

人間搭乗型 2 足歩行ロボット
に関する研究

Study on Biped Walking Vehicle

2006年 3月

早稲田大学大学院 理工学研究科
生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

菅原 雄介

Yusuke Sugahara

摘 要

超高齢社会においては、高齢者や身体障害者を単に保護するのではなく、共に社会を支える重要な一員として参加さらに活躍してもらうことが不可欠である。特に下肢のみに障害を持つ車いす利用者は、積極的な社会参画を阻むものは移動に関する能力のみであるため、車いす利用者の行動範囲を制限する障壁をゼロに近づけその行動可能範囲を大きく広げることは非常に有益かつ重要であるといえる。

車いすはその移動様式に車輪を用いているため、基本的には大きな凹凸のない平坦な路面でしか移動ができず、車いす利用者は原理的に健常者に比して移動可能範囲が狭い。これに対し、近年高齢者や身体障害者が自立でき社会に参画しやすい社会を作るべく、バリアフリーの考え方が普及し、車いすを使用する歩行障害者や高齢者の行動範囲は大きく広がってきている。しかしながらエレベータやスロープが完備された施設を一步出れば町中にはあちこちに段差があり、その施設までの移動も施設からの移動も健常者の助けを乞わざるを得ないのが現状である。真のバリアフリーの実現につながるブレークスルーには、インフラの整備によりバリアを取り除くのではなく、この世に無数にあるバリアを乗り越えるための手段である機械を各自が身につけて歩く、「バリアフリーの工学的的方法論としての移動ロボット」という方法が有効であると筆者らは考える。すなわち、健常者と同様の移動様式である2足歩行型で同等の運動能力を持つ車いすを提供することができれば、歩行障害者や高齢者の行動範囲を飛躍的に拡大することができるはずである。

また、人間共存型ロボットに関しても、これに究極的に望まれる移動様式は2足歩行型であると多くが認めているにもかかわらず、未だ2足歩行はこういったロボットの移動様式として一般的ではない。この理由は2足歩行が本質的に不安定な現象であることだけでなく、独立した移動モジュールとして扱いにくいことがある。2足歩行型の汎用移動台車を提供することができれば、2足歩行型は人間共存型ロボットの移動様式として実用的になりうると考える。

しかしながら、人間が搭乗できる2足歩行型車いすや2足歩行型の汎用移動台車の実現例は本研究以前にはなかった。

そこで本研究では、人間と同様の移動様式である2足歩行型の車いすや汎用移動台車の開発につながる基礎研究として、人間を搭乗させて歩行できる2足歩行ロボットについて、その機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に試作した人間搭乗型2足歩行ロボットを評価することによりその有効性を実証することを目的とした。具体的には、体重60 kg程度の成人を搭乗させての水平・平坦路面での歩行、および階段

昇降を可能とする、重量 60 kg 程度の軽量な人間搭乗型 2 足歩行ロボットを機構および制御法の両面から開発し、試作した複数体のロボットを用い人間を搭乗させての歩行実験により評価を行った。

本論文は、以下に示す 7 章からなる。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、脚と腰部のみで構成され、小型・軽量で電池により自立歩行が可能な 2 足歩行ロボットの先行試作機 WL-15 の開発について、その機械モデルと歩行制御法、評価実験と考察を述べた。WL-15 は 2 本のスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムの脚と腰部で構成されており、脚機構は片足につき 6 本の直動アクチュエータと上下の受動ジョイントを備えた。バッテリーや DC サーボドライバ、3 軸姿勢角センサは骨盤上部に搭載され、制御用コンピュータは骨盤後部に搭載された。足部は足底に床反力取得用 6 軸力覚センサを備えた。各部の設計には軽量化が施されており、重量は 57 kg となった。歩行制御法は本学で開発された、ZMP 安定判別規範に基づく 2 足ヒューマノイド・ロボットの 2 足歩行制御法をもとに開発した。この手法は任意の足先軌道による歩行動作に対し、フーリエ変換によるモーメント補償軌道算出アルゴリズムを用いて腰部のモーメント補償軌道を算出し、それらの軌道を設定歩行パターンとして歩行ロボットをプログラム制御するものとなっている。開発した WL-15 と歩行制御法を用いてその歩行能力を評価したところ、基本的な歩行能力に関してはその有効性を確認した。一方で、重量物積載歩行能力に関しては、積載歩行時の安定性とアクチュエータの出力の 2 つの点において十分な性能を持つとは確認できず、今後の改善を必要とする結果となった。

第 3 章では、実際に人間を搭乗させて 2 足動歩行を行う事が可能なロボット WL-16 の開発について、その機械モデルと仮想コンプライアンス制御の導入、またこれらを用いて行った評価実験と考察を述べた。WL-16 は体重 50 kg 程度の人間を搭乗させて歩行できること、および多少の凹凸がある路面においても安定に歩行できることを開発要件として開発したもので、基本的な自由度配置は WL-15 のものを踏襲し、広可動範囲化、高可搬重量化を目指してバックラッシの少なく推力とストロークの大きい直動アクチュエータと、同じくバックラッシが少なく小型・軽量な上下の受動ジョイントを新たに設計した。また特に骨盤上部には人間が搭乗するためのシートを備え、その大きさは WL-15 とほぼ同じであるが約 10 kg の軽量化に成功した。また歩行制御法に関しては、WL-15 で用いた ZMP 安定判別規範に基づくフーリエ変換によるモー

メント補償軌道算出法により生成された歩行パターンを用いたプログラム制御に加え、重量物積載歩行時の構造部材のたわみや路面の凹凸などのモデル誤差を原因として生じる着地衝撃の吸収と振動の抑制を目的として、脚の動作に仮想コンプライアンス制御を導入した。仮想コンプライアンス制御は、6軸力覚センサにより足部にかかる力とモーメントを測定し、このデータよりバネダンパ系の運動方程式に基づいて算出した操作量を足部の目標軌道に足し合わせながら制御を行うもので、各アクチュエータは位置制御のみを行いながらも足部は仮想的に力制御されるものである。開発した WL-16 と歩行制御法を用いて性能を評価したところ、歩幅 300 mm での歩行や微小な凹凸のある路面での安定歩行、50 kg の重量物を積載しての歩行、また史上初となる人間搭乗 2 足動歩行に成功し、その有効性を確認した。この人間搭乗歩行実験の成功により、水平平坦路面においては積載重量比 r_{pw} 1.25 を実現した。

第 4 章では、積載可能重量の増加と消費電力の低減を目的として開発した自重支持トルク低減機構について、予備実験とその基本設計、構造と動作原理およびこれを用いて行った評価実験と考察を述べた。自重支持トルク低減機構は脚機構の内側に各直動アクチュエータと並列に組み込まれ、主として鉛直方向の荷重を負担する機構である。構造は反力の異なる 2 本のロック機能付きガススプリングを直列に配し、脚機構にかかる荷重の異なる立脚・遊脚の 2 つの相に応じてバネの効果を切替えることにより、立脚時には各アクチュエータの必要推力を軽減させ、遊脚時にはその必要推力を増大させないことを狙ったものである。開発した自重支持トルク低減機構を WL-16 の改良機 WL-16R に装着して評価を行ったところ、各モータ電流の減少、消費電力の減少、積載可能重量の増加などが確認された。また、体重 94 kg の成人男性を搭乗させての歩行に成功し、この機構の有効性を確認した。これにより、水平平坦路面においては積載重量比 r_{pw} 1.59 を実現した。

第 5 章では、第 3 章において述べた仮想コンプライアンス制御の改良と姿勢補償制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。仮想コンプライアンス制御に関しては、第 3 章では全歩行周期を通じて一定値としていた各コンプライアンス係数を足部の位置に応じて変化させることでより安定な挙動を実現することを図った。姿勢補償制御に関しては、ロボットの腰部に搭載された姿勢角センサの検出量と、足部 6 軸力角センサにより測定される ZMP 偏差を用い、低ゲインのフィードバック制御を行うことで未知の傾斜路面における安定歩行の実現を図った。これらの制御法を WL-16R を用いた実験により評価したところ、仮想コンプライアンス制御を用いた場合では高周波振動の抑制が確認でき、また姿勢補償制御によりロボット腰部姿勢角のオフセット量が低減できていることが確認できた。またこれらを用い、緩やかに傾斜の変化する未知の傾斜路面においての安定歩行に成功し、開発した手法の有効性を確認した。

第6章では、本研究で提案する2足歩行型の車いすや汎用移動台車にもっとも重要となる階段昇降性能の開発について、手法の提案と機械モデルの改良、評価実験と考察を述べた。WL-15, WL-16, WL-16Rの脚機構に用いてきたスチュワート・プラットフォームは、脚機構としてさまざまな長所がある反面、可動範囲が比較的狭いという決定的な短所を持つことが知られており、広い可動範囲を必要とする階段昇降においては不利となる。この問題に対し、足先位置に応じた腰旋回角軌道と設定ZMP軌道の変更を行うことにより、各リンクの可動範囲内で階段昇降が可能となることをシミュレーションにより確認した。またこの手法を用いて作成した歩行パターンの出力のために、下部受動ジョイントと足底板を新たに設計した。開発した手法をWL-16Rの改良機WL-16RIIを用いた実験により評価したところ、最大でけあげ250 mmの階段昇降と、体重60 kgの成人男性が搭乗した状態でのけあげ200 mmの階段昇降に成功し、開発した手法の有効性を確認した。これにより、階段昇降に関しても積載重量比 r_{PW} 1.05を実現した。

以上のように、第2章と第3章で述べた試作機により人間を搭乗させての2足歩行が可能であることを世界で初めて実証し、またその積載可能重量、未知の不整路面における安定性、階段昇降能力という3種類の性能に関して、それぞれ第4章、第5章、第6章において述べた手法によりその強化が可能であることを示した。結果として、体重60 kg程度の成人を搭乗させて水平・平坦路面での歩行と階段昇降を可能とする重量60 kg程度の人間搭乗型2足歩行ロボットを開発し、本研究の目的を達成した。

最後に、第7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、人間搭乗型2足歩行ロボットの将来性について言及した。

以上、本論文では、人間を搭乗させて歩行できる2足歩行ロボットについて、その機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に試作した人間搭乗型2足歩行ロボットを評価することによりその有効性を実証することを研究の目的とし、その成果として、実際に人間を搭乗させての2足歩行が可能であることを世界で初めて実証した。また体重60 kg程度の人間が搭乗した状態での2足歩行と階段昇降が可能であり、また簡便なバネ要素を用いた自重支持トルク低減機構を開発しこれを用いてロボット本体の重量を超える体重94 kgの人間まで搭乗できる2足歩行ロボットを開発し、本論文において述べたような手法によりこれが実現可能であることを主として報告した。

本研究の成果は、2足歩行型車いすの開発と実用化につながる基盤技術となるものであり、また本研究が2足歩行ロボットによる人間を搭乗させての歩行に世界で初めて成功したものであるから、人間の住環境、屋内外、山野なども含めた環境をその対

象とし、人間の搭乗が可能な2足歩行型車いすを開発することを目標とした中長期的な研究が開始でき、これにより歩行が困難な高齢者や歩行障害者に健常者と同様の移動能力を提供することによって、歩行障害者や高齢者の行動範囲を飛躍的に拡大することができ、真のバリアフリーの実現を目指すことができる。これは超高齢社会を迎える我が国において高齢者・障害者の高質な生活を支え、また高齢者や身体障害者に共に社会を支える重要な一員としての活躍を支援するための重要な技術となり、人とロボット技術、社会の将来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	1
1.3 本研究の目的と意義	8
1.4 関連する研究	11
1.5 本論文の構成	19
第 2 章 先行試作機 WL-15 の開発	23
2.1 はじめに	23
2.2 基本設計	23
2.3 ハードウェアの設計	28
2.4 歩行制御法	36
2.5 評価実験と考察	46
2.6 まとめ	61
第 3 章 人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16 の開発	65
3.1 はじめに	65
3.2 基本設計	66
3.3 ハードウェアの改良設計	66
3.4 歩行制御法	71
3.5 評価実験と考察	76
3.6 まとめ	95
第 4 章 自重支持トルク低減機構の開発	97
4.1 はじめに	97
4.2 基本設計	97
4.3 自重支持トルク低減機構の設計	102

4.4	評価実験と考察	109
4.5	まとめ	118
第5章 姿勢補償制御法の開発		121
5.1	はじめに	121
5.2	姿勢補償制御法	121
5.3	評価実験と考察	123
5.4	まとめ	132
第6章 人間搭乗2足階段昇降の実現		133
6.1	はじめに	133
6.2	歩行パラメータの調整	135
6.3	ハードウェアの改良設計	141
6.4	評価実験と考察	143
6.5	まとめ	153
第7章 結論		155
7.1	結論	155
7.2	今後の展望	160
参考文献		169
謝辞		183
研究業績		

記号の説明

第 1 章

r_{PW} :	積載重量比
W_O :	搭乗型ロボットの自重
W_P :	搭乗型ロボットの最大積載重量

第 2 章

$\mathbf{O}-\mathbf{XYZ}$:	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)
$\overline{\mathbf{O}}-\overline{\mathbf{XYZ}}$:	原点がヒューマノイドロボットの腰部付近に固定されている (右手) 直交座標系 (運動座標系)
$\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$:	i 番目の質点の位置ベクトル
$\mathbf{r}_P = [x_P, y_P, z_P]^T$:	点 P の位置ベクトル
$\mathbf{G} = [g_x, g_y, g_z]^T$:	重力加速度ベクトル
$\mathbf{T} = [T_x, T_y, T_z]^T$:	点 P を介して路面からロボットに作用する床反力モーメントベクトル
$\mathbf{r}_{Fk} = [x_{Fk}, y_{Fk}, z_{Fk}]^T$:	k 番目の外力・外力モーメントが作用する点の位置ベクトル
$\mathbf{F}_k = [F_{xk}, F_{yk}, F_{zk}]^T$:	k 番目の外力作用点に作用する外力
$\mathbf{M}_k = [M_{xk}, M_{yk}, M_{zk}]^T$:	k 番目の外力作用点に作用する外力モーメントベクトル
$\mathbf{r}_{ZMP} = [x_{ZMP}, y_{ZMP}, z_{ZMP}]^T$:	ZMP の位置ベクトル
$\mathbf{T}_0 = [0, 0, T_z]^T$:	ZMP における路面からロボットに作用する床反力モーメントベクトル
$\overline{\mathbf{Q}} = [x_Q, y_Q, z_Q]^T$:	絶対座標系 $\mathbf{O}-\mathbf{XYZ}$ に基づく運動座標系 $\overline{\mathbf{O}}-\overline{\mathbf{XYZ}}$ の原点の位置ベクトルの運動座標系に基づくベクトル表現

$\bar{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$:

絶対座標系 $\mathbf{O}-\mathbf{XYZ}$ に基づく運動座標系 $\bar{\mathbf{O}}-\bar{\mathbf{XYZ}}$ の角速度ベクトルの運動座標系に基づくベクトル表現

$\dot{\bar{\omega}}$:

絶対座標系 $\mathbf{O}-\mathbf{XYZ}$ に基づく運動座標系 $\bar{\mathbf{O}}-\bar{\mathbf{XYZ}}$ の角速度ベクトルの運動座標系に基づくベクトル表現 $\bar{\omega}$ の運動座標系 $\bar{\mathbf{O}}-\bar{\mathbf{XYZ}}$ における時間に関する（伸縮成分に関する）1階微分

$\mathbf{r}_W = [x_W, y_W, z_W]^T$:

腰部質点の位置ベクトル

m_i :

i 番目の質点の質量

m_W :

腰部質点の質量

$\mathbf{M} = [M_x, M_y, M_z]^T$:

下肢の運動により設定 ZMP において発生する被補償モーメント

M_x^*, M_y^* :

既知被補償モーメント

e_{Mx}, e_{My} :

設定 ZMP におけるモーメント誤差

$\varepsilon_{Mx}, \varepsilon_{My}$:

モーメント誤差の許容値

$E_{Mx(n)}, E_{My(n)}$:

n 回目の繰り返し計算に用いる蓄積したモーメント誤差

第3章

\mathbf{F} :

足座標原点にかかる力・モーメント

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

足座標原点の歩行パターンからの位置偏差

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

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

 $\Delta t :$

制御周期

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

1 制御周期前の足座標原点の歩行パターンからの偏差

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

現在の足座標原点の歩行パターンからの偏差

第5章

 $L_{CCR} :$

腰座標系における足座標原点の位置と、設定 ZMP 座標の相対距離

$$\bar{\mathbf{x}}_{fR}^w = [\bar{x}_{fR}^w, \bar{y}_{fR}^w, \bar{z}_{fR}^w]^T :$$

腰座標系からみた右足座標原点の位置

$$\bar{\mathbf{x}}_{ZMP}^w = [\bar{x}_{ZMP}^w, \bar{y}_{ZMP}^w, \bar{z}_{ZMP}^w]^T :$$

腰座標系からみた設定 ZMP 座標の位置

$$\mathbf{K}_T = \begin{bmatrix} K_{Tx} & & & & & 0 \\ & K_{Ty} & & & & \\ & & K_{Tz} & & & \\ & & & K_{Tmx} & & \\ & & & & K_{Tmy} & \\ 0 & & & & & K_{Tmz} \end{bmatrix} :$$

6次元仮想ばね定数行列

$$\mathbf{C}_T = \begin{bmatrix} C_{Tx} & & & & & 0 \\ & C_{Ty} & & & & \\ & & C_{Tz} & & & \\ & & & C_{Tmx} & & \\ & & & & C_{Tmy} & \\ 0 & & & & & C_{Tmz} \end{bmatrix} :$$

6次元仮想粘性定数行列

 $\mathbf{E} :$

6x6 単位行列

$$\mathbf{H}_{CC} = \begin{bmatrix} H_x & & & & & & 0 \\ & H_y & & & & & \\ & & H_z & & & & \\ & & & H_{mx} & & & \\ & & & & H_{my} & & \\ 0 & & & & & H_{mz} & \end{bmatrix} :$$

パラメータ変化率行列

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = [\Delta\theta_x, \Delta\theta_y]^T :$$

姿勢角センサより得られる姿勢角偏差

$$\Delta\mathbf{x}_{ZMP} = [\Delta x_{ZMP}, \Delta y_{ZMP}]^T :$$

足部 6 軸力覚センサより得られる ZMP 偏差

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\theta}} = [\Delta\dot{\theta}_x, \Delta\dot{\theta}_y]^T :$$

姿勢角センサより得られる姿勢角速度偏差

$$\Delta\dot{\mathbf{x}}_{waist} = [\Delta\dot{x}_{waist}, \Delta\dot{y}_{waist}]^T :$$

腰位置操作量の微分値

$$\mathbf{K}_{p\theta} = \begin{bmatrix} K_{p\theta x} & 0 \\ 0 & K_{p\theta y} \end{bmatrix} :$$

姿勢角位置ゲイン行列

$$\mathbf{K}_{v\theta} = \begin{bmatrix} K_{v\theta x} & 0 \\ 0 & K_{v\theta y} \end{bmatrix} :$$

姿勢角速度ゲイン行列

$$\mathbf{K}_{px} = \begin{bmatrix} K_{px} & 0 \\ 0 & K_{py} \end{bmatrix} :$$

腰位置ゲイン行列

$$\mathbf{K}_{vx} = \begin{bmatrix} K_{vx} & 0 \\ 0 & K_{vy} \end{bmatrix} :$$

腰速度ゲイン行列

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： $\overline{\mathbf{r}}_i$ ）は運動座標系 $\overline{\mathbf{O}} - \overline{\mathbf{XYZ}}$ 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，人間の搭乗が可能な2足歩行ロボットの開発について論ずる．

これは2足歩行型車いすや2足歩行型汎用台車の開発と実用化につなげるための基礎研究であり，歩行が困難な高齢者や歩行障害者に健常者と同様の移動能力を，またこれまで移動様式に車輪を用いてきた乗り物や機械に2足歩行という人間と同様の移動様式を提供することを試みるものである．

1.2 本研究の背景

1.2.1 社会的背景

わが国は1950年代からの出生率の低下と70年代からの死亡率の改善により急速に高齢化が進んできており，平成26年には高齢化率が25%を超えると予測されている[1]．本論文執筆時の平成18年は，来るべき超高齢社会における施策を打ち出し実行していかなければならない時期であるといえる．

高齢者や身体障害者のうち車いすの利用者に注目してみると，平成13年度の厚生労働省の調査[2]によれば，肢体不自由として身体障害者の認定を受けた人は174.9万人おり，このうち下肢切断者と下肢機能障害者を合わせた人数は61.2万人いることがわかっている．ここに全身性運動機能障害を持つ人を合わせると，下肢の不自由な身体障害者の人数は100.5万人となり，この多くが既にもしくは潜在的な車いすの利用者と推測される．

こういった超高齢社会においては、高齢者や身体障害者を単に保護するのではなく、共に社会を支える重要な一員として参加さらに活躍してもらうことが就労人口の減少しているわが国の将来のためには不可欠である。特に下肢のみに障害を持つ車いす利用者は、極論すればその積極的な社会参画を阻むものは移動に関する能力のみであるため、車いす利用者の行動範囲を制限する障壁をゼロに近づけその行動可能範囲を大きく広げることは非常に有益かつ重要であるといえる。

1.2.2 車いすの歴史

ここでその車いすの歴史について簡単に触れておく。

車いすはその発明された時期が明らかではないが、Rory A. Cooper [3]によれば、その最初の記録は紀元前 6 世紀の中国の石棺の石に刻まれているものだという。車輪の発明は紀元前 3500 年ごろにシュメールにおいてなされたものと考えられており[4]、その後中央アジアやエジプトに伝わったとされている。一方いすはエジプトで紀元前 3000 年ころから既に用いられており、これらより考えて傷病人が車輪の付いたいすを用いるというアイデア自体は非常に古い歴史を持つことは想像に難くない。

1595 年にはスペインの Philip 2 世が痛風のため車いすを使っていたことや、フランスの Louis 14 世が手術後の回復治療に車いすを用いていたことが知られている。アメリカでは南北戦争や第 1 次世界大戦の際に車いすを供給しており、またイギリス赤十字社も動力式 3 輪車いすを供給している。また現在多く普及している折りたたみ式車いすの原型は 1932 年に Herbert Everest と Harry Jennings が発明したものであるという。

電動車いすは 20 世紀初頭にその起源をたどることができ、1940 年代には自動車用バッテリーとスタータモータを使用した簡単な電動車いすが製作された。この後 1950 年代のトランジスタの開発やその後の電子制御技術の発展と、医療技術の進歩による肢体まひ者の生存率の高まりによる車いす利用者の人口の増加などの要因により、今日では過去に比べ軽量で信頼性の高い電動車いすが多くの障害者に利用されている。

1.2.3 インフラ整備の限界とバリアフリーの方法論としての移動ロボット

下肢のみの機能障害であるか全身性運動機能障害であるか等にもよるが、車いすはその移動様式に車輪を用いているため、基本的には大きな凹凸のない平坦な路面でしか移動ができず、車いす利用者は原理的に健常者に比して移動可能範囲が狭いことは否定できない。

これに対し、近年高齢者や身体障害者が自立でき社会に参画しやすい社会を作るべ

く、バリアフリーやユニバーサルデザインといった概念が広く認識されるようになってきた。車いす利用者に関しても、2000年の交通バリアフリー法[5]以降、駅や公的施設、店舗などへのスロープやエレベータの設置は決して遅くないスピードで進んでいる。これらにより、車いす利用者の行動範囲は以前に比べ確実に広がってきていると言えよう。

しかしながら、車いす利用者や高齢者向けのエレベータやスロープが完備された施設を一步出れば、町中にはあちこちに段差があるため、その施設までの移動も施設からの移動も健常者の助けを乞わざるを得ないのが現状である。もちろんこの問題は街中の段差を解消することにより解決できるが、世界中のすべての場所において段差を解消することは現実的に不可能である。インフラの整備を必要とする事によって“インフラの整備された領域とそうでない領域”という形で、領域間のバリアを生じさせてしまう。インフラの整備のみによるバリアフリーでは、こういったいわば「バリアフリーのフレーム問題」が解決できはしないのである。

また、たとえば国宝である犬山城天守閣（図 1.1）など歴史的建造物などでは（階段や段差が非常に多いことが分かっているにもかかわらず）ほぼ一切の追加工事が望ましくない場合もありえ、この場合はインフラの整備によるバリアフリー化は事実上不可能である。

真のバリアフリーの実現というブレークスルーには、インフラの整備によりバリアを取り除くのではなく、この世に無数にあるバリアを乗り越えるための手段である機械を各自が身につけて歩く、「バリアフリーの工学的的方法論としての移動ロボット」という方法が有効であると筆者らは考える。すなわち、健常者と同程度の運動能力をもつ車いすを提供することができれば、歩行障害者や高齢者の行動範囲をこれまでの「バリアフリー対応の施設、エリア内」から飛躍的に拡大することができ、真のバリアフリーの実現へのブレークスルーとなりうるはずである。



(a) Exterior view.



(b) Stairs.

Figure 1.1 Inuyama Jyo Castle.

