_{ref}}$ については図 7.16 示すモデルにより算出した. 設定 ZMP 座標およびパターン上のエンドエフェクタ座標をもとに求めた変数 x_L と x_R より,

$$F_{Rref} = \frac{x_L}{x_R + x_L} (F_R + F_L) \quad (7.35)$$

$$F_{Lref} = \frac{x_R}{x_R + x_L} (F_R + F_L) \quad (7.36)$$

ただし,

F_{Rref} : 右足床反力目標値

F_{Lref} : 左足床反力目標値

F_R : 右足垂直床反力

F_L : 左足垂直床反力

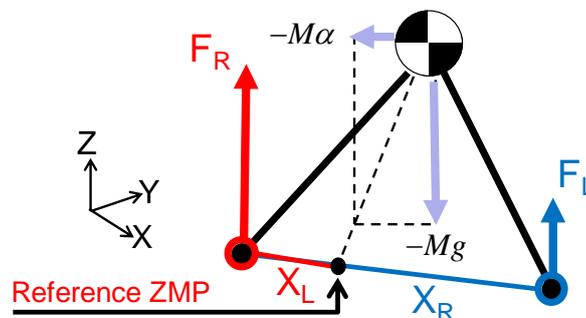


Figure 7.16 Reference ground reaction force

7.5.2 制御理論

本制御はロボットに両足の足底に実装されている力センサの値大きさから単立脚期, 両立脚期, 遊脚期を判断している. 単立脚期においては重心位置補償制御を行い, 両立脚期中に前述の修正量を出力し, 遊脚期にパターンに復帰する.

重心位置補償制御と統合された本制御のブロック図を図 7.17 に示す. 赤線で

示された部分が開発した床反力調整制御である。また、タイミングチャートを表 7.3 に示す。赤線で示された部分が床反力調整制御のタイミングチャートである。単立脚期には、修正量を保持し、両立脚期に前述の修正量を出力し、遊脚前期にかけてパターンに復帰する。ここで、 T_{th} は力のスレッシュホールド、 ΔT は右脚の力センサの値と左脚の力センサの値の差分である。

Table 7.3 Timing chart

	Stance phase	Double support phase		Swing phase	Double support phase	
		$F_{Th} < \Delta F$	$\Delta F < -F_{Th}$		$F_{Th} < \Delta F$	$\Delta F < -F_{Th}$
AXIS_Z	Keeping modification value	Modification control	Modification control	Returning motion	Modification control	Modification control
Roll,Pitch	Modification control	Modification control	Returning motion	Returning motion	Returning motion	Modification control

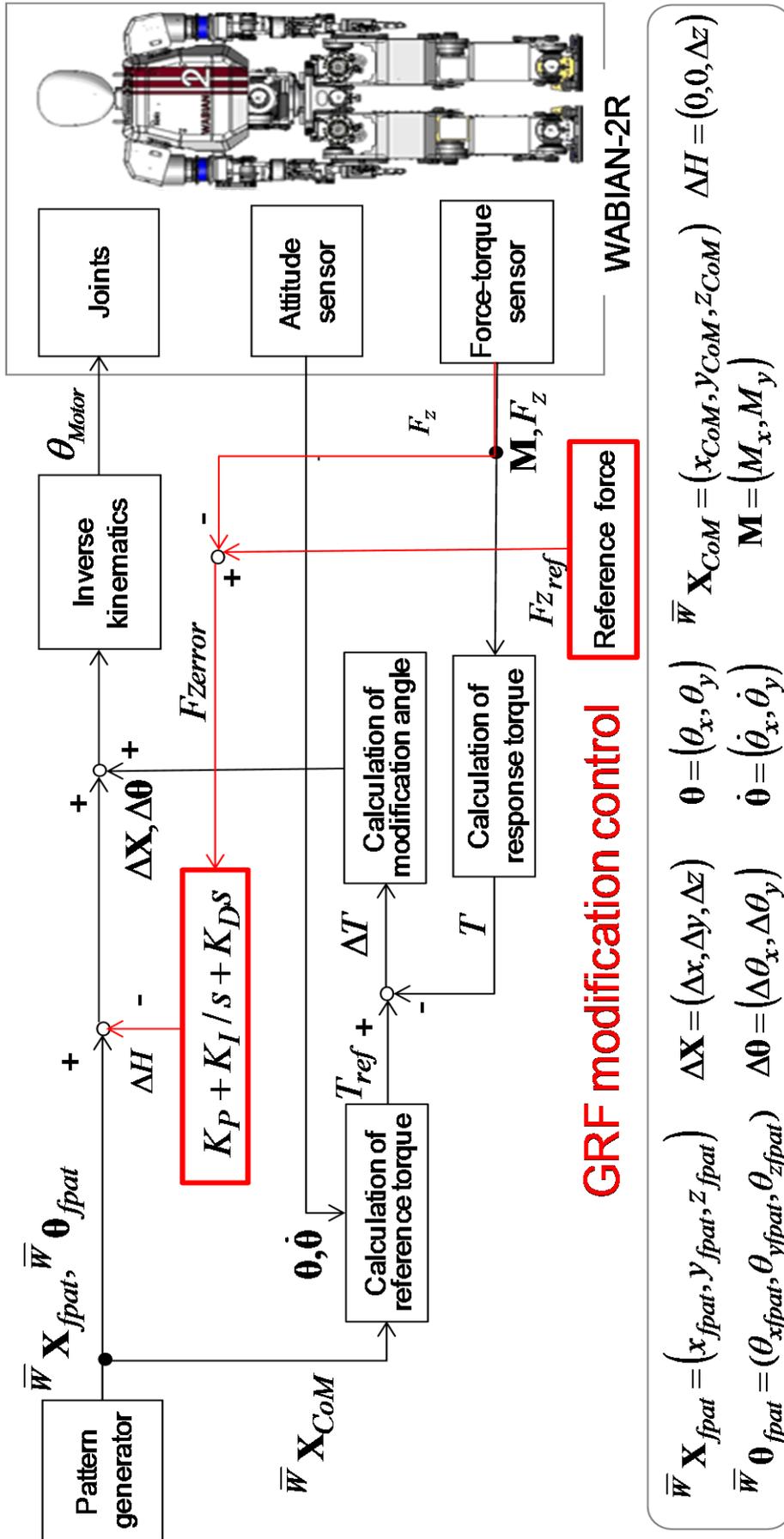


Figure 7.17 Block diagram of the walking stabilization control on a soft ground

7.6 評価実験と考察

7.6.1 足型センサを用いた適応制御歩行制御の歩行実験

開発した足型センサを用いた適応制御歩行制御を WABIAN-2R に実装して歩行実験を行なった。

(1) 実験目的

今年度に開発した脆弱路面における安定化制御で変形が行う路面での歩行を通じて開発した安定化制御の有効性の確認することを目的とした。

(2) 実験方法

平坦で一様な路面であるスポンジの上を踏ませて、Roll, Pitch 軸方向の倣い動作を確認する。実験条件とそれぞれの踏ませ方を以下に示す。

① 足踏み実験

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

腰高さ : 0.60m

歩数 : 8 step

歩行周期 : 1.0 s/step

安定化制御 : 脆弱路面での歩行安定化制御

(3) 実験結果

実験結果を図 7.18 から図 7.19 に示す。足踏み歩行に成功したのがわかる。この結果より、2009 年度開発した脆弱路面における歩行安定化制御が柔らかいスポンジに対して有効であることが確認された。

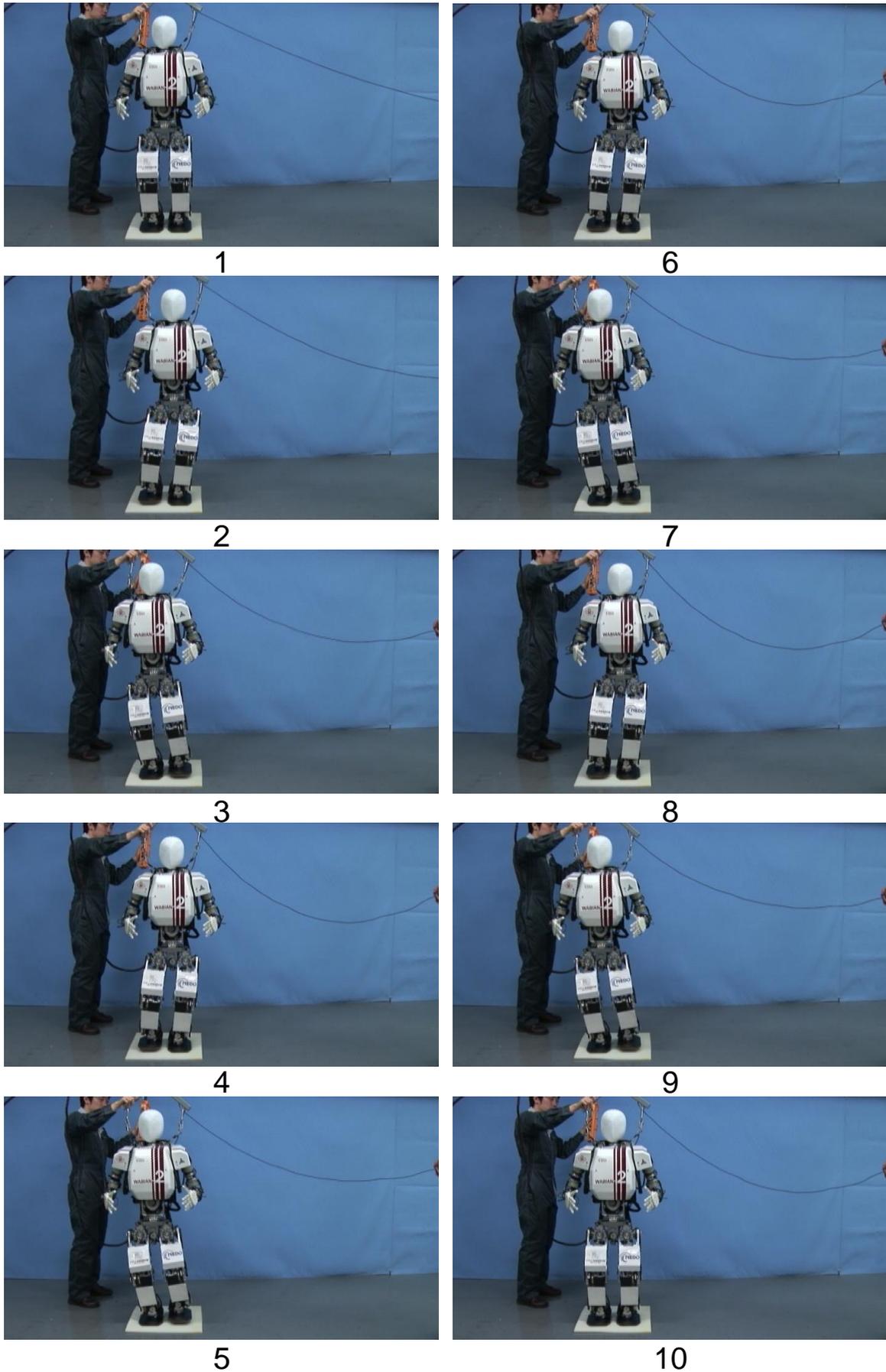


Figure 7.18 Walking experiment on a sort ground with a density of $22 \pm 2 \text{ kg/m}^3$

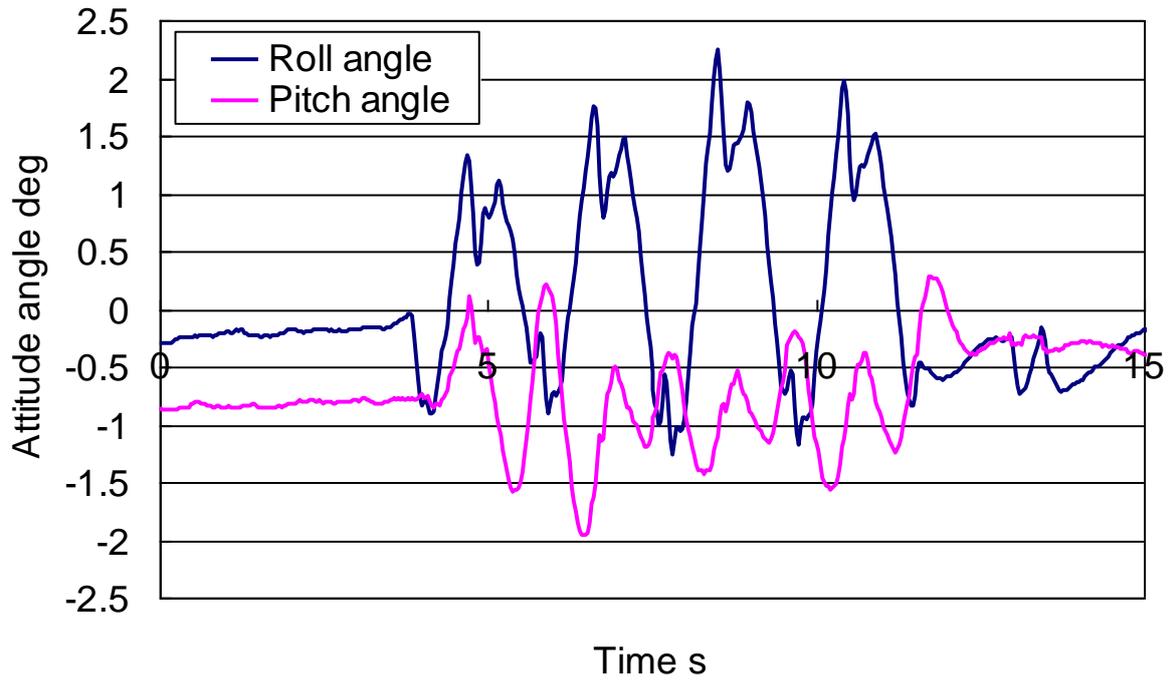


Figure 7.19 Attitude angle

7.6.2 重心位置補償制御の歩行実験

開発した重心位置補償制御の有効性の確認のため、従来の制御だけでは転倒してしまう軟弱路面での歩行実験を行った。

(1) 実験目的

開発した重心安定化制御を WABIAN-2R に実装し、人間が歩行解析において歩行した変形量の小さい軟弱路面（チップウレタンスポンジ）上での歩行の実現が可能かの確認および、歩行解析で得られた知見の妥当性の確認を目的とする。

(2) 実験方法

WABIAN-2R に重心安定化制御のみ実装し、人間が歩行解析において歩行した軟弱路面において路面の変形量を考慮した足上げ高さの歩行パターンを出力する。

(i) 実験条件

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）
腰高さ : 0.60 m
歩数 : 8 step
歩幅 : 0.2 m/step
足上げ高さ : 0.35 m
歩行周期 : 1.0 s/step
安定化制御 : 重心安定化制御

(ii) 軟弱路面

厚さ : 100 mm
密度 : 150±30 kg/m³

(3) 実験結果

歩行実験の結果、重心安定化制御を実装することで制御なしでは一步目で外側に転倒してしまう軟弱路面においても安定した膝曲げ前進歩行を実現した。

歩行実験の様子を図 7.20 に、実験結果として、WABIAN-2R の姿勢角のデータを図 7.21 に、制御の修正量を図 7.22、図 7.23 に示す。



Figure 7.20 Walking experiment on a sort ground with a density of $150 \pm 30 \text{ kg/m}^3$

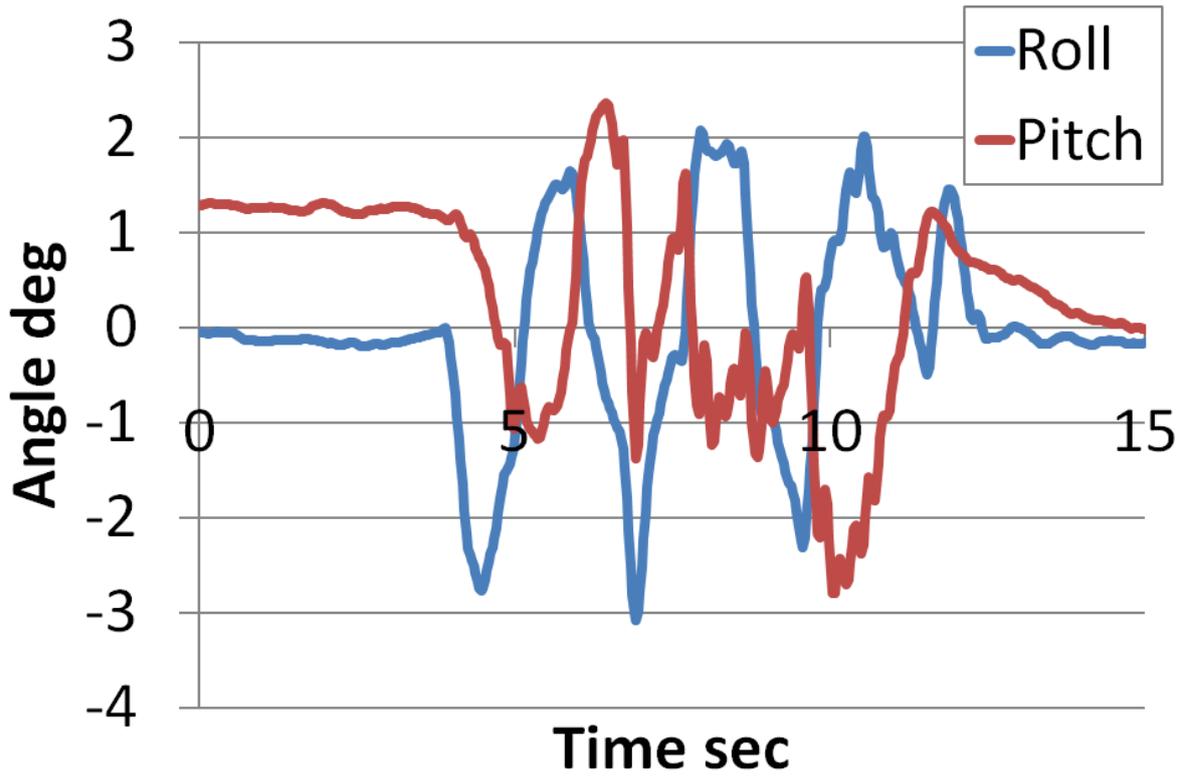


Figure 7.21 Attitude angle

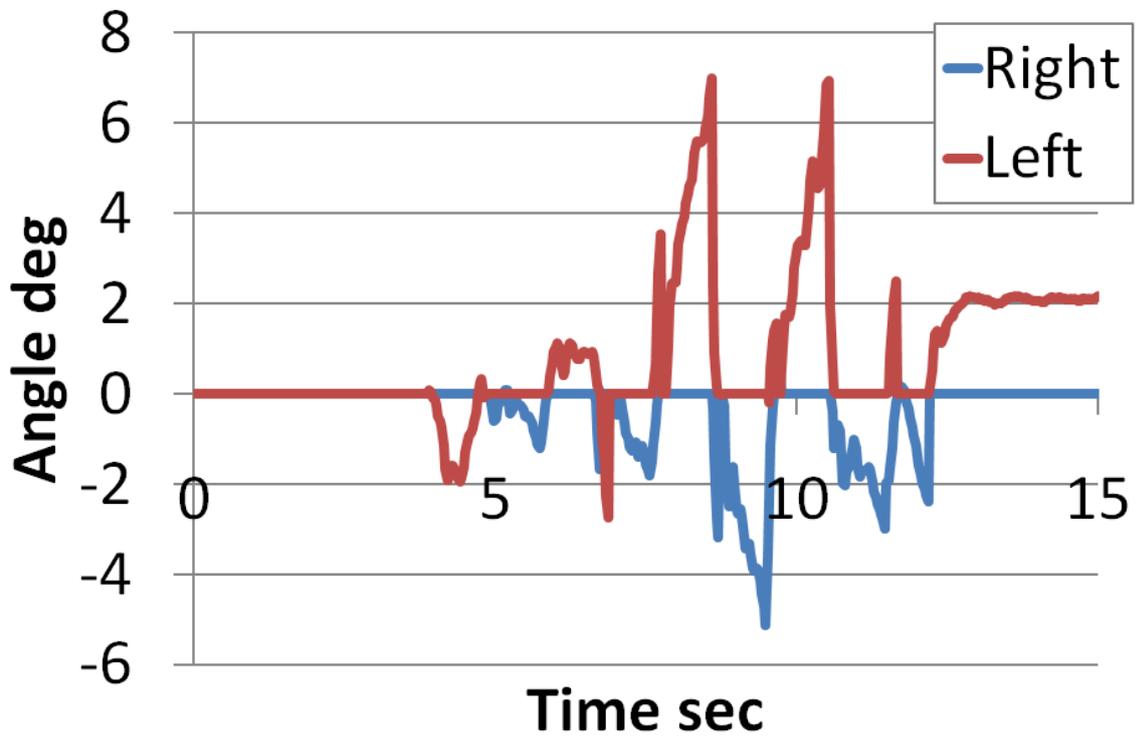


Figure 7.22 Modification value about roll axis

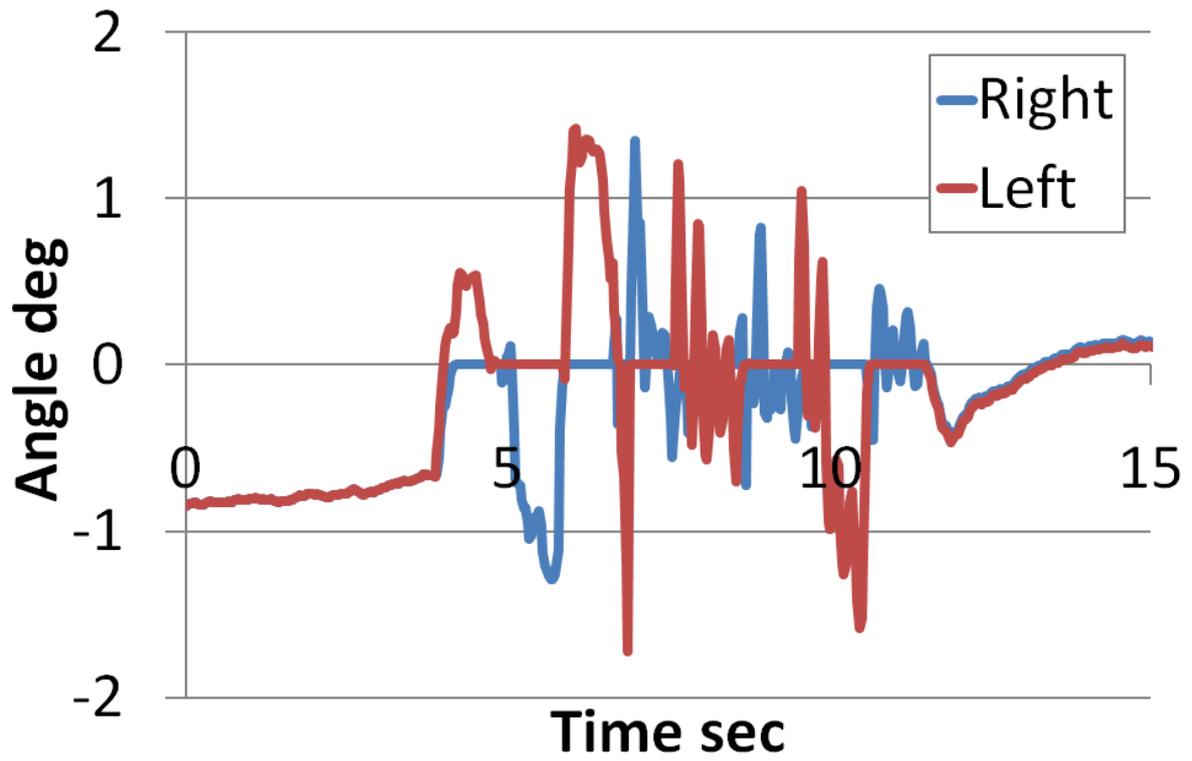


Figure 7.23 Modification value about pitch axis

7.6.3 住環境化での軟弱路面における歩行実験

(1) 実験目的

開発した重心安定化制御を WABIAN-2R に実装することで、カーペット素材として使用されるチップウレタンでの歩行を実現したが、実際のカーペットは実験で使用した素材のように、一様な平坦ではない。そこで、本制御が実環境にある軟弱路面においても有効であるかの確認を目的とする。

(2) 実験方法

WABIAN-2R に重心安定化制御のみ実装し、市販のカーペットの上で足踏み動作のパターンを出力する

(i) 実験条件

腰高さ一定足踏み（膝曲げ足踏み）
腰高さ : 0.60 m
歩数 : 8 step
足上げ高さ : 0.50 m
歩行周期 : 1.0 s/step
安定化制御 : 重心安定化制御

(ii) 軟弱路面（カーペット）

厚さ : 25 mm

(3) 実験結果

歩行実験の結果、重心安定化制御を実装することで、制御なしでは転倒してしまうカーペット上での足踏み動作を実現した。このことから、本制御は実環境におけるカーペットのような軟弱路面においても有効であることが確認できた。歩行実験の様子を図 7.24 に、実験結果として、WABIAN-2R の姿勢角のデータを図 7.25 に、制御の修正量を図 7.26、図 7.27 に示す。