1.2.4 車いすに望まれる移動様式とは

それでは、健常者と同程度の運動能力を実現するにはどのような移動様式が望まれるであろうか？

人間が生活するうえでの行動範囲は自宅や公共施設など屋内から街路、山林など自然環境までさまざまな環境が混在している。公共施設や工場内、オフィスなどは平坦で比較的広いことが多いが、屋外の街路は多少の段差や傾斜がある。特に国土の狭いわが国では伝統的な日本家屋は狭く（また図 1.2 のようにたいていの場合散らかっており）、また急な階段があることも珍しくない。長崎や尾道などの歴史の古い町では、街路も狭く階段がある場合もあり、専用の階段昇降機の研究例もあるほどに深刻である[6]。山林や農地など自然環境とそれに準ずる環境にいたっては平坦従来の電動車いすやシニアカーでの移動は事実上不可能に近い。

図 1.3 と表 1.1 に、あらためてさまざまな移動様式とそれが適応可能な環境をまとめた。図中○印は適応可能であること、×印は適応不可能であること、△印は適応不可能ではないが○印に比べ不利となることを意味する。これらのような環境すべてに適応可能な移動様式を考えると、車輪やクローラでは適応できない環境は数多い。1967 年のアメリカ軍の調査[7]によれば、地球上の地表面の半分は車輪やクローラで



Figure 1.2 Example of real disorganized room.

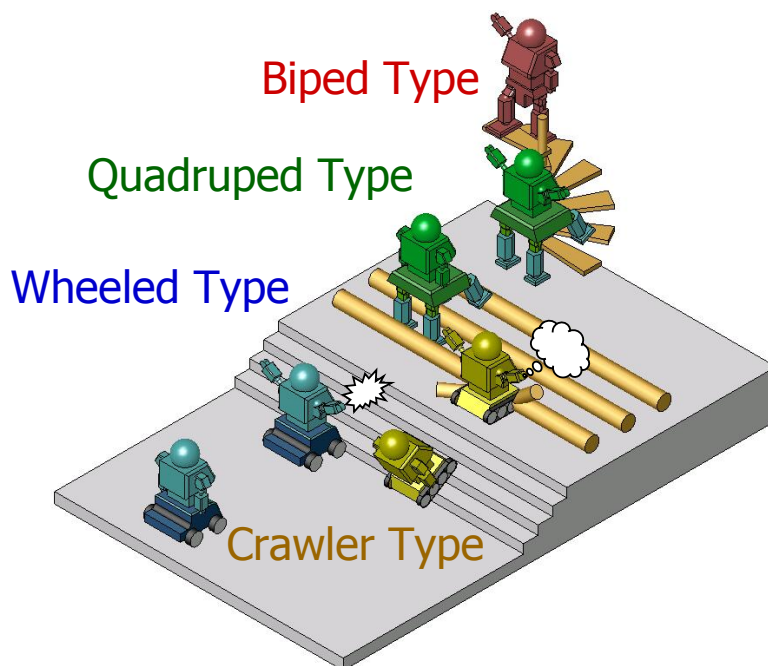


Figure 1.3 Various locomotion modes in various environments.

Table 1.1 Comparison of various locomotion modes in various environments.

	Wheeled Type	Crawler Type	Quadruped Type	Biped Type
Flat and even floor	○	○	○	○
Stairs	×	△	○	○
Uneven surface	×	△	○	○
Surface where the landable area is limited	×	×	△	○
Narrow space	×	×	△	○

は到達不可能という。クローラは悪路走破性に優れており、一部階段の昇降が可能なものもみられるが、表中4行目の着地可能な領域が限定されている路面、たとえば踏み潰してはいけないものの散らばっている室内や螺旋階段などに適応することはできず、また大型のものは家庭内での運用は困難である。多足歩行ロボットはそういった状況にロバストに対応できることは以前から指摘されているが[8, 9], 4足～6足のものはある程度の大きさのシステムの移動様式として考えた場合には占有面積が大きくなり、狭い人間の住環境への適応は困難である。

一方このような環境で（もちろん図 1.2 の環境においても）人間が生活していることを考えると、人間と同様の2足歩行という移動様式はこのすべてにおいて適応可能である。人間と同様の移動様式である「2足歩行型の車いす」を提供できれば、真のバリアフリーの実現に有効であると考えられる。

1.2.5 人間共存型ロボットに望まれる移動様式

また同様の理由から、人間共存型ロボット、ヒューマノイド・ロボットの移動様式に関しても、究極的に望まれるのは2足歩行型であると考えられる。このことにより近年2足ヒューマノイド・ロボットがさまざまな企業や研究機関から相次いで発表されてきている[10-20].

しかしながら近年開発されているヒューマノイド・ロボットのプロトタイプは、その移動様式に車輪やクローラを用いたものがいまだ圧倒的多数を占めている[21-30]. この理由は、2足歩行という移動様式が本質的に不安定であるということだけでなく、車輪やクローラのように独立した移動モジュールとして扱いにくいことも一因であると考えられる。

これに関しても、人間と同様の移動様式である2足歩行型の台車のような移動モジュールが提供できれば、2足歩行ロボットのノウハウのないユーザでも、これを用いて容易に2足ヒューマノイド・ロボットが構成できるようになる。

1.2.6 早稲田大学における2足歩行ロボット研究

ここで、早稲田大学における2足歩行ロボットの研究について触れておく。

早稲田大学は、1967年より人間の脚と2足歩行ロボットに関する研究を継続しており、世界でもっとも長い2足歩行ロボット研究の歴史を持つ研究機関である[31].

最初に実際の機械を用いて2足歩行ロボットの研究を始めたのは加藤らであり、静歩行を提案し、ゴム人工筋によりなる2足歩行ロボット WAP-3 (Waseda Anthropomorphic Pedipulator - No. 3) により、1972年に2足歩行を自動的に行うことに初めて成功した[32]. また1973年には油圧により駆動される2足歩行ロボット WL-5 (Waseda Leg - No. 5) を用いての静歩行にも成功した[33].

1980年には、高西・加藤らは、単脚支持相においては静歩行と同様に床面上の重心位置が立脚の足底による安定領域から外れないよう制御し、立脚切替相においては動歩行と同様に重心を動的に切り替える準動歩行方式を提案し[34], 1982年には10自由度の2足歩行ロボット WL-9DR を用いて平均台型の準動歩行を実現した[35, 36].

また1985年には、高西・加藤らは単脚支持相において設定歩行パターンを用いたプログラム制御を行い、立脚切替相においては切替状況に応じて足首部のトルクと機械的インピーダンスを可変とするシーケンス制御を行うことで、12自由度の2足歩行ロボット WL-10RD を用いて動完全歩行を実現した[37, 38].

1987年から1990年にかけては、高西・加藤らは上体補償型2足歩行制御方式を提案し[39, 40], 上体を有する2足歩行ロボット WL-12, WL-12R, WL-12RII, WL-12RIIIを用いて、既知あるいは未知の外力下での動歩行[41, 42], また階段や斜面などの不整地上での動歩行を実現した[43].

また1991年から1993年にかけて山口・高西・加藤らは、3軸モーメントを補償し、着地する路面の形状を検知しそれに基づく軌道修正を行う不整地歩行制御を提案し、未知の不整路面における歩行に成功した[44-46].

その後、これらの研究成果を背景に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 (WAseda BIpedal humANoid) を設計・製作し、1.28 s/step, 0.10 m/stepの動歩行、手先一定条件下で双腕による動的荷物運搬作業、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などを実現した[47-49].

小椋・高西らは、2002年より人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイド・ロボットという主題により、人間に近い自由度を持つ脚と骨盤を持つ2足ヒューマノイド・ロボットを開発しており、これまでに膝関節を伸ばした歩行に成功、またこのときの床反力や関節モーメントを測定し考察することによる人間の歩行運動の工学的見地からの研究を行っている[50-54].

以上見てきたように、早稲田大学における2足歩行ロボット研究の目的は、人間の歩行の工学的見地からの解明と、人間と同等の運動能力を持つヒューマノイド・ロボットの開発にある。その目的はもちろんどちらもいまだ達成されたとはいえないが、2足歩行ロボットに関する基礎的な技術の完成度は高まってきているといえる。

すなわち、2足歩行型の車いすや汎用移動台車の開発に際し、歩行制御技術の基礎は既に開発されたものをベースとして利用できると考えられる。

1.2.7 人間搭乗型2足歩行ロボットの着想

そこで本研究では、

- ・ 2足歩行型の車いす
- ・ 汎用2足移動モジュール

として実用に足る2足歩行ロボットの開発につながる基礎研究として、これまで実現例のない人間が搭乗できる2足歩行ロボットを開発し評価することを着想した。

本研究の研究目的はあらためて次節にて詳説する。また、本節における論理の流れを図1.4に示す。

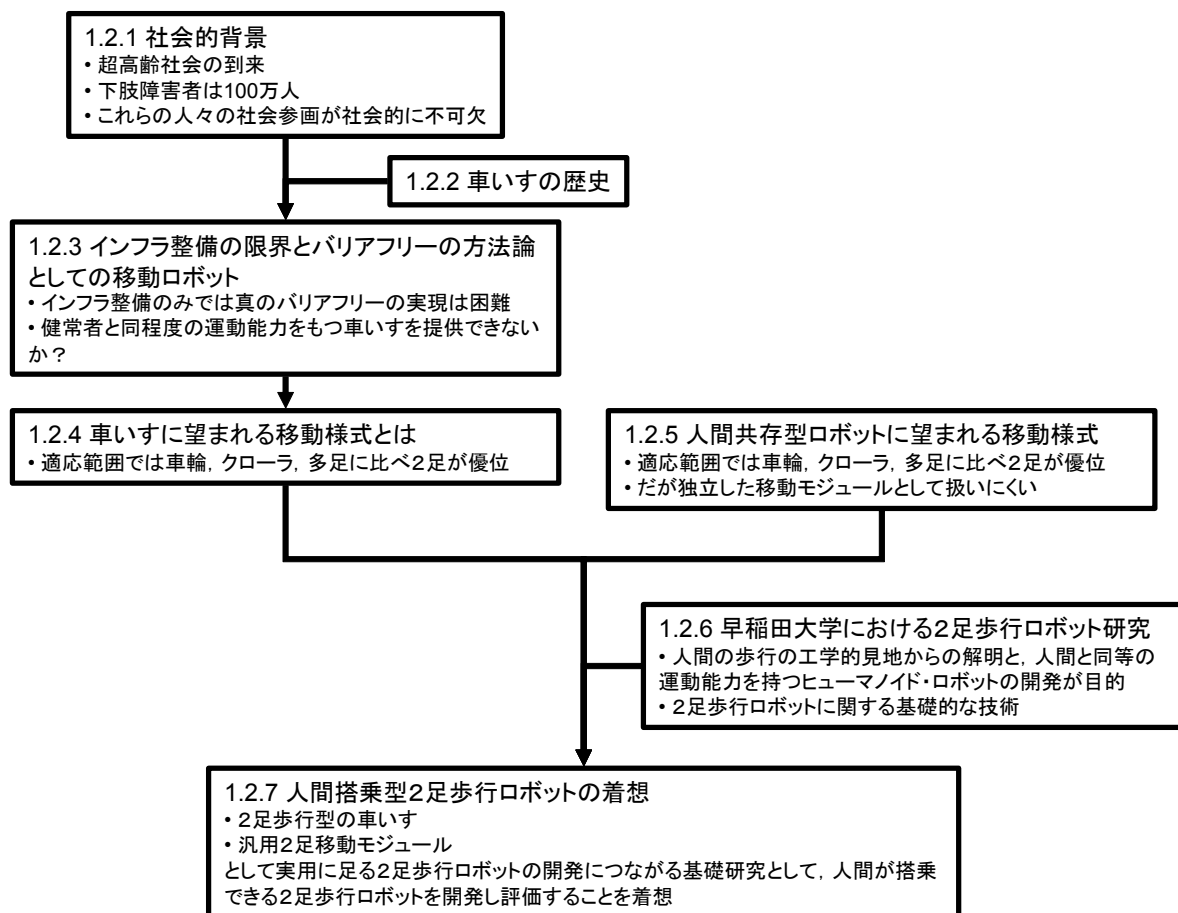


Figure 1.4 Flow of logic of research background.

1.3 本研究の目的と意義

1.3.1 本研究の目的

本研究では、人間を搭乗させて歩行できる2足歩行ロボットについて、その機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に試作した人間搭乗型2足歩行ロボットを評価することによりその有効性を実証することを目的とする。

具体的には、体重 60 kg 程度の成人を搭乗させての水平・平坦路面での歩行、および階段昇降を可能とする、重量 60 kg 程度の軽量な人間搭乗型2足歩行ロボットを機構および制御法の両面から開発し、評価を行う。

1.3.2 本研究の意義

本研究によって提案する人間搭乗型2足歩行ロボットは、2足歩行型の車いすや汎

用2足移動モジュールの開発につながる基礎研究として開発するものである。

従って、本研究によりその基礎的な技術が構築できれば、人間の住環境、屋内外、山野なども含めた環境をその対象とし、様々なロボット・システムの搭載、また人間の搭乗も可能な汎用移動モジュールとして実用に足る2足歩行ロボットを開発することを目標とした中長期的な研究を開始できると考える。

これは、脚と腰部のみで構成され、その上部部に運動する重量物を積載しての歩行が可能である汎用移動ロボットであり、使用者はその要求に応じてシーティングや上半身を架装することができるものである。機構のみでなく電源系統や安定化制御システムまでを統合的にモジュール化することによってそれ単体でも自立動作でき、積載される上位システム（搭乗する人間や上半身ヒューマノイド・ロボットなど）とインタラクティブに情報交換を行いながら移動機能を提供することのできるロボットとなる。

あらためて本研究の意義を述べると、大きく分けて以下の2点が挙げられる：

A. 真のバリアフリーの実現のための2足歩行型車いすの基礎技術の構築 人間が搭乗できる2足歩行ロボットを開発しその評価実験を行うことで、健常者と同程度の運動能力をもつ2足歩行型車いすの開発につながる基礎技術が開発できる。これにより歩行障害者や高齢者の行動範囲を飛躍的に拡大することができ、真のバリアフリーの実現が可能となる。

2足歩行型車いすにより移動の際の物理的障壁をクリアさせることができ、歩行障害者や高齢者に健常者と同等の移動能力を提供できることは1.2節にて述べたとおりだが、これにより車いす利用者の心的負担を軽減できることも意義がある。従来の階段昇降機などの運用では、車いす利用者は駅や公共施設構内の随所にある階段や段差に差し掛かるたびに係員や周囲の人の手助けを必要としていた。車いす利用者が外出を厭う原因としては、肉体的に苦勞を伴うことだけでなく、自分で乗り越えられないバリアがあるたびに周囲の人の助けを請わなければならないことによる精神的苦痛も大きいことは以前から指摘されてきた。利用者が一人でバリアを越えることができるようになる2足歩行型車いすは、こういった車いす利用者の心的負担を軽減する「心のバリアフリー」実現にも有効である。

B. 2足歩行型汎用移動台車の基礎技術の構築 人間が搭乗できる2足歩行ロボットを開発しその評価実験を行うことで、2足歩行型の汎用移動台車の開発につながる基礎技術が開発できる。これにより2足歩行ロボットのノウハウのないユーザでもこれを用いて容易に2足ヒューマノイド・ロボットが構成できるようになる。

2足歩行型の汎用移動台車が人間の住環境から自然環境を含む屋外までを連続的に運用フィールドとするロボット・システムの移動モジュールとして容易に利用でき

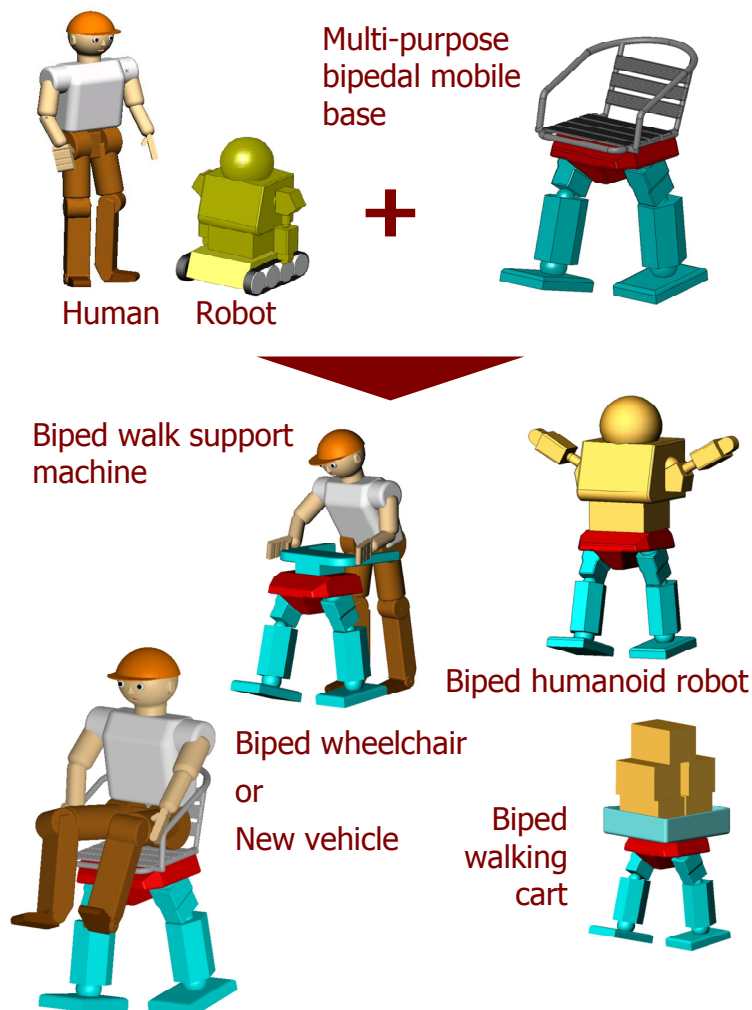


Figure 1.5 Various application fields for biped walking mobile base.

Table 1.2 Applications for biped walking mobile base.

Upper body system	Applications
Seat / Seating system	Biped walking wheelchair
Upper body humanoid robot	Biped humanoid robot
Passenger's seat	New vehicle
Walking support device	Biped walking support machine
Luggage carrier	Biped walking cart

るものとなるため、2足ヒューマノイド・ロボットの移動モジュールとして応用すること以外にも、図 1.5、表 1.2 に示した以下のような応用範囲が考えられる：

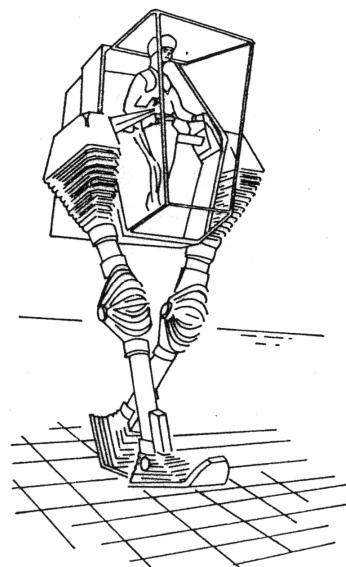
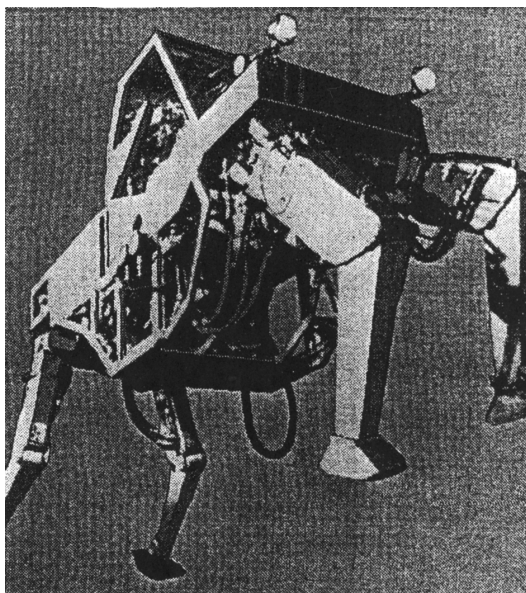
- ・ 新たなモビリティ、エンタテインメントビークルへの応用
- ・ 歩行支援機など車いす以外の移動型福祉機器への応用
- ・ 台車としての応用

また、本研究の意義として以下の一点をさらに挙げておきたい：

C. 全く新たな2足歩行ロボットの形の提案 本研究で開発する2足歩行ロボットは人間型である必要はなく、ことさらに人間の形態や運動制御を模倣する必要もない。人間の形態は純粋に進化の産物であるが、進化の産物とは基本的に **Local Minimum** であることは言うに及ばない。もちろん人間の2足歩行はある意味で完成されたものだと言うことは可能だが、人間の筋や骨、関節の配置やその制御構造が、本研究で開発する2足歩行ロボットにそのまま有効であると考えるのは早計である。本研究で開発する2足歩行ロボットは純粋に工学的設計論のみを用いて設計することが許され（こういった例は非常に少ない）、このため全く新たな2足歩行ロボットの形を模索できると同時に、本研究で得られる知見の一部は「逆説的ヒューマノイド論」としてヒューマノイド・ロボットに関する研究にも資する可能性がある。

1.4 関連する研究

人間が搭乗できる歩行ロボットの研究の歴史は実は意外に古く、歩行ロボット自体の研究の最も初期にあたる1968年に、R. S. Mosher と R. A. Liston が4足歩行トラックを試作したことが知られている[55, 56, 57]。図1.6(a)に示すこれは4本の脚を駆動する油圧アクチュエータをすべて操縦者が直接操作するようになっており、安定した動作は不可能であった。



(a) Photograph of quadruped walking truck.

(b) Image of biped type.

Figure 1.6 Walking truck of R. S. Mosher and R. A. Liston in 1968[57].

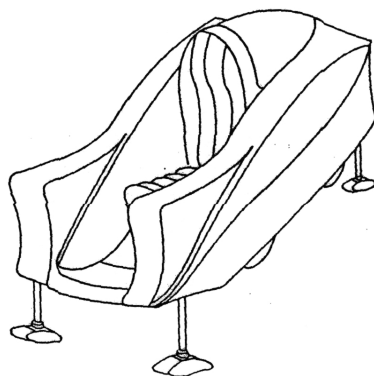
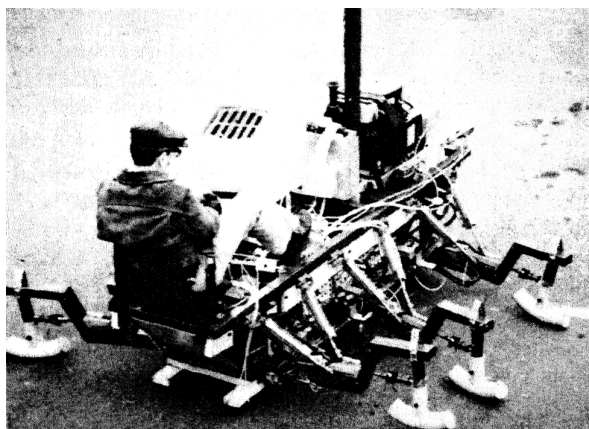
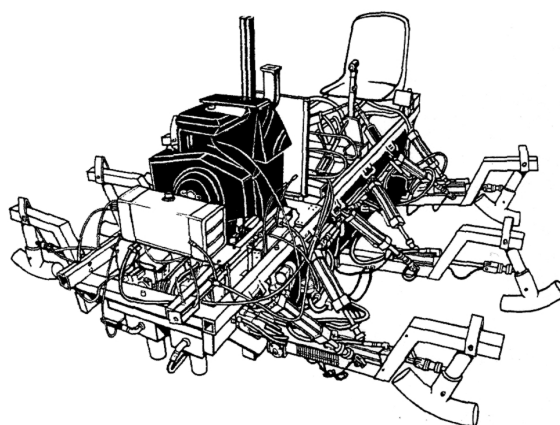


Figure 1.7 Walking chair of J. D. Mckenney, W. C. Baldwin and J. V. Miller in 1966[57].



(a) Photograph.



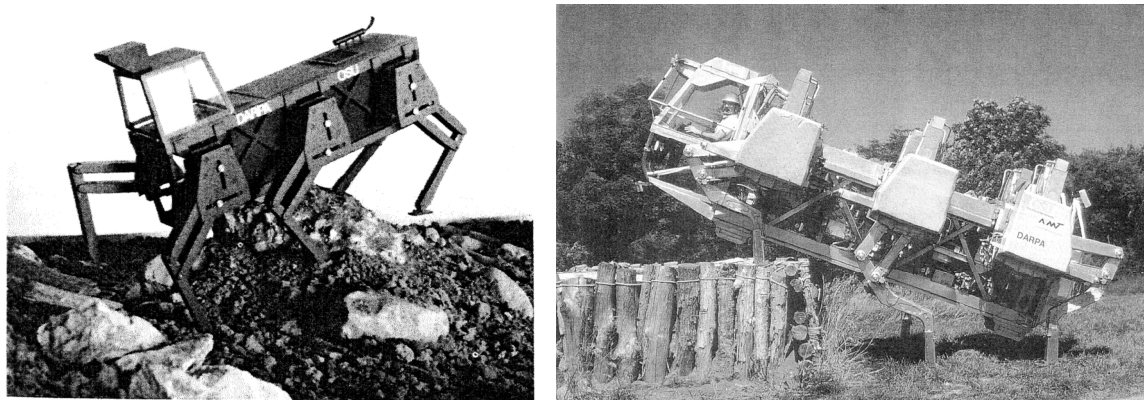
(b) Rendition.