Figure 7.24 Walking experiment on a sort carpet

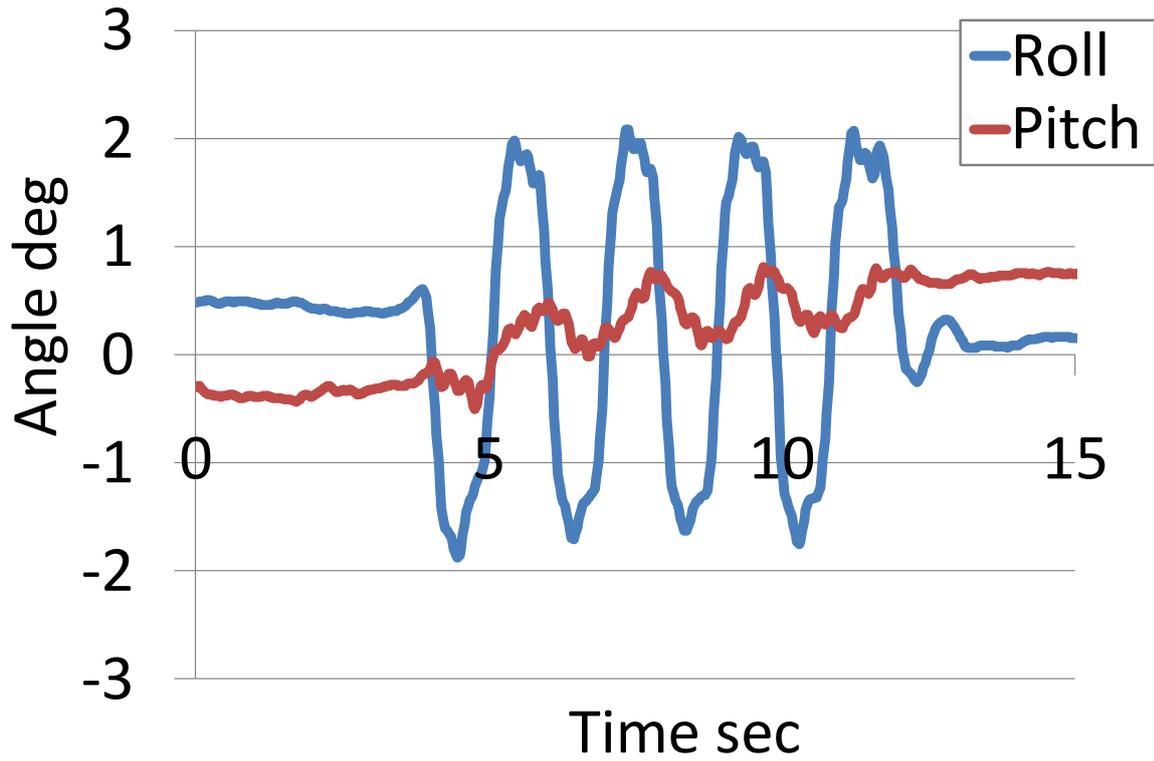


Figure 7.25 Attitude angle

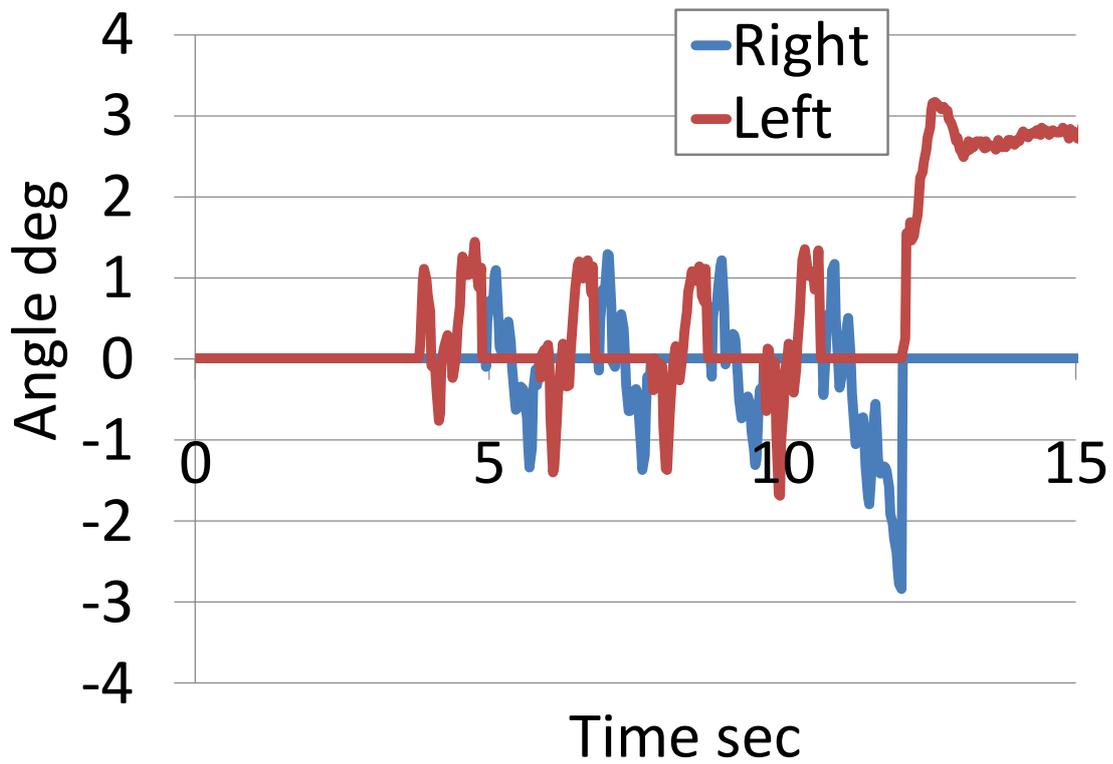


Figure 7.26 Modification value about roll axis

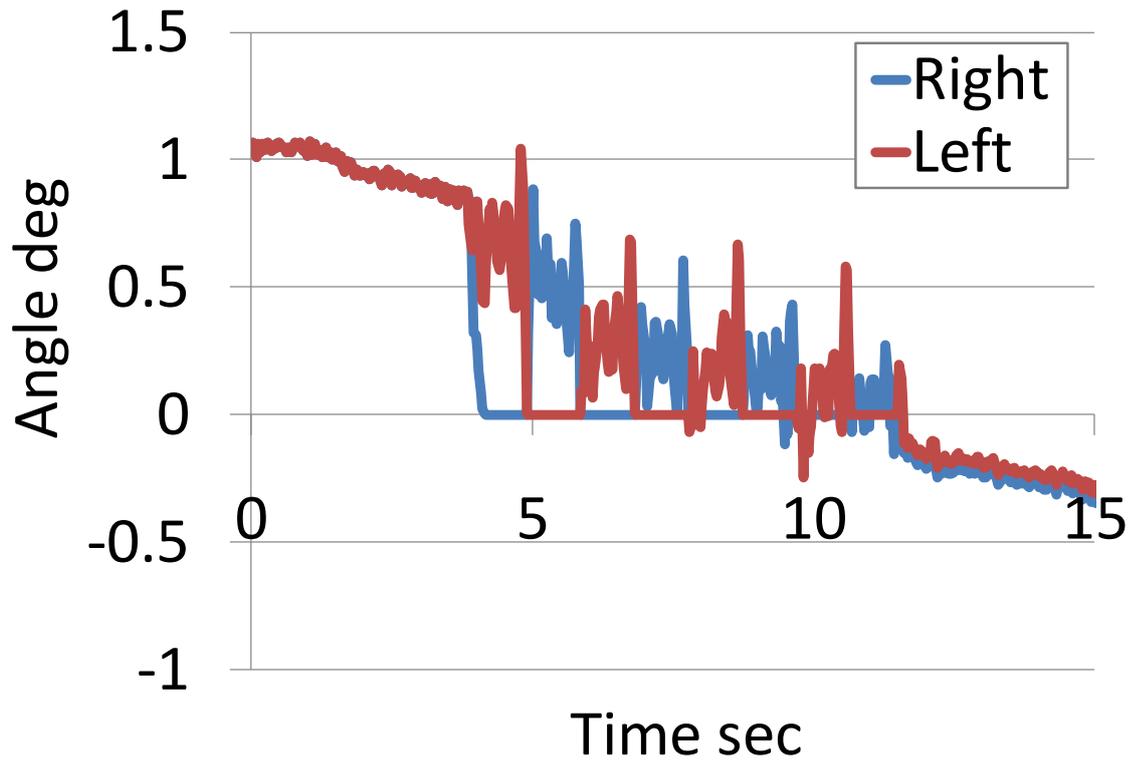


Figure 7.27 Modification value about pitch axis

7.6.4 床反力調整制御を用いた歩行実験

開発した床反力調整制御の有効性の確認のため、従来の制御だけでは転倒してしまう変形量の大きい軟弱路面での足踏み動作の実験を行った。

(1) 実験目的

変形量の大きい軟弱路面における足踏み動作において開発した床反力調整制御が有効であることを確認する。

(2) 実験方法

WABIAN-2R に床反力調整制御および重心位置補償制御を実装し、以下の実験条件で軟弱路面において足踏み動作を行い、路面の変形量を考慮した足先軌道の歩行パターンを出力する。

(i) 実験条件

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）
 腰高さ : 0.60 m
 歩数 : 8 step
 足上げ高さ : 0.50 m
 歩行周期 : 0.84 s/step
 歩行安定化制御 : 床反力調整制御
 重心位置補償制御

(ii) 軟弱路面

厚さ : 50 mm
 密度 : 22 ± 2 kg/m³

(3) 実験結果

歩行実験の結果、床反力調整制御を実装することで制御なしでは足踏み動作が不可能である変形量の大きい軟弱路面においても安定性が向上し、リフトなしでの8歩の膝曲げ足踏み動作を実現した。また、制御の有無によって両立脚期中の床反力の目標値との誤差が減少することを確認した。

歩行実験の様子を図 7.28 に、実験結果として、WABIAN-2R の姿勢角のデータを図 7.29 に、床反力の実測値および目標値を図 7.30 に制御の修正量を図 7.31 に示す。また、床反力調整制御なしの時の床反力の実測値および目標値を図 7.32 に示す。



Figure 7.28 Walking experiment on a soft ground with a density of $22 \pm 2 \text{ kg/m}^3$

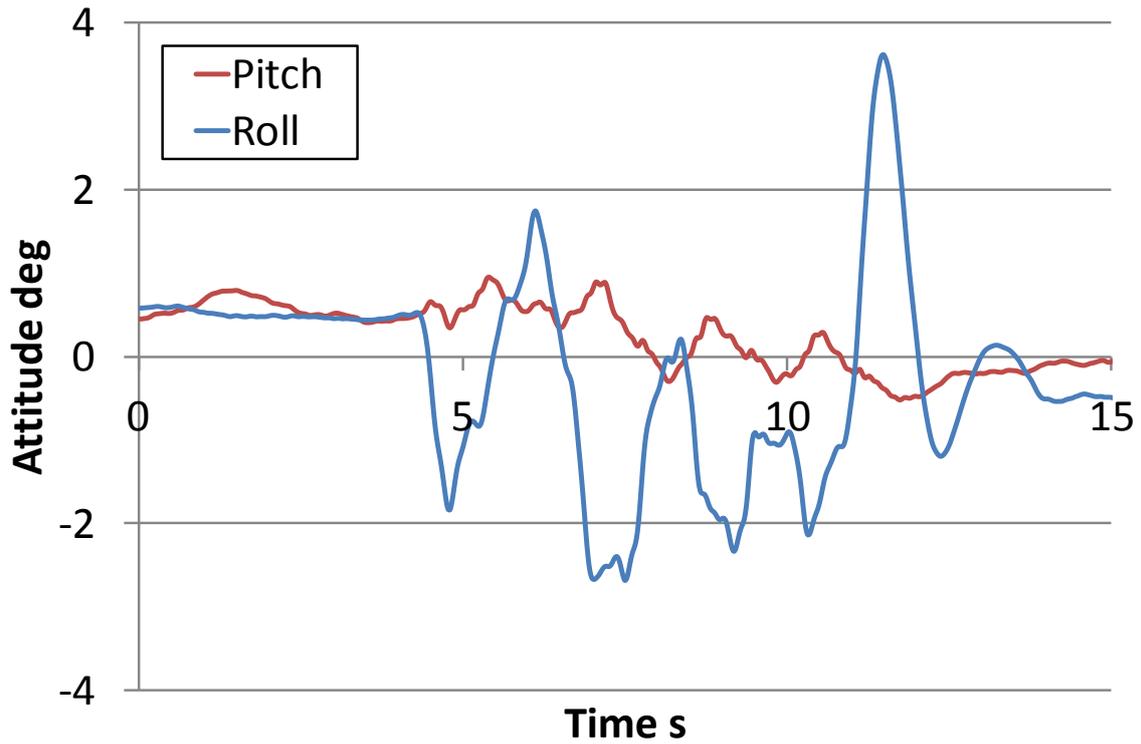


Figure 7.29 Attitude angle

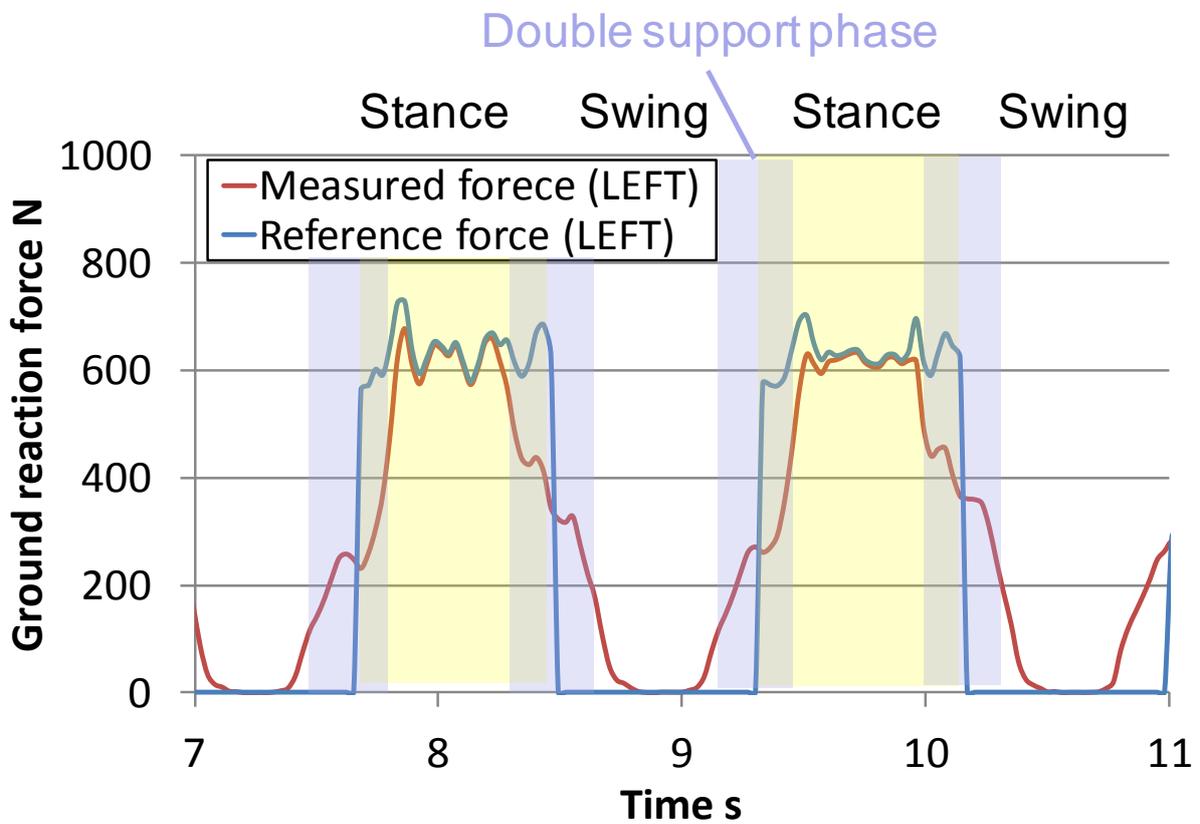


Figure 7.30 Grand reaction force with walking stabilization control

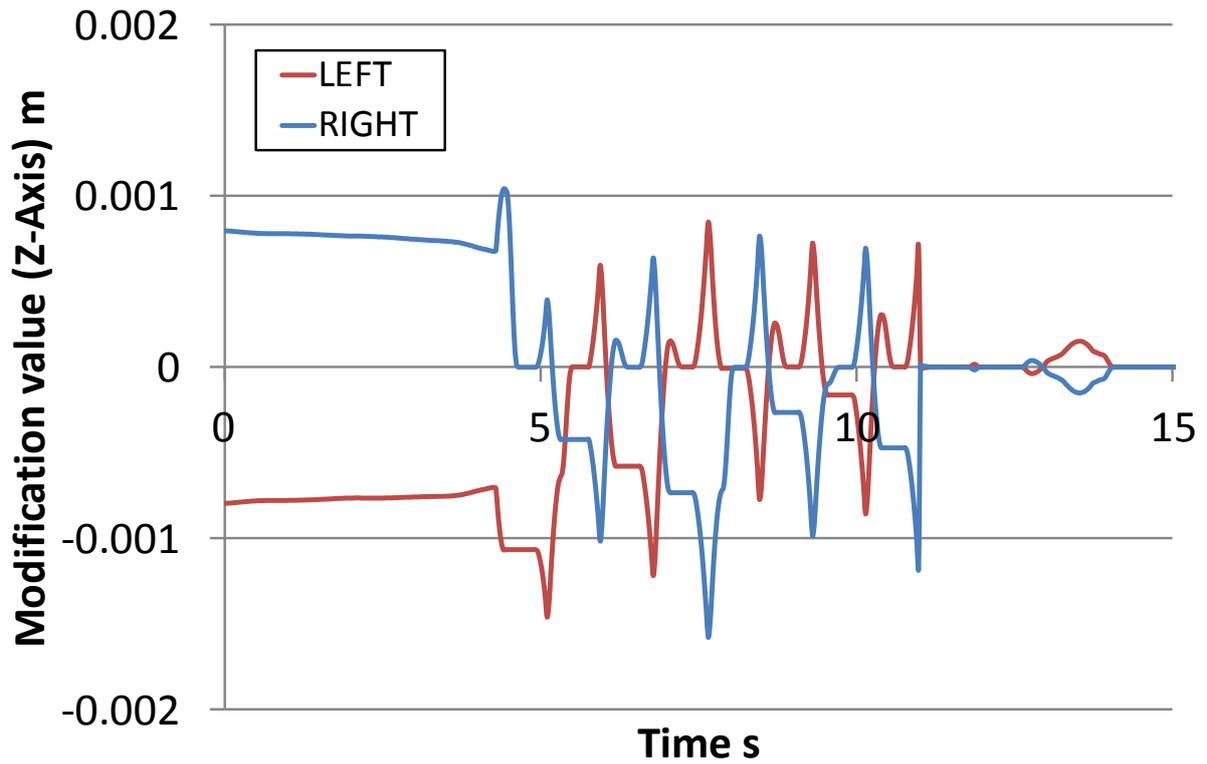


Figure 7.31 Modification value along the vertical axis

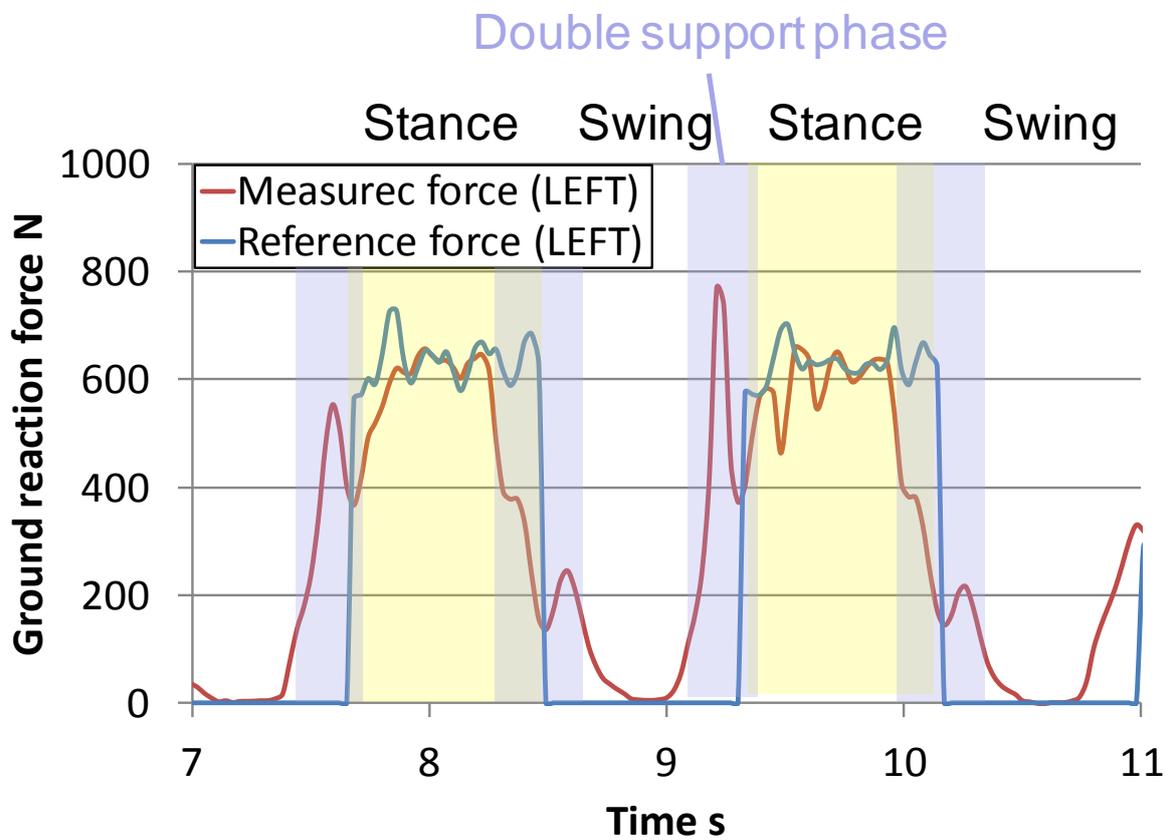


Figure 7.32 Grand reaction force without walking stabilization control

7.6.5 床反力調整制御を用いた膝曲げ歩行実験

(1) 実験目的

変形量の大きい軟弱路面における膝曲げ前進歩行において開発した床反力調整制御が有効であることを確認する。

(2) 実験方法

WABIAN-2R に床反力調整制御および重心位置補償制御を実装し、以下の実験条件で軟弱路面において膝曲げ前進歩行を行い、路面の変形量を考慮した足先軌道の歩行パターンを出力する。

(i) 実験条件

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

腰高さ : 0.60 m

歩数 : 8 step

足上げ高さ : 0.50 m

歩幅 : 0.2m

歩行周期 : 0.9 s/step

歩行安定化制御 : 床反力調整制御

重心位置補償制御

(ii) 軟弱路面

厚さ : 50 mm

密度 : 22±2 kg/m³

(3) 実験結果

歩行実験の結果、床反力調整制御を実装することで制御なしでは歩行が不可能である変形量の大きい軟弱路面においても8歩の膝曲げ前進歩行を実現した。また、制御の有無によって両立脚期中の床反力の目標値との誤差が減少することを確認した。歩行実験の様子を図7.33に、実験結果として、WABIAN-2Rの姿勢角のデータを図7.34に、床反力の実測値および目標値を図7.35に制御の修正量を図7.36に示す。また、床反力調整制御なしの時の床反力の実測値および目標値を図7.37に示す。

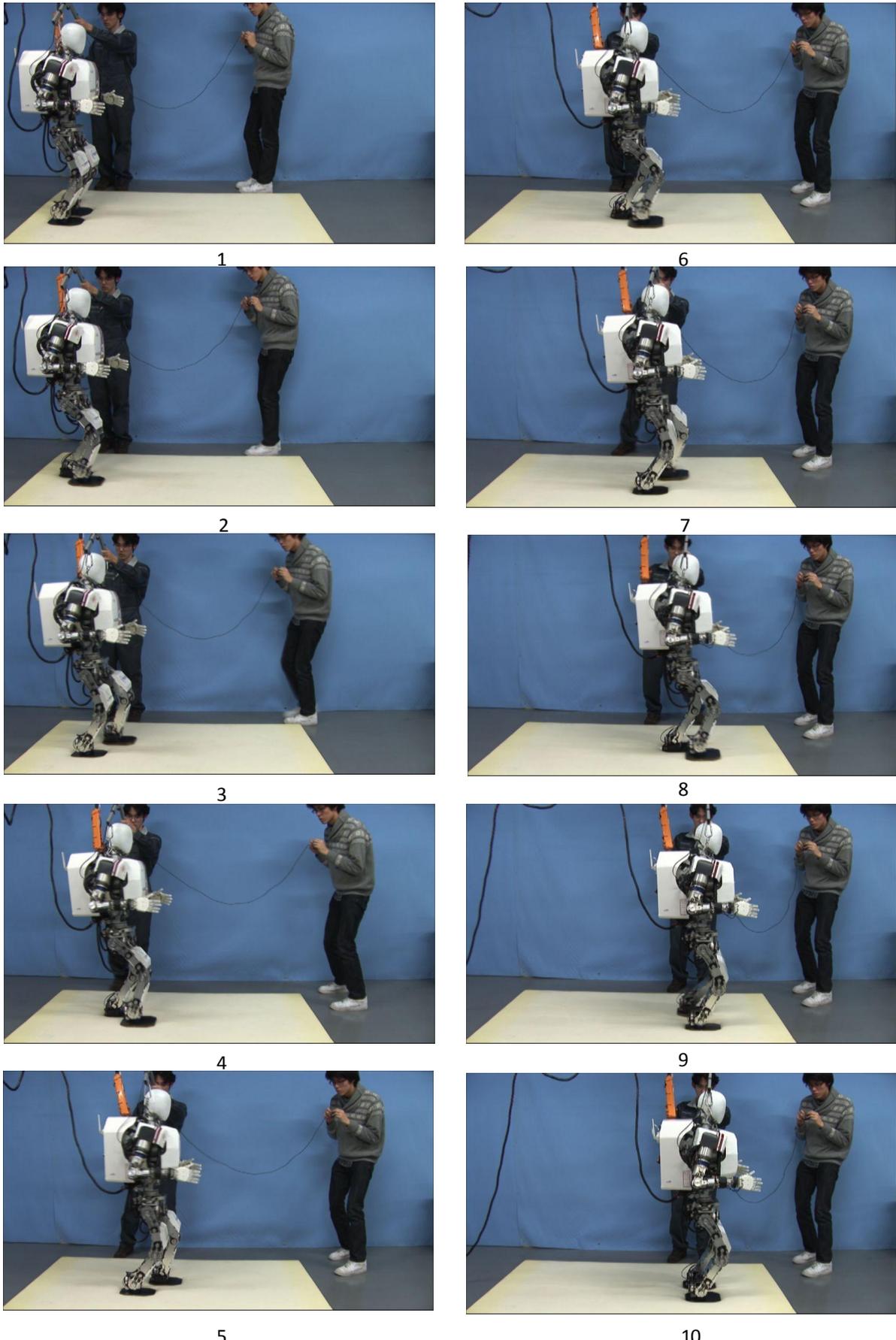


Figure 7.33 Forward walking experiment on a sort ground with a density of $22 \pm 2 \text{ kg/m}^3$

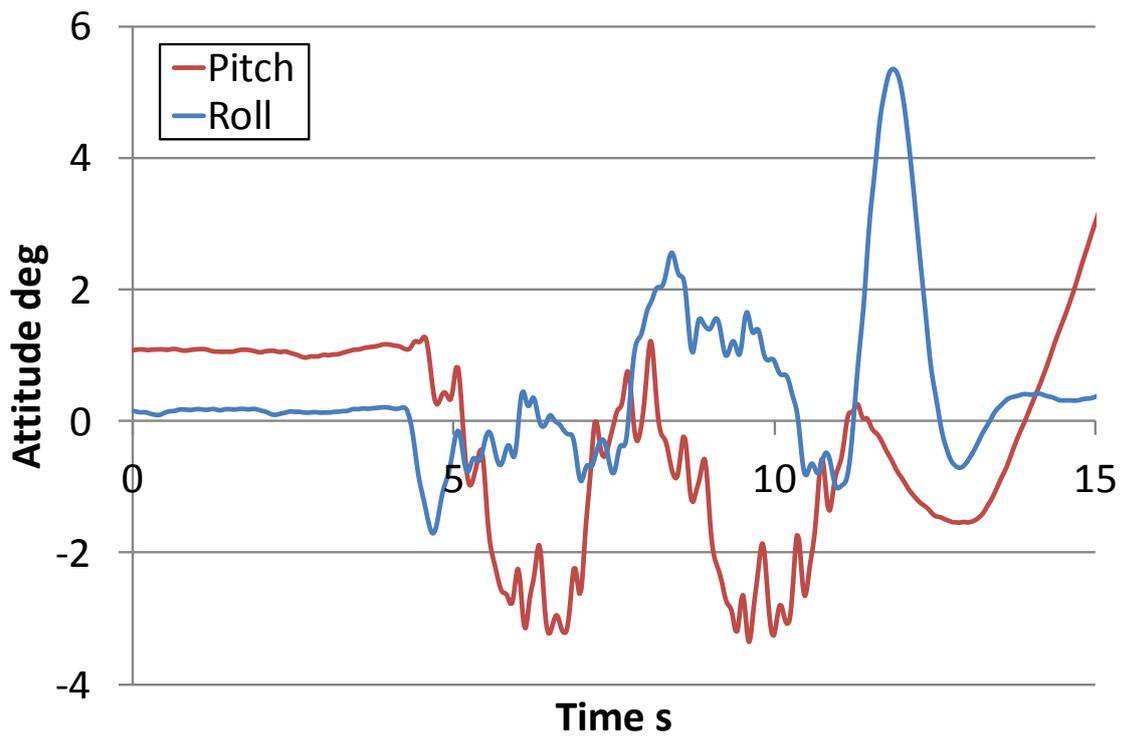


Figure 7.34 Attitude angle



Figure 7.35 Grand reaction force with walking stabilization control

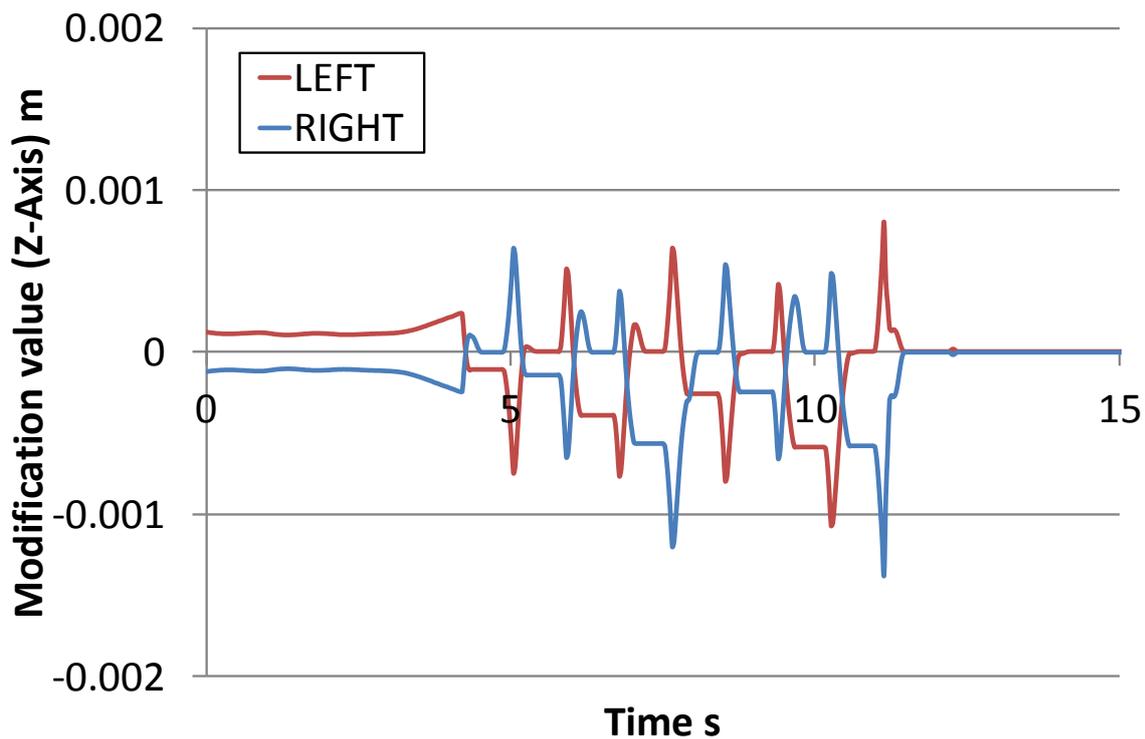


Figure 7.36 Modification value along the vertical axis

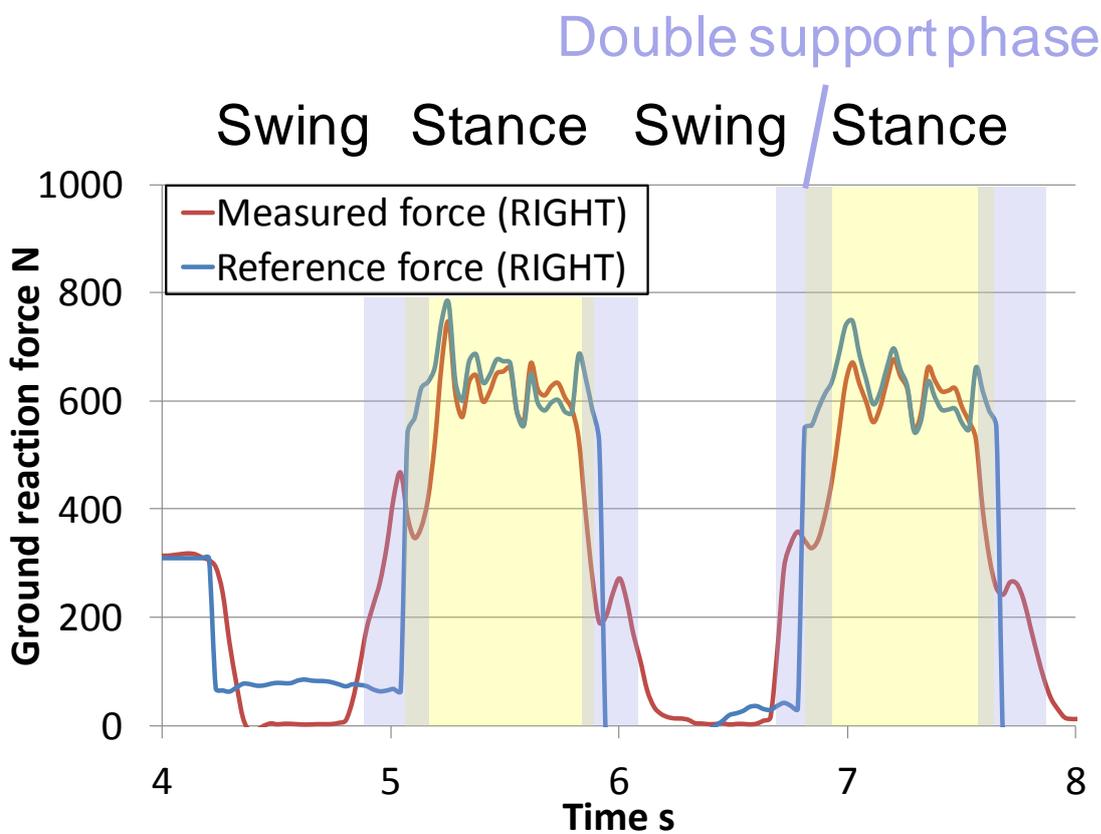


Figure 7.37 Grand reaction force without walking stabilization control

7.6.6 考察

実環境では砂利道、砂地、芝生などのように足部が接地すると加重により変形が生じるような路面に対する適応性の向上するため、脆弱路面における安定化制御を開発し、導入した。これにより柔らかいスポンジでの歩行が可能になった。

しかし、歩行可能な脆弱路面の厚さが 10[mm]で限っている。そこで歩行性を向上させるためには今年考案した Roll と Pitch 軸方向の以外に他方向に対しても修正を行わなければならない。脆弱路面は剛体路面とは異なり、ロボットの自重により立脚側の足部が沈むため、遊脚側の足部が予定していた時刻より早く着地することが特徴である。そこで、考慮した Z 方向に対する修正を再検討し、導入する必要がある。また、すべりに対する補償制御を行うとより安定で多様な路面における歩行が可能になると考える。

まず制御単体での評価における考察として軟弱路面における片立脚中の姿勢角のデータに注目する。理論的には、姿勢角のデータは Roll 軸、Pitch 軸ともに 0 deg に収束するはずであるが、実験結果からは、それぞれ -2 deg, -1 deg 付近で収束している。この原因の一つには、制御モデルと実機の誤差があるためと考えられる。本制御は、姿勢角の偏差に対して、直接補償しているのではなく、あくまで姿勢角の偏差から計算される軸トルクと力センサから得られる軸トルクの比較により、姿勢角の復帰を行っているため、制御モデルと実機にずれがあると正しい角度に復帰しない。得に片足上げ実験では、足上げ高さ 50 [mm]でかつ 600 N 程度の重さを片足で支えているパターンであるため、ハードウェアのたわみが大きくなってしまい、これが制御モデルと実機の誤差に大きな影響を与えていると考える。また、制御において重心の復帰に必要な軸トルクの算出において、発振することなく安定して目標値に達するように角度偏差に対して比例ゲインと微分ゲインを掛けている項があるが、比例ゲインに対して、微分ゲインが非常に大きいため角度偏差よりも角速度偏差が支配的になり、重心が動かない位置（速度が 0 の位置）に収束しているのではないかと考える。

まず静止立位での評価実験における考察として、Roll 方向の姿勢角のデータに注目する。2010 年度開発された重心位置補償制御のみを実装した場合、理論的には姿勢角のデータは Roll 軸、Pitch 軸ともに 0 deg に収束するはずであるが、実際には ± 3 deg 付近で収束してしまい、やや傾いた状態で静止してしまい歩行開始時に不安定になるという問題があった。原因として、たわみなど制御モデルで想定している実機モデルと実機に誤差があるために制御モデルから計算された修正角度が正しくない可能性が考えられる。これに対して本制御を実装した場合やや角度偏差が生じた状態からでも姿勢角が 0 deg 付近に収束しており本制御が前述のようなモデル誤差があった場合

に有効に働く可能性が示された。

続いて歩行実験に関して、その場足踏み動作については本制御により姿勢の安定性が向上し歩行成功率が高まったが前進歩行動作については以下のような問題点が見られた。

(1) 一定以上の歩幅 (150[mm]以上) に設定すると前後方向に不安定となり歩行継続が困難となる

(2) 図 7.34 に見られるように歩き終わりから静止時にかけて Roll, Pitch 方向に姿勢が不安定になる

ここで、(1)については並進方向の慣性力の増加による影響が考えられる。現在設定している床反力目標値は静的な状態のモデルであり重心の加速度が増加した場合対応できない可能性が考えられる。そこで、重心の投影点ではなく ZMP を用いるなど慣性力を考慮した新しい目標値計算のモデルを用いることで改善するのではないかと考えられる。

一方、(2)についても制動時の慣性力の影響と考えられるがこちらについては目標値ではなく床反力調整制御のパラメータを制動時に変化させる、あるいは制動時の新たな制御モデルを構築することで対応可能ではないかと考えられる

7.7 まとめ

本章では、足型センサを用いた適応制御歩行制御法、重心位置補償制御法、歩隔修正制御および足底姿勢修正制御法、床反力調整制御法などの軟弱路面における適応制御方法の開発とその評価実験、考察について述べた。様々な軟弱路面における歩行にも成功し、開発した制御方法の有効性を確認した。住環境化に存在するカーペットや高さ 50[mm]の極めて柔らかいウレタンスポンジ (密度: 22 ± 2 [kg/m³]) 上で安定した歩行を実現させた

この結果より、本研究の目的であった路面のモデル化に基づいた歩行安定化制御を開発および歩行実現を達成した。

軟弱路面として2種類のスポンジを用意し、剛体路面上と軟弱路面上の歩行の比較を行った。特に人間の歩行を重心と足先に動きに注目して、解析を行った結果、以下のような知見を得た。

- (1) 足上げ高さが路面の変形量に応じて増加する。
- (2) 変形量の大きい路面では足先軌道が垂直に上げ下ろされる。
- (3) 重心 (CoM) の振幅が左右方向で路面の変形量に応じた有意差がない
- (4) 歩幅と歩隔について路面の変形量に応じた有意差がない。

(1), (2) の知見より軟弱路面上において「人間は路面と足底のクリアランスを一定以上に保つ」という仮説が導かれることから WABIAN-2R に出力する歩行パターン作成時に足先軌道を垂直に上げ下ろしながら最大で通常の 1.7 倍の高さの 50[mm]に達するように設定した。変形量の大きい路面上において改良した歩行パターンを出力することで路面との接触による転倒を防止し有効性を確認した。

また, 2010 年度に開発された重心位置補償制御では床反力が両脚に生じる両立脚期の安定性が十分に考慮されていないという問題点があった。変形量の大きな路面の歩行では遊脚がパターンより早く接地してしまうため両立脚期が長くなることに加え, 遊脚に発生した床反力は歩行パターン生成時において想定されていない外乱となるため歩行の安定性に多大な影響を及ぼす。これに対して人間の歩行では (3), (4) の知見から「遊脚に発生した床反力の影響を着地位置変更以外の方法で低減している」ということが考えられ, 立脚側での制御が考えられる。そこで, トルクを制御対象とした重心位置補償制御に代わり, 床反力を調整することで姿勢を安定化する床反力調整制御を開発し歩行安定化を目指した。具体的には, 両立脚期にロボットの脚長を操作し発生する床反力を目標値に収束させることで静止立位時は姿勢を安定化し歩行時は遊脚に発生する床反力の影響の低減する。開発した制御と重心位置補償制御を統合した上で WABIAN-2R に実装し, 改良した歩行パターンにて, 変形量の大きい軟弱路面での安定した歩行に成功した。

今後の展望としてはより多くの軟弱路面での歩行の達成を目指すために塑性変形をともなう砂地路面上などより複雑な路面性状を示す路面での歩行が考えられる。この際は, 現状考慮している弾性要素以外の路面のパラメータの測定およびこれを考慮した制御モデルの構築が必要となる。また, 現在は路面パラメータを事前に計測して, 制御に実装しているため, 既知の軟弱路面しか歩行できない。そのため, 歩行しながら路面のパラメータを同定し, 未知の軟弱路面上で適応歩行を達成することも今後の大きな課題である。

第 8 章 結論

8.1 総合的な考察

8.2 結論

8.3 今後の展望

8.1 総合的な考察

本論文では、2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行を実現するために、路面の力学的特性に基づいたモデルかとその制御法について明らかにすることを目的とした。具体的には、実環境に存在する様々な路面を調査し、工学的観点からばね・ダンパ系でモデル化することで、路面を分類した。そして、路面パラメータを同定するために必要な路面を押し込む際の変位や速度、力などのデータを取得可能な路面性状測定装置を開発した。剛体の不整路面における歩行に関しては路面検知可能なセンサ式足部機構と路面適応制御を開発し、提案手法を2足歩行ロボットに実装して歩行実験を通して評価した。軟弱路面における歩行に関しては路面のモデル化に基づいた歩行安定化制御を開発し、2足歩行ロボットに実装して行った歩行実験より軟弱路面における歩行に成功し、その有効性を確認した。

本論文は、以下に示す8章から構成されている。

第1章では、序論として本研究の研究背景と目的、その意義と関連研究の動向について述べた。

第2章では、多様な路面の工学的モデルがないことから路面のモデル化について述べた。まず、土木工学、地盤工学などの路面に関する他分野での文献調査と共に実環境に存在する多様な路面について調査を行った。調査した路面を各々の特性に応じて「凹凸度」、「軟弱度」、「低摩擦度」の3つの軸で分類した。また、路面の変形を、路面の弾性と粘性によるものにとらえ、ばね・ダンパと滑りを考慮する摩擦要素を用いてモデリングし、並進変形だけでなく回転変形も考慮した6次元のモデル化を行った。特に Roll, Pitch 軸周りの回転変形は、上下方向の並進変形を表現するばね・ダンパモデルを4つ並列に配置し、それぞれの変形量の差により表現することにした。

第3章では、第2章において述べた路面モデルのパラメータを同定可能な路面性状

測定装置の開発および評価実験と考察を述べた。路面性状測定装置は路面に対し、6自由度の構成で、先端部には足部型力センサと6軸力覚センサを搭載した。足部型力センサは2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R (Waseda Bipedal Humanoid - No.2 Refined) の足部と同サイズで、足底部を左右前後方向に4つに分割し、各々のばねの変形を光学センサで検出する光学式力センサを持ち、上下方向の並進変形と Roll, Pitch 軸周りの回転変形が計測可能である。路面に対して力と速度を制御しつつ加重し、連続的な変形量を計測することで路面モデルの粘弾性パラメータ同定が可能である。開発した路面性状測定装置を用いて評価実験を行い、計測されたパラメータ値と考案した路面のモデルの有効性を確認した。

第4章では、未知の凹凸路面に適応可能な不整路面適応制御の開発、およびその評価実験と考察について述べた。開発した不整路面適応制御は、着地軌道修正制御と姿勢補償制御からなる。着地軌道修正制御は歩行パターンから得られる理論コンプライアンス中心移動量と足部の力センサのデータから算出される実測コンプライアンス中心移動量を比較することにより路面形状を検知するものである。姿勢補償制御は、瞬間的な姿勢の崩れに対応するために、姿勢角速度も用いた PD 制御からなり、ロボット自身の振動によって発生する角速度を不要に検出しないように移動平均フィルタを通しノイズを抑制する方法も採用している。この制御法を、2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し評価したところ、実験室内において 20[mm]の段差を高さ方向に踏む歩行や、傾斜 5[deg]の屋外環境での歩行に成功した。しかし、段差や傾斜が混在するような路面においては、安定領域を大きく確保できず、歩行安定性が悪いという課題があり、ハードウェアの面からも工夫が必要であった。

第5章では剛体の不整路面における適応歩行のための4点型路面検知足部機構の開発とそれを用いた不整路面適応制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。ロボットの足部が剛体平板であると、足底の中心部に突起物があるようなうねり路面に対応することが難しいが、4点型路面検知足部機構は足底4隅の接地点に厚みを持たせることで、そのようなうねり路面にも適応可能な構造である。足底4隅の接地点は路面高さを検出する接触式センサの役割も持ち、接地点の押し込み量をフォトリフレクタにより測定することで、路面との距離が測定できる。不整路面では4点すべてで接地することは原理的に不可能なため、4つのセンサのうち最初に路面を検知したセンサに応じて接地点を3点選択し、支持多角形を確保する。そして路面検知センサの値に応じてロボット足部が路面に倣うように着地軌道を修正する歩行安定化制御系を開発した。開発した4点型路面検知足部機構を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に装着し、第4章での姿勢補償制御も併用して歩行実験を行ったところ、厚さ 20[mm]までのアクリル板を用いた擬似的な不整路面での歩行に成功した。また、

最大の凹凸 15[mm]と傾斜 7[deg]が混在する屋外環境での歩行にも成功し、その有効性を確認した。しかし、着地軌道を修正する際に足底中心点周りに足部姿勢を修正していたため、接地点が不整路面から滑落しやすく、さらに支持多角形における安定余裕が小さいため歩行成功率が低いという課題があった。

第6章では、第5章において述べた4点型路面検知足部機構の欠点を補う3点型路面検知足部機構の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。4点型路面検知足部機構では、足底4隅の接地点から不整路面との接地部を3点選択していたが、設定ZMPから支持多角形の境界までの距離、すなわち安定余裕が小さく歩行安定性が悪いという問題点があった。そのため3点型の足部機構にすることで、支持多角形は小さくなるが安定余裕を大きく取ることが可能な構造にした。着地軌道の修正方法は4点型路面検知足部機構と同様であるが、路面に倣う際に接地点が並進方向に変位を生じ不整路面から滑落することを防ぐため、足部姿勢を修正する際の回転中心を足底中心点から路面との接地点に変更することで滑落防止を図った。また、路面検知センサで誤検知が生じることがあったため、センサ部の直動軸の材質を炭素鋼 S45C から軸受鋼 SUJ2 へ変更し、さらに高周波焼き入れ処理を施すことで軸の硬度や耐摩耗性を向上させた。開発した足部機構と制御法を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し評価実験を行ったところ、5[mm]から20[mm]までの段差が混在する擬似不整地路面、および傾斜 7[deg] 擬似斜面での安定した歩行を実現し、歩行成功率の向上を確認した。

第7章では、脚接地面が変形する軟弱路面に適応可能な制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。軟弱路面を歩行中はZMP (Zero Moment Point) を制御することが難しいため、重心位置を安定化する制御法を開発した。具体的には、軟弱路面を一様なばね要素として仮定することで足部力センサの測定値から路面の変形量が推定できるため、片脚支持期には足関節でトルクを発生し、重心位置を安定化する。さらに、両脚支持期には各足の床反力を目標床反力に収束させるように脚長を修正し、重心位置を安定化することとした。開発した制御法を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し、高さ 50[mm]の極めて柔らかいウレタンスポンジ (密度: $22 \pm 2[\text{kg}/\text{m}^3]$) 上で歩行実験を行った。なお、路面性状計測装置で路面パラメータを同定し、ウレタンスポンジのばね定数を 60[N/m]に設定した。歩行実験の結果、ウレタンスポンジ上での足踏み動作と前進歩行に成功し、提案手法の有効性を確認した。

以上のように、第2章、第3章で述べた路面のモデル化と路面性状測定装置により、路面の工学的モデルを立てた。また、第4章、第5章、第6章で述べた不整路面適応制御とセンサ式足部機構により、屋外に存在する凹凸路面で歩行できることを実証した。そして、第7章で述べた軟弱路面歩行安定化制御により、脚接地面が変形する軟

弱路面での歩行に成功した。

最後に、第8章では、結論として以上の研究成果を総括した。また今後の展望として、路面のモデルの確立と軟弱路面における歩行に対する問題点と2足歩行ロボットに実装されている制御の統合について言及した。

以上のように、第2章、第3章で述べた多様な路面のモデル化および路面性状測定装置の開発のにより、様々な路面のパラメータが測定可能になり、考案した路面のモデルで分類することが可能になった。また、第4章、第5章、第6章では着地軌道修正制御と姿勢補償制御の統合で凹凸がある不整路面での歩行を実現した。また、新たなセンサ式の足部機構と足部機構に対する路面適応制御の開発により、屋外に存在する凹凸路面で歩行できることを実証した。また、第7章では軟弱路面における歩行を実現させるために、開発した様々の新たな制御法を実装し、評価実験を行った結果、その有効性を確認し、軟弱路面における2足歩行ロボットの歩行に成功させた。

結果として、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を開発し、本研究の目的を達成した。

8.2. 結論

8.2.1 多様な路面分類および路面性状測定装置の開発

2009年度は荷重により変形が生じる脆弱な路面を表現する力学モデルの構築と、構築モデルのモデルパラメータの計測を行う路面性状計測装置の開発を行った。

まずは脆弱路面のモデル化を行い、少なくとも摩擦と弾性については路面によって差異が見られ、路面を分類するうえで有効である可能性が高い。

また、路面性状計測装置については、WABIAN-2Rの足部の軌道と発生する床反力を再現できる装置を開発し、用意した模擬的な路面に対し計測を行った。

しかし検証実験を行った結果、路面を粘弾性と摩擦を用いてモデル化を行うためには、路面と装置との相対変位を計測する必要があることがわかった。また、計測を行ったサンプルの範囲では弾性が粘性と比して支配的であり、粘性により路面を分類することが困難であるという結論に達した。

8.2.2 不整路面適応制御の開発

着地軌道修正制御と姿勢補償制御の統合により、Z軸方向、Pitch軸周り、Roll軸周りに足部軌道の修正が必要な未知の不整路面での歩行に成功した。特に、新たにジャ

イロセンサを搭載し、姿勢補償制御を行った。制御方法としてはPID制御を用いた制御を開発し、福岡市のロボット特区内の実環境路面において従来の剛体平板足部を用いて傾斜5[deg]の傾斜路面、およびうねりと凹凸を含んだ傾斜2[deg]の路面に対して制御のみで歩行を実現した。また、実験室内において最大20[mm]の段差を乗り越えられることを確認した。以上より、開発した姿勢補償制御の有効性を確かめた。また、光センサが付着され、路面の情報が計測可能な足部を用いてRoll軸周りに15[mm]、Pitch軸周りに20[mm]を踏んでの歩行も実現し、路面適応性能の向上を確認した。

8.2.3 4点型路面検知足部機構を用いた路面適応制御の開発

不整地に関してはこれまでも多く研究がされてきており、ハードウェアでは4点接地となる各つめにロック機構を設けたWS-5(Waseda Leg - No.5)を開発し、20mmの凹凸がある路面の歩行に成功している。また、ソフトウェアでは、非線形コンプライアンス制御を用いた着地軌道修正制御を開発し、不整地歩行に成功している。しかし、これらは一長一短であった。そこで、2008年度はハードウェアとソフトウェアを統合することによって不整地歩行の実現を目指した。

新型のハードウェアは、ソフトウェアとの統合を最初から考え、ロック機構を搭載せず、できるだけ軽量となる足部機構の開発を目指した。そして、足部中央付近の凹凸やうねり路面への対応のために点接地にすることによって、凹凸を避けることにした。このようにして、軽量（重量：約1.5kg）かつ剛性が高く、ソフトウェアのために路面検知用のセンサを4つ搭載した足部機構を開発した。

ソフトウェアでは、ハードウェアに搭載されている4つのセンサを使用した着地軌道修正制御を考案した。これまでの不整地歩行では、支持多角形を大きく確保しようと必ず4点で接地することを目指していた。しかし、今回は軽量化のためロック機構を搭載しなかったため、制御によって接地する3点を決定する必要がある。その方法としては、4つのセンサのうち一番早く路面を検知したセンサに応じて足関節の修正角度を算出する3つのセンサを決定した。また歩行パターンの変更により、十分な俵い時間を確保した。これによりセンサのストロークも短くなり、早い俵い動作を実現した。

以上のようなハードウェア、ソフトウェアを開発し、これまでには実現できていなかった20mmの凹凸にRoll方向で俵うことができるようになった。さらにうねり路面へも対応できるようになり、実環境不整地路面（傾斜：8deg、最大凹凸：15mm）での歩行に成功した。

8.2.4 3点型路面検知足部機構を用いた路面適応制御の開発

3点型路面検知足部機構に関しては、従来の設定 ZMP に対する安定余裕を増加させることを目的に、路面検知を行う直動の爪部による3点接地型の足部機構を開発した。また、センサ部の構造について再検討し、改良を行った。具体的には、直動軸の直径や材質の変更、衝撃力に対するモーメントアームの低減を図ることで、着地衝撃や遊脚時における路面の凹凸との衝突による軸の曲げやリニアブシュのボール痕を防止し、センサによる路面検知の信頼性を向上した。また、赤外線センサを検知距離が適切なものに変更し、センサ部のストロークを短縮することができた。さらに、爪部の Yaw 回転を抑制する機構に変更することで、それに起因する転倒やセンサの動作不良を解決した。そして、滑落に対する対策として、爪部の形状を円筒型の形状で底面に窪みのある形状とし、接地面の素材を高耐久性・高摩擦係数の大きい素材に変更した。

路面適応制御に関しては、従来の3点接地型から4点接地型の路面検知足部への変更に伴い、路面適応動作の変更を行った。さらに、路面適応のための倣い動作の回転中心を従来の足底中心点から、爪部による接地点・接地線周りへと変更することで、路面に対して足部の並進方向の変位が発生しないように制御を改良した。それにより、転倒の大きな原因のひとつであった滑落を防止することを試みた。

開発した3点型路面検知足部機構と路面適応制御の有効性を検証するために人間と同等サイズの2足ヒューマノイドロボット WABIAN-2R を用いて歩行実験を行った。

その結果として、20[mm]の段差に対して Pitch, Roll, Z 方向の倣い動作が可能であることと、滑落対策の有効性を確認した。さらに、5[mm]から20[mm]の段差が混在した擬似不整地での歩行に成功し、歩行成功率の向上を実現した。さらに、7[deg]の傾斜路面での歩行にも成功し、その有効性を確認した。

しかしながら、屋外の不整地路面（最大の段差 15[mm]、傾斜 7[deg]）における歩行の実現は難しかった。その原因として、斜面に対する路面適応のための倣い動作が着地時までには十分行われておらず、それにより転倒してしまうこと、設定 ZMP に対する安定余裕のまだ不足していること、の2点が挙げられ、更なる検証が必要である。

8.2.5 軟弱路面歩行安定化制御の開発

軟弱路面における2足歩行ロボットの歩行を実現するために、第2章に述べたように路面の分類を行い、第3章で述べたように路面性状測定装置を開発した。また、路面性状測定装置に実装されている足型センサを用いた適応制御歩行制御法、重心位置

補償制御法，歩隔修正制御および足底姿勢修正制御法，床反力調整制御法により，布団並みの柔らかさのウレタンスポンジ 50[mm]（密度 22 ± 2 [kg/m³]）上において歩行に成功した．この結果により，2 足ヒューマノイドロボットによる軟弱路面での歩行の実現を目指し，軟弱路面における歩行安定化制御を開発したところ，変形量の大きい軟弱路面での歩行を達成した．

8.3 今後の展望

8.3.1 多様な路面のモデル

結論にて述べたとおり，装置と路面との相対変位を計測する必要がある．また，粘性に関してはモデルの再考が必要である．

モデルの構築に終始したが，研究目的が 2 足歩行ロボットでの脆弱路面での歩行安定化制御の構築である以上，構築したモデルの最終的な評価は実際に WABIAN-2R で制御を構築して歩行を行うことではじめて達成される．今後の課題としては，今回構築したモデルを元に歩行安定化制御を完成させ，歩行実験を行うことであり，得られた結果をフィードバックしモデルの修正を行うことでより適切なモデルが構築出来るものと考えられる．