Figure 1.8 6-legged walking machine of I. E. Sutherland and M. K. Ullner in 1984 [59].

また Vukobratovic[57]によれば, J. D. Mckenney と W. C. Baldwin, J. V. Miller が麻痺患者のための歩行補助装置として, 図 1.7 のような椅子型多足歩行機械のプロトタイプを製作し, 電動モータとカムによる固定プログラム駆動により, 歩行と特定の形の階段の昇降に一応成功したという[58].

I. E. Sutherland ら[59]は 1980 年に, 人間を乗せられる程度の大きさの歩行ロボットの開発についての課題を研究するために, 図 1.8 に示す 6 足型の搭乗可能な歩行ロボットの製作を開始し, 1982 年に歩行に成功, 1983 年には研究を終了した. この歩行ロボットは 18 hp のガソリンエンジンを搭載し, 世界初の自立型歩行ロボットとされている[60]. アクチュエータは油圧シリンダを用い, レバーとペダルで進行方向を操作するものであった.

Kenneth J. Waldron, Robert B. McGhee らは, 1983 年から 1989 年にかけて 6 足歩行ロボットの大きなプロジェクトを持ち, 全長 5 m, 全高 3.3 m, 重量 2600 kg で 225 kg という可搬重量を目指し図 1.9 のような Adaptive Suspension Vehicle (ASV) という自立型 6 足静歩行ロボットを開発した[61-63].



(a) Photograph of the concept model[61]. (b) Photograph[63].

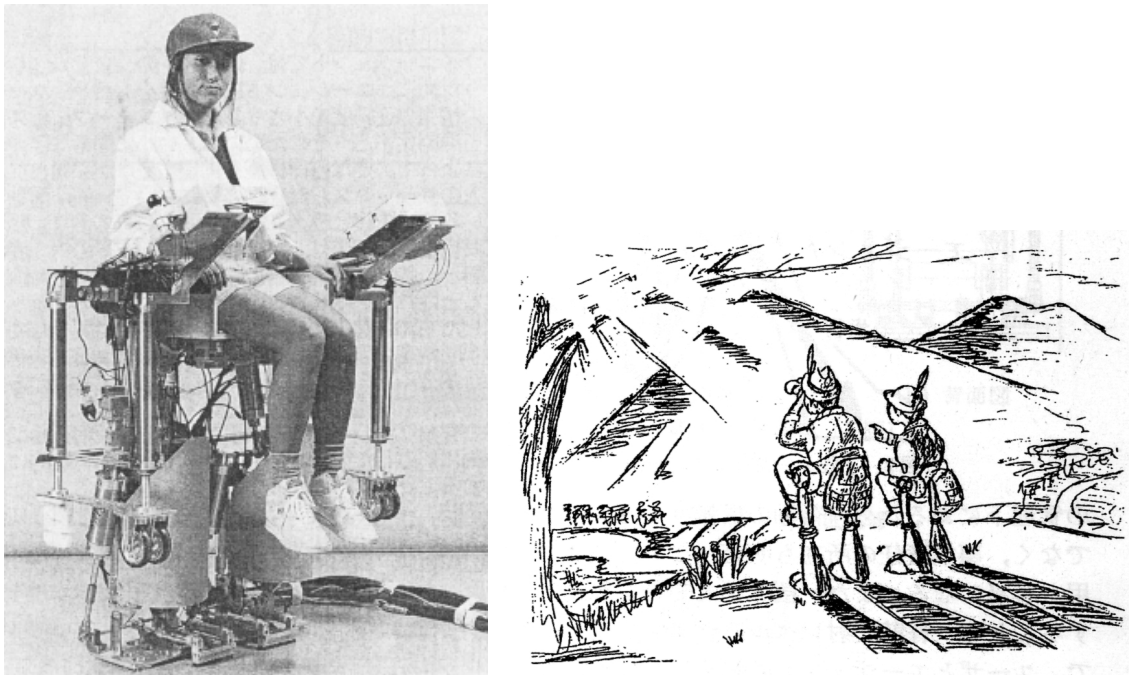
Figure 1.9 Adaptive Suspension Vehicle of Kenneth J. Waldron, et al., during 1983-1989.

以上の研究例のうち、Mosher らの歩行トラックと Waldron らの ASV は主に自然環境における不整地の踏破を目的としており、本研究とは目的を異にしている。Sutherland らの研究は大規模な不整地や階段での移動は目的としていない。Mckenney らのものは本研究の目的に近いが、方向転換には難があることが Vukobratovic[57]によって指摘されており、また固定プログラムを用いているために本来脚移動という様式の持つ積極的な対地適応性という長所を生かすことはできなかったと思われる[8]。Mosher らは図 1.6(b)に示すような 2 足型に関しても研究していたようだが[57]、実際に試作されることはなかった。

この後も、2 足歩行型車いすというアイデアは複数提案されてきた[64-69]が、実際に人間が搭乗しての 2 足歩行ロボットは筆者ら以前には実現された例はなかった。

実際にハードウェアまで試作された例としては、1994 年の鎌田らのユーザ搭乗型下肢エージェント「マイエージェント」が早い段階で試作されたものである[64-67]。写真を図 1.10(a)に示す。これはユーザの意思に基づいて人間動作を代行するシステムとして提案されており、本研究と同様にインフラを必要としないことで人間の生活空間と自然環境への無侵襲を掲げている。文献[67]において、老夫婦が搭乗型 2 足歩行ロボットに乗って山登りをするイラスト（図 1.10(b)）が見られるが、これはまさに本研究における最終目標と一致する¹。報告されたハードウェアは人間が搭乗する擬似 2 足歩行型の人間搭乗歩行ロボットの形状を持ち、発表されている[64-67]の報告では主に基本コンセプトと、搭乗者の骨盤の回旋を圧電センサで検知し「歩きたい」という

¹ 2004 年のロボティクス・シンポジアの席で名古屋工大の佐野明人先生から伝え聞いた話だが、このイラストは鎌田氏自身の手になるものであり、若い頃登山が好きだった老夫婦が、2 足歩行ロボットに乗って若い頃に登った山を再び目指す、というストーリーをイメージして書かれたものだという。



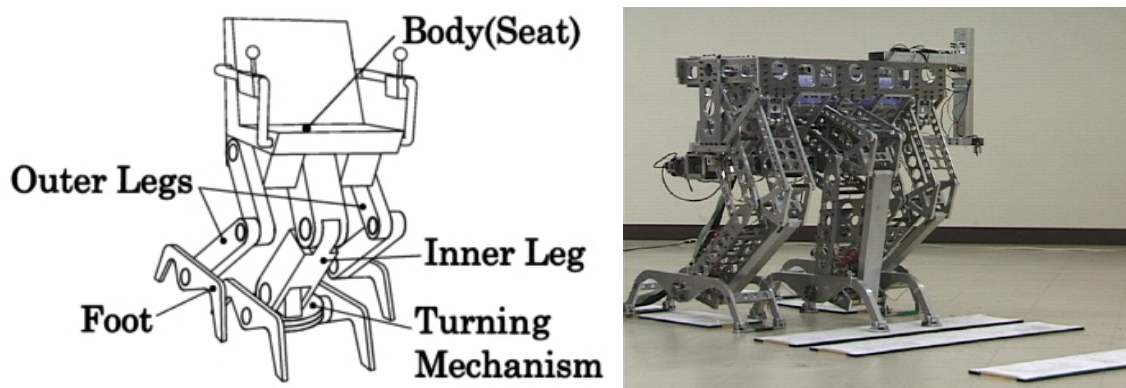
(a) Photograph[66]. (b) Illustration of the practical application image[67].
Figure 1.10 My Agent of T. Kamada in 1994.

意思として認識し、2本の脚を動作させる操縦方式について報告されている。ただしこれはバランス維持用の補助輪を備えており、完全な2足歩行を行うものではないと記述されている。また1995年以降本論文執筆時まで続報を確認していない。

南方らは2足歩行ロボットの歩行速度の操作性に関する論文[68]において、操作者が搭乗し歩容を操ることのできる「Biped Bike」を提案している。しかしながら実際にハードウェアを製作するなどのアプローチは見当たらない。

西川らは未知重量物体を2足歩行ロボットに積載させて歩行する場合にその重量と重心位置の推定と軌道計画について報告しており[69]、論文中において2足歩行ロボットをひとつの移動手段とみなした「Biped Vehicle」を提案している。しかしながら実際の評価実験に関しては述べられていない。

武田、樋口、舟橋らは、図1.11(a)に示すような人間の乗る椅子の下にリンク機構からなる脚を設けた「歩行椅子」の開発を継続している[70-76]。これは車いすが不得意とする段差や絨毯、畳などを含む歩行面上での安定な移動能力を有する、簡便、安全かつ安価であって普及が期待できる福祉用歩行機械を目指して開発されているもので、このコンセプトも本研究が最終的に目指すものに近い。これまでに路面のうねりや凹凸に対し機械的に適応する機構の研究[70, 71]や、搭乗者がクランクをまわすことによる入力を電動モータでパワーアシストする駆動系に関する研究[73, 75, 76]、構造部材の設計論[72, 74]など幅広い研究が行われている。しかしながら本論文執筆段階での試作機(図1.11(b))は外側2本、内側1本の都合3本の脚を有し、両外側の脚は同



(a) Image illustration[70]. (b) Photograph of the prototype[76]
Figure 1.11 Walking chair of Y. Takeda, et al. from 1999.



(a) Mountable prototype[78]. (b) i-foot[79].
Figure 1.12 2-leg mountable robot of Toyota Motor Corporation in 2004.

一の運動を行い, 内側の1脚と同期して動かされるもので, また各足部が十分大きく, 結果として機構的に必ず十分な静的安定領域が確保される「3足静歩行」とも呼ぶべき歩行形態である. これは2足動歩行型と比べ安全性や簡便性に関して有利である反面, 広瀬らが指摘した「歩行機械の5大特性」のうちの地表支持点の任意選択性[77]を持たず, 本研究とは若干アプローチが異なる.

最近の例としては, トヨタ自動車株式会社が, 図 1.12 に示すような, 人間を搭乗させて歩行する2足歩行ロボットの試作機[78]と, 搭乗歩行型パートナーロボット「i-foot」を発表している[79]. 試作機は全高 1800 mm, 重量 75 kg であり, 腰部に人間が搭乗するバケットシートを備える2足歩行ロボットであり, ジョイスティックによる操作に応じ人間が搭乗した状態での前進歩行, 旋回, 横方向の歩行を行う様子が



Figure 1.13 HUBO FX-1 of Jun-Ho Oh in 2005[80].



Figure 1.14 iBOT of Independence Technology L.L.C.[81]

発表されている。i-foot は全高 2360 mm, 重量 200 kg の人間搭乗型 2 足歩行ロボットであり, 可搬重量は 60 kg, 歩行速度は 1.35 km/h と発表されている。この i-foot は 2005 年の愛知万博において人間を搭乗させての平面内歩行のデモンストレーションを行っている。これらは本論文執筆時の段階で詳細が明らかになっていないが, i-foot はその大きさと重量から住環境での運用は不可能であり, やはり本研究とは若干の方向性の相違が認められる。また階段昇降の成功に関する発表もない。

韓国 KAIST の Jun-Ho Oh らは 2005 年末に人間搭乗型 2 足歩行ロボット HUBO FX-1 を発表している (図 1.13)。本論文執筆時の段階で論文等は確認できず詳細は不明であるが, 研究室のウェブサイト[80]を見ると, ロボットの大きさは全高 1.75 m, 重量 150 kg と i-foot に近く大型であり, やはり本研究とは若干の方向性の相違がある。

また車輪を用いたものではあるが, 米 Independence Technology 社の階段や斜面, 段

差の昇降が可能な電動車いす「iBOT」は、人間が搭乗する移動機構として高い完成度を持つ[81]。これは通常時は4輪型の電動車いすであるが、4つの能動輪を備えるシャシと人間の搭乗するシート部が2つの能動関節で接続されており、不整路面や斜面の走行時、微小な段差乗り越え時にシート部を水平に保つ機能がある。またこの能動関節を用いて4つの能動輪のうち2輪のみで倒立振子としての走行や姿勢保持が可能となっており、この際にはちょうど直立時の健常者と同じ目線になるように設計されている。4輪駆動のために多少の段差の昇降能力もあり、また前輪2輪と後輪2輪を交互に接地させる動作により階段昇降も可能となっている。しかしながら車輪式であるために機構的に踏んではいけないものの散らばっている室内での運用は対象としておらず、また階段昇降に頑強な手すりを必要とすることや横方向への移動が不可能であることなどの問題がある。また米国内ではすでに実用化されているが、可搬重量は120 kg、重量は131 kgであり、日本の木造家屋での使用は現実的ではない。

以上、人間が搭乗できる2足歩行ロボットを中心に、本研究に関連する研究・開発事例を見てきた。これらのうち本研究と目的の近いものを表1.3にまとめておく。表中「?」の文字は詳細が不明であるもの、「△」の文字は限定的に可能と報告されているものを示す。

この表からわかるように、人間が搭乗して2足動歩行を行うロボットを開発し、その評価実験を行った例は本研究以前には皆無であったといえる²。

また、ここで搭乗型ロボットの性能を評価するために、「積載重量比 (Payload-Weight Ratio)」という基準を提案し導入する。

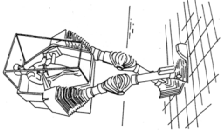
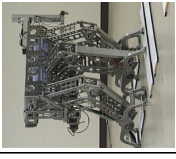


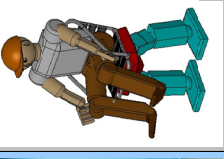
$$r_{PW} = W_p / W_o \quad (1.1)$$

ここで、 r_{PW} : 積載重量比、 W_o : 搭乗型ロボットの自重、 W_p : 搭乗型ロボットの最大積載重量であり、この数値が大きいほどロボットの自重に対し最大積載重量が大きくなる。また、人間搭乗型であれば最大積載重量は大きくても150 kg程度あれば十分と思われるので、この数値が大きければ大きいほどトータルとしての重量が小さくなり、住環境における運用が現実的となる。

² 本論文執筆時の段階でトヨタ自動車株式会社は「i-foot」の試作機により人間搭乗平面内2足動歩行に成功しており、2004年3月11日にマスコミに公開しているが[78]、筆者はこれ以前の2003年10月8日に人間搭乗平面内2足動歩行に成功し、翌月21日にマスコミに公開、またトヨタ自動車株式会社の発表の3日前の2004年3月8日に、第9回ロボティクス・シンポジウムにて学会発表している[82]。また同社は2004年12月3日に「i-foot」を発表し[79]、その席上で「階段昇降にも成功している」と発表した。以降本論文執筆時までデモンストラレーションや映像の公開は確認できていない。筆者は2005年4月28日に人間搭乗2足階段昇降をマスコミに公開し[83, 84]、2005年8月2日～6日のIEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systemsにて学会発表している[85]。

「HUBO FX-1」に関しては、発表自体が本研究以降のものであることは言うまでもない。

Table 1.3 Comparison between this study and related studies.

Developer	Baldwin	Mosher	Kamada	Takeda	Independence Technology	Toyota Motor	Oh	Sugahara	Sugahara (Long-term Objective)
Name	?	?	My Agent	Walking Chair	iBOT	i-foot	HUBO FX-1	WL	
Figure									
Year	1966	1968	1994	1999-	2003	2004	2005	2001-	2006-
Walking mode	?	Bipedal	Pseudo-bipedal	Static tripod	Wheeled	Dynamic Biped	Dynamic Biped	Dynamic Biped	Dynamic Biped
Unladen Weight	?	?	?	?	131 kg	200 kg	150 kg	60 kg	40 kg
Payload	?	?	?	?	120 kg	60 kg	100 kg	60 kg	100 kg
Payload-Weight Ratio	?	?	?	?	0.92	0.3	0.67	1	2.5
Adaptable Area	Even terrain	×	○	○	○	○	○	○	○
	Uneven terrain	×	×	△	○	?	?	×	○
	Rough terrain	×	×	?	×	?	?	×	○
	Stairs	△	×	×	○	?	?	○	○
Surface where the landable area is limited	×	×	×	×	×	?	?	×	○
	×	×	?	?	○	×	×	×	○
Human-living Environment	○	×	○	○	○	○	○	○	○
Realization	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Practical application	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表中に示したこの値を見ると、i-foot は 0.3, HUBO FX-1 は 0.67 となっている。これらに対し iBOT は 0.92 と高い数値を誇っているのがわかる。

表中 8 列目の水色の網掛けをした部分には、本研究で開発を目指す人間搭乗型 2 足歩行ロボットの 1.3.1 で述べた開発目標を示した。本研究で開発を目指す人間搭乗型 2 足歩行ロボットの積載重量比は 1 程度を目標とする。

表中 9 列目の灰色の網掛けをした部分には、1.3.2 で述べた、本研究の成果を元に中長期的に開発してゆくべき 2 足歩行型車いすのあるべき仕様を示した。本論文においては重視しない不整地歩行能力や着地点選択能力についても研究を行うことが必要となるであろう。自重は 40 kg 程度にして最大積載重量が 100 kg 程度を達成できれば、積載重量比は 2.5 となり、人間の住環境における運用も現実的となると思われる。

1.5 本論文の構成

前述したように、本研究では、人間を搭乗させて歩行できる 2 足歩行ロボットについて、その機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に試作した人間搭乗型 2 足歩行ロボットを評価することによりその有効性を実証することを目的とした。

そしてこの目的に対し、図 1.15 に示す 4 機の 2 足歩行ロボットを開発した。図中 WL-15 は 2001 年～2002 年に開発された、実際に人間が搭乗できる 2 足歩行ロボットの開発に対する先行試作機であり、このロボットは重量物を積載する能力を持たなかったが、これにより脚機構にスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムを用いての 2 足動歩行を実現した。WL-16 は 2002 年～2003 年に開発された、実際に人間を搭乗させて歩行させることを目的として開発した試作機であり、基本的な自由度構成は WL-15 と同様のまま、直動アクチュエータをはじめとする各部の機構設計を見直し、WL-15 より軽量でありながら高い推力と広い脚可動範囲を持つ試作機である。また仮想コンプライアンス制御を導入することにより世界初となる人間を搭乗させての 2 足動歩行に成功した。WL-16R は 2003 年～2004 年に開発された WL-16 の改良機であり、自重支持トルク低減機構を開発し装備することにより、ロボット自体の重量より重い体重 94 kg の成人男性を搭乗させての 2 足動歩行を実現した。また ZMP と姿勢角のフィードバック制御を導入し、未知の傾斜路面における安定歩行に成功した。WL-16RII は 2004 年～2005 年に開発された WL-16 の 2 次改良機であり、脚機構の一部を改良し軌道生成におけるパラメータのチューニングを施すことにより、体重 60 kg の成人男性を搭乗させての 2 足階段昇降に成功した。

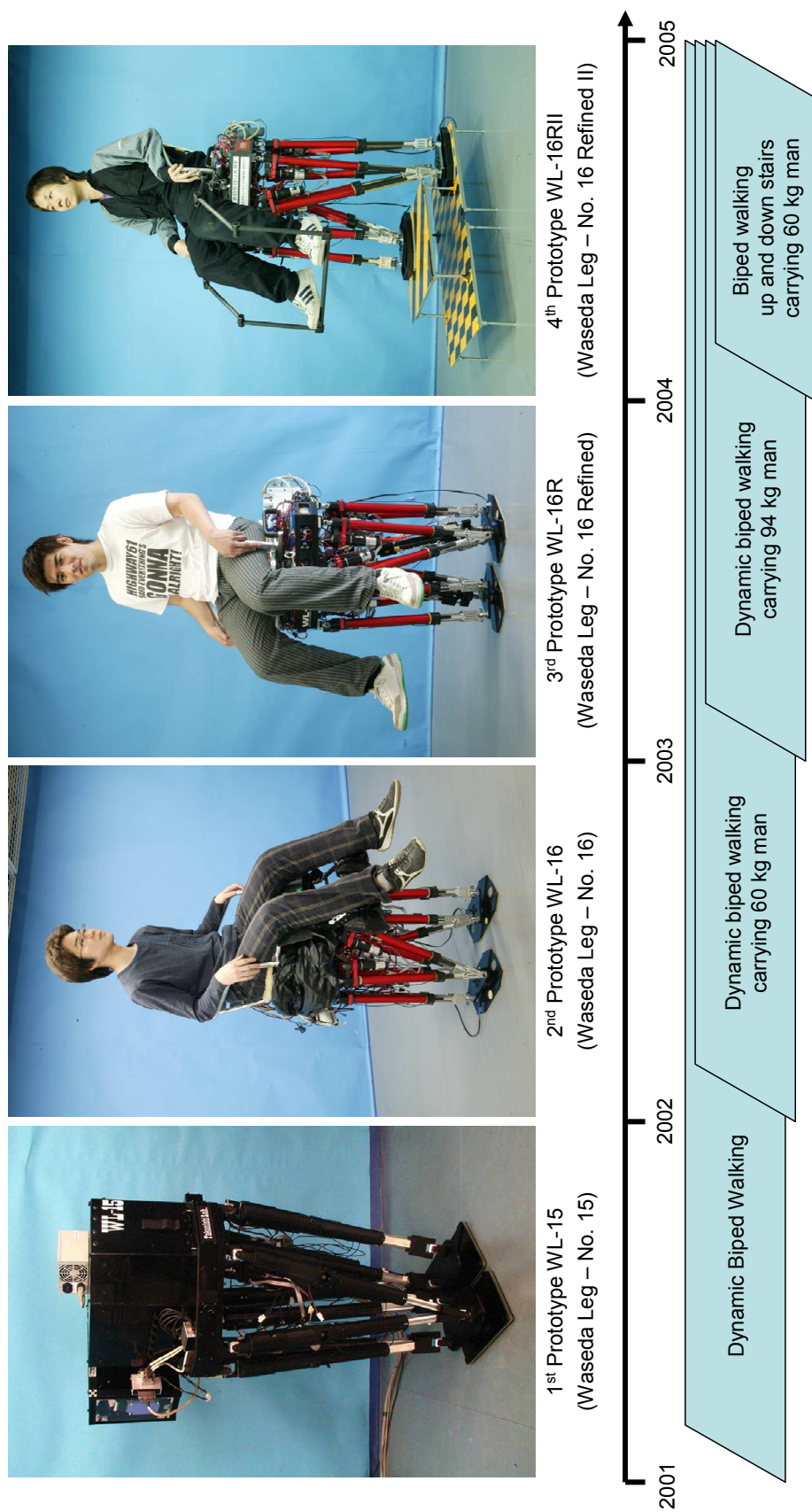


Figure 1.15 Prototypes of multi-purpose biped locomotor WL series.

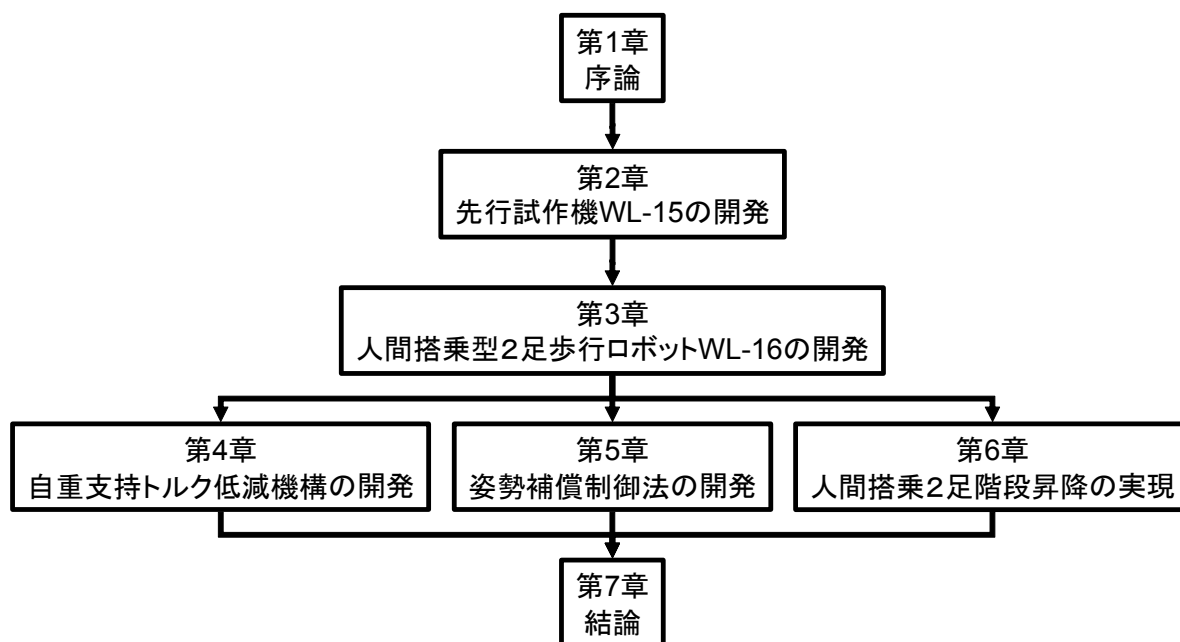


Figure 1.16 Configuration of this thesis.