また，路面性状測定装置に関しては，現在測定可能な範囲は基本的に 1 方向に対し等速に荷重を加えた際の応答に限られていた．今後，ソフトウェアの改良を行い，実際の WABIAN-2R の歩行パターンに則した足先軌道を再現し，床反力を再現したトルク制御を加えることで，限りなく歩行時の条件に近い計測データを得ることが出来るであろうと考えられる．

8.3.2 剛体の不整路面における歩行

本研究では，屋内に接地した擬似不整地路面では安定した歩行を確認し，歩行成功率向上を実現した．しかしながら，屋外における実際の不整地路面では安定した歩行が実現できなかった．今後の展望として，下記の課題を解決することで屋外不整地路面での歩行を目指す．

路面適応能力については，現状足部の修正量は P 制御を用いて決定しており，倣い動作の応答性を向上させるため比例ゲインを増加させると着地衝撃が大きくなり，安定した歩行が実現できない．そこで，PD 制御などを用いて制御性の向上を図ることで解決できるのではないかと考える．

また、着地軌道修正制御は歩行パターンから得られる理論上のセンサ移動量と実際のセンサ移動量の差から路面の凹凸を検知しているため、正しく検知するためには姿勢角を適切に維持されていることが前提となる。そのため、姿勢制御の改良を行うことで、路面適応能力の向上が期待される。

一方、安定余裕については、前述の仮説を検証し、実質的に必要な安定余裕を確認する必要があると考える。

また、これまで2足歩行ロボットの運動性能を表す場合、「 $\sim\text{mm}$ の凹凸まで対応可能」という表現が用いられてきた。しかし、これではロボットの歩きにくさを定量的に表しているとはいえない。なぜなら、同じ高さの突起物を踏んだ場合でも、足部と路面との接地状況によっては接地面積が大きく確保できず、その接地状況が歩行の安定性に大きく影響を与えるからである。2足歩行ロボットの“歩きにくさ”を考える場合、足底面内の凹凸に注目することが重要であると考えられる。これまでに歩行ロボットの静的安定性や動的安定性の評価手法[180, 181]は提案されてきているが、それらは各足部で大きな支持多角形が確保されていることが前提となっており、足部の中心付近で凸部を踏んだ場合などに適用することは難しい。

そこで、あらゆる歩行ロボット、特に2足歩行ロボットが歩行する路面に対して“歩きにくさ”を定量的に表すことのできる指標の必要性を強く認識するに至った。

歩行安定化制御アルゴリズムや接地面積を大きく確保できる足部機構などの歩行安定化技術を定量的に評価するための指標としては次のようなものが考えられる。

- 足底基準面の基準点の相対高さ $\Delta h/H$
- 足底基準面の絶対傾斜 $\Delta\theta$
- 支持多角形の面積 S'/S
- 足底面内の凹凸度合い

ここで、 Δh は足底基準点の相対高さ、 H は歩行開始時のロボットの脚長、 S' は不整路面歩行時の支持多角形の面積、 S は平坦路面歩行時の支持多角形の面積である。

またこれ以外にも、路面の柔らかさや滑りやすさなどの粘弾性係数や、摩擦係数も考慮すべきである。この指標を選出する際は、小型の2足歩行ロボットや、多脚型の歩行ロボットにも適応できる汎用性の高いものが望まれるため、可能な限り無次元量である必要がある。

8.3.3 軟弱路面における歩行

今後の展望としてはより多くの軟弱路面での歩行の達成を目指すために塑性変形

をとまなう砂地路面上などより複雑な路面性状を示す路面での歩行が考えられる。この際は、現状考慮している弾性要素以外の路面のパラメータの測定およびこれを考慮した制御モデルの構築が必要となる。また、現在は路面パラメータを事前に計測して、制御に実装しているため、既知の軟弱路面しか歩行できない。そのため、歩行しながら路面のパラメータを同定し、未知の軟弱路面上で適応歩行を達成することも今後の大きな課題である。

また、ヒト足部の機能に関する研究について行う必要がある。ヒトは屋外の凹凸路面や脆弱な路面においても2足歩行できていることを考えると、ヒト足部の構造に注目することは重要である。しかしながら、ヒト足部の特徴であるアーチ構造を取っても、依然としてその存在については明確な理由が解明されておらず、アーチ構造が2足歩行の安定化に寄与しているかどうかは推定の域を出ていないのが現状である。そのため、本研究ではヒト足部の構造を模擬することはせずに不整路面に適応可能な足部機構を開発した。しかし、逆にヒト足部の特徴を持った足部機構を開発し、それをロボットに装着した実験を通してヒト足部のアーチ構造の存在意義を調べることは、人間工学の視点から非常に重要であると考えられる。しかし、そのような足部を開発したからといって2足歩行ロボットの歩行能力が向上するわけではなく、ロボット全体のシステムとしてその制御系についてもヒトに近づける努力を続けなければならない。

8.3.4 まとめ

以上、本研究において発掘した問題領域に関する今後の展望について述べた。こうしてみると2足歩行ロボットの実用化に向けて解決すべき課題は多く、これらを解決するのは容易ではない。しかしながら、多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの実用化に向けた基盤技術になるものである。この技術により、2足歩行ロボットの歩行能力が向上され、剛体路面のみならず軟弱路面など人間の様々な生活環境において移動が可能になった。高い運動能力を持つロボットを提供することができ、人間共存型ロボットの実現に一步近づいたと言える。さらに、狭い人間の住環境での運用に適している2足歩行ロボットの運動能力と共に他分野の多様な技術との相互関係によって、より人間共存型ロボットの飛躍的な活躍が拡大されるものであると期待できる。よって、ロボット工学、機械工学のみならず土木工学、地盤工学など幅広い工学分野の発展に大きく貢献するものであると考える。

付録A 2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R

- A.1 基本設計
- A.2 機械ハードウェア
- A.3 制御システム
- A.4 WABIAN-2R

A.1 基本設計

A.1.1 サイズ

本機械モデルは，人間のパートナーとして親しみを持てる，また人間の運動シミュレータとして活用できるサイズとして，全高1500[mm]，重量60[kg]を目標に設計を行っている．各リンク長さは外観の美的評価，人間との協調性を考慮し，図A.1を参考にした．

A.1.2 自由度構成

従来からある2足ヒューマノイドロボットと比べたWABIAN-2Rの特徴的な自由度について説明する．

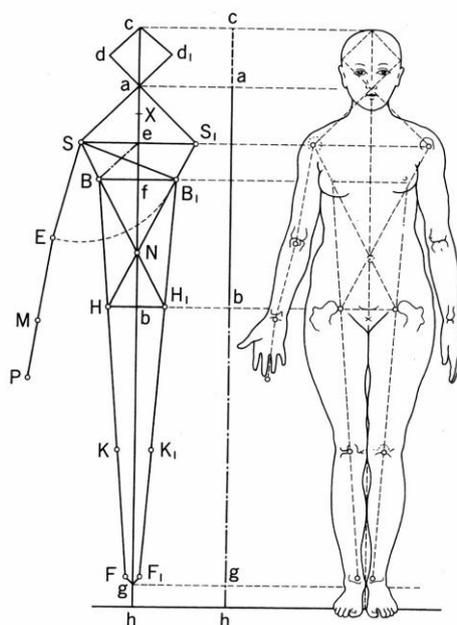


Figure A.1 Link length of human (pattern diagrams)

(1) 骨盤2自由度

定常歩行中における人間の骨盤の回旋運動は、図A.2に見られるように、前額面内（ここではRoll軸まわりと定義する）、および水平面内（Yaw軸まわり）において観察される。矢状面内（Pitch軸まわり）の運動は図A.3のスティック線図を見ても分かるようにほとんど観察されない。これより、上体の姿勢に依らない骨盤のRoll軸，Yaw軸まわりの運動を用いることで人間の歩行運動を2足ヒューマノイドロボットで再現できるのではないかと考えた。また、次のような仮説のもと自由度配置，機械設計を行っている。定常歩行中において，2枚の寛骨は互いにずれながら運動をしていると言われている。これは，恥骨結合という2枚の寛骨の結合部が機械的にはクランク機構のような役割を果たすためにおこる運動である。この運動にしたがって，股関節の運動は相対的な2自由度系とみなすことが出来ると考えられる。

骨盤Roll軸，Yaw軸の配置に関しては両股関節中心にて両軸が交差するものとした。これは回旋運動による上体の位置変位が最も小さく人間に即していると考えたからである。

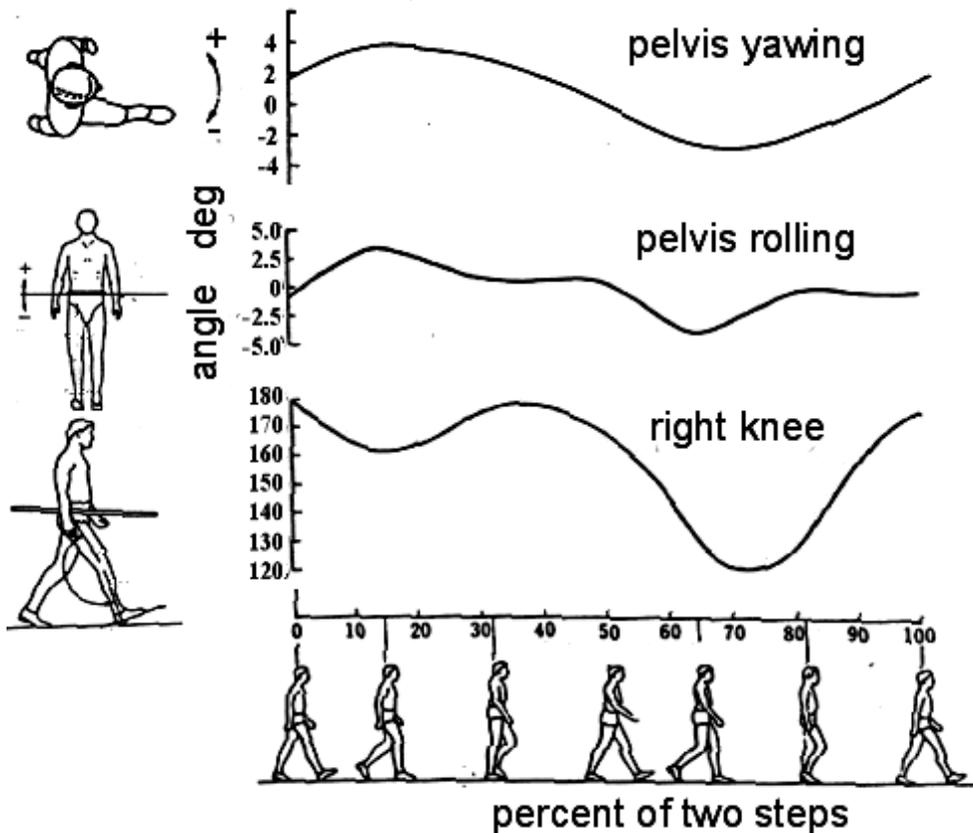


Figure A.2 Pelvis and knee motion of human walking

側方像

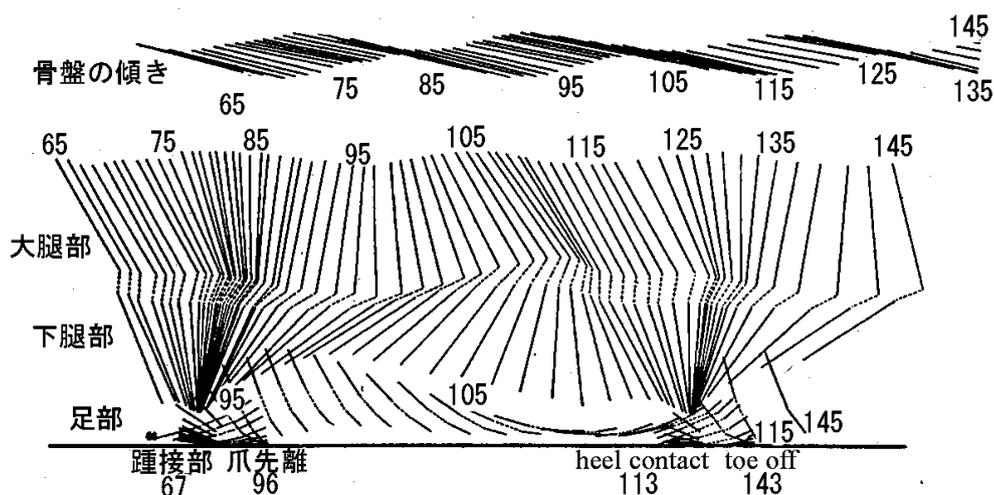


Figure A.3 Stick diagram of human leg motion

(2) 体幹2自由度

体幹部にはPitch軸とRoll軸の自由度を配置した。人間は体幹部を用いた全身運動を伴い様々な運動を行う。これに対応するため上記2自由度を設けている。これに加えYaw軸まわりの自由度も必要になるがこの自由度に関しては骨盤の回旋運動を実現するために設けた2自由度のうちのYaw軸の自由度を併用することとした。

WABIAN-2Rの全自由度は41であり、そのうち2自由度が後述する爪先関節の受動関節である。内訳としては、片足に7自由度（股関節3自由度、膝1自由度、足関節Pitch, Rollの2自由度、爪先受動1自由度）、骨盤の回旋運動に2自由度（Roll, Yaw）、体幹に2自由度（Pitch, Roll）、片腕に7自由度（肩3自由度、肘1自由度、手首3自由度）、片手に3自由度、首に3自由度である。

A.2 機械ハードウェア

A.2.1 人間形足部機構

2005年度には、踵接地・爪先離地が可能な爪先付足部機構を開発した。この足部は、受動的な爪先軸と踵の丸みにより、歩行時の足底軌道を模擬できるように製作された。

しかし、この足部は人間と比べると足幅が2倍近くあるものとなっている。また、人間の足部はアーチ構造となっているのに対し、2005年に開発された爪先付足部機構の足底は平板となっている。このように、構造は人間とかけ離れたものとなっている。

そこで、人間の構造を模擬した人間形足部機構の開発を2008度より行っている。Fig. 2.7の足部は2008年度に開発されたもので、人間の足部のサイズや内側縦アーチ構造を模擬している。歩行中の内側縦アーチの変形とそれに伴う弾性の変化を模擬するべ

く、Fig. 2.8のように、歩行中においてワイヤによってアーチが可動するようになっている。また、このとき軟素材をストッパとしてはさむことにより、人間と同等の回転ばね定数を再現した。(ただし、爪先離地時の回転ばね定数はワイヤの伸びが原因となり再現することができなかった)。

2009度は、前述した足部にさらに改良を加え、人間の足裏の機械的特性の模擬までを図った人間形足部の開発を行った。達成できていなかったⅡ相とⅢ相の弾性の切り替えに成功し、また、通常、人間は靴を履いて歩行することが多いことから、靴を履くことができる形状となっている。

A.3 制御システム

制御システムとしては、各アクチュエータを制御する制御用コンピュータおよびDCサーボドライバをロボット上に搭載している。制御用コンピュータは安定化制御の軌道計算もアクチュエータの制御と同時にリアルタイムに行っている。制御用コンピュータにはアナログ出力機能、アナログ入力機能、エンコーダパルスのカウント機能が追加されている。DCサーボドライバは速度制御モードで使用し、コンピュータからのアナログ電圧出力を速度指令値としてモータを制御している。速度制御はDCサーボドライバ内のローカルなループで行う。モータの出力軸にはインクリメンタル式磁器式エンコーダが取り付けられており、これを用いて取得した角度データをコンピュータにフィードバックすることでアクチュエータの位置制御を行っている。

また求められる機能からケーブルレスなシステムとなっており、Li-ionバッテリーを搭載し(連続実験のために外部電源を排他的に使用することが可能)ロボットへの指令もワイヤレスLANを通して行うことが可能となっている。

補償軌道計算に基づいた歩行パターンは外部ホストコンピュータにおいて作成され、この歩行パターンを制御用コンピュータに読み込ませることで歩行をさせる。その際先述したように安定化制御の軌道計算はリアルタイムに制御用コンピュータで計算され、逐次あらかじめ読み込ませてある歩行パターンを更新し出力している。

2.4 WABIAN-2R

開発した2足ヒューマノイドロボットWABIAN-2Rの仕様を記す。WABIAN-2Rは、全高1502[mm]、総重量62.7[kg]である。全体図を図A.5に、自由度配置図を図A.6に、WABIAN-2Rの写真を図A.7と図A.8に示す。

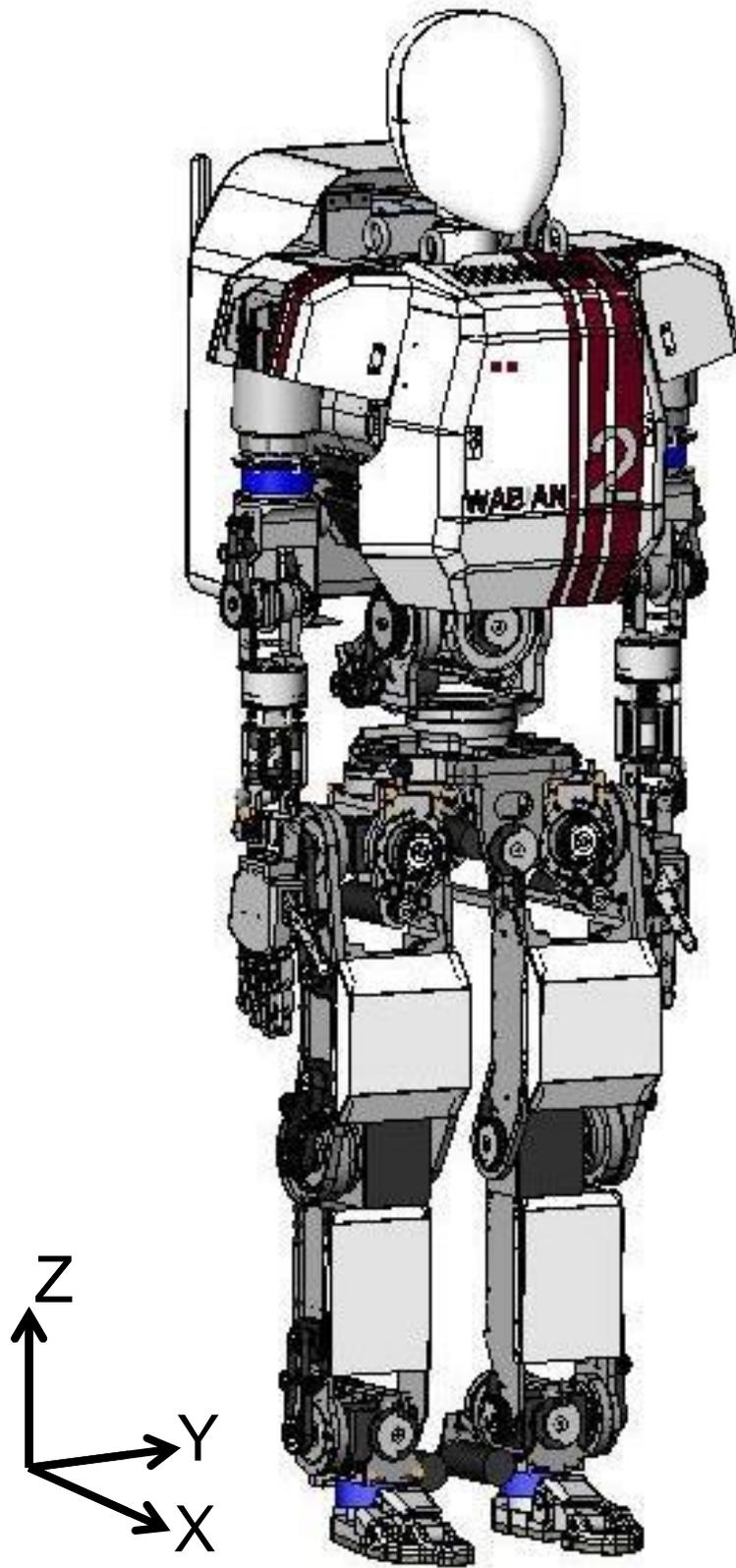


Figure A.5 WABIAN-2R

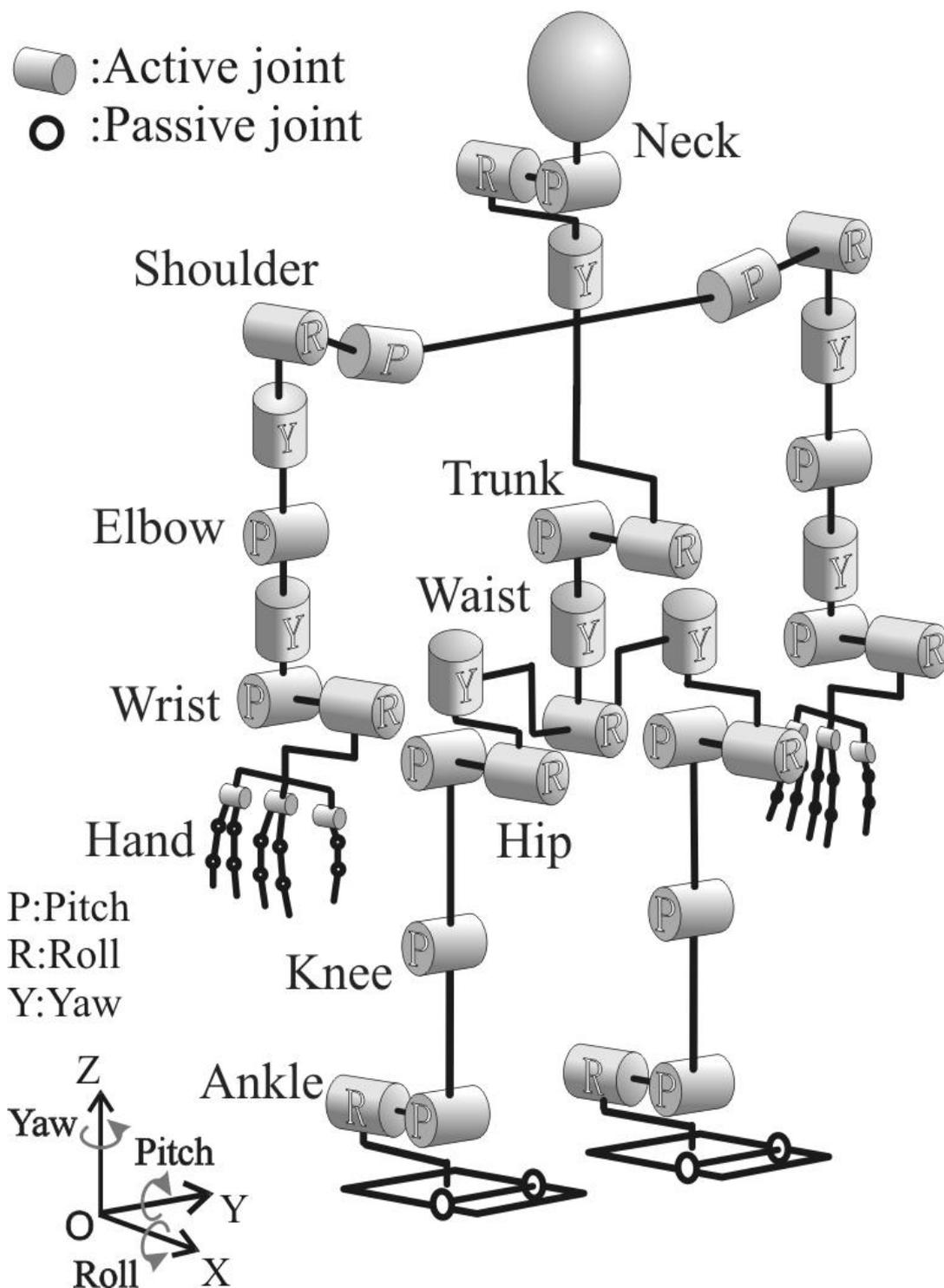
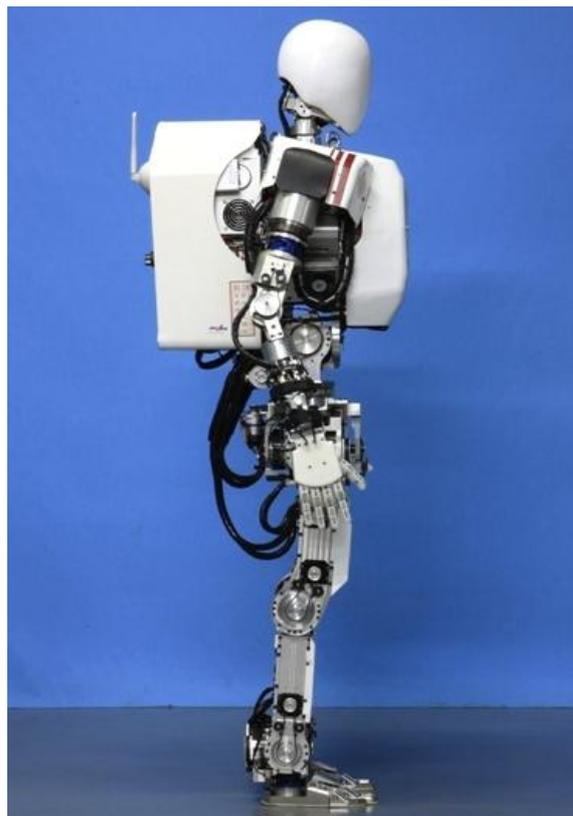


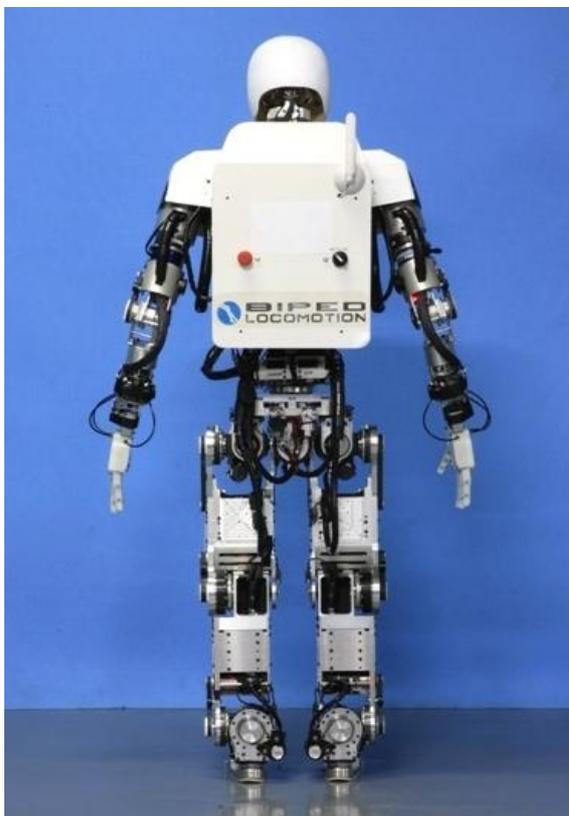
Figure A.6 DOR configuration



(a) Front



(b) Side



(c) Back

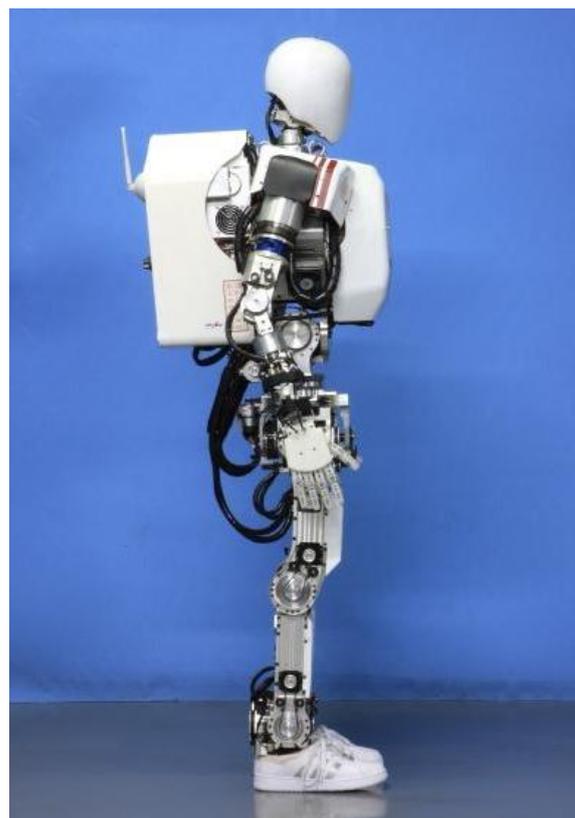


(d) Overview

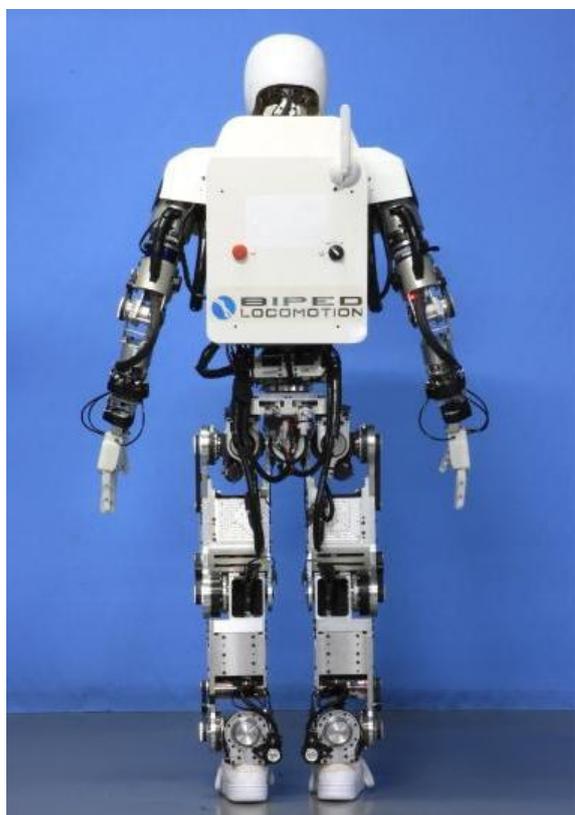
Figure A.7 WABIAN-2R with human-like foot



(a) Front



(b) Side



(c) Back



(d) Overview

Figure A.8 WABIAN-2R with shoes

付録 B 遊脚軌道修正制御の開発

- B.1 はじめに
- B.2 遊脚軌道修正制御法
- B.3 評価実験と考察
- B.4 まとめ

B.1 はじめに

現在、多くの大学や企業において、様々な目的で2足歩行ロボットが研究されている。しかし、開発されてきている2足歩行ロボットの歩行能力は、人間と比べると程遠いものである。そのため、接地面積を大きく確保するために、人間と比べ幅の広い足部を使用しているのが現状である。高西研究室で開発している WABIAN-2R も例外ではなく、人間の足幅の2倍近くある幅 160[mm]の足部を使用している。そこで本研究では、2足歩行ロボットの運動性能を人間に近づけるべく、人間と同等の幅 90[mm]以下の幅狭な足部での歩行実現を目的とした。

これまで、幅が狭い足部での歩行を試みると、姿勢が倒れてしまい歩行が困難であった。そこで、幅が狭い足部で安定した歩行を実現する方法として、ロボットの姿勢の崩れを積極的に利用することを考えた。外に倒れると対応が難しいため、足部ハードウェアによって、意図的に内側に倒れやすい状態にし、その姿勢の倒れに応じて遊脚軌道を制御するものである。これを遊脚軌道修正制御とした。また、姿勢が倒れることによって、足部は基準歩行パターンより早く接地してしまう。そこで、その基準歩行パターンとの差の分だけ、次からの歩行周期を変更するようにした。この遊脚軌道修正制御を用いて、従来の足部に比べ実質の接地面積の幅が 70[mm]狭い足部で歩行実験を行なった結果、安定した歩行に成功した。このとき歩行周期は 1.0s/step から 0.8s/step に変更された。さらに、この制御で歩行できる限界の足幅を見極めるために歩行実験を行なった結果、前進歩行では足幅 30[mm]での歩行に成功した。さらに、本年度開発した人間形足部機構を用いての踵接地・爪先離地歩行にも、遊脚軌道修正制御を用いた結果、歩行周期 1.0[s/step]、歩幅 350[mm/step]の安定した歩行に成功した。以上から、本年度開発した遊脚軌道修正制御の有効性を確認したため、本章では遊脚軌道修正制御法および評価実験と考察について述べる。

B.2 遊脚軌道修正制御法

前述のように、多くの大学や企業において様々な目的で2足歩行ロボットが研究されているが、開発されてきている2足歩行ロボットの歩行能力は、人間と比べると程遠いものである。そのため、接地面積を大きく確保するために人間と比べ非常に幅の広い足部を使用しているのが現状である。そこで、2足歩行ロボットの運動性能を人間に近づけるべく、人間と同等の幅 90[mm]以下の幅狭な足部での歩行実現を目標とした。

幅が狭い足部で安定した歩行を実現する方法として、以下の2つが考えられる。

- (1) 姿勢の崩れを防止
- (2) 姿勢の崩れを利用

ここで、(1)の手法は 2007 年度に姿勢補償制御として実装済みの技術である。そして、姿勢補償制御など立脚を修正する制御は転倒が始まってしまうと有効に働かないという予備実験の結果を得た。そこで、(2)の手法を用いて、姿勢の崩れを積極的に利用することを考えた。外側に倒れると、もう一方の足を外側に着くことが難しいため、対応が困難である。そこで、足部ハードウェアによって、意図的に内側に倒れやすい状態にし、その姿勢の崩れに対して遊脚軌道を制御するものを考案した。この制御を遊脚軌道修正制御とし、概要は図 B.1 のようになる。

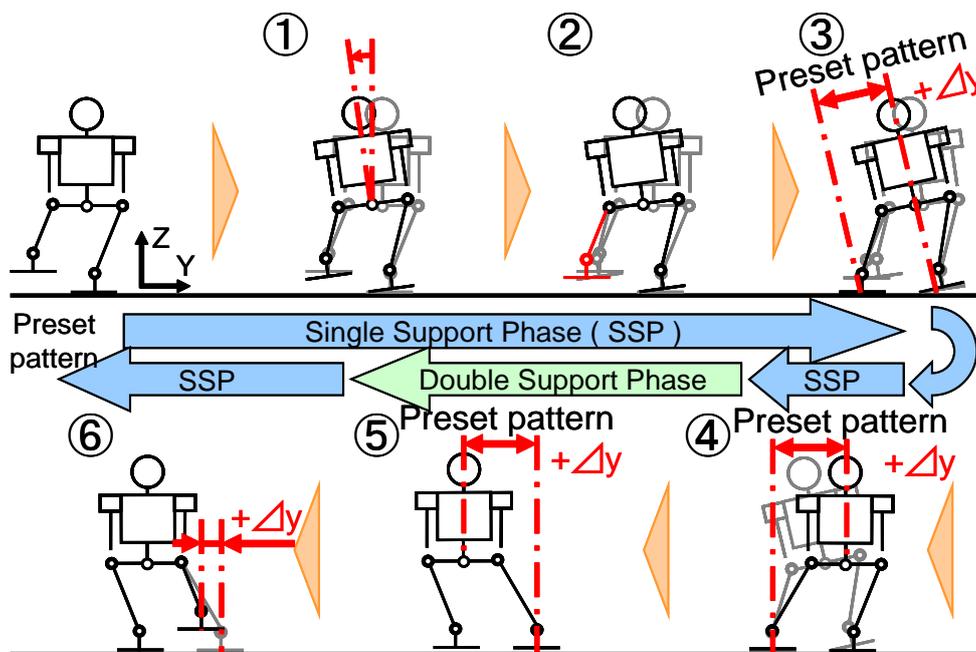


Figure B.1 Swing pattern medication control

- ① 内側に倒れやすい足部を用いることによりロボットが内側に倒れ、そのときの姿勢角を取得.
- ② 姿勢角に合わせ、路面と遊脚の足底が平行になるように遊脚の足関節角度を修正、および横方向に着地位置の変更. 仮想コンプライアンス制御により着地衝撃緩和.
- ③ 姿勢の倒れによって設定パターンより早い時期で着地. 設定パターンとの差の分だけ次からの歩行周期を変更.
- ④ 残りの単立脚期間 (SSP) を使って、着地位置の変更を考慮した設定パターンに復帰.
- ⑤ 着地位置の修正量を考慮した腰軌道により、ZMP を他方の足に移動.
- ⑥ 遊脚前期に設定パターンに復帰.

具体的な方法としては、次のように歩行中の状態を分割して各々の期間によって制御を行なう.

- (1) 立脚前期 (単立脚)
立脚である単立脚期を 2 分割した前半部.
- (2) 立脚後期 (単立脚)
立脚である単立脚期を 2 分割した後半部.
- (3) 遊脚前期
遊脚期を 2 分割した前半部.
- (4) 遊脚後期 (遊脚着地前)
遊脚期を 2 分割した後半部、かつ遊脚が地面に接地する前の状態.
- (5) 遊脚後期 (遊脚着地後)
遊脚期を 2 分割した後半部、かつ遊脚が地面に接地した後の状態.
- (6) 両立脚期

尚、踵接地・爪先離地歩行時は足部が地面から完全に離れたときから踵が接地している状態までを遊脚期、足底接地から足部が地面から離れた瞬間までを立脚期として制御を行なう.

また、設定した動作期としては以下の 6 つに分けられる.

- (a) 遊脚修正期
姿勢角センサの値に応じて遊脚軌道を修正する期間.

(b) 保持期

ひとつ前の修正量を保持して出力する期間.

(c) 復帰期

基準パターンへの復帰動作を行なう期間.

(d) 通常期

基準パターン通りの位置指令を出力する期間. ただし, 他の安定化制御は適応される.

(e) 仮想コンプライアンス制御期

仮想コンプライアンス制御を行なう期間.

(f) 両立脚期

Y 方向の修正量を考慮したパターンを出す.

以下, 具体的にそれぞれの動作期について詳述する.

B.2.1 遊脚修正期

歩行中の状態

Roll : (3) 遊脚前期

(4) 遊脚後期 (遊脚着地前)

Y-axis : (4) 遊脚後期 (遊脚着地前)

姿勢角センサにより取得した値によって, Roll 軸方向, Y 軸方向の修正を行なう期間である. 姿勢角センサの値を 10msec ごとを取得し, その値になるように 5 次関数補間で修正を行なう. このとき, 歩行状態が変わった瞬間に修正の目標値が非常に大きくなってしまう可能性があるため, ゲインをかけることによって徐々に修正するようにした. ゲインの値については, Roll 方向に関しては「(3) 遊脚前期」中に, Y 方向に関しては「(4) 遊脚後期 (遊脚着地前)」の前半中に 0 から 1 になるように 5 次関数によって変更するようにした. 以上より計算式は次のようになる.

$$\theta(t) = K_{\theta} \left[\theta(t-t_c) + \Delta\theta \left\{ 6 \left(\frac{t_c}{T_c} \right)^5 - 15 \left(\frac{t_c}{T_c} \right)^4 + 10 \left(\frac{t_c}{T_c} \right)^3 \right\} \right] \quad (4.1)$$

$\theta(t)$: 修正量

T_c : 修正時間 (10msec)

t_c : T_c 期間内の時間
 $\Delta\theta$: $t_c=0$ のときの $\theta(t)$ と目標値の差
 K_θ : 修正ゲイン (0 から 1 に変化)

B.2.2 保持期

歩行中の状態

Roll : (5) 遊脚後期 (遊脚着地後)
 (6) 両立脚期
 Y-axis : (5) 遊脚後期 (遊脚着地後)

B.2.3 復帰期

歩行中の状態

Roll : (1) 立脚前期 (単立脚)
 Y-axis : (5) 遊脚前期

この期間は、「(a) 遊脚修正期」および後述の「(e) 仮想コンプライアンス制御期」で変更した歩行軌道を基準歩行パターンに復帰させる。具体的には、復帰期に入る 1 周期前の修正値を、復帰期の終了の時刻までに復帰するよう、加速度まで連続になる 5 次関数補間を行なう。ここで、復帰する量が問題となる。Roll 方向に関しては、復帰期が立脚時であるため 0 まで戻す必要があるが、Y 方向に関しては必ずしも 0 に戻す必要がない場合がある。なぜなら、今回ハードウェアにより意図的に内側に倒れやすい状態にしているため、次の遊脚時にも同じ程度姿勢が倒れ、0 に戻しても結局 1 歩前と同じだけ Y 方向を修正しなければならない可能性があるためである。よって、以下のように、復帰量を Roll と Y 方向で異なるように設定する。

(1) Roll 軸方向

Roll 方向に関しては、立脚中に復帰期となるので、必ず 0 に戻すべきであるため、以下のような計算式となる。

$$\theta(t) = \theta_{\text{modif}} \left\{ -6 \left(\frac{t}{T} \right)^5 + 15 \left(\frac{t}{T} \right)^4 - 10 \left(\frac{t}{T} \right)^3 + 1 \right\} \quad (4.2)$$

$\theta(t)$: 復帰変更量

θ_{modif} : 復帰させるべき(0へ戻すべき)修正量

T : 復帰期の時間

(2) Y 軸方向

前述の通り, Y 方向に関しては必ずしも 0 に戻す必要はない. よって, これまでの歩行の傾向が, 発散していこうとしているのか, 安定に向かっているのかで修正量を変更することにした. その判断方法としては, 1 歩前の変更量 (Y_{m1}) と 2 歩前の変更量 (Y_{m2}) を比較することによって行なうことにした.

i. $Y_{m2} < Y_{m1}$

発散傾向にあるため, 次の 1 歩も大きく修正しなければならない可能性が高い. すなわち, この期間では復帰しないほうがよいことになる. よって, 「(b) 保持期」と同じように, 修正量をそのまま維持することにした.

ii. $Y_{m2} \geq Y_{m1}$

この場合は安定に向かっているため, ある程度復帰したほうがよいと言える. ここで, どこまで復帰するかが問題となる. 安定に向かっているとは言え, まだ修正量があり次の 1 歩でどうなるかわからないため, 0 まで戻す必要はないと考えた. そこで, 今回は 1 歩前の修正量 (Y_{m1}) の 1/2 だけ復帰することにした. よって, 計算式は以下のようなになる.

$$Y(t) = Y_{m1} + \frac{Y_{m1}}{2} \left\{ 6 \left(\frac{t}{T} \right)^5 - 15 \left(\frac{t}{T} \right)^4 + 10 \left(\frac{t}{T} \right)^3 \right\} \quad (.3)$$

$Y(t)$: 復帰変更量

Y_{m1} : 1 歩前の修正量

T : 復帰期の時間

ここで, 注意していただきたいのは, この 1/2 という数値に根拠はないということである. 今後, このような復帰の場合, どの程度まで復帰すればよいのか, 復帰量の最適な算出方法が必要になってくると思われる.

B.2.4 通常期

歩行中の状態

Roll : (2) 立脚後期

(6) 両立脚期

Y-axis : (1) 立脚前期

(2) 立脚後期

基準歩行パターン通りに位置指令を出力する期間. この期間において, 遊脚軌道修正制御によって足先の位置・姿勢が変更されることはない. なお, 他の安定化制御を同時に用いた場合は, その制御によって足先の位置・姿勢が変更されることになる.

B.2.5 仮想コンプライアンス制御期

歩行中の状態

Roll : (4) 遊脚後期 (遊脚着地前)

(5) 遊脚後期 (遊脚着地後)

Y-axis : 動作期間なし

遊脚軌道修正制御では姿勢が内側に倒れることを前提とした制御である. すなわち, 内側に倒れることによって基準パターンより早く接地してしまうことになり, その際に非常に大きな着地衝撃が発生すると考えられる. この着地衝撃緩和のために 2005 年度に開発された粘性項のみの仮想コンプライアンス制御を用いることにした. このとき, 以下のような式が成り立つ.

$$\bar{\mathbf{F}} = \mathbf{C} \cdot \dot{\bar{\mathbf{x}}}_f \quad (4.3)$$

$\bar{\mathbf{F}}$: エンドエフェクタ座標原点に加わる力・モーメント

$\dot{\bar{\mathbf{x}}}_f$: エンドエフェクタ座標原点における速度 (並進・回転)

\mathbf{C} : 仮想粘性係数行列

これをコンプライアンス中心における式として離散化すると以下の式を得る.

$$\Delta \bar{\mathbf{X}}_{fcc}(t + \Delta t) = \left[\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \bar{\mathbf{F}}_{cc} + \Delta \bar{\mathbf{X}}_f(t) \quad (4.4)$$

- $\Delta\bar{x}_{fcc}(t+\Delta t)$: 現制御周期における, 基準パターン位置・姿勢からの, コンプライア
ンス中心まわりのエンドエフェクタ座標原点における偏差の指令値
- $\Delta\bar{x}_{fcc}(t)$: 1 制御周期前における, 基準パターン位置・姿勢からの, コンプライア
ンス中心まわりのエンドエフェクタ座標原点における偏差の指令値
- Δt : 制御周期 (現在は 1[ms])

なお, この粘性項のみを用いた仮想コンプライアンス制御は Z 軸, Pitch 軸方向に
関しても行なわれており, Roll 軸方向と同じタイミングで基準パターンに復帰してい
る.

B.2.6 両立脚期

Y 方向における両立脚期間は Roll などとは少し違う. 両立脚期間において, ZMP は
立脚だった足から, 着地した足へと移動する. このときに遊脚期における修正量を着
地した足 (両立脚の前は遊脚だった足) から, 立脚だった足 (両立脚の次は遊脚にな
る足) へ変更する必要がある. よって, 各々の足で行なう制御が違ってくる.

(1) 遊脚だった足 (次に立脚になる足)

修正量を 0 に戻していくため, 「(c) 復帰期」と同様の動作となる. しかし, 5 次関
数補間の場合, 両立脚の途中で非常に腰軌道が早くなってしまうため, 線形補間によ
り修正量を 0 に戻していった.

$$Y_{swing}(t) = Y_{modif} \left\{ 1 - \left(\frac{t}{T} \right) \right\} \quad (4.5)$$

$Y_{swing}(t)$: 復帰変更量

Y_{modif} : 復帰させるべき(0 へ戻すべき)修正量

T : 復帰期の時間

(2) 立脚だった足 (次に遊脚になる足)

0 から前の 1 歩 (遊脚だった足) の修正量へ Y 方向を修正する必要がある. このと
き, 歩隔は基準パターンの歩隔に修正量を加えたもので一定にならなければならない.

$$Y_{stance}(t) = Y_{swing}(t) - Y_{modif} \quad (4.6)$$

$Y_{stance}(t)$: 復帰変更量

なお、歩行が終了する最後の両立脚期においては、両足の中央に腰が来るように設定している。

以上をまとめると、表 B.1 のような制御タイミングチャートになり、フローチャートは図 B.2 のようになる。

また、「遊脚後期」と「爪先離地期（踵が離地する瞬間から足部が完全に路面から離れる瞬間）」においては、以下のような特別な制御を導入している。

I. 遊脚後期

本制御では内側に倒れることを前提としている。すなわち、遊脚は設定パターンより早く着地してしまう。そこで、問題となってくるのが、X 方向（前進の場合）である。設定パターンはできるだけ真上から下ろすような歩容にしているが、それ以上に早く着地してしまったり、まだ X 方向について速度をもっている状態で着地してしまう。その結果、つまづくような状態になり、歩行が不安定となる。それを避けるため、着地を検知したら絶対座標において X 方向を止めることにした。

II. 爪先離地期

今年度開発した人間形足部機構では、人間の内側縦アーチ構造を模擬しており、歩行中にアーチが可動するようになっている。これによって、爪先離地期において、足関節から爪先軸までの距離が変化する。そのため、あらかじめ設定した歩行パターンとは違った軌道を通ることになる。この解決方法としては、歩行パターンをあらかじめアーチの可動を考慮に入れて作成する方法も考えられる。しかしながら、アーチを可動させているワイヤの長さは精度が悪く、正確な軌道を設定することは難しいと思わ

Table B.1 Timing chart

	Swing Phase			Double Support Phase	Stance Phase		Double Support Phase
	First half	Last half			First Phase	Last Phase	
		Before Landing	After Landing				
Y	Returning Motion	Modification Control	Holding Modified Orientation	Returning Motion	Preset Pattern	Preset Pattern	Modification Control
Roll	Modification Control	Modification Control	Holding Modified Orientation	Holding Modified Orientation	Returning Motion	Preset Pattern	Preset Pattern
		Compliance Control					
Z, Pitch	Preset Pattern	Compliance Control		Holding Modified Orientation	Returning Motion	Preset Pattern	Preset Pattern

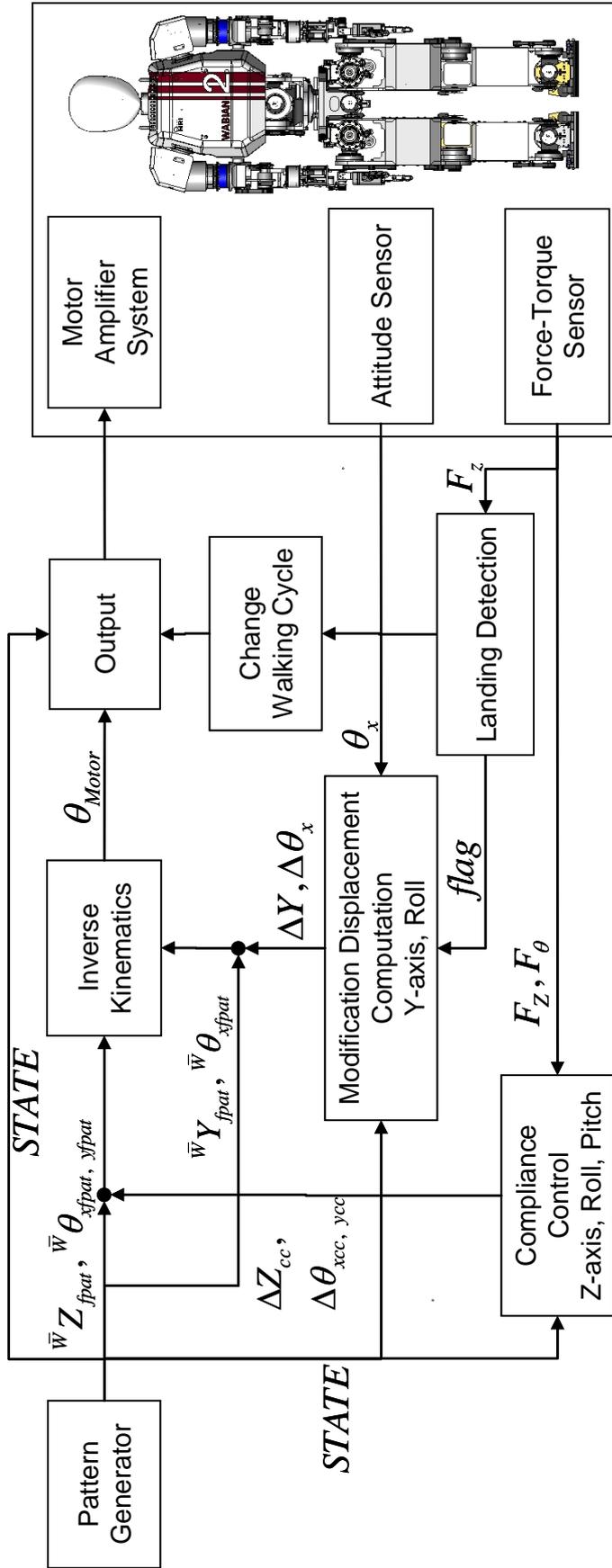


Figure B.2 Block diagram of the swing pattern modification control

れる。よって、今回はアーチの可動に応じて足部の位置・姿勢を修正するように仮想コンプライアンス制御を取り入れることにした。このとき、爪先離地期になった瞬間にいきなり仮想コンプライアンス制御を導入すると、すでに接地し力が加わっているため危険である。そこで、0 から 1 に線形的に変化するゲインをかけることによって、いきなり修正量が入ることを防止した。また、コンプライアンス移動量には限界値を設け、それ以上は修正しないようにした。このような制御を X, Z 方向において行なった。

以上のような制御を取り入れれば、幅が狭い足部でも歩行することは可能である。しかし、これは内側に倒れながら歩行するため、見た目は非常に不安定で、いつ倒れてもおかしくないように見える。そこで、より安定した歩行に近づけていくために、歩行周期の変更を行なうことにした。歩行周期の変更方法を以下に示す。

1. 姿勢の崩れにより遊脚が設定パターンより早く着地
2. 着地を検知し、実際の着地と設定パターンの着地のタイミングの差を計算
3. 2 の差の分だけ次の歩行周期を変更

今回、歩行周期の変更には補間点数の値を変化させることで実現した。しかし、これは補償計算の結果を無視していることになり、本来ならすべき方法ではない。今回はまだオンラインパターン生成法が完成しておらず、また現在研究しているオンラインパターン生成法はすぐに歩行周期を変更することは難しいため、補間点数を変更するという方法を取った。今後、これは解決しなければならない問題点であると言える。

B.3 評価実験と考察

開発した遊脚軌道修正制御の有効性を確認するために、従来と比べ足幅が狭い足部での歩行実験を行なった。

B.3.1 遊脚修正確認実験

(1) 実験目的

遊脚軌道修正制御で遊脚を変更することが有効であることを確認することを目的とする。そのため、歩行周期の変更は行なわない。

(2) 実験方法

図 B.3 のような従来と比べ接地面積（足幅）が 70[mm]狭く，内側に倒れやすい足部を用いて歩行実験を行なう．

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

腰高さ : 0.60 m

歩数 : 8 step

歩幅 : 0.2 m/step

歩行周期 : 1.0 s/step

安定化制御 : 遊脚軌道修正制御

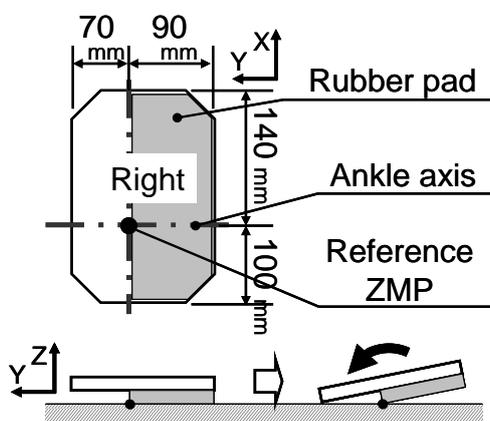


Figure B.3 Narrow foot(width of 90mm)

(3) 実験結果

歩行実験の結果を図 B.4～図 B.8 に示す． 1 歩目，2 歩目までは Roll 軸方向に大きく揺れているが，時間が経つにつれ歩行周期が早くなり安定しているのがわかる．そのため，足部の修正量も時間が経つにつれ少なくなっている．