本論文は全7章で構成されており、その構造は図 1.16 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、その社会的・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、先行試作機 WL-15 の機械モデルと歩行制御法、評価実験と考察について述べる。第3章では、WL-15 の開発において得られた知見に基づき新たに開発した試作機 WL-16 について、機械モデルと仮想コンプライアンス制御、またこれらを用いて行った評価実験と考察について述べる。第4章では、アクチュエータの出力を増すことなく準受動的な機構によるエネルギー効率の向上と可搬重量の増大を目的として開発した自重支持トルク低減機構について、その開発と評価実験、考察について報告する。第5章では、未知の不整路面における安定歩行を目的として開発した姿勢補償制御法について、その開発と評価実験、考察について述べる。第6章では、脚機構の一部を改良し軌道生成におけるパラメータのチューニングを施すことにより行った、体重 60 kg の成人男性を搭乗させての2足階段昇降について、その詳細と評価実験、考察について述べる。最後に第7章においてこれらの研究成果を総括し、本研究によって得られた知見をまとめ、また本研究の将来性について議論する。

第2章 先行試作機 WL-15 の開発

- 2.1 はじめに
- 2.2 基本設計
- 2.3 ハードウェアの設計
- 2.4 歩行制御法
- 2.5 評価実験と考察
- 2.6 まとめ

2.1 はじめに

前述したように本研究の目的は、2足歩行型の車いすや汎用移動台車の開発につながる基礎研究として、人間が搭乗できる2足動歩行ロボットを開発することにある。しかしながらこれまでの2足歩行ロボットに関する研究はそのほとんどが2足ヒューマノイド・ロボットの開発を最終目標としており、前章1.4節で述べたように、本研究で目指すような、脚と腰部のみで構成され重量物を積載して歩行することを目的として開発されてきた2足歩行ロボットの研究例は無かった。

このため本研究では、はじめに脚と腰部のみで構成され、小型・軽量で電池により自立歩行が可能であり、重量物を積載して歩行するのに適した構造の2足歩行ロボットを試作し、これにより問題点を考察することを考えた。

この先行試作機 WL-15 (Waseda Leg - No.15) は2001年～2002年に開発された、実際に人間が搭乗できる2足歩行ロボットの開発に対する先行試作機である。本章では、WL-15の機械モデルと歩行制御法、評価実験と考察について述べる。

2.2 基本設計

2.2.1 機能的要求

WL-15 は実際に人間が搭乗できる2足歩行ロボットの開発に対する先行試作機として開発した。従って基本設計にあたり次のような機能的要求を設定した：

- A. 片脚 6 自由度を持つこと** 平地のみでなく不整地や傾斜路面などでの全方向への歩行，階段昇降を可能とし，安定化のために腰軌道や足部位置および姿勢軌道の変更を行う必要があることを考えると，片脚 6 自由度が必要となる．これは 2 足ヒューマノイド・ロボットの設計論ではポピュラーな考え方ではあるが，パラレルメカニズムにおいてはその機構の選択肢を大きく左右する．
- B. 積載可能重量が大きいこと** 人間が搭乗するためには，少なくとも 60 kg 程度の重量が積載可能である必要があるが，通常の 2 足ヒューマノイド・ロボットでは上体部はここまで重いことは多くなく，この点でも通常の 2 足ヒューマノイド・ロボットの脚機構とは異なる設計論が必要になる．
- C. ロボット本体は軽量であること** B.とも関連するが，自立稼働に必要なコンピュータなどをすべて搭載した状態で積載重量比 1.0 程度を目指すには，他のすべての機能的要求を満たしつつロボット自体の重量を 60 kg 程度に抑える必要がある．すなわちロボット本体は軽く，積載可能重量は大きくという相反する機能的要求を満足することが本ロボットの設計において重要となる．
- D. 高い自立性を持つこと** これは，具体的には制御用コンピュータやバッテリーをロボット本体に搭載することが必要であることを意味する．
- E. 低コストであること** 本研究の段階で検討できる方法は限られているが，共通部品を多く使用するなどにより生産コストを下げることは可能であると思われる．

2.2.2 パラレルメカニズムを用いた脚機構の基本設計

これらの機能的要求，特に高い可搬重量という本ロボットに特有の機能を満足するため，本研究ではパラレルメカニズムに着目した．

これまで多く研究されてきた 2 足歩行ロボットでは，後に述べるごく少数の例を除き脚機構にはシリアルメカニズムが用いられている[10-16, 20]．これは 2 足歩行ロボットの研究が人間の歩行を模倣するところから始まったことや，2 足歩行を実現させるためには機構よりも以下に制御するかという問題のほうが大きい問題領域であると捉えられていたことが原因と考えられるが，2 足歩行にはあらゆる意味でシリアルメカニズムが最適であると実証した報告は筆者の知る限り無い¹．

舟橋[86]と内山[87]の論文を参考に，表 2.1 に一般的なパラレルメカニズムとシリア

¹ 人間の筋や骨が歩行に適した配置や形状になっていることを示した研究は数多くあるが，これは 2 足歩行にシリアルメカニズムが適していると実証したことにはならない．本ロボットは重量物を多く搭載して歩行できる能力が求められるが，このような機能的要求を満たすべく開発された 2 足歩行ロボットの研究例はないし，無論このような要求は人体に求められる機能でもない．

Table 2.1 Features of Serial / Parallel Mechanism

Features	Serial	Parallel
Position error	Accumulation	Mean
Stiffness	Low	High
Output power	Low	High
Working area	Wide	Narrow
Inverse kinematics	Difficult	Simple
Forward Kinematics	Simple	Difficult

ルメカニズムの比較を示す。短所は赤字，長所は青字で示した。

このようにパラレルメカニズムには，シリアルメカニズムに比べ一般的には：

- ・ 位置誤差が平均化されるために高精度な位置決めがしやすいこと。
- ・ 干渉駆動させるために剛性や出力が高いこと。

などの長所がある。これらは逆に言えば，低出力のモータや剛性の低い構造部材を用いても十分な剛性や出力を得られると言い換えることもできる。

また，反対に：

- ・ 可動範囲が狭い

という短所が一般的に存在する。

脚機構にパラレルメカニズムを用いた歩行ロボットの研究例を見てみると，4足型など2足以外の歩行ロボットでは，前章で触れた Sutherland の6足歩行機械や Waldron らの ASV など，脚機構の一部にパラレルメカニズムを用いた研究例が古くから多く散見される[8, 59, 61-63, 88-90]。これは2足歩行ロボットが人間を模倣する目的で研究が始まった[31]のに対し，多足歩行ロボットは不整地移動機械としての現実的な応用性を念頭に行われてきたことが原因と思われる。

注目すべき例としては，広瀬らの「Para Walker」は6足歩行ロボットではあるが，そのうち3脚ずつの相対的位置関係は固定されており，その2組の脚部を6自由度パラレルメカニズムによって連結したものである[91, 92]。これは主に脚部同士の連結に高い剛性と出力を見込み，また機構的に歩行時に用いる可動範囲が狭くても問題がないことが理由であると考えられる。

2足歩行型としては，古くは舟橋らの開発した2足歩行ロボットは脚機構がパラレルメカニズムとなっており[91-94]，限られた能動自由度で定常歩行運動を得，他のいくつかの自由度で足部の路面に対する適応運動などを作り出す興味深い機構がさまざまに提案されている[95]。

しかしながらこれは6自由度空間機構への発展が難しく，また機構の総合により脚

軌道を作り出すことに重きが置かれており、重量物を積載する高負荷での安定歩行を目的とした本研究とは視点が異なる。

第1章で触れた鎌田のマイエージェントもその脚機構に部分的パラレルメカニズムを利用している[64-67].

広瀬らの恐竜型2足歩行ロボット「TITRUS」は、走行を含む高速な動歩行を行うことを目的とし、高出力なパラレルメカニズムを脚機構に採用した提案例である[98-103]. 初報[98]ではスチュワート・プラットフォーム[104]を脚機構に用い、次報以降[99-103]ではより可動範囲の広いパラレルメカニズムを開発したことが報告されている。

内海らは、内骨格式2足歩行ロボット「ISR-1」において、その脚機構にパラレルメカニズムを用いている[105-108]. これは脚機構の軽量化を主として目的にしており、外骨格構造との機構剛性や出力の評価も行っている。

M. Gienger らの2足ヒューマノイド・ロボット「Johnnie」[17]では、その2自由度の足関節に江村らのもの[90]に似たパラレルメカニズムが使われている。これは足部が左右に短く前後に長いのが一般的であるから、ZMPの存在範囲を考えればRoll軸よりPitch軸を駆動するモータにより大きい出力が必要となり、また走行を視野に入ればさらに大きな出力がPitch軸駆動モータに必要となるため、干渉駆動を用いることを考えたためであると考えられる。

以上見てきたように、歩行ロボットにパラレルメカニズムを採用した例は多くあり、2足歩行ロボットに関する研究例もあるが、特にその出力や剛性が大きいという特性を利用し大きい可搬重量を実現しようとする研究はなかった。

これらに対し、本研究では6自由度パラレルメカニズムを脚機構に用いることにより、軽量化を図りつつ大きな機構剛性や出力を得、これにより大きい可搬重量を実現することを着想した。

具体的には、2.2.1項で述べた機能的要求より：

- ・ A. 片脚6自由度を持つこと—6自由度のパラレルメカニズムを採用することで満足できる。
- ・ B. 積載可能重量が大きいこと—出力や剛性が高いというパラレルメカニズムの一般的特徴を利用できる。
- ・ C. ロボット本体は軽量であること—出力や剛性が高いというパラレルメカニズムの一般的特徴を利用すれば、シリアルメカニズムと同等の出力、剛性、位置精度を実現するのに、出力の低いアクチュエータや剛性の低い材料を使用でき、ロボット本体の軽量化も図ることができる。
- ・ D. 高い自立性を持つこと—上記のように出力の低いアクチュエータの使用が可

能であれば、油圧アクチュエータなど軽量のロボットで自立性を保つのが困難なアクチュエータを用いる必要がなく有利である。

- ・ E. 低コストであること—6 自由度パラレルメカニズムは一般に部品点数は多い反面、共通部品を多く設計することができて量産効果が高いため、量産した場合には製作コストが低減しやすい。

これらのことから、本研究ではパラレルメカニズムを脚機構として採用し、先に述べた機能的要求を満足しようと試みた。

中でも、WL-15 には一つの能動直進対偶と 2 つの受動球対偶で構成されるスチュワート・プラットフォームを採用した。

パラレルメカニズム全般の一般的な特徴以外に、この機構固有の特徴としては：

- ・ 2 つの球対偶間のリンクには曲げモーメントが作用しないため、軽量のリンクで大きな剛性が得られること。
- ・ 基準姿勢において鉛直軸方向に力を発揮しやすいこと。

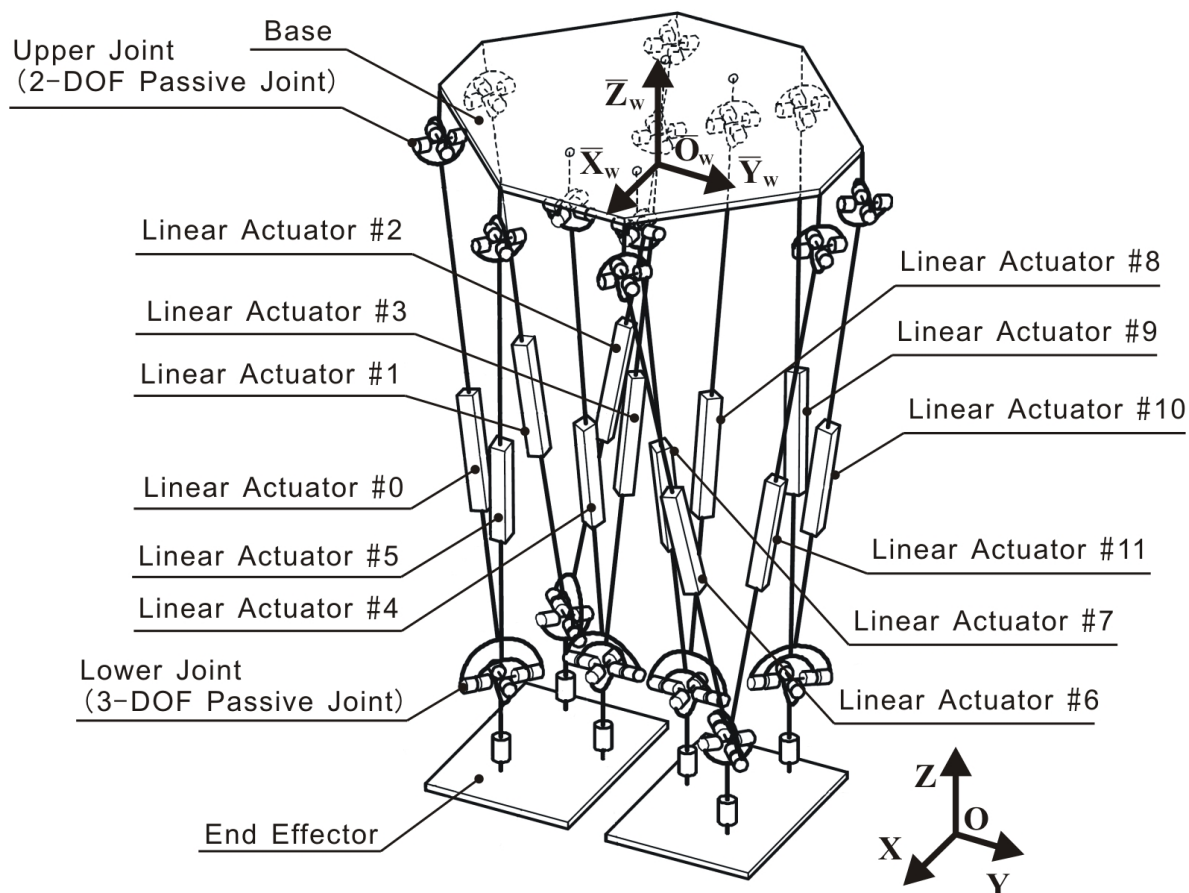


Figure 2.1 DOF configuration of WL-15.

- ・ 重いアクチュエータを腰部近くに配置することが可能で、可動部の質量増大が回避できること。

などの利点がある。

これに対し欠点としては：

- ・ 特に可動範囲が狭いこと。

が挙げられる。これについては、木製のモックアップを作成しリンク配置に関して調査することにより詳細な寸法を決定した。

WL-15 の自由度配置図を図 2.1 に示す。

2.3 ハードウェアの設計

2.3.1 リニアアクチュエータの設計

能動直進対偶はコストの低減，メンテナンス性の向上を図り，左右合計 12 個すべて共通のリニアアクチュエータとして設計した。

歩行周期 0.5 s/step の歩行が可能となるように，リニアアクチュエータは垂直方向に質量 12.5 kg を 1 往復 1 秒以下で搬送可能であることを設計仕様とした。また前述のモックアップを用いた検討から，水平方向 400 mm，垂直方向 150 mm の可動範囲を可能にするためストローク 200 mm を仕様とした。製作したリニアアクチュエータの写真と分解図を図 2.2，2.3 に示す。

脚部の駆動力源には 150 W の DC サーボモータを使用した。モータの最高回転数でネジ軸が危険速度を超えないよう減速比 3.5:1 の遊星ギアを取付けている。

また本研究では特に，ロボットが停止している際のエネルギー浪費を防ぐ目的として，通電するとブレーキが解放する負動作電磁乾式ブレーキを組み込んだ。これによりシステムの非稼働時にも姿勢を保持することが可能となっている。このブレーキは制御用コンピュータおよび外部スイッチからの入力により作動する。

ねじ軸に関しては，高速動作を可能にするためリードを大きくする必要があるが，ボールネジは軸径の 2 倍以上のリードのものを作ることが技術的に困難であり，リードを大きく取ると軸径も増加し全体の肥大化や質量増加，可動範囲の減少につながる。これらの理由から滑りねじを選定した。一般に滑りネジは効率が 30~40 %程度と知られているが，ナットに強度，すべり特性，耐磨耗性に優れた自己潤滑性ポリアセタールを使用することにより摩擦係数は低く，またボールねじと比較して大幅に軽いという特徴もある。リードは 25 mm とした。

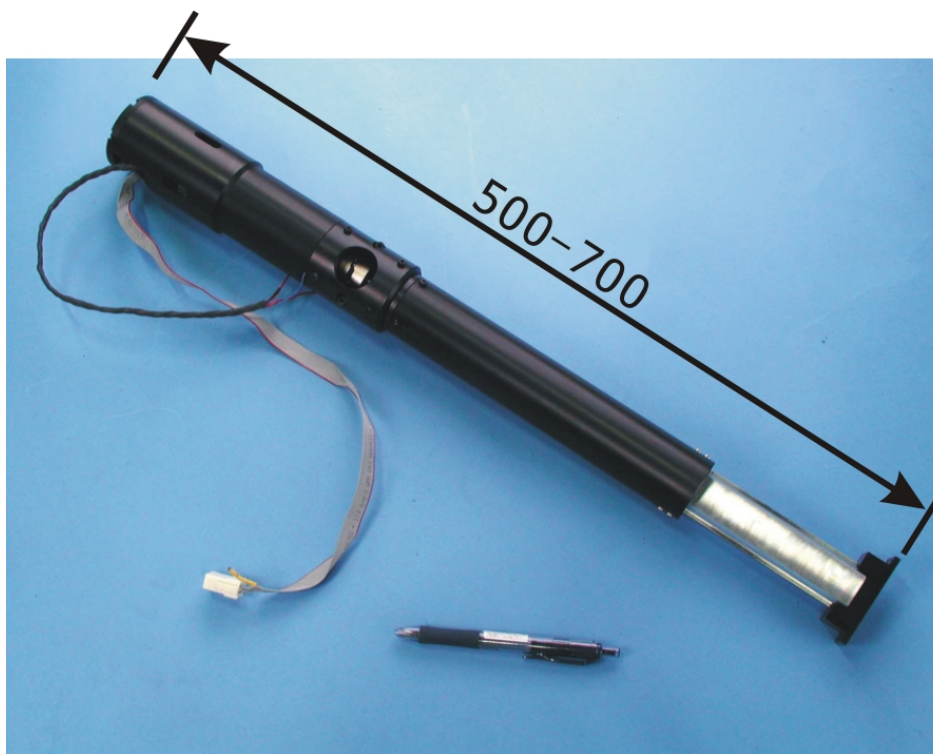


Figure 2.2 Photograph of linear actuator developed.

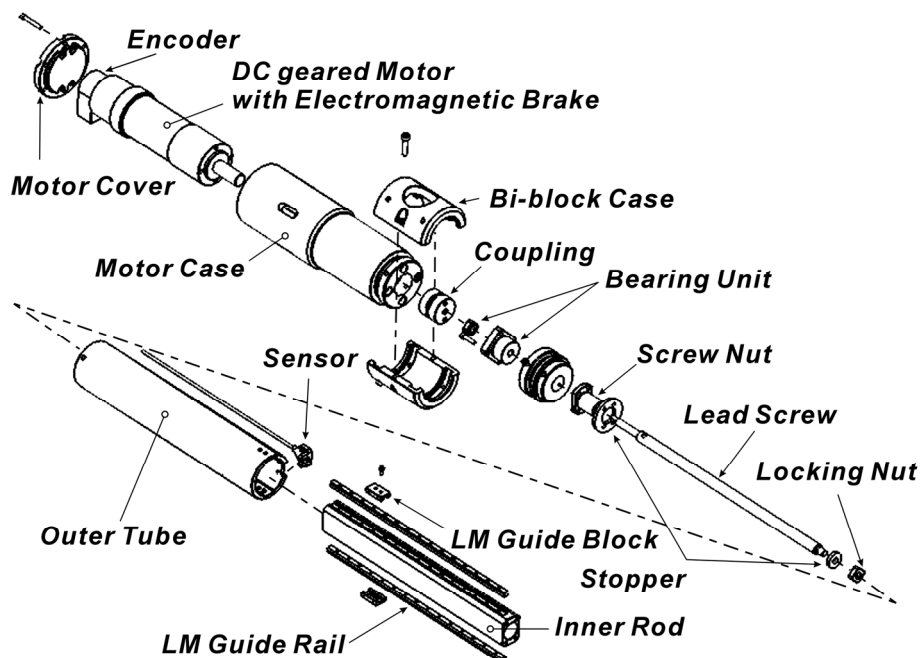


Figure 2.3 Exploded view of linear actuator developed.

構造材料に関しては、機構自体の剛性が高いことを見込んで各リンクの剛性を低下させても軽量化を図った。繊維強化プラスチックはコストの問題から困難であると判断し、低コストであることと優れた特徴、また業者に加工のノウハウがあることから比重約 1.4 のポリアセタールを材料として選定した。

これらの方法により、モータ重量が約 1 kg, その他の構成部品約 1 kg と直動リンク 1 つで計 2 kg となっている。サーボドライバの重量に関しても同出力の一般的な AC サーボドライバに比べて 1 軸あたり 1/10 程度となっている。

2.3.2 受動ジョイントの設計

受動ジョイントに関しては、市販のボールジョイントは可動角が最大 20 deg 程度しかないため、エンドエフェクタの作業範囲が制限されないよう、最小可動角 45 deg の 2 自由度受動ジョイントや、ジンバル対偶と回転対偶を組み合わせる事で 3 自由度の受動ジョイントを設計した。ともにロボットに搭載する個数が多い事から低コスト化を見込んでそれぞれに互換性を持たせた。

ジンバル機構は低速回転で運動をし、高荷重、衝撃荷重を伴う可能性がある。また、エンドエフェクタやベースに配置する際、相互に干渉しないよう小型にする必要がある。上の理由から、軸受には安価・軽量の無給油ブッシュを使用した。部品はリニアアクチュエータ部と同様ポリアセタールを主に用い軽量化を図った。

この結果ロボットの作業領域はジンバルの可動範囲の制限に影響を受けることは無く、同時に下部 3 自由度受動ジョイントは 380 g, 上部 2 自由度受動ジョイントは 150 g と軽量となっている。

開発した上下部受動ジョイントの分解図を図 2.4 と 2.5 に示す。

2.3.3 骨盤の設計

2 足歩行ロボットの歩行を不安定にするモデル誤差は、股関節部構造のロール軸周りのたわみによるものが顕著にあらわれることが知られている[109]。WL-15 においては脚機構に平行メカニズムを用いるため、骨盤部の形状は通常の 2 足ヒューマノイド・ロボットの股関節部とは大幅に異なることになる。骨盤は図 2.1 に示したように 2 組のスチュワート・プラットフォームのベースとなり、単脚支持期には通常の 2 足ヒューマノイド・ロボットの骨盤に比して大きな曲げモーメントが作用する。また構造が大型になるため、設計によって重くなりやすい。このため 2 足ヒューマノイド・ロボットの骨盤に比して大幅に高剛性かつ軽量の構造の実現を図る必要があった。

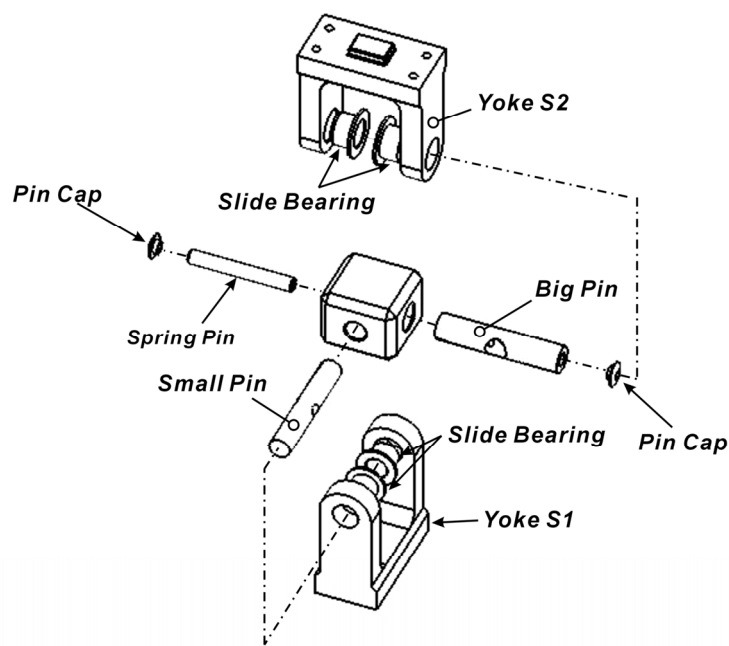


Figure 2.4 Exploded view of upper 2-DOF passive joint.