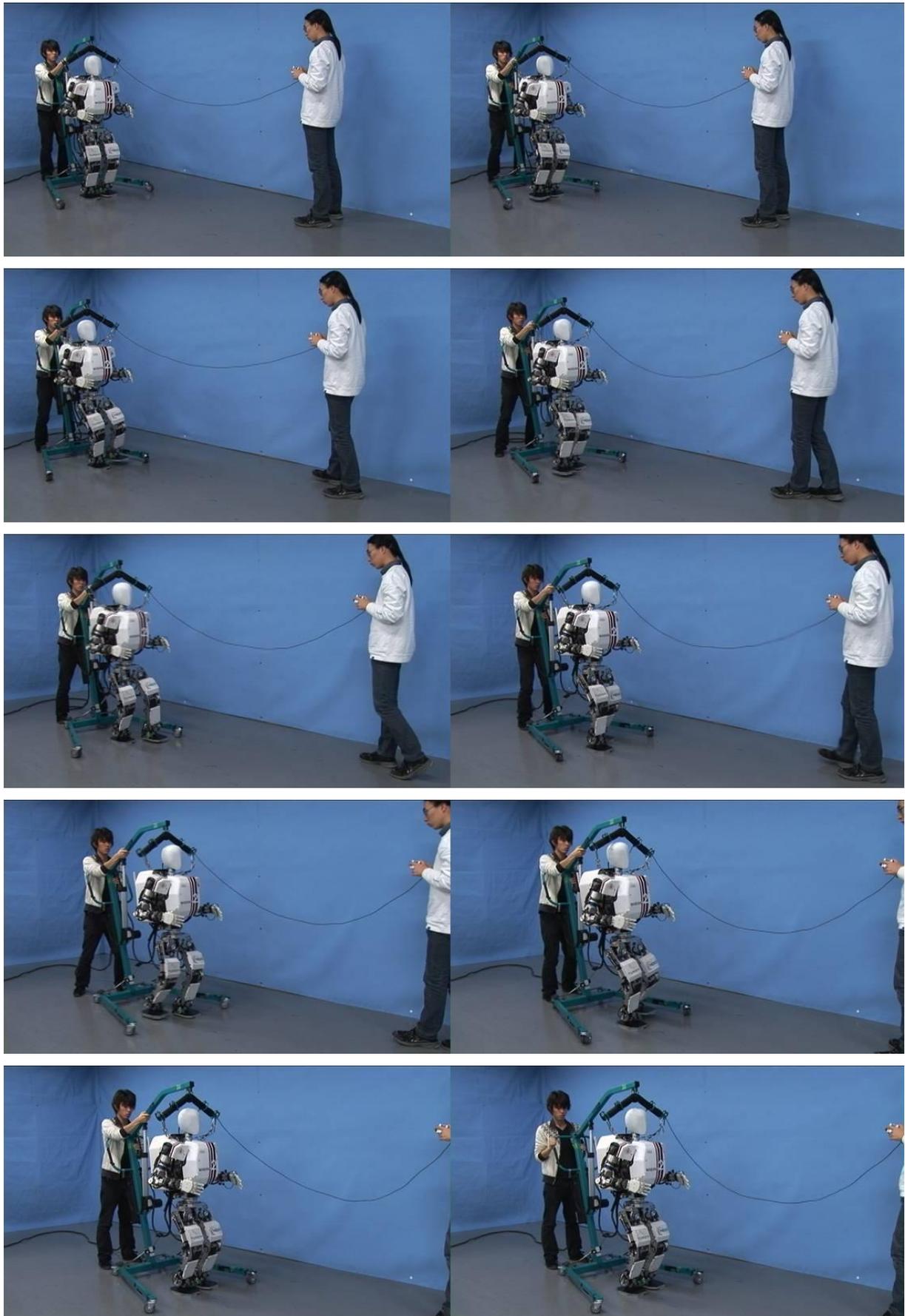


Figure B.4 Walking experiment with narrow foot (width of 90mm)

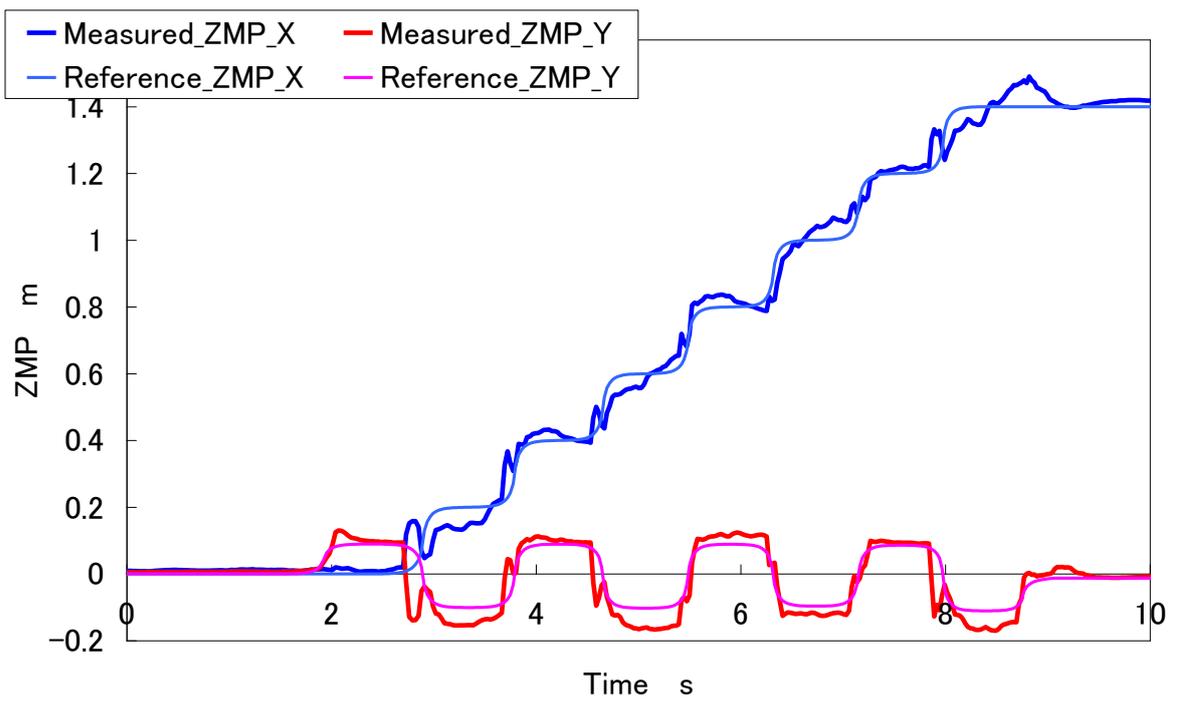


Figure B.5 ZMP trajectories (width of 90mm)

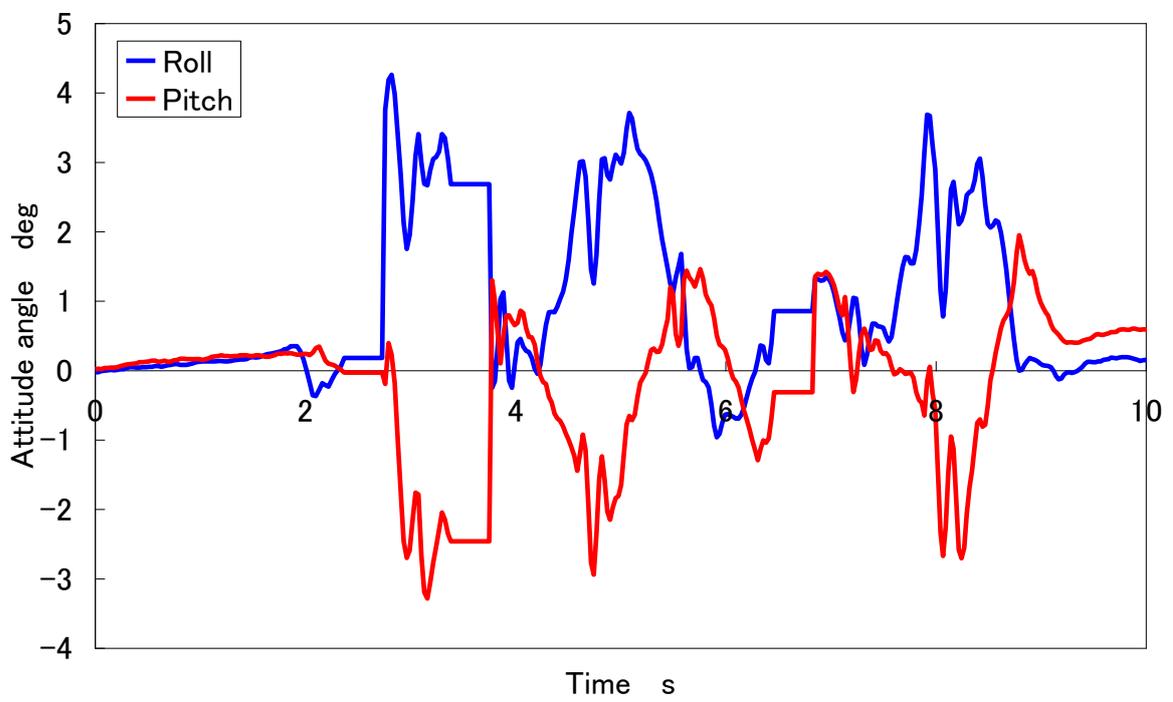


Figure B.6 Attitude angle (width of 90mm)

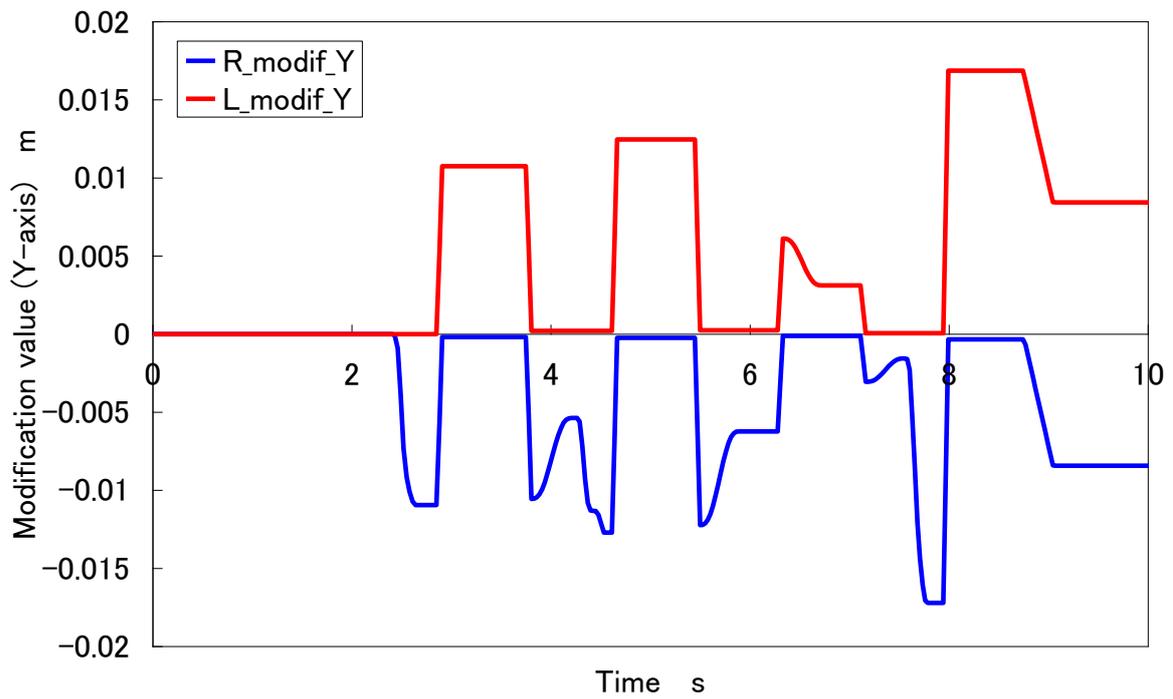


Figure B.7 Modification value along y axis (width of 90mm)

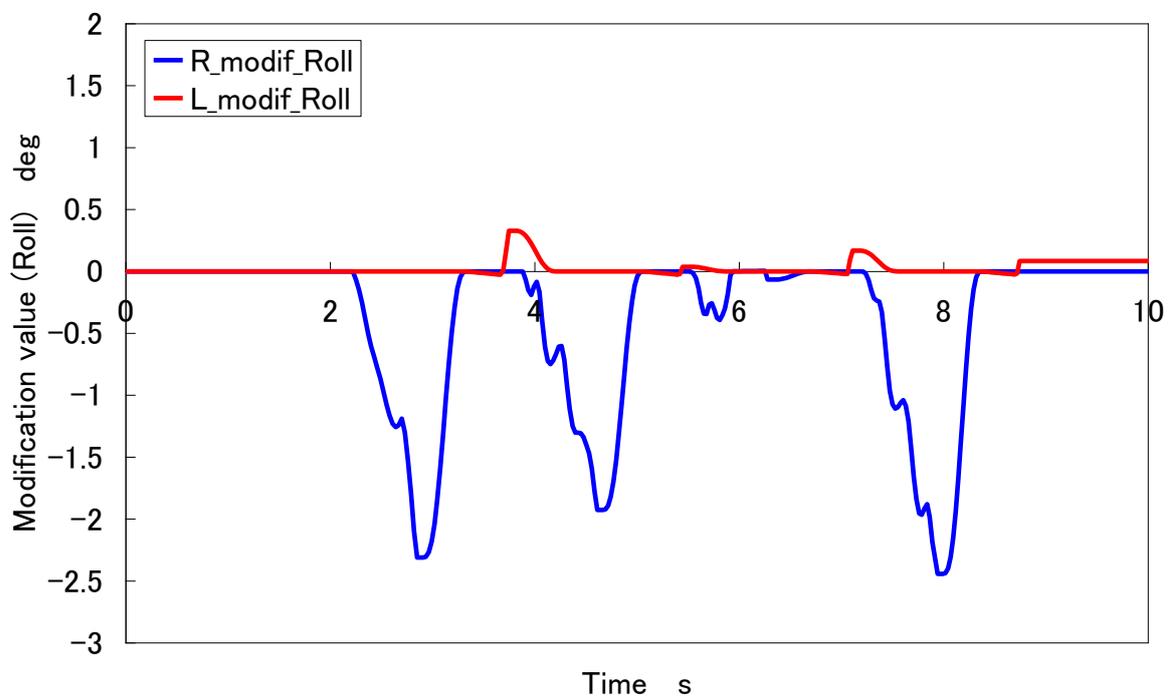


Figure B.8 Modification value about roll axis (width of 90mm)

B.3.2 足幅の限界値確認実験

(1) 実験目的

遊脚軌道修正制御で遊脚を変更することが有効であることを確認することを目的とする。そのため、歩行周期の変更は行なわない。

(2) 実験方法

図 B.9 のような従来と比べ接地面積（足幅）が 130[mm]狭く、内側に倒れやすい足部を用いて歩行実験を行なう。

腰高さ一定型歩行（膝曲げ歩行）

腰高さ : 0.60 m

歩数 : 20 step

歩行周期 : 1.0 s/step

安定化制御：遊脚軌道修正制御

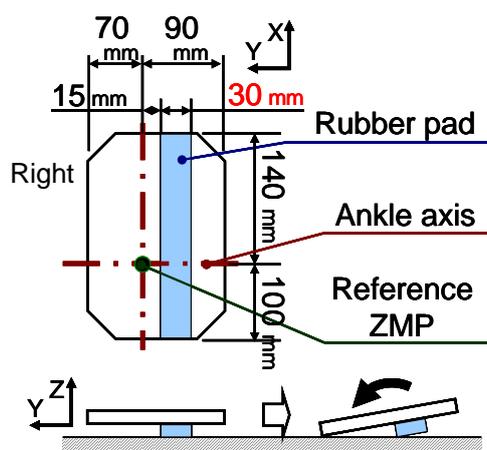


Figure B.9 Narrow foot(width of 30mm)

(3) 実験結果

この実験の結果、足幅 30[mm]（図 B.9）での足踏み、前進歩行に成功した。しかしながら、100%成功するわけではないため、足幅 30[mm]が本研究の限界値とした。この実験結果を図 B.10～図 B.14 に示す。



Figure B.10 Walking experiment with narrow foot (width of 30mm)

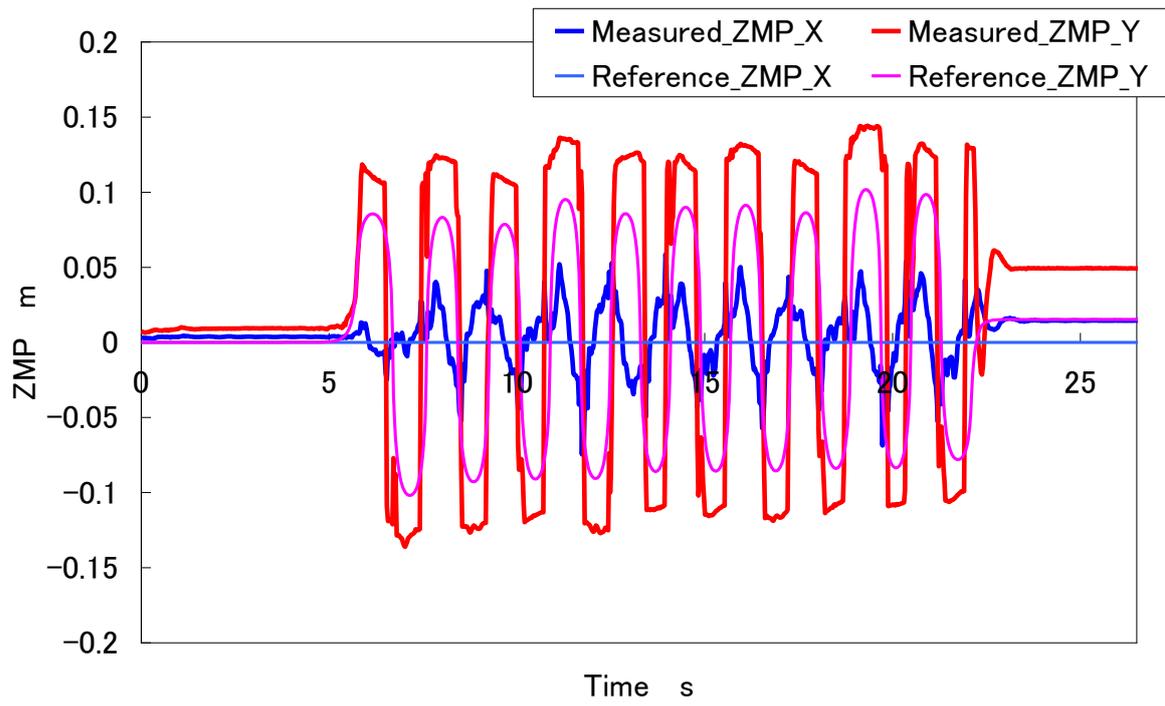


Figure B.11 ZMP trajectories (width of 30mm)

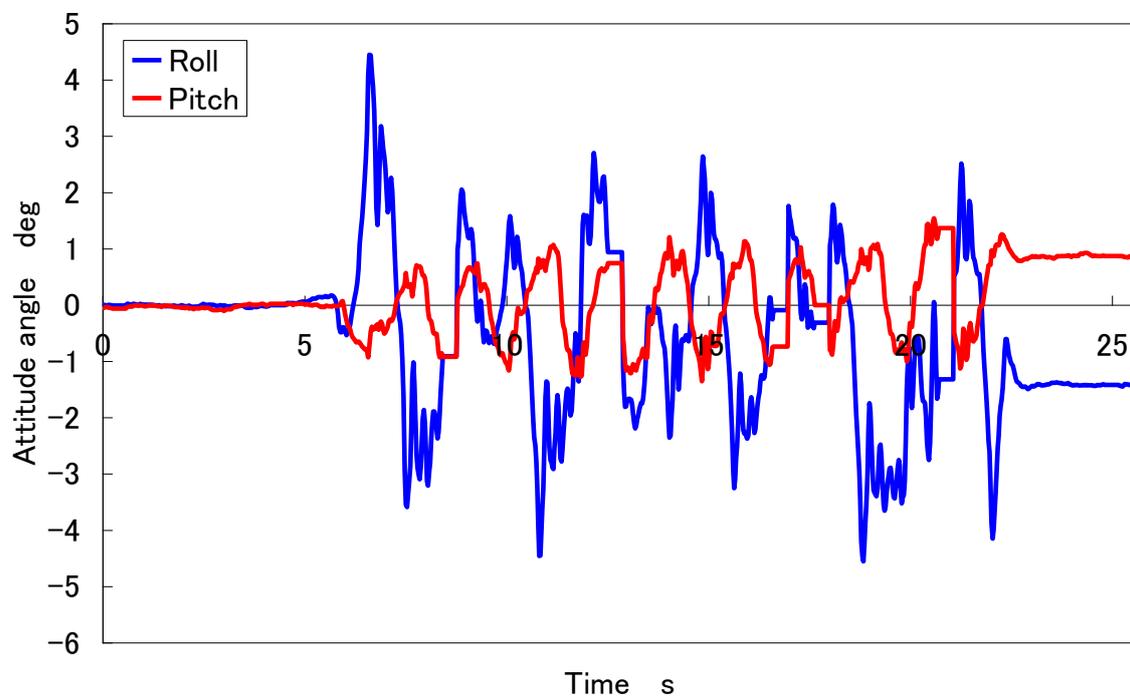


Figure B.12 Attitude angle (width of 30mm)

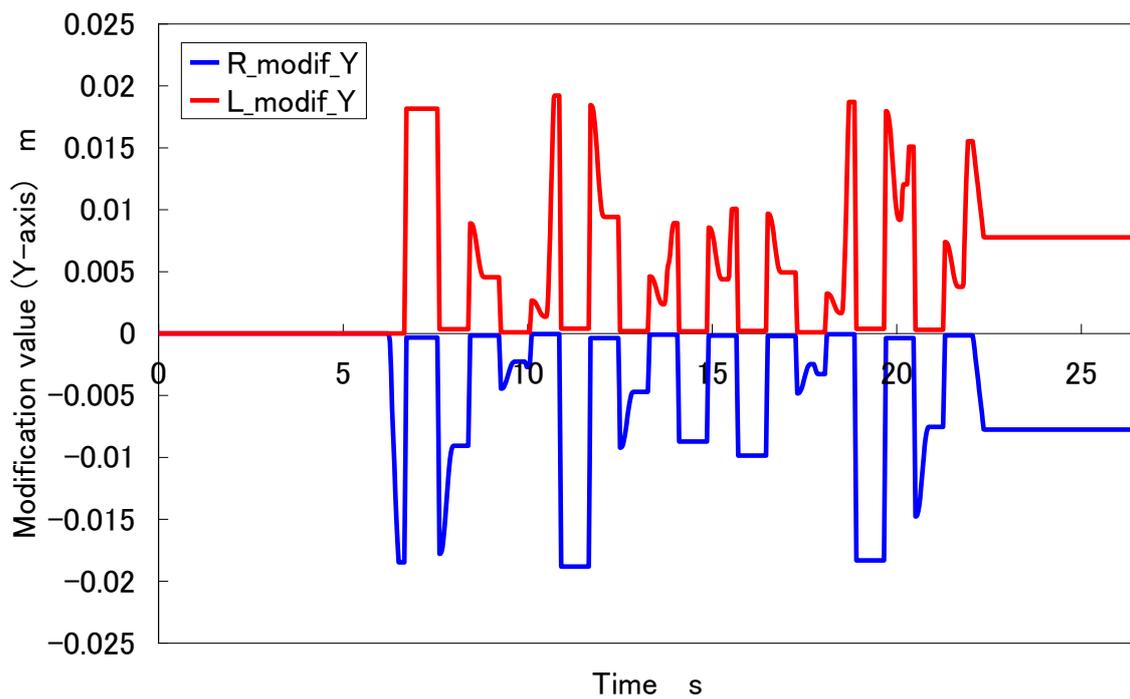


Figure B.13 Modification value along y axis (width of 30mm)

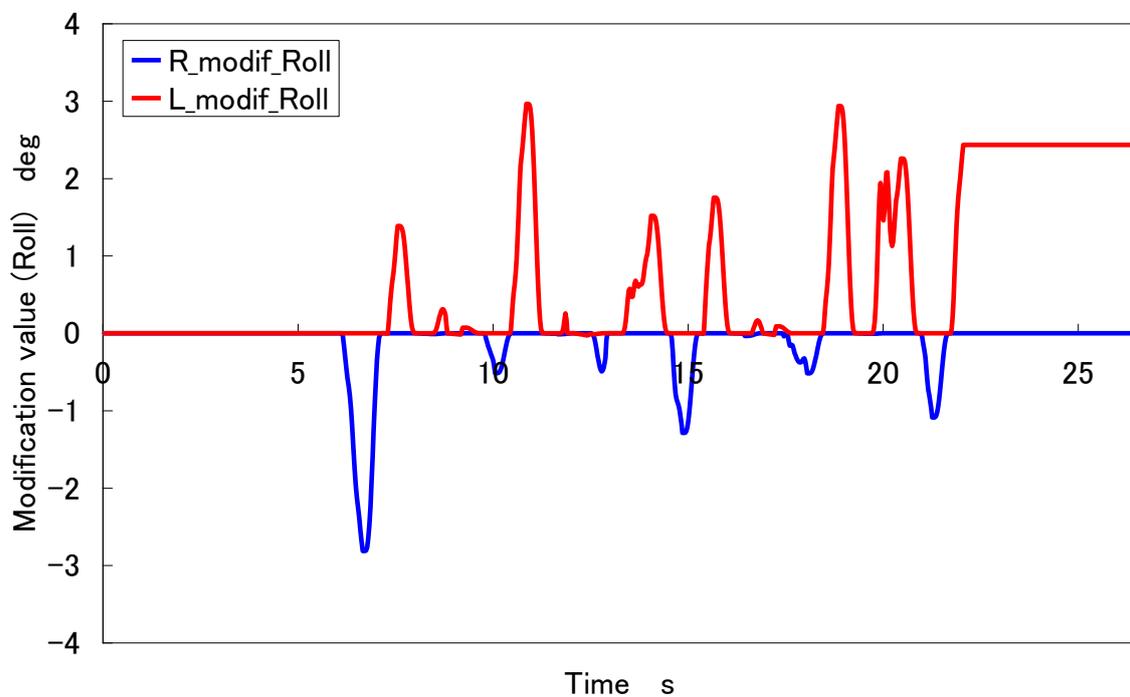


Figure B.14 Modification value about roll axis (width of 30mm)

B.3.3 最大歩幅による歩行実験

(1) 実験目的

従来の踵接地・爪先離地歩行が可能な足部では歩幅 500[mm]での歩行に成功している。そこで、今年度開発した人間形足部機構を用いて、どれだけの歩幅が出せるか実験的に求める。

(2) 実験方法

図 B.15 に示す足部機構を用いて歩幅 350[mm]から 50[mm]ずつ歩幅を大きくしていき、どれだけ大きくできるかを検証する。実験条件は以下の通りである。なお、アーチは可動するようになっている。

歩数 : 6 step
歩幅 : 0.35 m/step ~
歩行周期 : 1.0 s/step
安定化制御 : 遊脚軌道修正制御

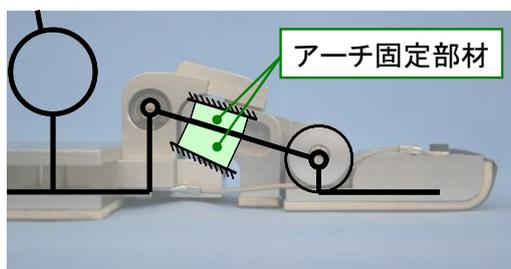


Figure B.15 Human-like foot

(3) 実験結果

実験を行なった結果、歩幅 450[mm/step]での歩行に成功した。歩幅[500mm/step]での歩行に挑戦しようとしたところ、股関節の Pitch のモータの限界速度に達し、歩行パターンを出すことさえできなかった。よって、歩幅 450[mm/step]を本研究の限界値とする。この歩幅 450[mm/step]のときの実験結果を図 B.16～図 B.21 に示す。

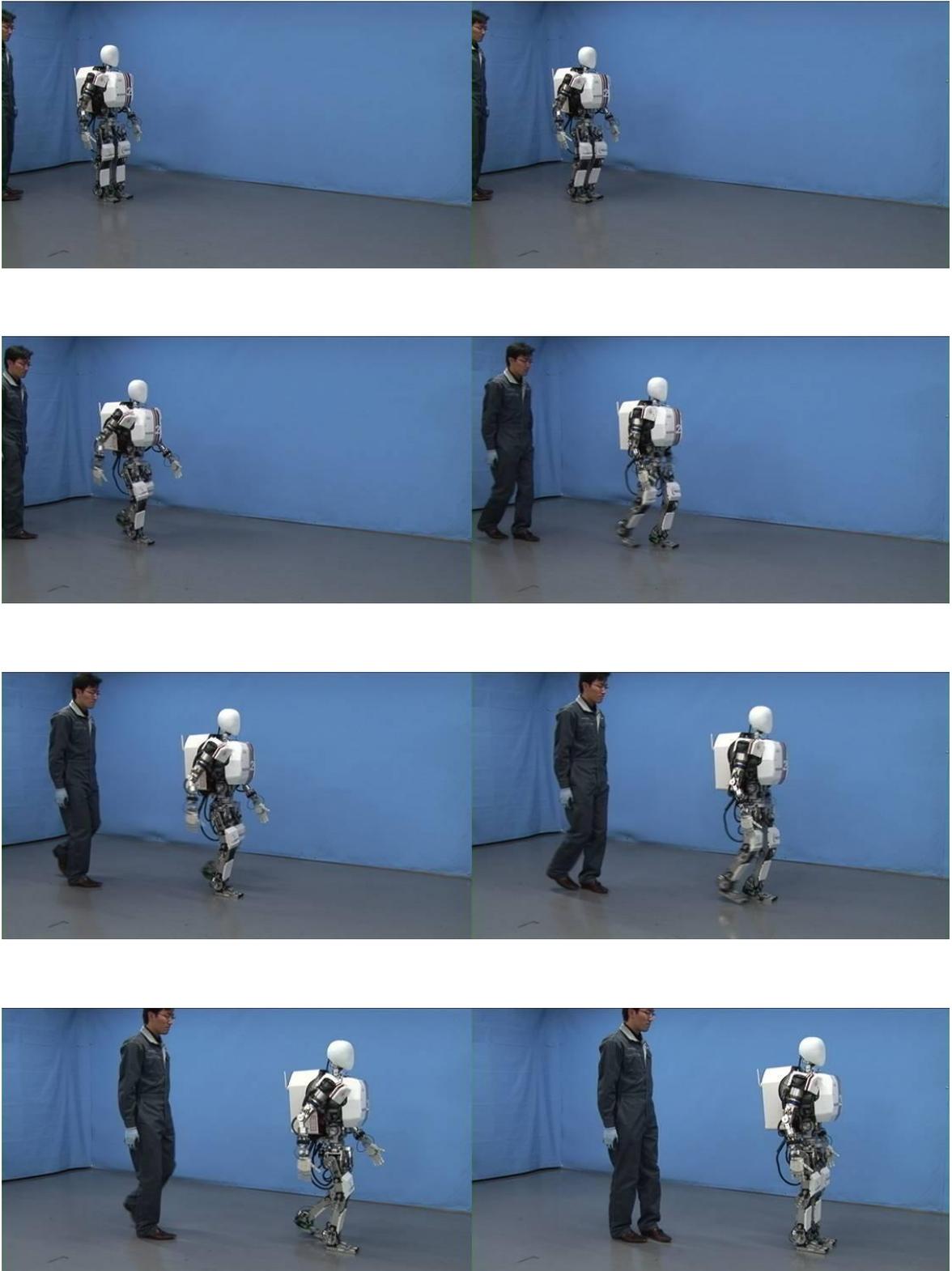


Figure B.16 Walking experiment with human-like foot

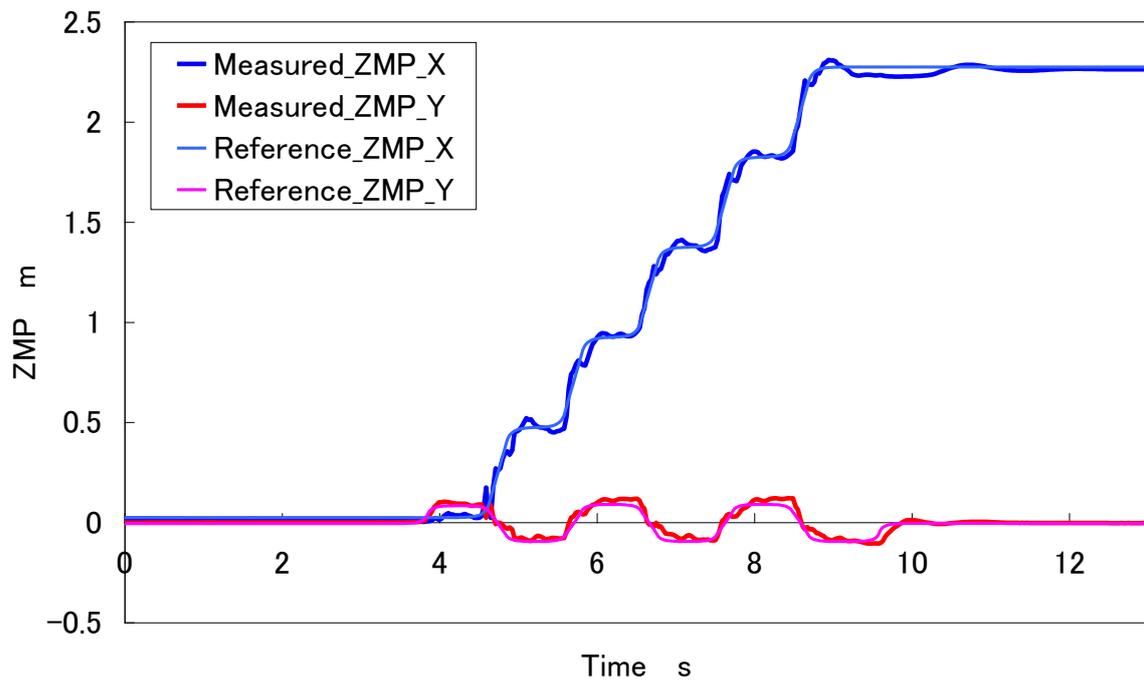


Figure B.17 ZMP trajectories (human-like foot)

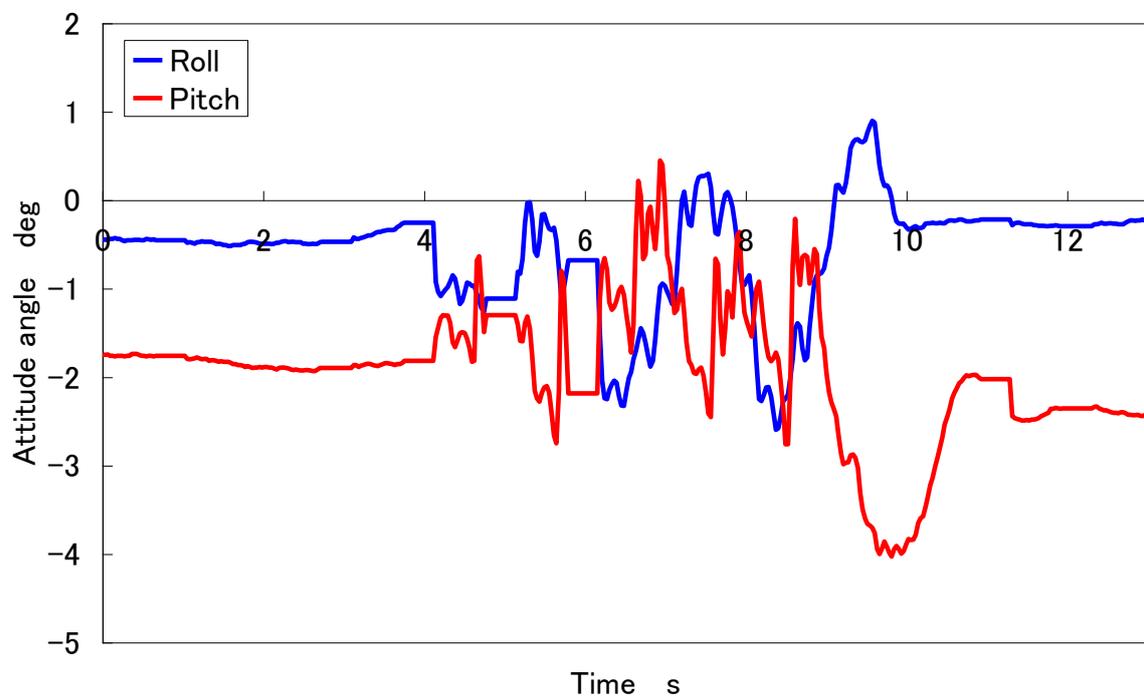


Figure B.18 Attitude angle (human-like foot)

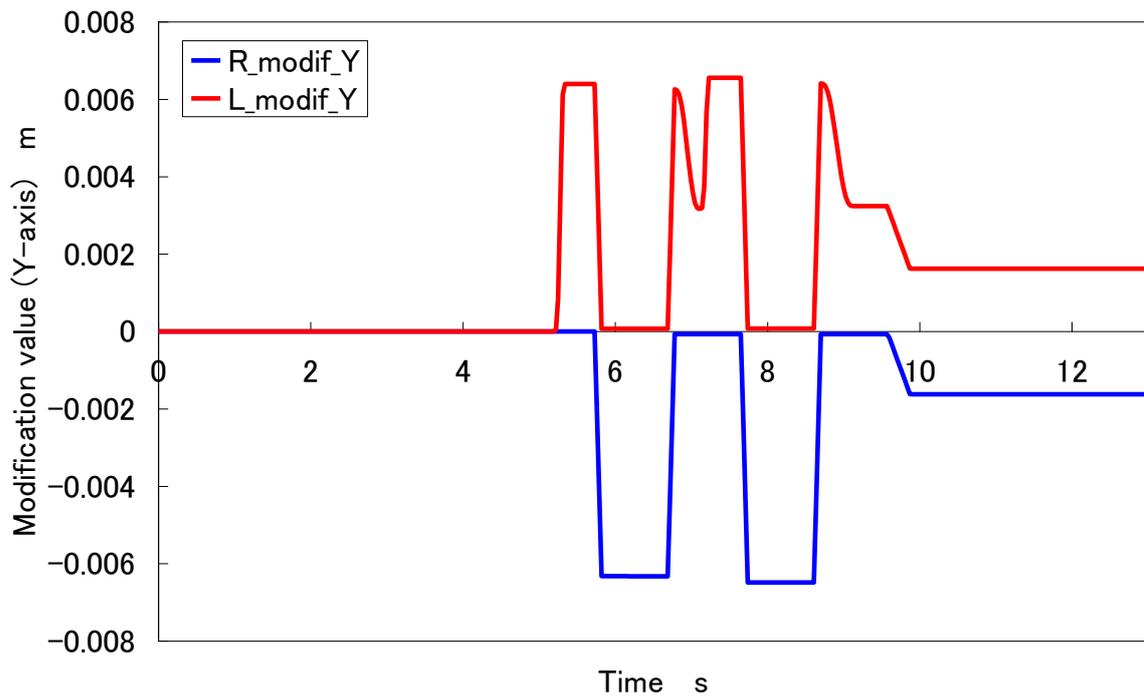


Figure B.19 Modification value along y axis (human-like foot)

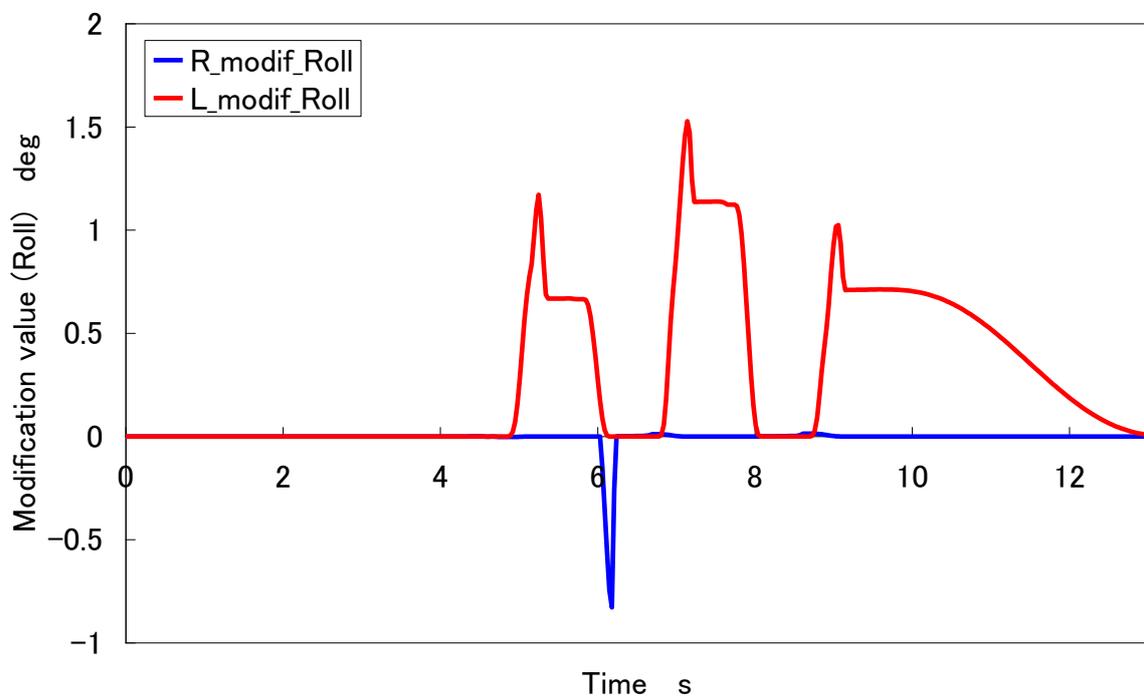


Figure B.20 Modification value about roll axis (human-like foot)

B.3.4 考察

2008年度、歩行能力の向上を目的として遊脚軌道修正制御を実装した。そして、本制御により足幅 30mm での足踏み、および前進歩行に成功した。歩行周期を変更することにより、ロボットの安定性は非常に向上することが確認できた。

しかし、人間はスケート靴のような足幅が限りなく 0mm に近い状態でも歩行することができる。今回、遊脚軌道修正制御を導入しても、そこまでは達成することができなかった。その原因としては、まずセンサの精度が考えられる。特に姿勢角センサがまだ人間に比べると劣っている。今回使用した姿勢角センサは 80msec ごとにしか姿勢角を取得することができない。そのため、どうしても遅れが生じてしまうのである。この対策として角速度から現在の姿勢角を線形補間により算出し、その値を制御に使用しているが、それでは不十分である。やはり従来の姿勢角センサより早い周期で姿勢角を取得できるセンサが必要であると言える。

また、遊脚軌道修正制御では脚部しか修正を行っていない。人間はバランスをとる場合、上半身を傾けたり、腕を広げたりと脚部だけでなく全身を使用している。今後、WABIAN-2R で人間と同等の歩行能力を目指すのであれば、上半身も含めた全身でバランスをとるような制御を開発する必要があると思われる。

B.4 まとめ

前述のように、多くの企業や大学で2足歩行ロボットが開発されてきているが、これらのロボットの足部は安定性を確保するために、人間と比べ幅が2倍近くある足部を使用している。また、足の幅が狭い足部を有しているロボットも存在するが、このようなロボットは平地でも歩行することができていない。それだけ2足歩行ロボットにおいて、足部の大きさとは重要であり、足部の大きさがそのロボットの安定性を表す1つの指標にもなり得るものである。

高西研究室で開発されている WABIAN-2R も例外ではなく、人間比べ2倍近くある幅 160mm の足部を利用していた。そこで、その足幅を小さくする方法として、姿勢が倒れることを積極的に利用することを考えた。ハードウェアにより意図的に内側に倒れやすい状態にし、そのときの遊脚を制御することによって幅が狭い足部での歩行実現を目指した。

制御方法としては、単立脚中に姿勢角を取得し、その角度に応じて遊脚の角度および着地位置の変更を行なった。また、着地衝撃緩和のために、粘性項のみの仮想コンプライアンス制御を用いた。そして、姿勢の崩れによって、設定パターンより遊脚が

早く着地してしまうため、このタイミングに合わせ歩行周期の変更を行なった。

以上のような遊脚軌道修正制御を導入し、幅が狭い足部において歩行実験を行なった。その結果、膝曲げ歩行では幅 30mm の足部での歩行に成功した。そして、踵接地・爪先離地歩行では人間と同等の幅となっている人間形足部機構（足幅：89.5mm）での歩行に成功した。以上から、遊脚軌道修正制御の有効性を確認した。

また、今後においてやらなければならないと思われるのが、既存の姿勢補償制御との統合である。姿勢補償制御は、姿勢が倒れ、足部が地面から離れ始めてしまった場合は余計に倒れてしまう方向へ修正するようになる。そのため、倒れだしたら姿勢補償制御は悪影響をロボットに対し与えることになる。しかし、足部が地面から離れなければ有効に働く。そのため、何らかの方法により地面との接地状況を把握し、姿勢制御の ON/OFF を切り替えることができれば、より幅が狭い足部で歩行できる可能性がある。そして、スケート靴のような横方向に限りなく 0 に近い足部での歩行が可能となれば、不整路面は Pitch 軸方向だけ倣えばよくなり、不整地の安定化にもつながる可能性があると考えられる。

参 考 文 献

第 1 章

- [1] 米田完, “不整地移動の将来展望”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 265-266, 2002.
- [2] 大道武生, “ロコモーション開発 30 年から見た実用化への進化論—移動ロボットは社会に受け入れられるか?”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 255-260, 2002.
- [3] 山下淳, 浅間一, 新井民夫, 太田順, 金子透, “ロボットの移動機構に関する研究動向”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 3, pp. 282-292, 2003.
- [4] Anonymous, “Logistical Vehicle Off-Road Mobility”, U.S. Army Transportation Combat Developments Agency, Project TCCO 62-5, 1967.
- [5] 広瀬茂男, 米田完, “実用的 4 足歩行機械の開発に向けて”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 360-365, 1993.
- [6] M. G. Bekker, “Off-The-Road Locomotion”, University of Michigan Press, 1960.
- [7] M. G. Bekker, “Introduction to Terrain Vehicle Systems”, University of Michigan Press, 1969.
- [8] M. Kaneko, A Mizuno and K. Harada, “Torque Distribution for Achieving a Hugging Walk”, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2613-2618, 2002.
- [9] M. J. Spenko, G. C. Haynes, J. A. Sanders, M. R. Cutkosky, A. A. Rizzi, R. J. Full, and D. E. Koditschek, “Biologically Inspired Climbing with a Hexapedal Robot”, Journal of Field Robotics, Vo. 25, Issue 4-5, pp. 223-242, 2008.
- [10] 広瀬茂男, 森島昭男, 永井宏一, “節体幹形移動ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 56-61, 1989.
- [11] S. Hirose, “Biologically Inspired Robots - Snake-Like Locomotors and Manipulators”, Oxford University Press, 1993.
- [12] M. Nilsson, “Snake Robot Free Climbing”, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3415-3420, 1997.
- [13] B. Klaassen and K. L. Paap, “GMD-SNAKE2: A snake-like robot driven by wheels and a method for motion control”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3014-3019, 1999.
- [14] K. J. Kyriakopoulos, G. Migadis and K. Sarrigeorgidis, “The NTUA Snake: design,

- planar kinematics and motion planning”, *Journal of Robotics Systems*, Vol. 16, No. 1, pp.37-72, 1999.
- [15] K. L. Paap, T. Christaller and F. Kirchner, “A Robot Snake to Inspect Broken Buildings”, *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2079-2082, 2000.
- [16] H. Streich and O. Adria, “Software Approach for the Autonomous Inspection Robot MAKRO”, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3411-3416, 2004.
- [17] 山田浩也, 広瀬茂男, “へび型ロボットの Sidewinding 運動の操舵制御の研究”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3A2-01, 2008.
- [18] T. Nakamura, T. Kato, T. Iwanaga and Y. Muranaka, “Development of a Peristaltic Crawling Robot Based on Earthworm Locomotion”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 18, No. 3, pp. 299-304, 2006.
- [19] G. Long, J. Anderson and J. Borenstein, “The Kinematic Design of the Omnipede: A new approach to obstacle traversal”, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 714-719, 2002.
- [20] 広瀬茂男, “「可変拘束機構」とその設計—特殊環境移動作業ロボットへの適用—”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 17, No. 5, pp. 615-619, 1999.
- [21] 黒田洋司, “不整地移動メカニズム”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 21, No. 5, pp. 477-479, 2003.
- [22] 広瀬茂男, “ロコモーション研究の 20 年—私的回想と展望—”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 20, No. 3, pp. 223-228, 2002.
- [23] 大道武生, 井辺智吉, “脚車輪型移動装置の開発 (その 1)”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 2, No. 3, pp. 68-75, 1984.
- [24] 高野政晴, “自律移動ロボットの機構と移動制御技術”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 5, No. 5, pp. 52-58, 1987.
- [25] 木村浩, 中野栄二, 野中洋一, “脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 10, No. 4, pp. 520-525, 1992.
- [26] 中嶋秀朗, 中野栄二, 高橋隆行, “脚車輪分離型ロボットの未知不整地における基本移動制御手法”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 22, No. 8, pp. 1082-1092, 2004.
- [27] F. Michaud, D. Létourneau, M. Arsenaault, Y. Bergeron, R. Cadrin, F. Gagnon, M. A. Legault, M. Millette, J. F. Paré, M. C. Tremblay, P. Lepage, Y. Morin, J. Bisson and S. Caron, “AZIMUT, a Leg-Track-Wheel Robot”, *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ*

- International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2553-2558, 2003.
- [28] G. Endo and S. Hirose, "Study on Roller-Walker (Multi-mode Steering Control and Self-contained Locomotion)", Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2808-2814, 2000.
- [29] 木邑信夫, "防災ロボット移動装置", 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 669-672, 1991.
- [30] 松本治, 梶田秀司, 西郷宗玄, 小森谷清, 谷和男, "自立型脚車輪2足システムの開発(第1報) -機構と移動形態-", 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 399-400, 2001.
- [31] O. Matsumoto, S. Kajita and K. Komoriya, "Flexible Locomotion Control of a Self-contained Biped Leg-wheeled System", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2599-2604, 2002.
- [32] 曾根原光治, 小林研吾, 田中宏一, 山本忠幸, 藤井正和, 村上弘記, "3脚車輪型ロボットの機構設計と実験システムの開発", 第9回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 236-241, 2004.
- [33] Y. Ota, K. Yoneda, T. Tamaki and S. Hirose, "A Walking and Wheeled Hybrid Locomotion with Twin-Frame Structure Robot", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2645-2651, 2002.
- [34] S. Yokota, K. Kawabata, P. Blazevic, H. Kobayashi, H. Hashimoto and Y. Ohyama, "The development of crawler type robot that can move in all over the house", SICE-ICASE International Joint Conference 2006, pp. 4266-4269, 2006.
- [35] M. Lauria, Y. Piguet and R. Siegwart, "Octopus: An Autonomous Wheeled Climbing Robot", International Conference on Climbing and Walking Robots 2002 (CLAWAR 2002), pp. 315-322, 2002.
- [36] A. Halme, I. Leppanen, M. Montonen and S. Ylonen, "Robot Motion by Simultaneously Wheel and Leg Propulsion", International Conference on Climbing and Walking Robots 2001 (CLAWAR 2001), pp. 1013-1019, 2001.
- [37] E. Rollins, J. Luntz, A. Foessel, B. Shamah, and W. Whittaker, "Nomad: a demonstration of the transforming chassis", Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 611-617, 1998.
- [38] R. Volpe, "Rocky 7: A next generation mars rover prototype", Journal of Advanced Robotics, vol. 11, no. 4, pp. 341-358, 1997.
- [39] C. Grand, F. BenAmar, F. Plumet and P. Bidaud, "Decoupled Control of Posture and Trajectory of the Hybrid Wheel-legged Robot Hylos", Proceedings of the 2004 IEEE

- International Conference on Robotics and Automation, pp. 5111-5116, 2004.
- [40] H. Adachi, T. Arai, K. Homma, T. Nakamura and H. Yoshinada. “Study on Underground Space Excavation Machine”, Proceedings of the 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 751-758, 1992.
- [41] M. Mori and S. Hirose, “Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D Mobility”, Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1552-1557, 2001.
- [42] 広瀬茂男, 森島昭男, 塚越真一, 妻木俊道, 物部宏之, “節体幹型移動ロボット KRII の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 551-559, 1991.
- [43] H. Kimura and S. Hirose, “Development of Genbu: Active Wheel Passive Joint Articulated Mobile Robot”, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 823-828, 2002.
- [44] 橋本周司, 成田誠之助, 小林哲則, 高西淳夫, “プラットフォームとしての2足歩行型ヒューマノイド: WABIAN”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 763-764, 1997.
- [45] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, F. Kanehiro, M. Inaba and H. Inoue, “Design and Development of Research Platform for Perception-Action Integration in Humanoid Robot: H6”, Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1559-1564, 2000.
- [46] 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明, “人間型ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 983-985, 1997.
- [47] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujimura, “The intelligent ASIMO: System overview and integration”, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2478-2483, 2002.
- [48] 高木宗谷, “トヨタパートナーロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 208-210, 2006.
- [49] 石田健蔵, 黒木義博, 山口仁一, “小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4XII に関する機構部の開発”, 日本ロボット学会第21回学術講演会, 1E25, 2003
- [50] 五十棲隆勝, 赤地一彦, 太田成彦, 金広文男, 金子健二, 比留川博久, “ヒューマノイドロボット HRP-2”, 日本ロボット学会第21回学術講演会, 3A32, 2003
- [51] M. Gienger, K. Löffler and F. Pfeiffer, “Towards the Design of a Biped Jogging Robot”, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and

- Automation, pp. 4140-4145, 2001.
- [52] K. Löffler, M. Gienger and F. Pfeiffer, “Sensor and Control Design of a Dynamically Stable Biped Robot”, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 484-490, 2003.
- [53] S. Lohmeier, K. Löffler, M. Gienger, H. Ulbrich and F. Pfeiffer, “Computer System and Control of Biped “Johnnie”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4222-4227, 2004.
- [54] I. W. Park, J. Y. Kim, J. Lee and J. H. Oh, “Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot - 3: HUBO)”, Proceedings of 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 321-326, 2005.
- [55] J. Yamaguchi, S. Inoue, D. Nishino and A. Takanishi, “Development of a Bipedal Humanoid Robot Having Antagonistic Driven Joints and Three DOF Trunk”, Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 96-101, 1998.
- [56] J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue and A. Takanishi, “Development of a Bipedal Humanoid Robot –Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking–”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 368-374, 1999.
- [57] S. Kajita and K. Tani, “Experimental Study of Biped Dynamic Walking in the Linear Inverted Pendulum Mode”, Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2885-2819, 1995
- [58] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi and H. Hirukawa, “A Realtime Pattern Generator for Biped Walking”, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 31-37, 2002.
- [59] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, “Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point”, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1620-1626, 2003.
- [60] 梶田秀司, 金広文男, 金子健二, 藤原清司, 原田研介, 横井一仁, 比留川博久, “分解運動量制御: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 6, pp. 772-779, 2004.
- [61] 長坂憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允, “最適勾配法を用いた人間型ロボットの動歩行パターン生成”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-78-110, 1999.