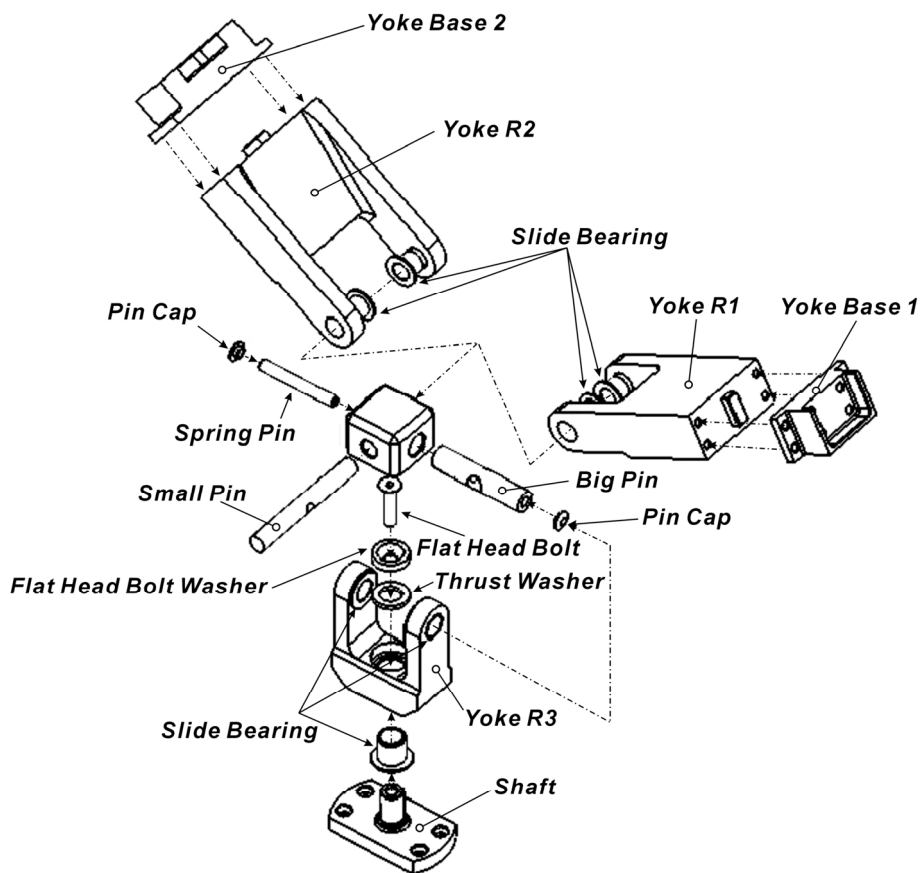


Figure 2.5 Exploded view of lower 3-DOF passive joint.

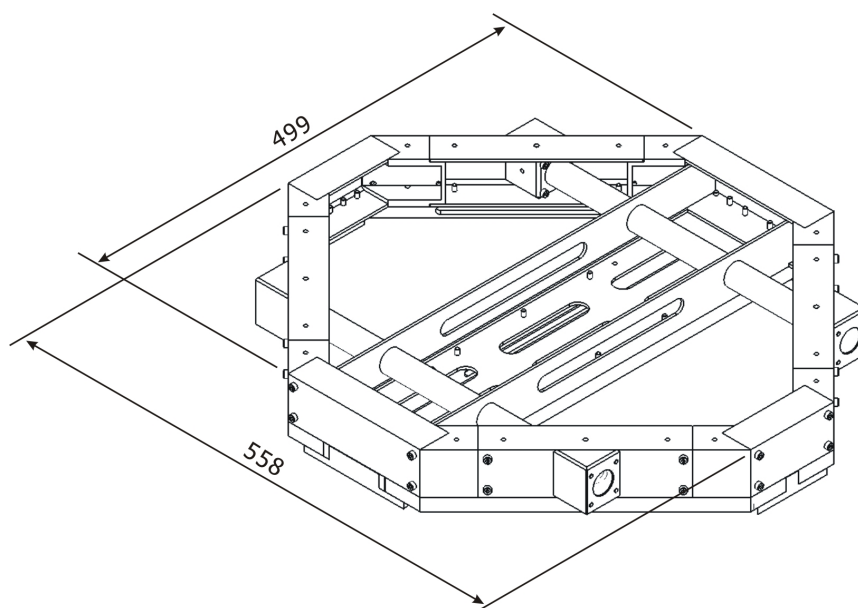


Figure 2.6 Outline of pelvis developed.

そこで WL-15 では、骨盤を C 形チャンネルのフレームやパイプで構成する方法をとった。骨盤を上方から見た図を図 2.6 に示す。主要なフレームは肉厚 3 mm、高さ 50 mm のアルミニウム合金 A7075 を使用した C 形であり、構造を閉じることによって、負荷に対する剛性を高めた。さらにステンレス鋼 SUS304、肉厚 0.5 mm のパイプを貫通させ、ロール軸周りの曲げ剛性を高めた。また、メンテナンス性も考慮して 2 本のリニアアクチュエータを取り付けたままで組立・分解できるように設計した。重量は 5.4 kg である。

2.3.4 電装の設計

各アクチュエータを制御する制御用コンピュータはロボット上に搭載した。制御用コンピュータは歩行パターン生成用の外部コンピュータと LAN を介して接続され、作成されたパターンに応じて DC サーボモータ 12 個を制御する。制御システム全体の構成図を図 2.7 に示す。

状態検出センサとしては、各アクチュエータにロータリーエンコーダおよび初期位置検出用のフォトマイクロセンサ、両足部に 6 軸力覚センサ、腰部に 3 軸姿勢角センサを搭載した。

電源にはニッケル水素バッテリーを採用した。外観を図 2.8 に示す。公称電圧は 43.2 V、公称容量は 7.3 Ah となっている。また、バッテリー充電時の実験および長時間の連続実

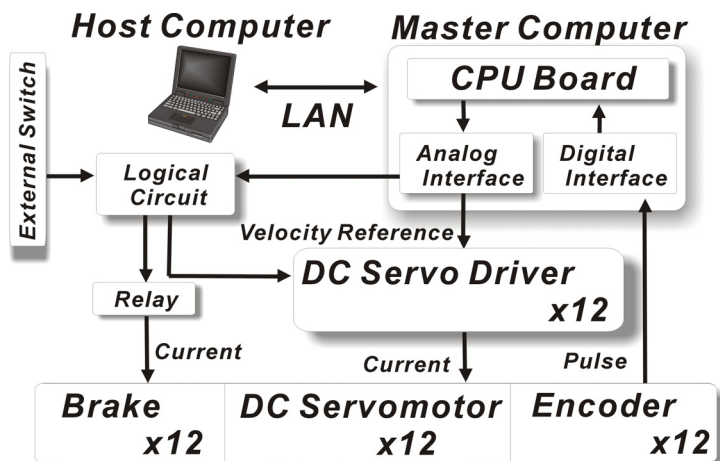


Figure 2.7 Control system configuration.

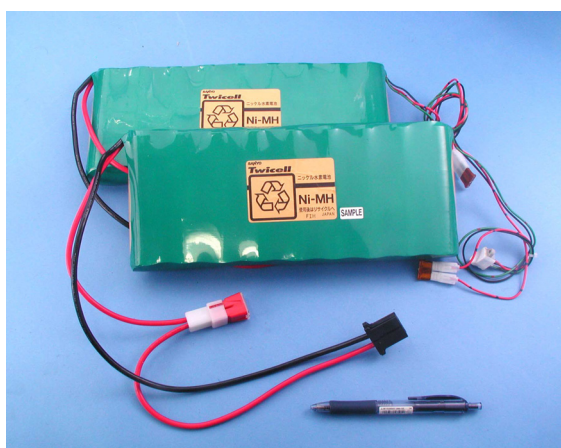


Figure 2.8 Ni-MH batteries.

験にも対応できるように外部直流電源による動作も可能にした。

2.3.5 WL-15 の仕様

開発した WL-15 の外形寸法図を図 2.9 に、仕様を表 2.2 に示す。また各部の名称を図 2.10 に、外形写真を図 2.11 に示す。

WL-15 は、2 本のスチュワート・プラットフォーム型の脚と腰部で構成されている。脚機構は片足につき 6 本の直動アクチュエータと上下の受動ジョイントを備える。バッテリーや DC サーボドライバ、3 軸姿勢角センサは骨盤上部に搭載され、制御用コンピュータは骨盤後部に搭載されている。足部は足底に床反力取得用 6 軸力覚センサを備える。

全高は基準姿勢で 1200 mm、重量は 57 kg（バッテリー除く）となっている。

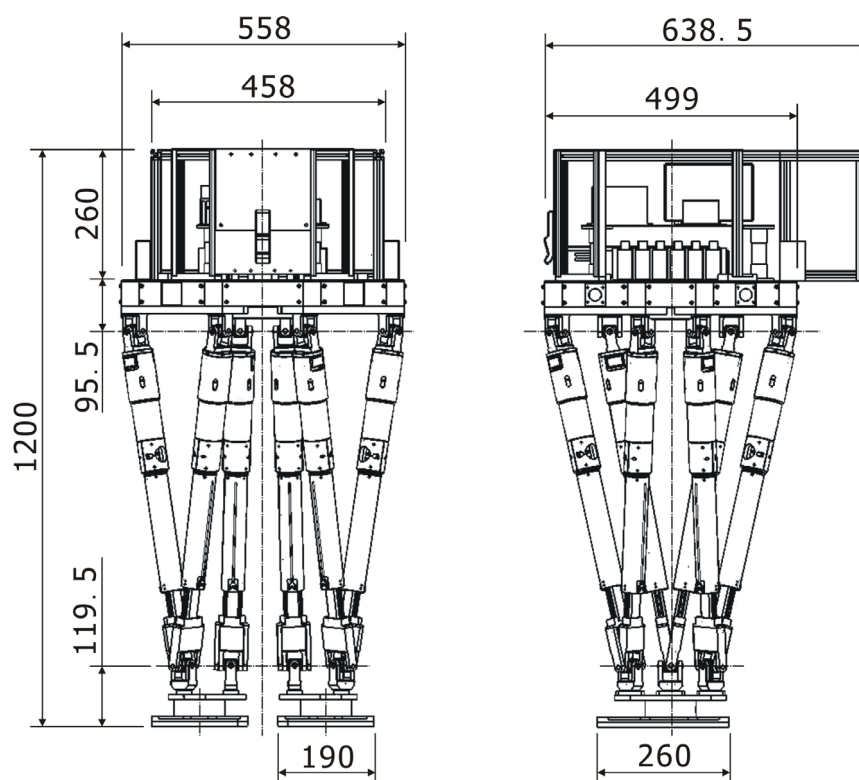


Figure 2.9 Assembly drawing of WL-15.

Table 2.2 Specifications of WL-15.

Model No.	WL-15
Dimension / Weight	
Height	1200 mm
Weight	57 kg
Mechanism	
Link Mechanism	Stewart Platform
Degrees of Freedom	6 x2
Actuator	
Motor	DC Servomotor
Rated Power	150 W
Lead of Slide Screw	25 mm
Stroke	200 mm
Computer / Electric System	
CPU	Pentium III 850 MHz
DC Servo Driver Type	Titech Driver Ver.1
Batteries	
Type	Ni-MH
Nominal Voltage	21.6 x2 V
Equipment	
Force / Moment sensor	IFS-100M40A x2
3-axis Angle Detector	GU-3024

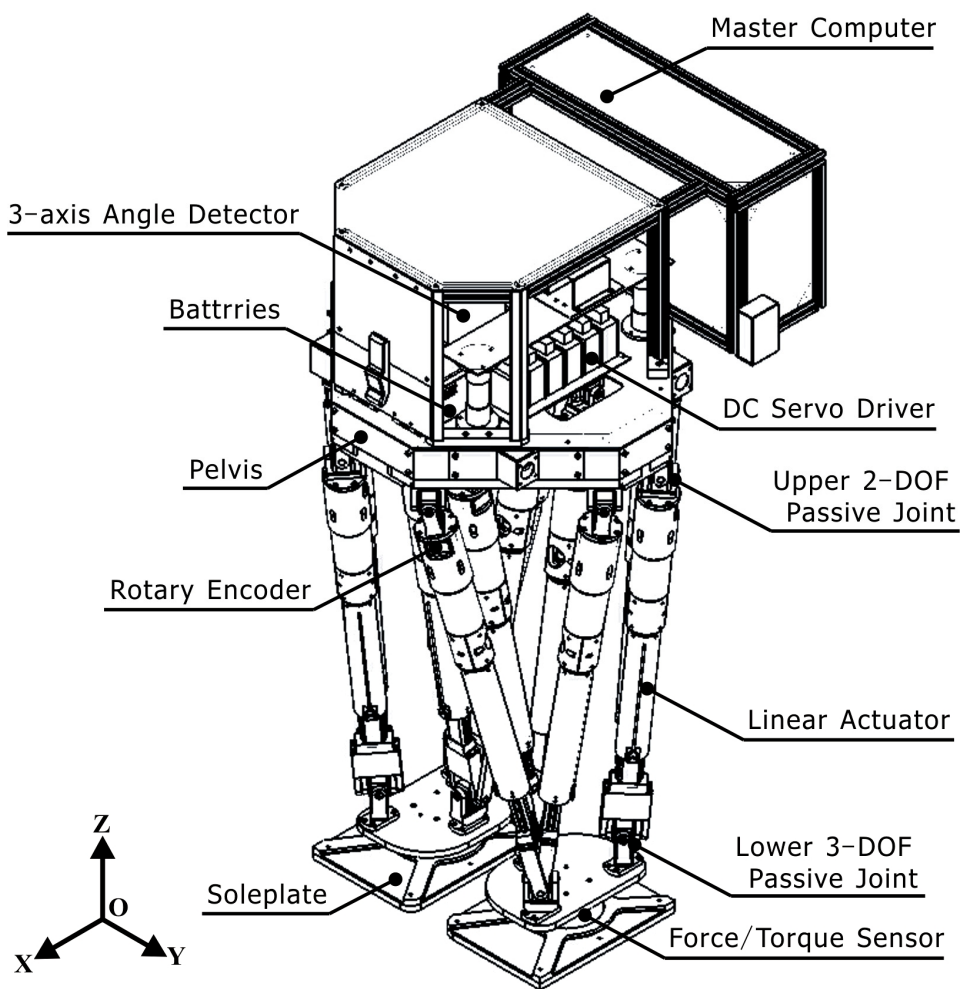
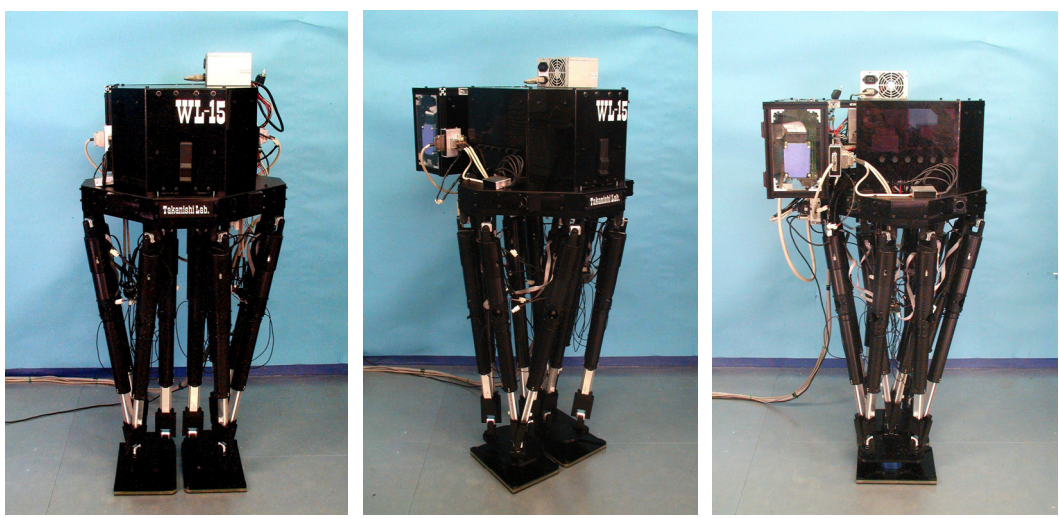


Figure 2.10 Outline of WL-15.



(a) Front view.

(b) Isometric view.

(c) Side view.

Figure 2.11 Photograph of WL-15.

2.4 歩行制御法

WL-15 は 6 自由度の 2 本の脚と腰を持つ 2 足歩行ロボットであるから、その歩行制御問題のうちその動歩行パターン生成問題はヒューマノイド・ロボットを含む従来の 2 足歩行ロボットのそれと基本的には同じであると考えた。

2 足歩行ロボットの歩行パターン生成に関する近年の研究例としては、長阪らは最適勾配法をもちいた歩行パターン生成を実現している[110]。これははじめに初期補償軌道を与え、最適勾配法により全歩行期間における設定 ZMP 軌道と計算 ZMP 軌道の偏差の 2 乗の積分値を最小化するよう繰り返し計算を用いて軌道を算出するものである。

西脇らは ZMP 方程式に若干の拘束を加え線形・非干渉化することで歩行パターンを高速生成している[111]。これはヒューマノイド・ロボットを構成する各リンクの各時刻の位置を水平並進方向にだけ運動するものとみなし、やはり ZMP 偏差がある許容値以内となるよう収束計算を行って軌道を算出するものである。

梶田らはロボット全身の運動量を与えそれを満足する軌道を計算する分解運動量制御[112, 113]や、目標軌道の未来値を利用することで最適なトラッキング制御を実現する予見制御を利用することによって効率的な歩行パターン生成を行う手法を提案している[114, 115]。分解運動量制御はロボット全体の運動量と角運動量をあらかじめ与え、これを実現する関節速度を逐次計算する手法である。予見制御理論を用いた手法は、歩行パターン生成を設定した ZMP 軌道を厳密に満たす軌道を求める逆問題ではなく、ZMP のトラッキング制御問題ととらえ、予見制御を利用して一定時間先までの ZMP 軌道から逐次歩行パターンを生成するものである。

これらに対し WL-15 の歩行パターン生成法は、筆者の属する研究グループがこれまで研究してきた、2 足ヒューマノイド・ロボットの ZMP 安定判別規範に基づく腰・体幹協調型 2 足歩行制御法[44, 47, 49, 116-119]を若干変更したものをを用いた。上記アルゴリズムは、任意の足先軌道による歩行動作に対し、腰と体幹によるモーメント補償動作により全身運動を安定化するというものであり、ハードウェアの構成を選ばないロバストな手法であるため、体幹の運動による補償を行わないことのみを修正を加え、本機の歩行制御法として用いた。

これについて以下に述べる。

2.4.1 ZMP 安定判別規範

歩行パターンを生成するにあたり、安定性を判別する必要がある。早稲田大学では、2足歩行ロボットに対して力学的視点から安定性を判定するために、ZMP 安定判別規範を用いてきた。以下に ZMP の説明および安定判別法を述べる。

2足歩行ロボットが歩行中に安定な支持状態を維持するために必要な条件を考える。2足歩行ロボットが安定な支持状態を保てなくなる、つまり転倒するという事は、足底部と路面との接点（3点以上）が形成する支持多角形（路面と足底接地点が形成する面積最大の凸多角形）のある辺または点を通る路面上の直線を軸に回転運動をしていると考えられる。すなわち、支持多角形から見て外向きのモーメントが作用していることになる。逆に言えば、支持多角形上の全ての辺および点まわりにおいて、鉛直軸周りのモーメントを除き外向きのモーメントが発生せず、内向きのモーメントのみ発生していれば、2足歩行ロボットは安定な支持状態を維持できる。このときの2足歩行ロボットの支持状態を考えると、足底の接地点が浮かないため、全ての接地点において2足歩行ロボットから路面に作用する重力および慣性力による力は路面を押し向きであり、これらの合力が作用する点 P（図 2.12）は足底の支持多角形内になければならない。この点 P 回りの合力による鉛直軸まわり以外のモーメントは明らかにゼロであり、この点を ZMP（Zero Moment Point）と呼ぶ²。

整理すると、ZMP とは路面上において2足歩行ロボットの各部の重力および慣性力によるモーメントがゼロになる点といえる。また、運動中のあらゆる瞬間において、ZMP が支持多角形内に存在し、（それ以前に支持多角形が形成されており、）かつ2足歩行ロボットから路面に作用する力が路面を押し向きであれば、2足歩行ロボットは安定して運動を継続できるといえる。これを ZMP 安定判別規範と呼ぶ。

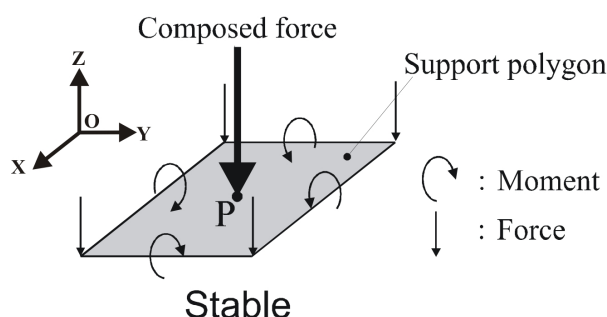


Figure 2.12 Support polygon and composed force.

² ZMP のアイデアは M. Vucobratovic と J. Stepanenko の 1972 の論文[120]において初めて提案された。もともとの定義は床反力の圧力中心点そのものである[121]。

2.4.2 フーリエ変換を用いた ZMP 安定判別規範に基づく 2 足歩行パターン生成法

本歩行パターン生成方式の概略は、モーメント補償軌道算出アルゴリズムを用いて、任意の下肢軌道および ZMP 軌道から補償軌道を算出し、それらの軌道を設定歩行パターンとして歩行ロボットをプログラム制御するものである。

本方式の要となる補償軌道算出アルゴリズムは以下の 4 点からなる。

- I. 2 足歩行ロボットのモデル化
- II. I のモデルにおける ZMP 方程式の導出
- III. 2 足歩行ロボットの近似モデル化
- IV. III の近似モデルを用いた繰り返し計算による II を満足するモーメント補償軌道の厳密解の算出
詳細を以下に述べる。

2.4.3 2 足歩行ロボットのモデル化

2 足歩行ロボットと路面のモデル化は次のような仮定および座標系の設定に基づいて行う。

- ① 2 足歩行ロボットは質点の集合からなる。
- ② 路面は十分に硬く、どんな力やモーメントが作用しても変形したり動いたりすることはない。
- ③ 2 足歩行ロボットの足底と路面との接地状況は点接地の集合とする。
- ④ X 軸（2 足歩行ロボットの正面方向に一致）および Y 軸を含む平面が路面に一致し、路面に垂直な軸を Z 軸とする直交座標系 O（右手系）を設定する（図 2.13）。
- ⑤ 歩行系と路面との接地点において、路面での回転（X, Y および Z 軸回り）に対する摩擦係数は無視できるほど小さい。
- ⑥ 2 足歩行ロボットが歩行する際の推進力は、接地点における並進（X および Y 軸）方向の滑りが生じない範囲とする。

2.4.4 ZMP 方程式の導出

前節のような仮定と設定のもとに、絶対座標系 $O-XYZ$ において、路面上の任意の点 P についてのモーメントの釣り合い式は以下のように表せる。

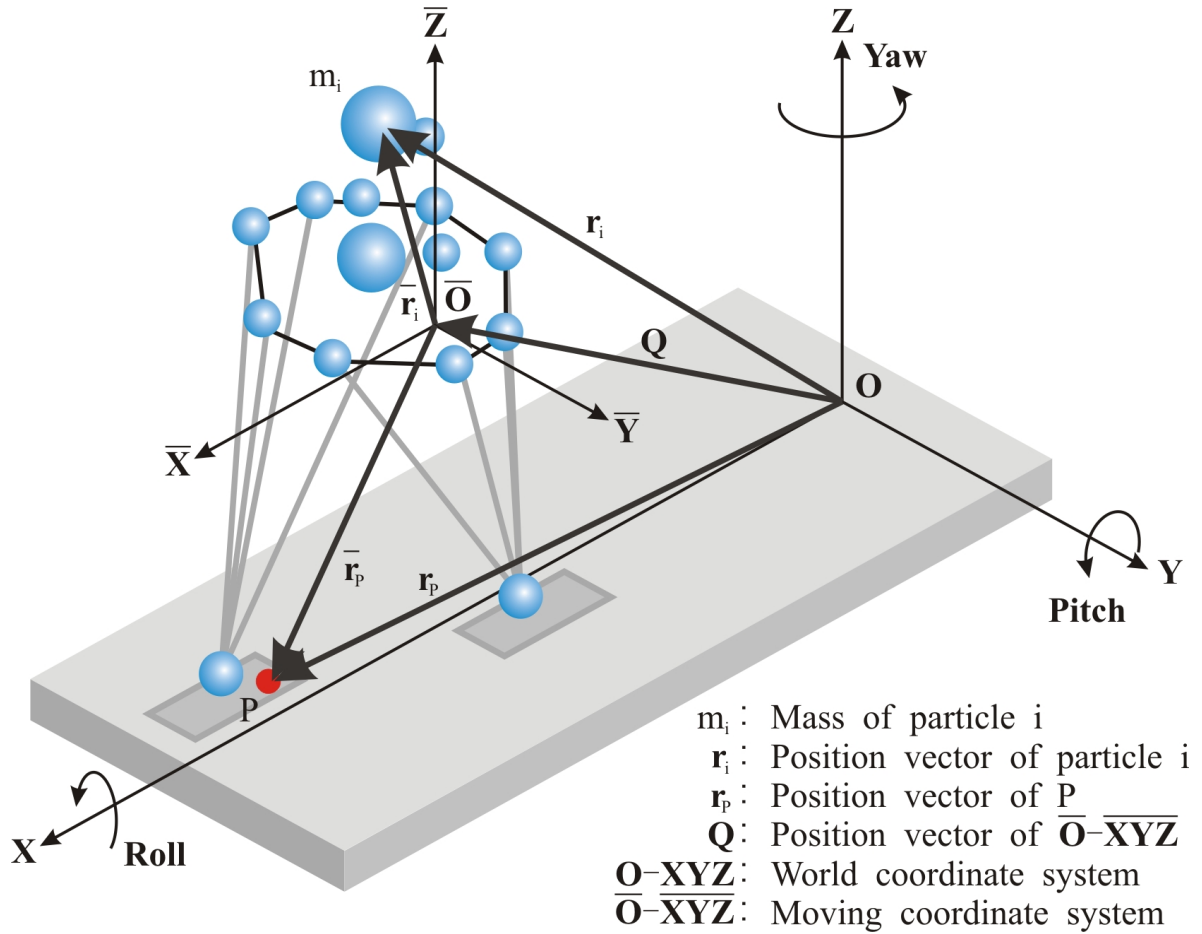


Figure 2.13 Definition of coordinates and vectors.

$$\sum_i^{\text{All Particles}} m_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_p) \times (\ddot{\mathbf{r}}_i + \mathbf{G}) - \sum_k^{\text{All Points}} \{ (\mathbf{r}_{Fk} - \mathbf{r}_p) \times \mathbf{F}_k + \mathbf{M}_k \} + \mathbf{T} = \mathbf{0} \quad (2.1)$$

式(2.1)において点 P を ZMP とすることで、次の ZMP 方程式を得る。

$$\sum_i^{\text{All Particles}} m_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{ZMP}) \times (\ddot{\mathbf{r}}_i + \mathbf{G}) - \sum_k^{\text{All Points}} \{ (\mathbf{r}_{Fk} - \mathbf{r}_{ZMP}) \times \mathbf{F}_k + \mathbf{M}_k \} + \mathbf{T}_0 = \mathbf{0} \quad (2.2)$$

ここで、ZMP の定義より $\mathbf{T}_0 = [0, 0, T_z]^T$ である。

さらに、各部の相対運動を考えるために、図 2.13 に示す 2 足歩行ロボットの腰部付近を運動する運動座標系 $\bar{O}-\bar{XYZ}$ を設定する。この座標系を用いて ZMP 方程式を表すと次式を得る。

$$\sum_i^{\text{All Particles}} m_i (\bar{\mathbf{r}}_i - \bar{\mathbf{r}}_{ZMP}) \times \left\{ \ddot{\bar{\mathbf{r}}}_i + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_i + 2\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_i + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_i) + \ddot{\bar{\mathbf{Q}}} + \bar{\mathbf{G}} \right\} - \sum_k^{\text{All Points}} \left\{ (\bar{\mathbf{r}}_{Fk} - \bar{\mathbf{r}}_{ZMP}) \times \bar{\mathbf{F}}_k + \bar{\mathbf{M}}_k \right\} + \bar{\mathbf{T}}_0 = \mathbf{0} \quad (2.3)$$

この式(2.3)は運動座標系 $\bar{\mathbf{O}} - \overline{\mathbf{XYZ}}$ における ZMP 方程式であり, 安定な動歩行パターンの生成問題とは, 任意の ZMP 軌道と足先軌道を与えたときのこの式を満足する各質点の運動を求めることに他ならない. 本研究で対象とするロボットは脚と腰部のみで構成されるために, 任意の ZMP 軌道と足先軌道を与えたときの, この式を満足するような腰の軌道を求めることになる. この任意の ZMP 軌道と足先軌道を与えたときに (解は無数にあるが) 従属的に決まる腰の軌道を, モーメント補償軌道と呼ぶ.