- [62] 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允, “ZMP 導出の線形・非干渉化, 離散化によるヒューマノイドの動力学安定軌道の高速生成—感覚行動統合全身型ヒューマノイド H6 での実現—”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 721-722, 2000.
- [63] S. Kagami, T. Kitagawa, K. Nishiwaki, T. Sugihara, M. Inaba and H. Inoue, “A Fast Dynamically Equilibrated Walking Trajectory Generation Method of Humanoid Robot”, *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 1, pp. 71-82, 2002.
- [64] T. Mita, T. Yamaguchi, T. Kashiwase and T. Kawase, “Realization of a High Speed Biped Using Modern Control Theory”, *The International Journal of Control*, Vol. 40, No. 1, pp. 107-119, 1984.
- [65] J. Furusho and M. Masubuchi, “Control of a Dynamical Biped Locomotion System for Steady Walking”, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 108, No. 2, pp. 111-118, 1986.
- [66] J. K. Hodgins and M. H. Raibert, “Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 289-298, 1991.
- [67] 梶田秀司, 谷和男, “実時間路面形状計測に基づく動的 2 足歩行の制御”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 7, pp. 1062-1069, 1996.
- [68] Y. Fujimoto and A. Kawamura, “Simulation of an Autonomous Biped Walking Robot Including Environmental Force Interaction”, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 5, No. 2, pp. 33-41, 1998.
- [69] 長阪憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允, “体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3M13, 1999.
- [70] K. Inoue, H. Yoshida, T. Arai and Y. Mae, “Mobile Manipulation of Humanoids—Real-Time Control Based on Manipulability and Stability—”, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2217-2222, 2000.
- [71] Q. Huang, K. Kaneko, K. Yokoi, S. Kajita, T. Kotoku, N. Koyachi, H. Arai, N. Imamura, K. Komoriya and K. Tanie, “Balance Control of a Biped Robot Combining Off-line Pattern with Real-time Modification”, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3346-3352, 2000.
- [72] 吉野龍太郎, “歩行パターン・レギュレータによる高速歩行ロボットの安定化制御”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 18, No. 8, pp. 1122-1132, 2000.
- [73] S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba and H. Inoue, “AutoBalancer: An Online

- Dynamic Balance Compensation Scheme for Humanoid Robots”, Proceedings of the 4th International Workshop on Algorithmic Foundation on Robotics, pp. 329-340, 2000.
- [74] M. Morisawa and K. Ohnishi, “Interactive Control of Environmental Mode for Biped Walking”, Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 490-495, 2003.
- [75] M. Morisawa, T. Tsuji, Y. Nishioka, K. Akuzawa, H. Takahashi and K. Ohnishi, “Contact Motion in Unknown Environment”, Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 992-996, 2003.
- [76] 加藤一郎, “二足歩行ロボット—その歴史と課題—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 164-166, 1983.
- [77] 加藤一郎, 石田豊彦, 森善朗, 山本敏博, “ゴム人工筋を用いた2足歩行機械”, バイオメカニズム, 東京大学出版会, pp. 267-274, 1972.
- [78] 加藤一郎, 角尾光信, 平林久明, 石原好実, 遠藤敏一, 小日向静夫, “2足歩行ロボット(WABOT-1)の開発: 足(人間型油圧歩行機械)”, バイオメカニズム2, 東京大学出版会, pp. 173-184, 1973.
- [79] 雁瀬彰, 加藤高明, 加藤一郎, “油圧式2足歩行機械による準動歩行の研究”, バイオメカニズム5, 東京大学出版会, pp. 269-280, 1980.
- [80] 高西淳夫, “2足歩行ロボットによる準動歩行”, 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 196-203, 1983.
- [81] 高西淳夫, 石田昌己, 山崎芳昭, 加藤一郎, “2足歩行ロボットWL-10RD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.
- [82] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, T. Takeya and I. Kato, “Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion”, RoManSy 7: Proceedings of the 7th CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp. 68-79, 1988.
- [83] A. Takanishi, M. Tochizawa, T. Takeya, H. Karaki and I. Kato, “Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion under known external force”, Advanced Robotics: Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Robotics, pp. 299-310, 1989.
- [84] A. Takanishi, T. Takeya, H. Karaki and I. Kato, “A control method for dynamic biped walking under unknown external force”, Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 795-801, 1990.
- [85] A. Takanishi, H. O. Lim, M. Tsuda and I. Kato, “Realization of dynamic biped

- walking stabilized by trunk motion on a sagittally uneven surface”, Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 323-330, 1990.
- [86] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, “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
- [87] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, “路面形状に偏差のある環境における 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.
- [88] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, “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.
- [89] 高西淳夫, 糸田真宏, 山口仁一, 松熊研司, 加藤一郎, “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.
- [90] 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, pp. 2892-2899, 1995.
- [91] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, “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.
- [92] 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 International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1156-1163, 1994.
- [93] 山口仁一, 木下昇, 高西淳夫, 加藤一郎, “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”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 546-559, 1996.
- [94] 山口仁一, 井上貞敏, 松尾茂樹, 高西淳夫, “2 足歩行型ヒューマノイドにおける全身協調型 2 足動歩行制御”, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 851-852, 1997.
- [95] 山口仁一, 井上貞敏, 西野大助, 玄相昊, 石井啓範, 松尾茂樹, 山本要介, 高西淳夫, “早稲田 2 足歩行型ヒューマノイド WABIAN の開発—全体システムの設計—”, 第 15 回日本 ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 773-774, 1997.

- [96] 菅原雄介, 圓戸辰郎, 細畠拓也, 御厨裕, 林憲玉, 高西淳夫, “脚機構にパラレルメカニズムを用いた汎用2足ロコモータの開発 (第1報, 試作機 WL-15 の設計・開発)”, 日本機械学会論文集, 70-691, C編, pp.790-797, 2004.
- [97] Y. Sugahara, T. Hosobata, Y. Mikuriya, H. Sunazuka, H. O. Lim and A. Takanishi, “Realization of Dynamic Human-Carrying Walking by a Biped Locomotor”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3055-3060, 2004.
- [98] Y. Sugahara, A. Ohta, K. Hashimoto, H. Sunazuka, M. Kawase, C. Tanaka, H. O. Lim and A. Takanishi, “Walking Up and Down Stairs Carrying a Human by a Biped Locomotor with Parallel Mechanism”, Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3425-3430, 2005.
- [99] Y. Sugahara, K. Hashimoto, M. Kawase, T. Sawato, A. Hayashi, N. Endo, A. Ohta, C. Tanaka, H. O. Lim and A. Takanishi, “Walking Pattern Generation of a Biped Walking Vehicle Using a Dynamic Human Model”, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2497-2502, 2006.
- [100] 小椋優, 林憲玉, 高西淳夫, “2足ヒューマノイドロボットの膝関節伸展型歩行パターン生成アルゴリズム”, 日本機械学会論文集, C編, 第70巻, 700号, 2004.
- [101] Y. Ogura, H. Aikawa, H. O. Lim and A. Takanishi, “Development of a Human-like Walking Robot Having Two 7-DOF legs and a 2-DOF Waist”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 134-139, 2004.
- [102] Y. Ogura, T. Kataoka, H. Aikawa, K. Shimomura, H. O. Lim and A. Takanishi, “Evaluation of Various Walking Patterns of Biped Humanoid Robot”, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 605-610, 2005.
- [103] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. O. Lim and A. Takanishi, “Development of a Humanoid Robot WABIAN-2”, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 76-81, 2006.
- [104] 桃木新平, 下村嘉士, 大久保達, 小椋優, 近藤秀樹, 森島彰俊, 林憲玉, 高西淳夫, “人間の歩行データを用いたヒューマノイド用足部機構の開発”, 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3H13, 2006.
- [105] 小椋優, 下村嘉士, 桃木新平, 大久保達, 林憲玉, 高西淳夫, “爪先受動関節を持つヒューマノイドロボットによる踵接地・爪先離地歩行”, 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3H14, 2006.

第2章

- [106] 清水昭男, “土質地盤の調査・試験とその応用”, 理工図書, 1992
- [107] 地盤工学会地盤の変形解析編集委員会, “地盤の変形解析 : 基礎理論から応用まで”, 地盤工学会, 2002
- [108] 地盤工学会地盤の変形解析編集委員会, “土の弾塑性構成モデル”, 地盤工学会, 2009
- [109] 桑原文夫, “地盤工学”, 森北出版, 2002
- [110] わかりやすい構造物基礎編集委員会, “わかりやすい構造物基礎”, 地盤工学会, 2009
- [111] 土の締固めと管理編集委員会, “土の締固めと管理”, 土質工学会, 1991
- [112] 稲田倍穂, “軟弱地盤の土質工学 : 予測と実際”, 鹿島出版会, 1994
- [113] 斎藤孝夫, “地盤土と土層断面図”, 鹿島出版会, 1985
- [114] 広瀬茂男, “屋外で活躍する移動ロボットの機構設計”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 904-908, 2000.
- [115] 広瀬茂男, 福田靖, 菊地秀和, “4足歩行機械の制御システム”, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 4, pp. 46-66, 1985.
- [116] 小林一敏, 湯川治敏, 井上伸一, “べき級数形非線形モデルによる粘弾性特性の同定筑波大学体育科学系紀要”, 筑波大学, 1983

第3章

- [117] 山形孝雄, “Design Wave magazine 5月号”, CQ出版社, 2008
- [118] 山形孝雄, “Design Wave magazine 6月号”, CQ出版社, 2008
- [119] 和田稲苗, “精説機械製図三訂版”, 実教出版, 2001
- [120] 和田稲苗, “機械要素設計”, 実教出版, 2001
- [121] ノヨハン, “気管挿管訓練システムのカセンサの開発—手技評価用センサと力制御用センサの開発—”, 第27回日本ロボット学会学術講演会, 2009
- [122] Yohan, M., Segawa, A., Shimomura, Y., Solis, J., Hatake, K., Takanishi, A., “Determination of Effective Evaluation Parameters on the Airway Management Training System WKA-1R”, Proceeding of the 2006 International IEEE EMBS Special Topic Conference on Information Technology in Biomedicine, ID119, 2006

第4章

- [123] T. Mita, T. Yamaguchi, T. Kashiwase and T. Kawase, “Realization of a High Speed Biped Using Modern Control Theory”, The International Journal of Control, Vol. 40,

- No. 1, pp. 107-119, 1984.
- [124] J. Furusho and M. Masubuchi, “Control of a Dynamical Biped Locomotion System for Steady Walking”, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108, No. 2, pp. 111-118, 1986.
- [125] J. K. Hodgins and M. H. Raibert, “Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp. 289-298, 1991.
- [126] 梶田秀司, 谷和男, “実時間路面形状計測に基づく動的2足歩行の制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7, pp. 1062-1069, 1996.
- [127] Y. Fujimoto and A. Kawamura, “Simulation of an Autonomous Biped Walking Robot Including Environmental Force Interaction”, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 5, No. 2, pp. 33-41, 1998.
- [128] 長阪憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允, “体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化”, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3M13, 1999.
- [129] K. Inoue, H. Yoshida, T. Arai and Y. Mae, “Mobile Manipulation of Humanoids –Real-Time Control Based on Manipulability and Stability–”, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2217-2222, 2000.
- [130] Q. Huang, K. Kaneko, K. Yokoi, S. Kajita, T. Kotoku, N. Koyachi, H. Arai, N. Imamura, K. Komoriya and K. Tanie, “Balance Control of a Biped Robot Combining Off-line Pattern with Real-time Modification”, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3346-3352, 2000.
- [131] 吉野龍太郎, “歩行パターン・レギュレータによる高速歩行ロボットの安定化制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 8, pp. 1122-1132, 2000.
- [132] S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba and H. Inoue, “AutoBalancer: An Online Dynamic Balance Compensation Scheme for Humanoid Robots”, Proceedings of the 4th International Workshop on Algorithmic Foundation on Robotics, pp. 329-340, 2000.
- [133] K. Nishiwaki and S. Kagami, “Sensor Feedback Modification Methods that are Suitable for the Short Cycle Pattern Generation of Humanoid Walking”, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4214-4220, 2007.
- [134] 金子健二, 金広文男, 梶田秀司, 横井一仁, 藤原清司, 原田研介, 比留川博久, “HRP-2 の歩行安定化制御”, 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集,

- 3A34, 2003.
- [135] Y. Okumura, T. Tawara, K. Endo, T. Furuta and M. Shimizu, “Realtime ZMP Compensation for Biped Walking Robot using Adaptive Inertia Force Control”, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 335-339, 2003.
- [136] 今田吉則, 田窪朋仁, 新井健生, 前泰志, “ZMP 修正指標マップを用いた不整地歩行”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-F12, 2008.
- [137] J. H. Park and H. Chung, “Hybrid Control for Biped Robots Using Impedance Control and Computed-Torque Control”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1365-1370, 1999.
- [138] J. H. Park, “Impedance Control for Biped Robot Locomotion”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 6, pp. 870-882, 2001.
- [139] K. Hashimoto, Y. Sugahara, Hun-ok Lim, and A. Takanishi, “Biped Landing Pattern Modification Method with Nonlinear Compliance Control,” Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1213-1218 (2006).
- [140] K. Hashimoto, Y. Sugahara, Hun-ok Lim, and A. Takanishi, “Landing Pattern Modification Method with Predictive Attitude and Compliance Control to Deal with uneven Terrain,” Proc.of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, pp. 1755-1760(2006).
- [141] K. Hashimoto, Y. Sugahara, H. O. Lim and A. Takanishi, “Biped Landing Pattern Modification Method and Walking Experiments in Outdoor Environment,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 20, No. 5, pp. 775-784, 2008.
- [142] 西脇, 加賀美, 國吉, 稲葉, 井上 “姿勢角センサを用いた股関節部の変形補償量獲得による歩行動作の安定化”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1P1-E05, 2002
- [143] 梶田, 横井, 金子, 神徳, 荒井, 小谷内, 小森, 西郷, 谷江 “角運動量と重心位置の直接フィードバックによる直立型機構のバランス維持方式”, 機械技術研究所所内研究発表会予稿, 2000
- [144] 吉野龍太郎 “歩行パターン・レギュレータによる高速歩行ロボットの安定化制御”, 日本ロボット学会誌vol.18 No.8, pp.1122-1132, 2000
- [145] 田宮, 稲葉, 井上 “人間型ロボットの片足立脚動作における全身を用いた実時間動バランス補償”, 日本ロボット学会誌vol.17, pp.268-274, 1999
- [146] 梶田秀司 “ゼロモーメントポイント(ZMP)と歩行制御”, 日本ロボット学会誌 vol.20, pp.229-232, 2002

- [147] 長坂, 黒木, 永野, 高橋, 山口 “小型二足歩行エンターテインメントロボットによる踵接地及び爪先接地を伴う二足歩行”, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3L22, 2004
- [148] 小椋, 大淵, 小島, 古名, 潮見 “通常歩行時の骨盤加速度に注目した歩行分析ー若年者における歩行時加速度の特徴的パターンの同定に関する検討ー”, 理学療法科学20(2), pp.171-177, 2005

第5章

- [149] 金広, “3D グリッドマップを用いたヒューマノイドの狭隘部移動”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 589-597, 2007
- [150] 湯浅, “ヒューマノイドによるレーザレンジファインダを用いた三次元地図作成と障害物回避”, 第8回システムインテグレーション部門講演会 (SI2007), pp. 539-540, 2007
- [151] 橋本健二, “2足歩行ロボットの不整地適応能力向上を図った足部機構の開発 (第3報: 新保持機構開発による不整地歩行の実現)”, 日本ロボット学会第24回学術講演会予稿集, 2F15, 2006
- [152] 姜賢珍, “人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発 (第8報: 実環境下の安定歩行のための制御方法の統合と開発)”, 日本ロボット学会第26回学術講演会予稿集, 1O2-01, 2008
- [153] Hyun-jin, Kang, S. Momoki, H. Kondo, K. Hashimoto, H.O. Lim, A. Takanishi, “Attitude Compensation Control for Biped Humanoid Robot”, 2009 the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, pp. 677-684, 2009

第7章

- [154] 木下宏晃, 永谷圭司, 吉田和哉, “軟弱地盤及び不整地走行を目的とした小型の脚・クローラハイブリット機構の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2010, 2A1-E25, 2010.
- [155] 金子真, 谷江和雄, 堀内英一, “路面の変形を考慮した多足歩行機械の一制御法ー交互3点支持歩行を中心にー”, 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 3, pp. 231-240, 1986.
- [156] 西川昌宏, 福原裕明, 島田茂伸, 江上正, “多足歩行ロボットのための接地面認識センサ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2000, 2P1-43-062, 2000.

- [157] 小水内俊介, 近野敦, 安孫子聡子, 内山勝, “2脚ロボットの軟弱地面における接地力学解析,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2010, 2P1-D06, 2010.
- [158] J. Perry, “Gait Analysis: Normal and Pathological Function,” SLACK Incorporated, 1992.
- [159] N. A. Borghese, L. Bianchi and F. Lacquaniti, “Kinematic determinants of human locomotion,” *Journal of Physiology*, Vol. 494, No. 3, pp.863-879, 1996.
- [160] T. Pozzo, A. Berthoz and L. Lefort, “Head stabilization during various locomotor tasks in humans,” *Experimental Brain Research*, Vol. 82, No.1, pp. 97-106, 1990.
- [161] J. Yamaguchi, A. Takanishi, and I. Kato, “Experimental Development of a Foot Mechanism with Shock Absorbing Material for Acquisition of Landing Surface Position Information and Stabilization of Dynamic Biped Walking,” *Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2892-2899, 1995.
- [162] K. Nishiwaki and S. Kagami, “Strategies for Adjusting the ZMP Reference Trajectory for Maintaining Balance in Humanoid Walking,” *Proc. of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4230-4236, 2010.
- [163] H. J. Kang, K. Hashimoto, H. Kondo, K. Hattori, K. Nishikawa, Y.Hama, H. O. Lim, A. Takanishi, K. Suga and K. Kato, “Realization of Biped Walking on Uneven Terrain by New Foot Mechanism Capable of Detecting Ground Surface,” *Proc. of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5167-5172, 2010.
- [164] S. Kajita, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro and K. Yokoi, “Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking,” *Proc. of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4489-4496, 2010.
- [165] S. Komizunai, A. Konno, S. Abiko and M. Uchiyama, “Development of a Static Sinkage Model for a Biped Robot on Loose Soil,” *Proc. of the 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp.61-66, 2010.
- [166] M. J. MacLellan and A. E. Patla, “Adaptations of walking pattern on a compliant surface to regulate dynamic stability,” *Experimental Brain Research*, Vol. 173, pp. 521-530, 2006.
- [167] M. J. MacLellan and A. E. Patla, “Stepping over an obstacle on a compliant travel surface reveals adaptive and maladaptive changes in locomotion patterns,” *Experimental Brain Research*, Vol. 173, pp.531-538, 2006.

謝 辞

本研究を進めるにあたり，多大なご指導とご教示を賜りました早稲田大学理工学術院 高西淳夫教授に，深く感謝し心より御礼申し上げます．修士課程から現在に至るまで5年間，研究活動だけでなくあらゆる面において，温かく熱心なご指導とご激励を賜りましたこと，重ねて御礼申し上げます．何う度にいつも笑顔で迎えて下さって，大変力になりました．また小さい頃から夢見てきた2足歩行ロボットという素晴らしい研究テーマを与えて下さり，時には厳しく，時には優しく指導して頂きました．誠にありがとうございます．そして本論文をまとめるにあたり，貴重な御時間を割いて頂いた上，適切なお指導ご意見を賜りました早稲田大学理工学術院 梅津光生教授，藤江正克教授，人間科学学術院 藤本浩志教授，ならびに神奈川大学 林憲玉教授に，深く感謝致します．

本論文は，筆者の修士課程および博士後期課程における研究成果をまとめたものであり，機械工学，ロボット工学，土木工学，地盤工学，人間工学，福祉工学の各分野の先生方から数え切れないほどのご助言を頂きました．たくさんの先生方に心から感謝申し上げます．

本論文は，筆者の修士課程および博士後期課程における研究成果をまとめたものであり，ロボット工学，人間工学，福祉工学の各分野の先生方から数え切れないほどのご助言を頂きました．とりわけ，機械工学的観点から適切なお助言を頂きました機械工学科の諸先生方および生命理工学専攻の諸先生方，早稲田大学ヒューマノイド研究所の諸先生方，特に土木工学・地盤工学観点から適切なお助言頂きました社会環境工学科の赤木寛一先生に深い感謝の意を表します．また，人間工学・福祉工学的観点から適切なお助言を頂きました国立障害者リハビリテーションセンターの高嶋孝倫先生に深い感謝の意を表します．

そして，本研究を共に遂行してきた高西淳夫研究室2足班の橋本健二先生（2008年博士後期課程卒，現早稲田大学研究院講師），近藤秀樹氏（2010年博士後期課程卒），Aiman Musa Mohamed Omer 氏（2011年博士後期課程卒），遠藤信綱氏（現早稲田大学博士後期課程5年），清水自由理氏（2008年修士課程卒），服部賢太郎氏（2008年修士課程卒），遠藤圭太氏（2009年修士課程卒），濱雄一郎氏（2009年修士課程卒），吉村勇希氏（2009年修士課程卒），竹崎裕記氏（2010年修士課程卒），西川浩介氏（2010年修士課程卒），飯田文也氏（2010年修士課程卒），Przemyslaw KRYCZKA 氏（現早稲田大学博士後期課程2年），Matthieu DESTEPHE 氏（現早稲田大学博士後期課程3年），Gabriele TROVATO 氏（現早稲田大学博士後期課程2年），小田中浩平氏（2009

年学部卒), 本橋弘光氏 (2011 年修士課程卒), 中村真志氏 (2011 年修士課程卒), 児嶋卓也氏 (2011 年修士課程卒), 岸竜弘氏 (現早稲田大学修士課程 2 年), 大谷拓也氏 (現早稲田大学修士課程 2 年), 蒲旭氏 (現早稲田大学修士課程 2 年), 丸山貴之氏 (現早稲田大学修士課程 2 年), 粟野晴貴氏 (現早稲田大学修士課程 1 年), 飯塚晃弘氏 (現早稲田大学修士課程 1 年), 南重松行紀氏 (現早稲田大学修士課程 1 年), 瓜生和寛氏 (現早稲田大学学部 4 年), 二木元氏 (現早稲田大学学部 4 年), 八原昌亨氏 (現早稲田大学学部 4 年) に, 心より感謝いたします.

そして, これまで共に楽しく頑張ってきた, とりわけ, Massimiliano ZECCA 先生 (現早稲田大学準教授), 石井裕之先生 (現早稲田大学研究院講師), Klaus PETERSEN 氏 (現早稲田大学 GCOE 客員次席研究員), 林焯华氏 (現早稲田大学 GCOE 客員次席研究員), ノヨハン氏 (現早稲田大学 GCOE 研究助手), 石青氏 (現早稲田大学 GCOE 研究助手), イジェウ氏 (現早稲田大学博士後期課程 3 年) をはじめこれまでにお世話になった高西淳夫研究室の諸先輩方, 同輩, 後輩方の皆さまに心より感謝申し上げます.

また, 本研究に際し多大なご協力を頂きました早稲田大学アーリーバードの皆様, 独立行政法人日本学術振興会のグローバル COE プログラム皆様, 文部科学省の国費外国人留学生担当の皆様, ソリッドワークス・ジャパン株式会社様に深い感謝の意を表します. 本研究に際しご協力いただきましたヒーハイト精工株式会社様, 特殊電装株式会社様, ニッタ株式会社様, マイクロ・ビークル・ラボ株式会社様, 有限会社エフテック様, お取引をさせていただきました株式会社アスク様, 有明技研株式会社様, 株式会社エムズコーポレーション様, 新妻精機株式会社様, 株式会社サンアル様, 株式会社寺畑商会様, 日本電計株式会社様, 株式会社羽野製作所様, マクソンジャパン株式会社様, ケーエスエス株式会社様に感謝いたします.

また, 修士課程からこの 5 年間, お母さんのようにいつも私に気を配って下さり, 研究生生活を支えて下さった高西研究室秘書の太田久子に深く感謝申し上げます. また, 女性同士で細かいところまでの研究生生活を支えて下さった高西研究室秘書の伊藤輝美様に心より感謝致します.

そして, 学会等で御会いした折に議論に御付合い頂き, ご意見を頂きましたすべての研究者の皆様, 関係者の皆様に感謝いたします.

また, 私の研究活動や留学生生活を常に応援し, 支えてくれた友人達に心より感謝致します.

ここまでこられるように私を産んで育ててくれて, 大変なとき一緒に泣きながら祈ってくれて, 嬉しいときは私より何倍も喜んでくれた家族に感謝の言葉を伝えたいです. いつも会いたい気持ちです. 愛しています.

最後に、この全てを主観し、導いて下さるイエス様、どんなにつらい状況にいてもいつもそばで共におられ、私を見守って下さる我らの救い主、イエス様、心より感謝致します。この全ての栄光を我が主イエス様に捧げます。ハレルヤ！！アーメン！！

2013年2月

姜 健珍

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文				
○	Attitude Compensation Control for Biped Humanoid Robot	2009 the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, pp. 677-684	2009年9月	姜賢珍 桃木新平 近藤秀樹 橋本健二 林憲玉 高西淳夫
○	Realization of Biped Walking on Uneven Terrain by New Foot Mechanism Capable of Detecting Ground Surface	2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5167-5172	2010年5月	姜賢珍 橋本健二 近藤秀樹 服部健太郎 西川浩介 濱雄一郎 林憲玉 高西淳夫
○	Biped Walking Stabilization on Soft Ground Based on Gait Analysis	2012 IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, pp. 669- 674	2012年6月	姜賢珍 橋本健二 西川浩介 Egidio Falotico 林憲玉 高西淳夫 Cecilia Laschi Paolo Dario Alain Berthoz
	Realization of Biped Walking on Soft Ground with Stabilization Control Based on Gait Analysis	2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2064-2069	2012年10月	橋本健二 姜賢珍 中村真志 Egidio Falotico 高西淳夫 Cecilia Laschi Paolo Dario Alain Berthoz

種類別	題 名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演	人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発 (第8報:実環境下の安定歩行のための制御方法の統合と開発)	日本ロボット学会第26回学術講演会予稿集, 1O2-01	2008年9月	姜賢珍 桃木新平 近藤秀樹 濱雄一郎 清水自由理 林憲玉 高西淳夫
	人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発 (第10報:幅狭な足部を用いた安定歩行のための遊脚軌道修正制御)	日本ロボット学会第27回学術講演会予稿集, 1S3-02	2009年9月	姜賢珍 服部賢太郎 橋本健二 竹崎裕記 近藤秀樹 清水自由理 西川浩介 林憲玉 高西淳夫
	路面検知可能なセンサ式足部機構を用いた不整地適応歩行の実現	日本ロボット学会第27回学術講演会予稿集, 3P1-02	2009年9月	西川浩介 服部賢太郎 橋本健二 濱雄一郎 近藤秀樹 清水自由理 竹崎裕記 姜賢珍 林憲玉 高西淳夫 菅敬介 加藤恵輔
	3点型路面検知足部機構を用いた2足歩行ロボットの不整地適応歩行の実現	日本ロボット学会第28回学術講演会予稿集, 2D1-6	2010年9月	姜賢珍 中村真志 本橋弘光 橋本健二 西川浩介 近藤秀樹 小田中浩平 林憲玉 高西淳夫 菅敬介 加藤恵輔

種類別	題 名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演の続き	<p>2足歩行ロボットの軟弱路面での歩行実現に向けた基礎的研究</p> <p>人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発（第15報：歩行解析に基づく軟弱路面歩行安定化制御と軟弱路面での歩行実現）</p>	<p>日本ロボット学会第28回学術講演会予稿集, 2D2-1</p> <p>日本ロボット学会第30回学術講演会予稿集, 4K1-5</p>	<p>2010年9月</p> <p>2012年9月</p>	<p><u>姜賢珍</u> 橋本健二 吉村勇希 近藤秀樹 林憲玉 高西淳夫</p> <p>橋本健二 <u>姜賢珍</u> 中村真志 西川浩介 Egidio Falotico Cecilia Laschi Paolo Dario Alain Berthoz 林憲玉 高西淳夫</p>