2.4.5 2足歩行ロボットの近似モデル化

本歩行パターン生成方式では, モーメント補償軌道の近似解の算出とその厳密モデルへの代入, そしてモーメント誤差をフィードバック, 蓄積する繰り返し計算によりモーメント補償軌道の厳密解を得ている. その近似モデル化のプロセスは以下の通りである.

- 1) 外力は近似モデルでは考慮しない.
- 2) 腰は重心に質量の集中する 1 質点近似モデルとする (図 2.14).
- 3) 線形, 非干渉化のために運動座標系の回転は考慮しない.
- 4) Z 軸の運動を共有しないものとして線形, 非干渉化する.

まず, 外力を近似モデルで考慮しないとすると式(2.3)は次のようになる.

$$\sum_i^{\text{All Particles}} m_i (\bar{\mathbf{r}}_i - \bar{\mathbf{r}}_{ZMP}) \times \left\{ \ddot{\bar{\mathbf{r}}}_i + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_i + 2\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_i + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_i) + \ddot{\bar{\mathbf{Q}}} + \bar{\mathbf{G}} \right\} + \bar{\mathbf{T}}_0 = \mathbf{0} \quad (2.4)$$

ここで被補償モーメントとなる下肢の運動により発生するモーメントを \mathbf{M} とおき, 1 質点近似モデル化を行うと式(2.4)は次のようになる.

$$m_w (\bar{\mathbf{r}}_w - \bar{\mathbf{r}}_{ZMP}) \times \left\{ \ddot{\bar{\mathbf{r}}}_w + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_w + 2\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_w + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_w) + \ddot{\bar{\mathbf{Q}}} + \bar{\mathbf{G}} \right\} + \bar{\mathbf{T}}_0 = -\mathbf{M} \quad (2.5)$$

式(2.5)は, 運動座標系の回転により発生する見かけの力の項において互いに干渉している. よって, これらの微分方程式を非干渉なものにするために, まずその見かけの力によるモーメントが発生しないものと仮定, つまり運動座標系が回転していない

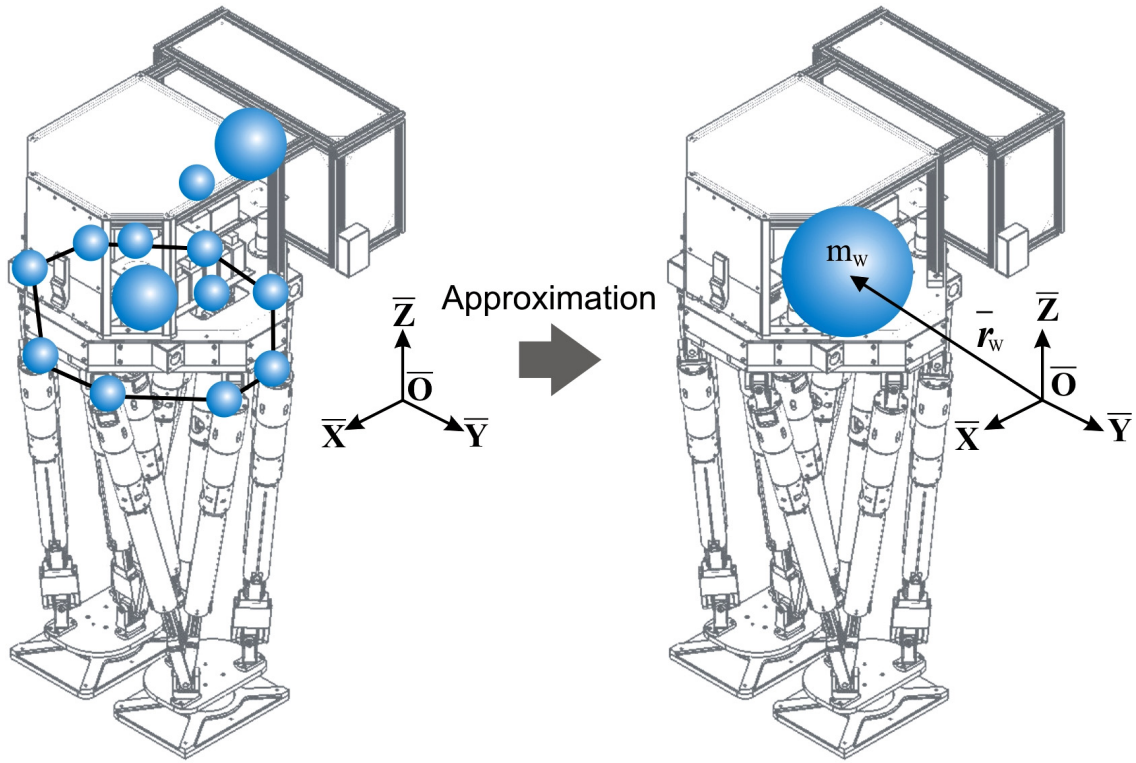


Figure 2.14 Approximate model.

ものとする。式(2.5)のロール軸、ピッチ軸周りの成分は式(2.6)、式(2.7)のようになる。

$$m_w(\bar{y}_W - \bar{y}_{zmp})(\ddot{\bar{z}}_w + \ddot{\bar{z}}_q + g_z) - m_w(\bar{z}_W - \bar{z}_{zmp})(\ddot{\bar{y}}_W + \ddot{\bar{y}}_q + g_y) = -M_x \quad (2.6)$$

$$m_w(\bar{z}_W - \bar{z}_{zmp})(\ddot{\bar{x}}_W + \ddot{\bar{x}}_q + g_x) - m_w(\bar{x}_W - \bar{x}_{zmp})(\ddot{\bar{z}}_W + \ddot{\bar{z}}_q + g_z) = -M_y \quad (2.7)$$

式(2.6)、(2.7)はZ軸方向の運動を共有していることから干渉系である。

そこで2足歩行ロボットは運動中腰高さ一定、また運動座標系はZ軸方向に関して運動しないものと仮定し、 $\ddot{\bar{z}}_w = 0, \ddot{\bar{z}}_q = 0$ として線形、非干渉化すると次の2式を得る。

$$m_w \bar{g}_z(\bar{y}_W + \bar{y}_{ZMP}) - m_w(\ddot{\bar{y}}_W + \ddot{\bar{y}}_q + \bar{g}_y)(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP}) = -M_x \quad (2.8)$$

$$-m_w \bar{g}_z(\bar{x}_W + \bar{x}_{ZMP}) + m_w(\ddot{\bar{x}}_W + \ddot{\bar{x}}_q + \bar{g}_x)(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP}) = -M_y \quad (2.9)$$

ここで、式(2.8)、式(2.9)において、設定 ZMP 軌道や運動座標系の加速度、重力加速度などの左辺の既知項を右辺に移項し、改めて書き直すと次の2式を得る。

$$(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP})\ddot{\bar{y}}_W - \bar{g}_z \bar{y}_W = \frac{M_x^*}{m_w} \quad (2.10)$$

$$(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP})\ddot{\bar{x}}_W - \bar{g}_z \bar{x}_W = \frac{M_y^*}{m_W} \quad (2.11)$$

これらがモーメント補償軌道の近似解を求めるのに用いる式となり，基本的に任意の M_x^*, M_y^* を与えた場合にこれらが成立する \bar{x}_W, \bar{y}_W を求める，ある種の逆問題となる．

ここでその特性を少し検討しておく．

式(2.10)において，右辺を入力， \bar{x}_W を出力とすると，インパルス応答の特性方程式は以下のようなになる：

$$(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP})s^2 + (-\bar{g}_z) = 0 \quad (2.12)$$

この特性方程式は2つの実根を持つため，発散運動となる[122]．つまり，インパルス状の被補償モーメントに対する腰部の補償軌道は，単にフィードバック制御系を構成した場合は発散運動が求まってしまうことになる．歩行運動においてこれは好ましくないことはいうまでもない．

ここで，式(2.10)における出力の周波数伝達関数を求めると，以下のようなになる：

$$\bar{X}_W(j\omega) = -\frac{1}{(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP})\omega^2 + \bar{g}_z} \quad (2.13)$$

これを逆フーリエ変換すれば，以下のような式が得られる：

$$\bar{x}_W(t) = be^{-at} \quad (2.14)$$

ただし，

$$a = \sqrt{\frac{\bar{g}_z}{(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP})}}, b = -\frac{1}{2\sqrt{\bar{g}_z}(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP})}. \quad (2.15)$$

例えば $a=1, b=-1$ としたときのこの式を図 2.15 に図示した．

いうまでもなく，式(2.14)もまた式(2.10)のインパルス応答である．この軌道は発散運動ではなく，インパルス状の被補償モーメントに対する腰部の補償軌道として利用可能である．すなわち発散運動が原理的に求まらない周波数領域に持ち込んで補償軌道を計算することで，被補償モーメントが発生する以前から補償運動を開始する，という（因果律は成り立たなくなるが）補償軌道を求める，というのが以降に述べるフーリエ変換を用いたモーメント補償軌道算出法の基本的アイデアである．

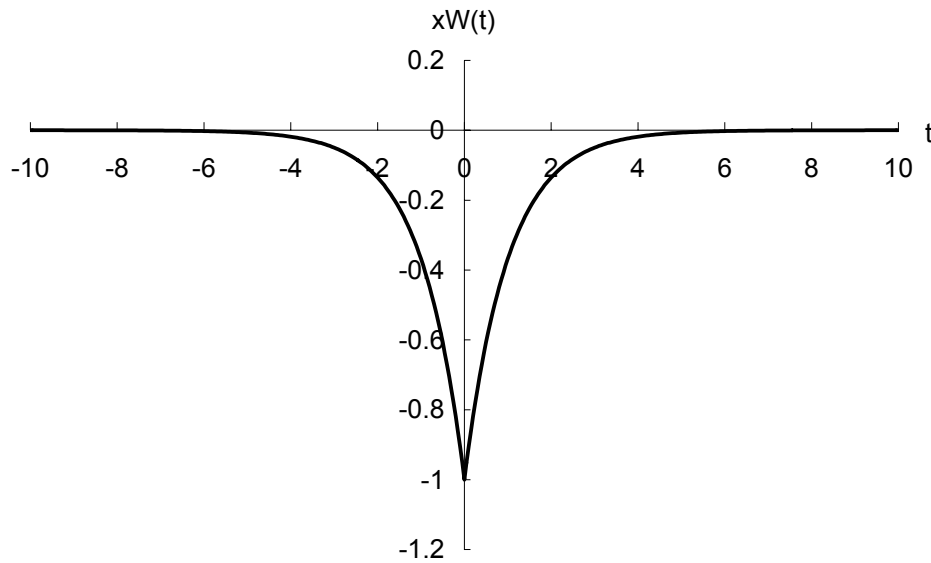


Figure 2.15 Function in equation (2.14).

2.4.6 フーリエ変換による近似解の算出

モーメント補償軌道 \bar{x}_w , \bar{y}_w は, 式(2.10), 式(2.11)を用いて解析的に近似解を得る.

ここで, これらの式において, M_x^* および M_y^* は足先軌道, 運動座標系の軌道および ZMP 軌道から算出できるので既知関数となる. またさらに定常歩行であるとすれば, 2足歩行ロボットの各部質点ならびに ZMP は運動座標系 $\bar{\mathbf{O}} - \bar{\mathbf{XYZ}}$ に関して周期的な相対運動をするので, M_x^* および M_y^* はそれぞれ周期関数となる. よって, 式(2.10), 式(2.11)の左辺も同じく周期関数になる. そこでこれらの式の右辺をそれぞれフーリエ級数展開し, また \bar{x}_w , \bar{y}_w をそれぞれ係数未知のフーリエ級数で表し各両辺のフーリエ係数を比較することで \bar{x}_w , \bar{y}_w それぞれのフーリエ係数を求める. そして, これを逆フーリエ級数展開することでモーメント補償軌道 \bar{x}_w , \bar{y}_w の近似解を得ることが出来る.

2.4.7 繰り返し計算によるモーメント補償軌道の厳密解の算出

モーメント補償軌道の厳密解を得るには, 繰り返し計算手法を用いる. 具体的には上記のように得られた近似解を厳密モデルの式である式(2.3)に代入し, その右辺と比較することで設定 ZMP におけるモーメント誤差 e_{M_x}, e_{M_y} を算出し, これらの誤差の符

号を反転したものを式(2.10)と式(2.11)の右辺に蓄積して再び計算を行い、モーメント誤差がある許容値 $\varepsilon_{M_x}, \varepsilon_{M_y}$ 以下になるまで繰り返し計算を行うことで厳密解を得る。

しかしこのままでは厳密解を得るのに非常に多くの計算が必要になるため、本歩行パターン生成法では収束の規則性を利用し、 n 回目の繰り返し計算に用いる蓄積したモーメント誤差 $E_{M_x(n)}, E_{M_y(n)}$ を、その極限值を式(2.16)を用いて推定しながら繰り返し計算を行うことで計算時間の短縮を図っている。

$$\begin{aligned} E_{M_x(1)} &= 0, E_{M_y(1)} = 0, \\ E_{M_x(2)} &= e_{M_x(1)}, E_{M_y(2)} = e_{M_y(1)}, \\ E_{M_x(n)} &= E_{M_x(n-1)} + 0.5e_{M_x(n-1)}, E_{M_y(n)} = E_{M_y(n-1)} + 0.5e_{M_y(n-1)} \quad (n = 3, 4, 5, \dots) \end{aligned} \quad (2.16)$$

以上において、定常歩行における解法について述べてきたが、一般的な運動に関しても、運動開始および終了の姿勢が同一であれば、運動開始および終了を含む一連の運動を1つの運動周期とし、その前後の停止姿勢の期間を十分に長く取ることで、全く同様の方法によりモーメント補償軌道を算出することができる。

2.4.8 歩行パターンの生成手順

モーメント補償軌道算出法をフローチャートで表したものを図 2.16 に示す。

モーメント補償軌道算出法により、実際に2足歩行ロボットが出力する各脚の位置・姿勢の時系列データを作成する手順は以下の5つの工程から成る。

- A. 足先軌道の設定** 2足歩行ロボットの足先位置と姿勢の時系列におけるデータを、各座標軸方向についての位置、速度および加速度までの連続性を考慮して、5次または6次の多項式を用いて作成し、足先軌道パターンとする。
- B. 初期腰軌道の設定** 上述の足先軌道をもとに、まず腰部の初期軌道を設定する。なお、腰部の軌道は後のモーメント補償計算により変化する。
- C. 設定 ZMP 軌道の設定** ZMP は足底が形成する安定領域内に設定する。X, Y 座標ともに安定領域のほぼ中央に設定し、最後にローパスフィルタに通して全体を滑らかにし、設定 ZMP 軌道パターンとする。
- D. モーメント補償軌道の算出** まずモーメント補償に関するパラメータを設定し、前述のモーメント補償軌道算出法に基づく計算を行い、体幹および腰部のモーメント補償軌道を決定する。

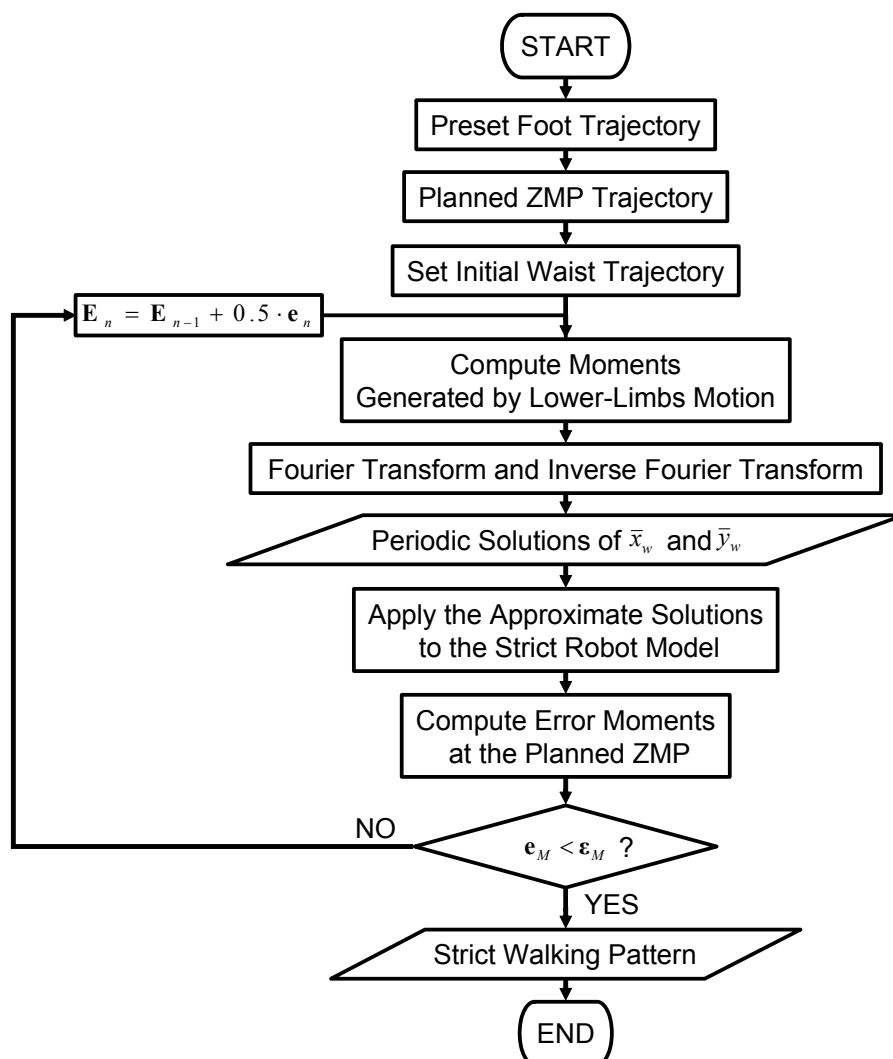


Figure 2.16 Flowchart of moment compensation trajectories computation.

E. 歩行パターンの作成およびファイル出力 本研究では、足先の位置・姿勢を表す6次元のベクトルの形でパターンを出力し、制御用コンピュータ側でリアルタイムに逆運動学計算を行いリンク長さの参照値を生成しながら制御を行うという方法を取った。この方法を採用したことにより、制御用コンピュータは順運動学計算を行わずして腰の運動座標原点から見た足先の位置・姿勢を把握することができる。もちろんリンク長さの応答値より算出するのに比べ、大きな外力が加わった場合には実際の足先の位置・姿勢に対し偏差を生じる場合があるしその場合も偏差の量を検出する事はできないが、パラレルメカニズムの特性のひとつである位置誤差の平均化を頼み、問題はないと判断した。制御用ソフトウェア内ではこのデータを ZMP の算出モジュールや後に述べる仮想コンプライアンス制御用コンプライアンス移動量算出モジュールで計算に用いている。

2.4.9 作成した歩行パターンの一例

以上の手法で作成した歩行パターンの一例を示し説明する。

図2.17に実際の歩行パターンを図示する。歩行周期は0.48 s/step, 歩幅は100 mm/stepである。このように歩行パターンは腰に固定された座標系から見た左右足先座標系の位置と姿勢という形で出力される。このパターンにおける実際の各リンクの長さのパターン（右足のみ）を図2.18に示す。ただしリンク番号と配置は図2.1に示したとおりである。図2.17の足先位置・姿勢パターンから図2.18のリンク長さパターンを算出する逆運動学計算は、ロボット制御プログラムが1 ms ごとに実時間で行っている。

図2.19はこの歩行周期0.48 s/step, 歩幅100 mm/stepの歩行パターンにおける設定ZMP軌道と腰軌道をX-Y平面に図示したものであり、図2.20は歩行周期0.96s/step, 歩幅100 mm/stepの歩行パターンに関して同様に図示したものである。これらを比較すると分かるように、歩行周期の短い歩行になると腰の触れ幅が小さくなりより動的な歩行となることが分かる。これらの図において、歩き初めと歩き終わりの時刻に腰の軌道がZMPとずれているのは、腰の重心が腰座標原点より前にあることによる。

図2.21と図2.22は、歩行パターン生成時の繰り返し計算によって、モーメント誤差 e_{M_x}, e_{M_y} が減少していく様子を表したものである。ロール軸まわりに関しては6回程度、ピッチ軸まわりに関しては9回程度の繰り返し計算により e_{M_x}, e_{M_y} が0.1 Nm以下に収束していることが分かる。

2.5 評価実験と考察

開発したWL-15を用い、複数の評価実験を行った。

評価する項目は以下のものである：

- ・ 水平平坦路における前進歩行能力
 - ・ 歩行可能最大歩幅
 - ・ 歩行可能最短歩行周期
 - ・ 歩行可能最大旋回角度
 - ・ 歩行可能最大積載重量
 - ・ 電源切断時の姿勢保持能力
- これらについて以下に述べる。

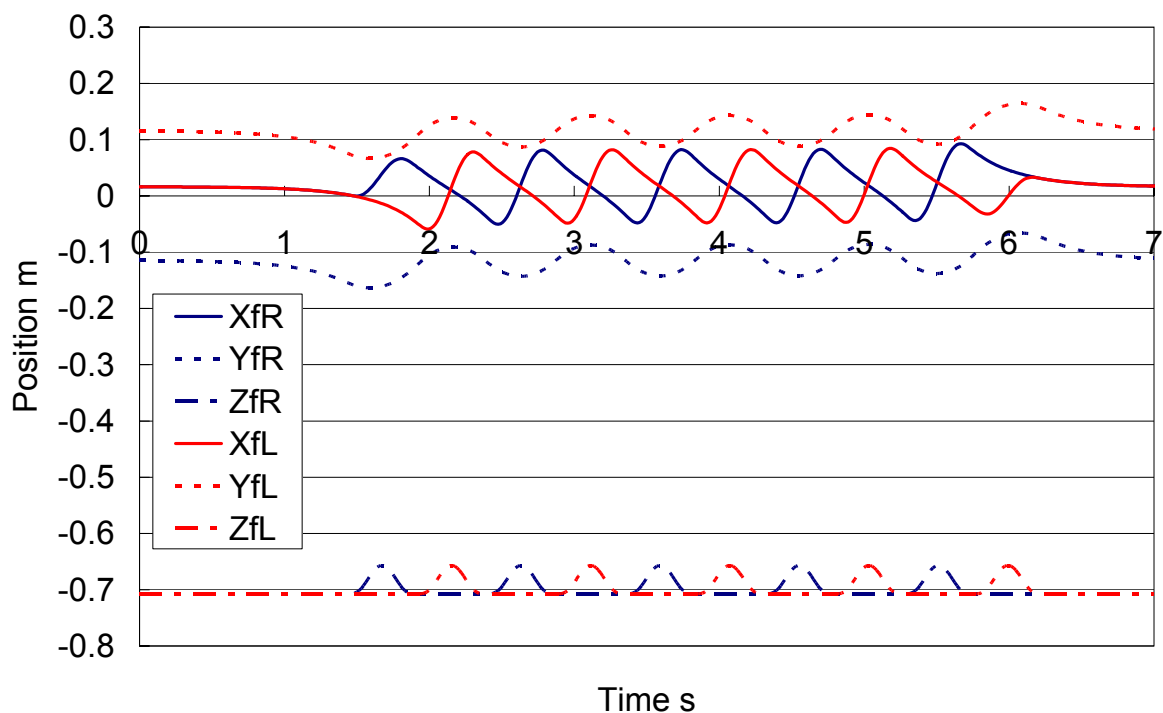


Figure 2.17 Walking pattern of WL-15.

(Walking forward, walking cycle: 0.48 s/step, step length: 100 mm/step)

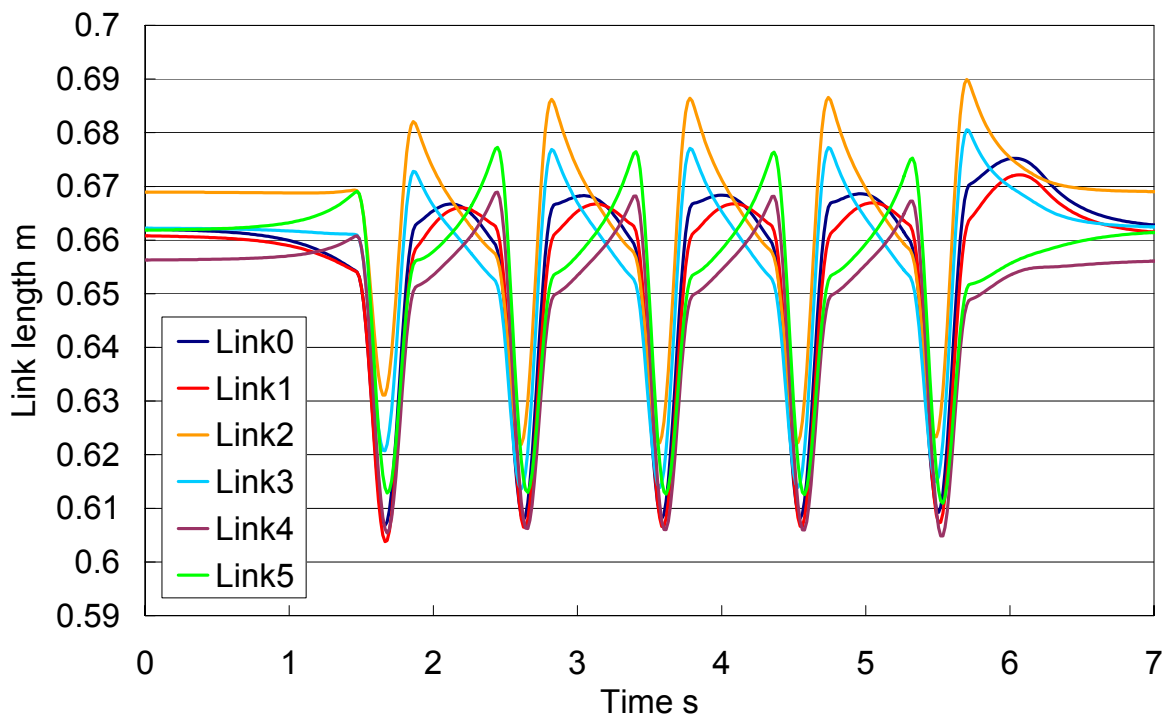


Figure 2.18 Link length pattern of WL-15's right leg.

(Walking forward, walking cycle: 0.48 s/step, step length: 100 mm/step)

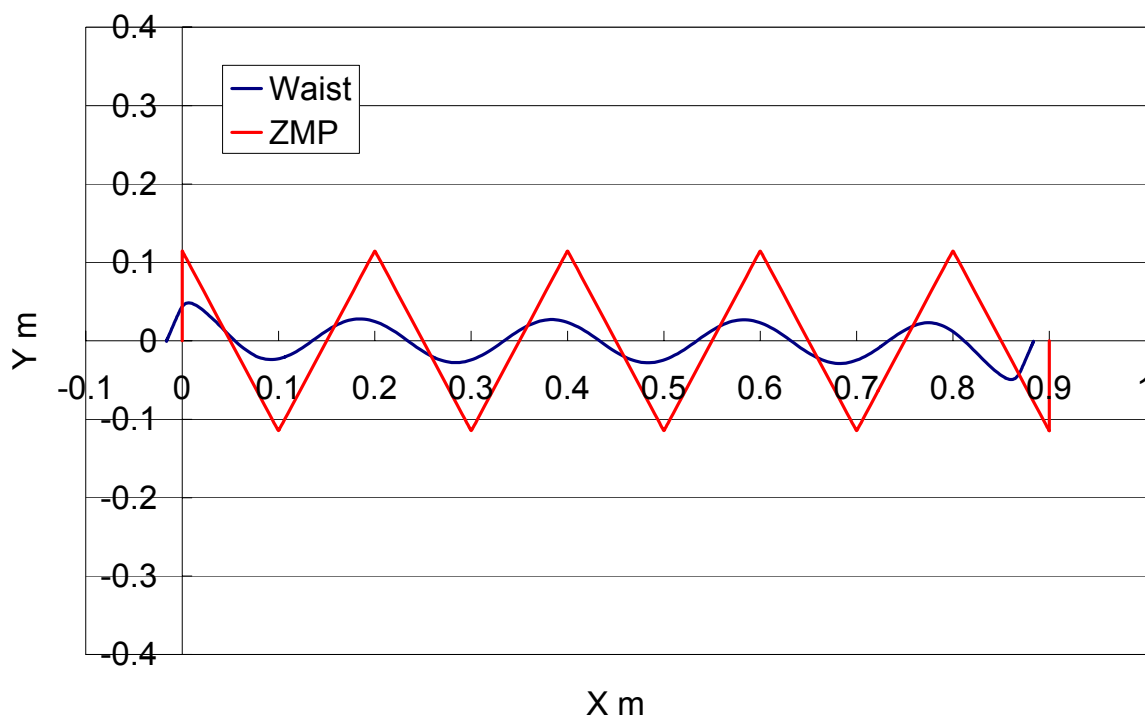


Figure 2.19 ZMP and waist trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 0.48 s/step, step length: 100 mm/step)

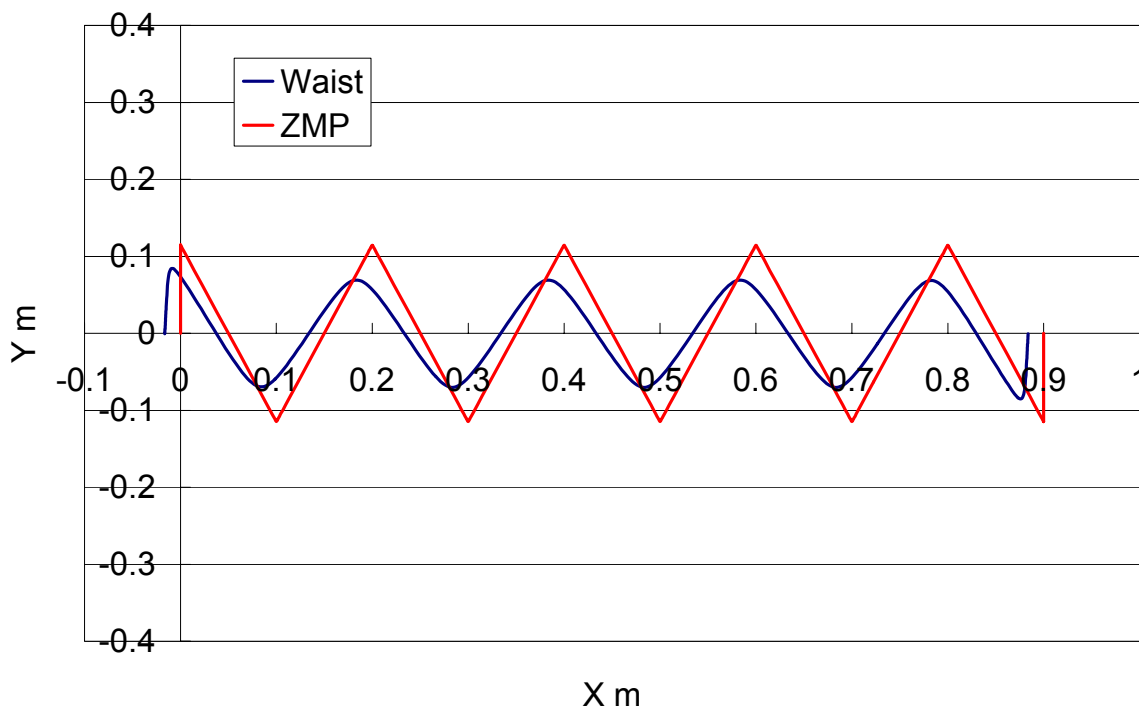
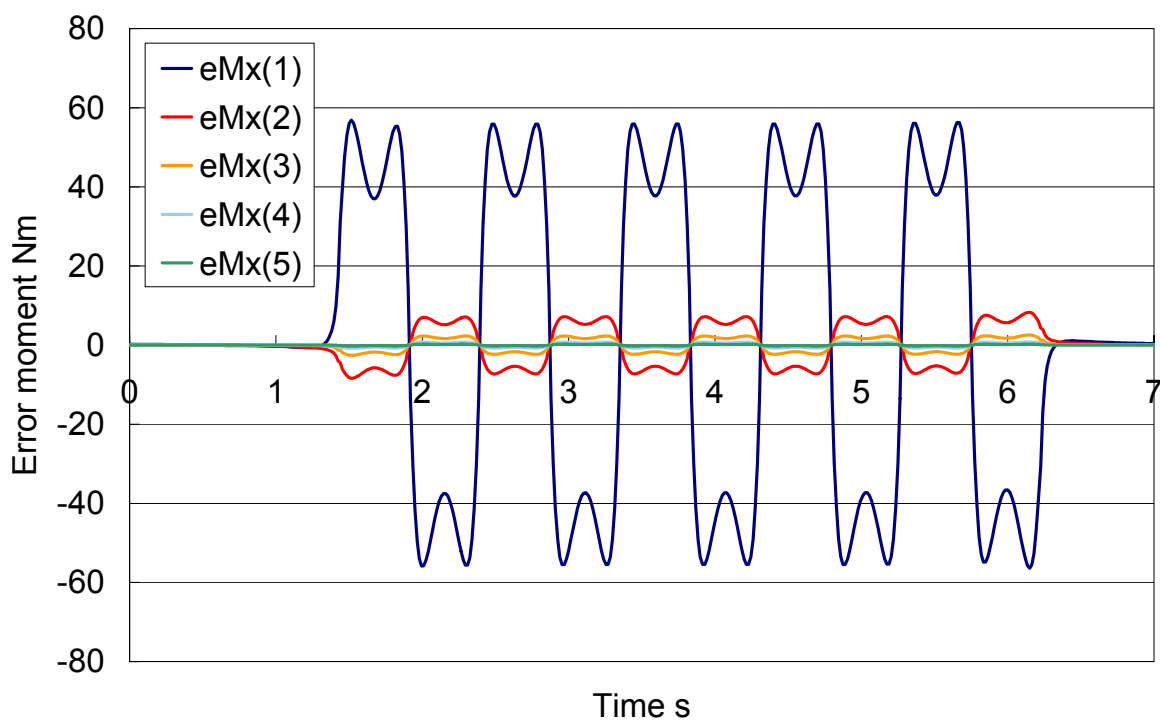
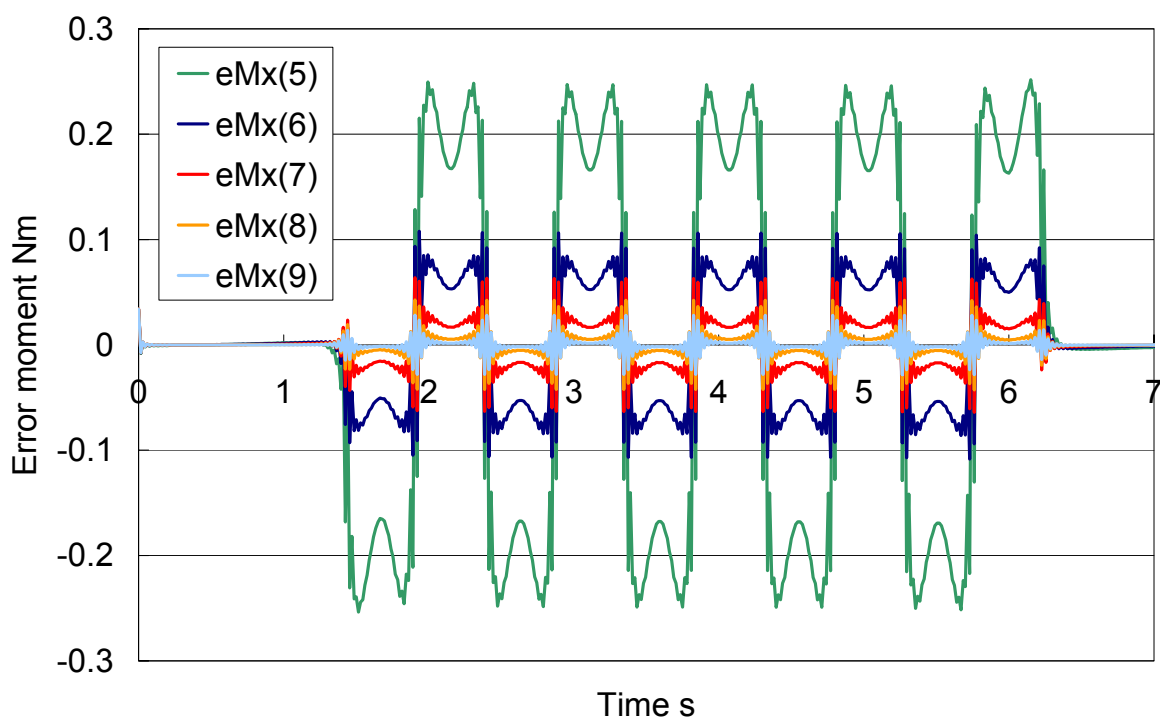


Figure 2.20 ZMP and waist trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

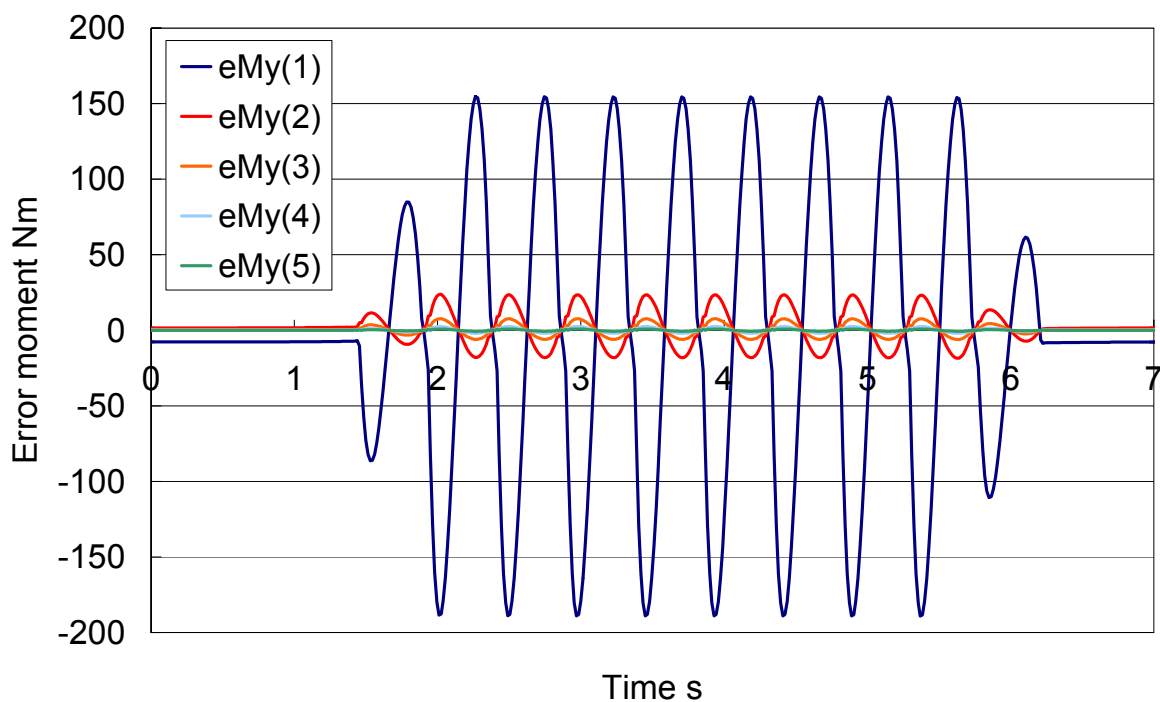


(a) $n=1, 2, 3, 4, 5$

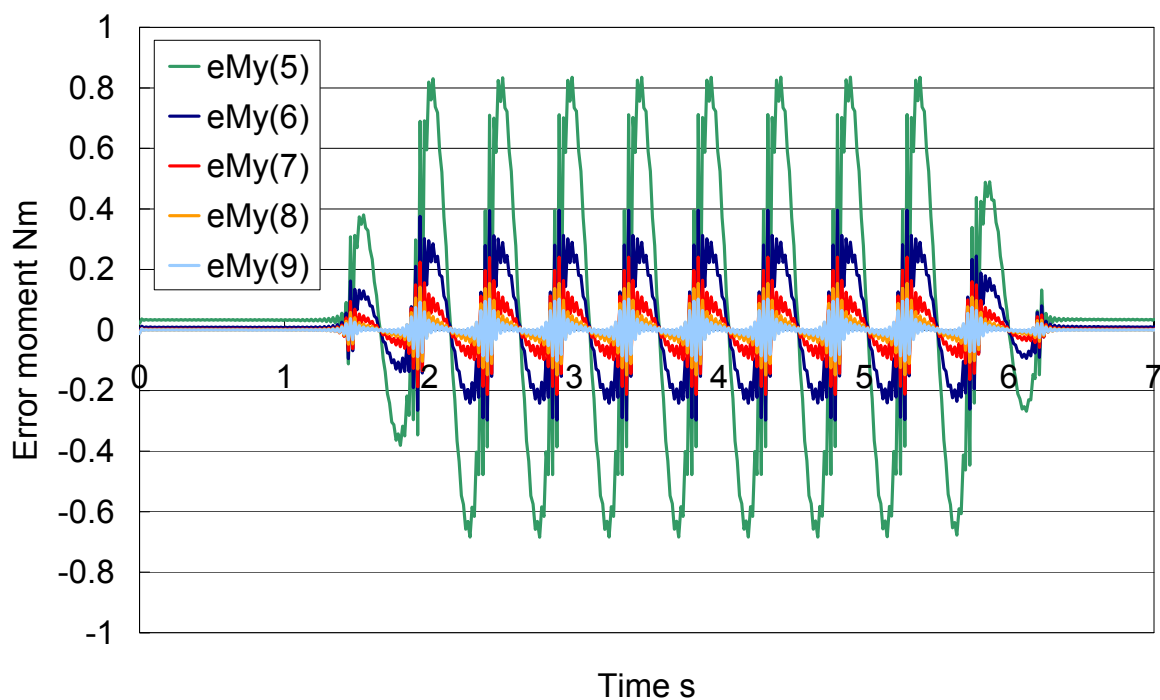


(b) $n=5, 6, 7, 8, 9$

Figure 2.21 Error moment along X axis and iteration times.
 (Walking forward, walking cycle: 0.48 s/step, step length: 100 mm/step)



(a) n=1, 2, 3, 4, 5



(b) n=5, 6, 7, 8, 9

Figure 2.22 Error moment along Y axis and iteration times.
(Walking forward, walking cycle: 0.48 s/step, step length: 100 mm/step)

2.5.1 水平平坦路における前進歩行実験

充分水平かつ平坦な路面上において、歩幅 100 mm/step、歩行周期 0.96 s/step (0.375 km/h)、前進の歩行パターンで歩行実験を行った。歩行実験の様子を図 2.23 に示す。また、歩行パターン生成時に設定した ZMP 軌道および実測した ZMP 軌道を図 2.24、図 2.25 に、ロボットの骨盤に設置した姿勢角センサのデータを図 2.26 に示す。

図 2.24、図 2.25 の ZMP 軌道を見ると、実測 ZMP 軌道は作成された歩行パターンに固有の設定 ZMP 軌道に対しておおむね追従していることが観察できる。立脚切り替え時および歩行終了後に振動が見られるが、これらは脚部および腰部の機械構造のたわみやガタなどのモデル誤差が原因と考えられる。振動が減衰したあとは元の軌道に復帰しており、歩行を不安定にするほどの影響はないことがわかる。

図 2.26 に示すロボット腰部の姿勢角は、ピッチ軸まわり、ロール軸まわりともに 0.5~1.5 deg のオフセットおよび最大 1.5 deg ほどの振幅をもって振動している。歩行パターンの生成においては、腰部の姿勢角はピッチ軸まわり、ロール軸まわりともに 0 deg のまま変化しないように設定しており、これも機械構造のたわみやガタが原因であると思われる。ただしこのグラフからはこれらの振動が発散してゆく傾向は見られず、多少の振動はあるものの、ロボットが安定に歩行できていることがわかる。

これらの結果から、開発した WL-15 が、水平平坦路面上にて歩行が可能であることが確認できた。

2.5.2 最大歩幅評価実験

充分水平かつ平坦な路面上において、歩行周期 0.96 s/step の歩行パターンで前進、横方向の歩行に関して、歩行可能な最大歩幅の評価実験を行った。

実験の結果、歩行可能な最大歩幅は前進、横方向ともに 200 mm/step であった。歩行実験の様子を図 2.27、図 2.28 に示す。実験の結果より、200 mm/step 以下の歩幅であれば、安定に歩行できることが確認できた。

2.5.3 最短歩行周期評価実験

充分水平かつ平坦な路面上において、歩幅 100 mm/step の歩行パターンでの前進歩行に関して、歩行可能な最短歩行周期の評価実験を行った。

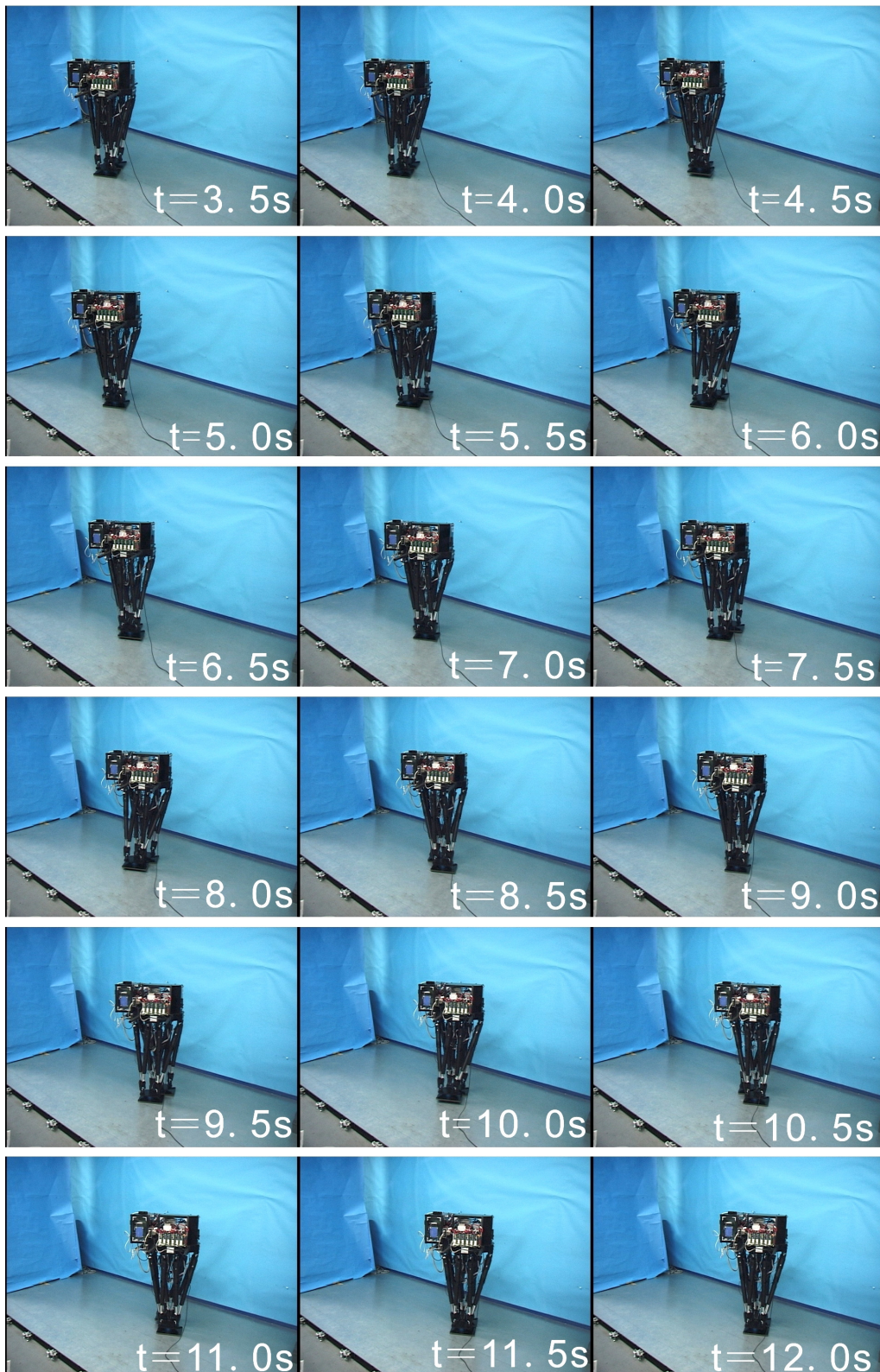


Figure 2.23 Walking experiment of WL-15.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

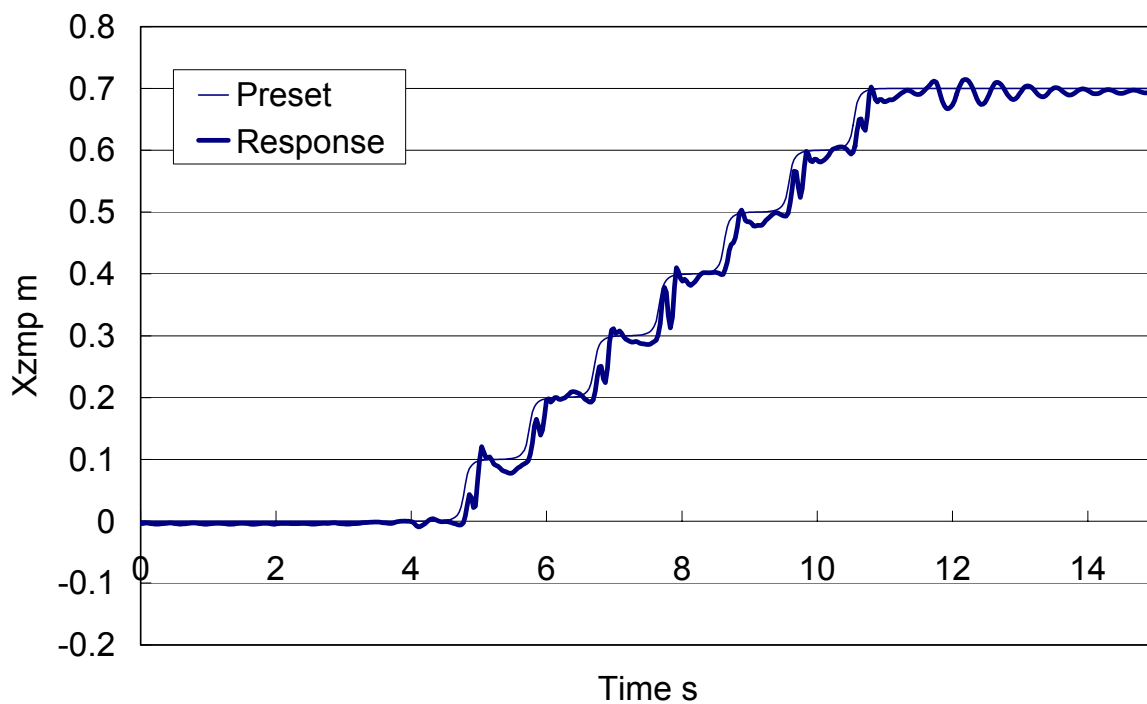


Figure 2.24 ZMP trajectories along X axis.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

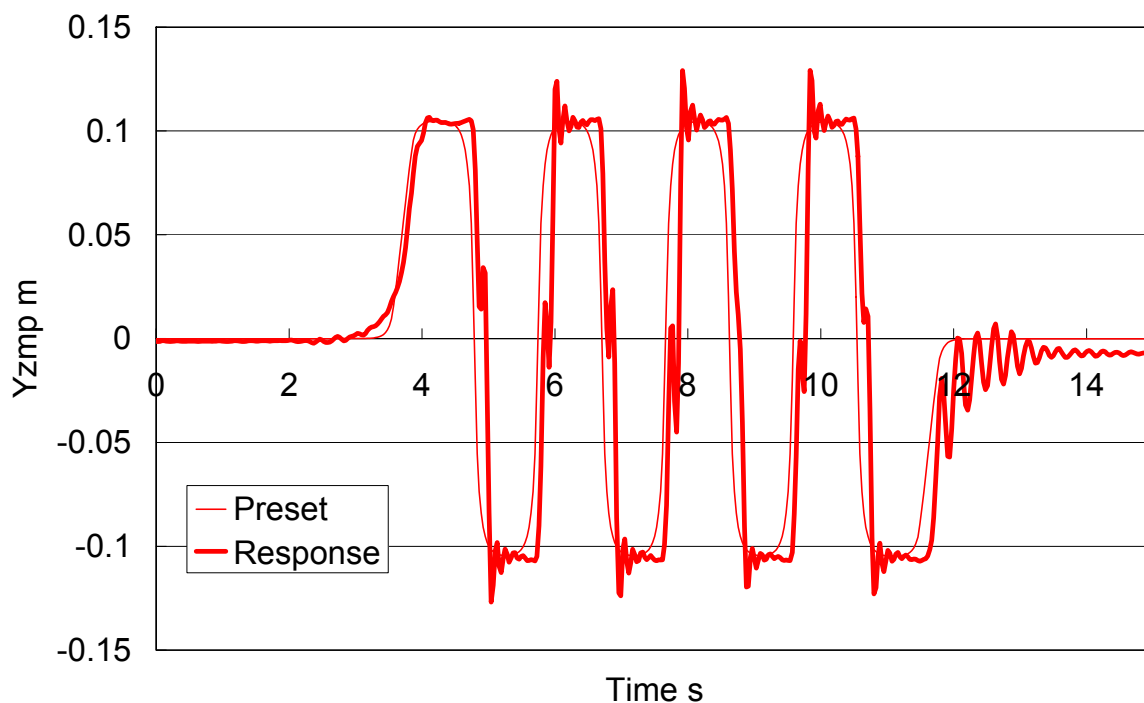


Figure 2.25 ZMP trajectories along Y axis.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

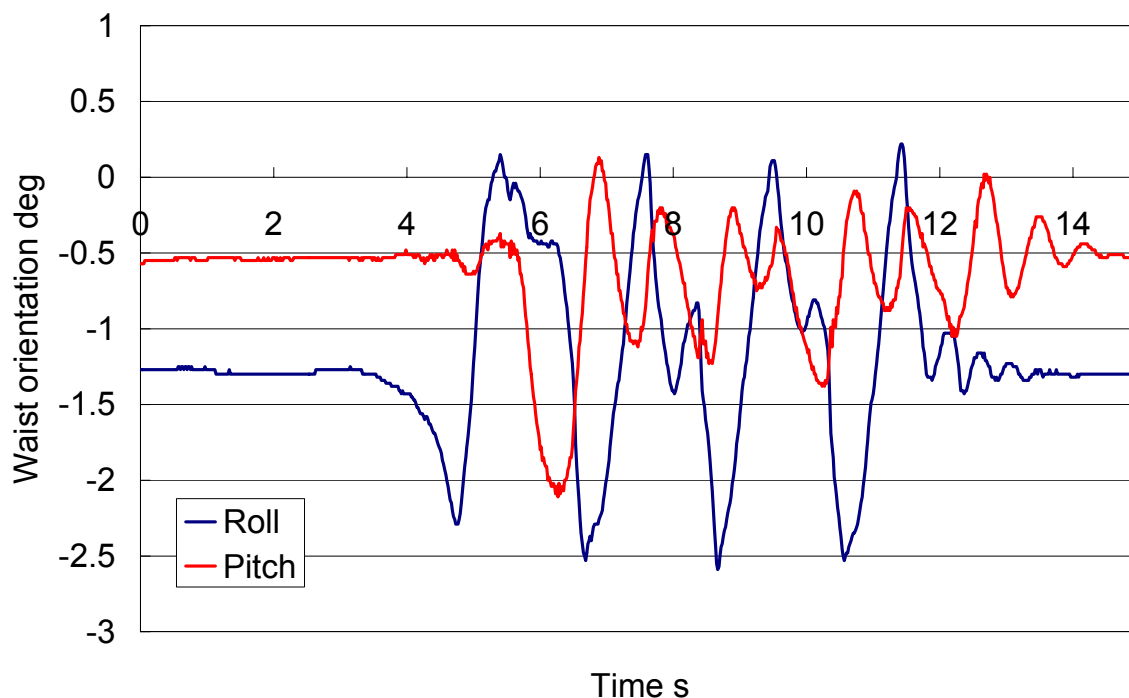


Figure 2.26 Posture orientation angle of the waist.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

実験の結果，歩行可能な最短歩行周期は 0.8 s/step であった．歩行実験の様子を図 2.29 に示す．実験の結果より，0.8 s/step 以上の歩行周期であれば，安定に歩行できることが確認できた．

2.5.4 最大旋回角度評価実験

充分水平かつ平坦な路面上において，歩行可能な最速の方向転換実験を行った．

実験の結果，歩行可能な最速の方向転換は，歩行周期 0.96 s/step，2 歩で 90 deg の方向転換であった．実験の様子を図 2.30 に示す．この実験より，歩行周期 0.96 s/step，2 歩で 90 deg の高速な方向転換が可能であることが確認できた．

2.5.5 最大積載重量評価実験

充分水平かつ平坦な路面上において，歩幅 100 mm/step，0.96 s/step の前進歩行での最大積載重量の評価実験を行った．

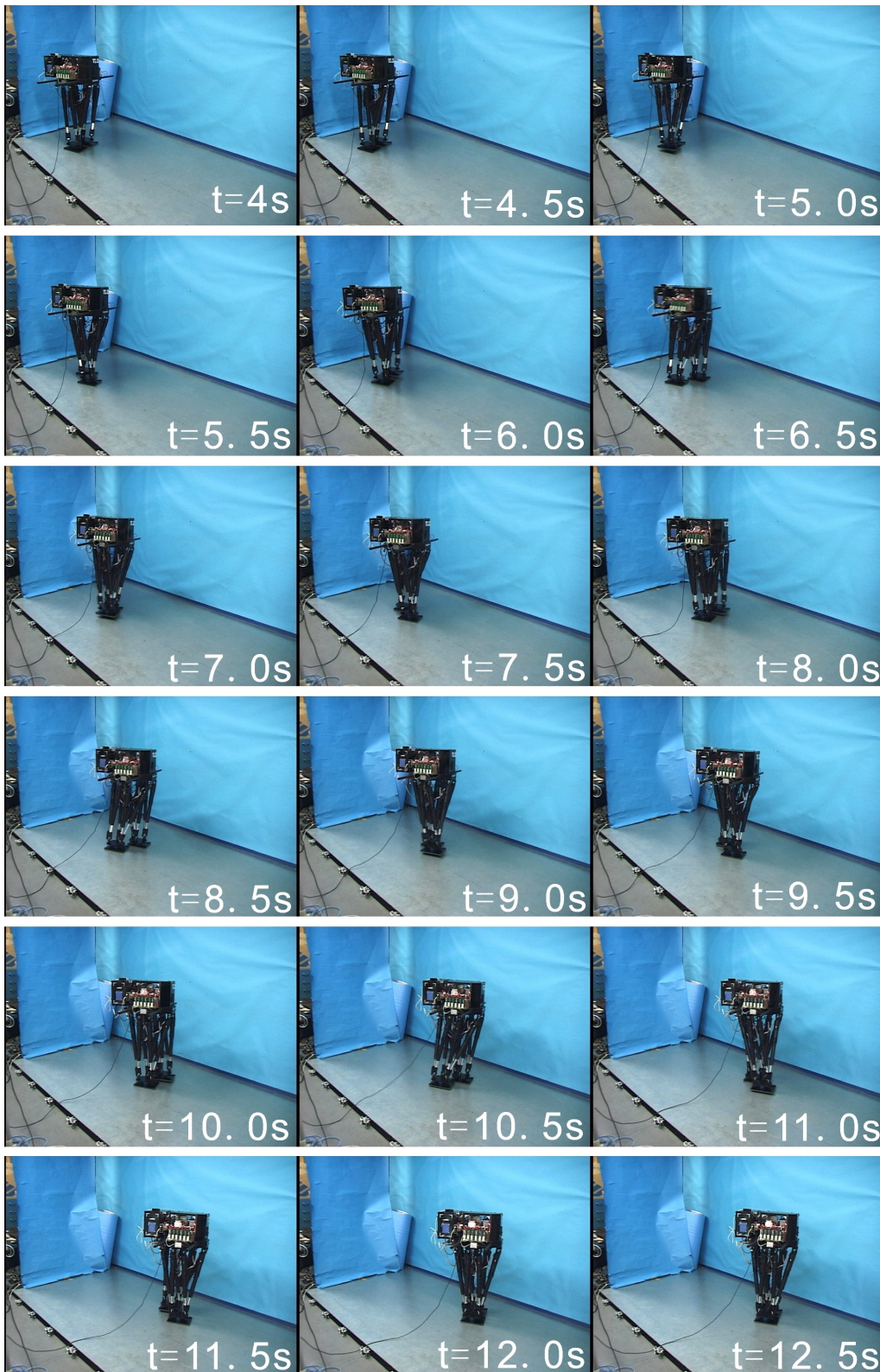


Figure 2.27 Walking experiment of WL-15.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 200 mm/step)

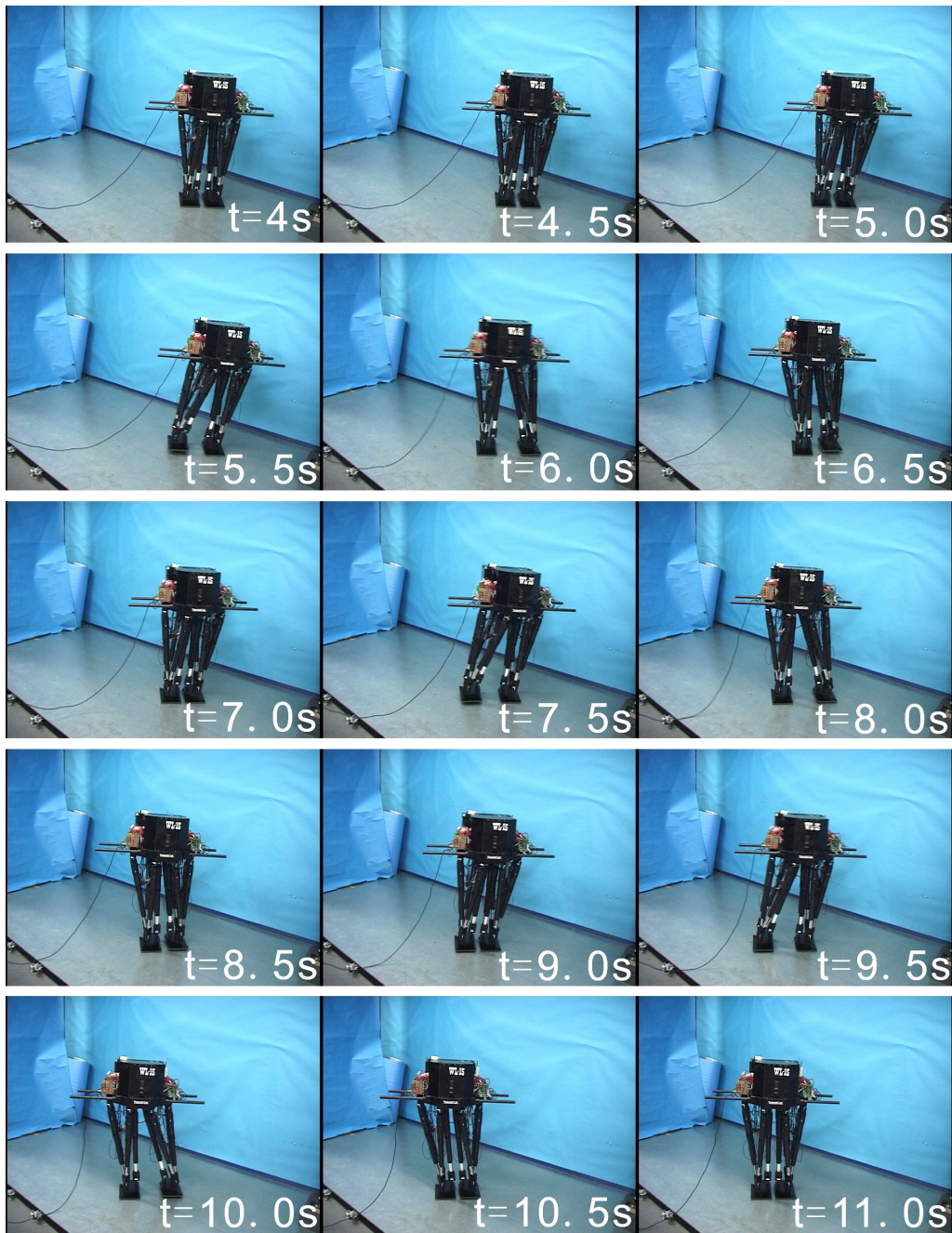


Figure 2.28 Walking experiment of WL-15.

(Walking sideward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 200 mm/step)

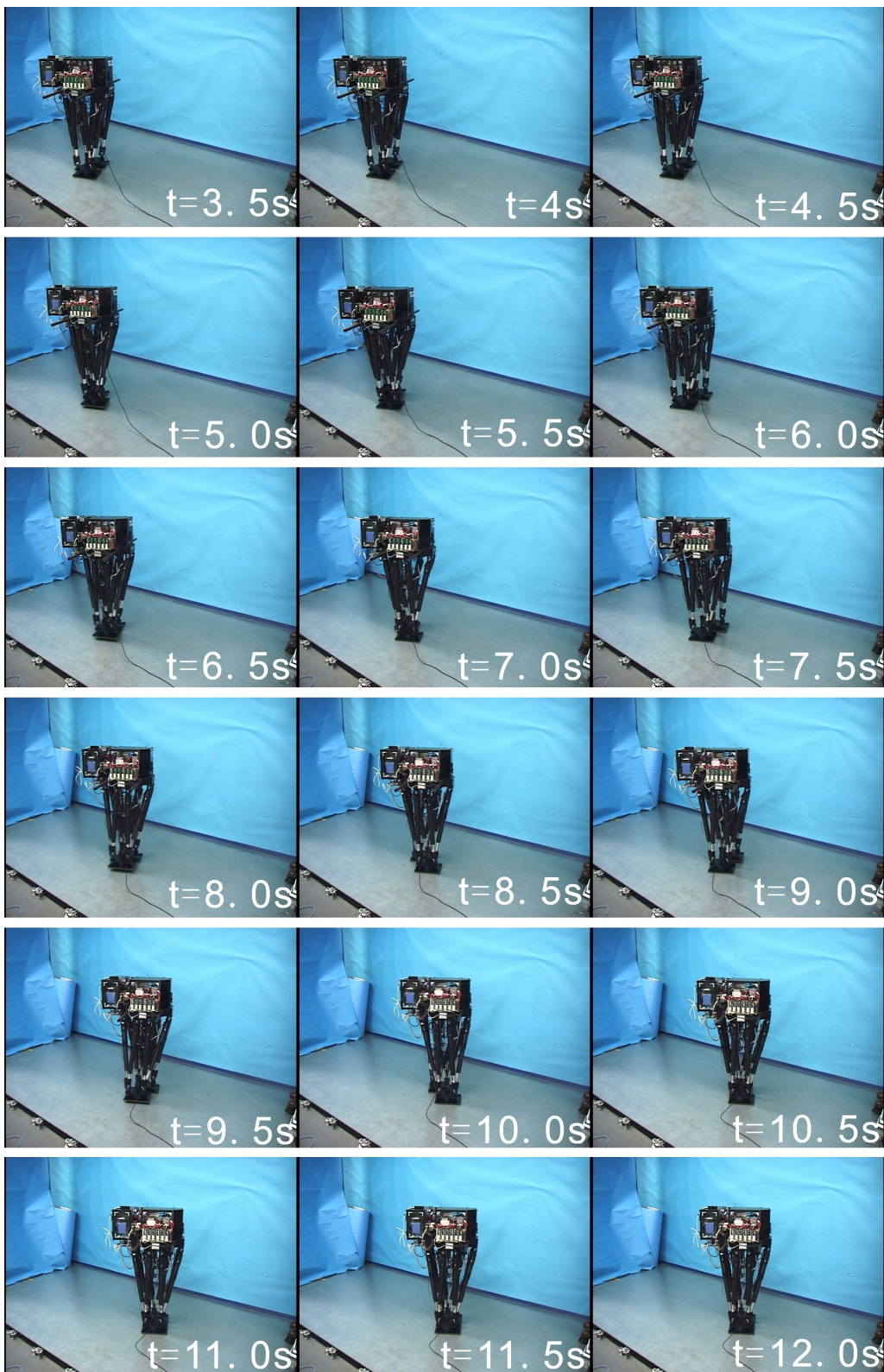


Figure 2.29 Walking experiment of WL-15.

(Walking forward, walking cycle: 0.8 s/step, step length: 100 mm/step)



Figure 2.30 Turning experiment of WL-15. (90 deg in 2 steps)

実験の結果，歩行可能な最大可搬重量は 18 kg であった．実験の様子を図 2.31 に示す．この実験より，開発した WL-15 が 18 kg の重量物を積載して歩行することが可能であることが確認できた．

2.5.6 電源切断時の姿勢保持能力評価実験

充分水平かつ平坦な路面上において，歩幅 100 mm/step, 0.96 s/step の前進歩行を行い，その後電源を切断しバッテリーを取り出しても各アクチュエータに装備された負動作電磁ブレーキにより姿勢保持が可能かどうかの評価実験を行った．



Figure 2.31 Walking experiment of WL-15 carrying 18 kg payload.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 18 kg)



Figure 2.32 Posture holding experiment of WL-15 without power supply.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

実験の様子を図 2.32 に示す。図中時刻 $t = 20$ s の時オペレータがロボットのシステムをシャットダウンして電源を切断し、時刻 $t = 40$ s においてはバッテリーを取り出して持ち去っている。この連続写真より分かるとおり、WL-15 において電源切断時・システム非稼働時にはアクチュエータをロックして姿勢を保持する機能が実現できていることが確認できた。

2.5.7 屋外歩行実験

WL-15 はバッテリー駆動が可能であるため、屋外のアスファルト路面において歩行実験を行った。歩行パターンは前進と側方歩行のものをを用い、ともに歩行周期は 0.96

s/step, 歩幅は 100 mm/step である。実験の様子を図 2.33 に示す。

実験を行った路面は数 mm の凹凸が見受けられたが, WL-15 は安定に歩行することに成功した。

2.5.8 考察

以上の実験結果から分かるように, 開発した WL-15 は水平平坦路面での安定した歩行に成功し, また最大歩幅や最短歩行周期, 旋回速度やシステム非稼働時の姿勢保持能力は, 2 足歩行型車いすや汎用 2 足移動台車として応用できる人間搭乗型 2 足歩行ロボットの先行試作機としては十分な仕様を満足していると考えられる。

しかしながら, 人間搭乗型 2 足歩行ロボットに最も重要と考えられる最大可搬重量はわずか 18 kg となっており, この数値は決して充分とは言いがたく今後の改善を必要とする結果となった。

この原因としてまず考えられるものはアクチュエータの出力不足であるが, 図 2.24 ~2.26 に見られるように, 無積載時でもすでに歩行時に振動が見られており, 上下の受動ジョイントやすべりねじなどの機構の持つバックラッシュや, 構造の剛性不足によるたわみなどのモデル誤差が歩行に対し悪影響を及ぼしていることもあると考えられる。

逆に屋外における歩行実験では路面に対象の凹凸があるにもかかわらず WL-15 が安定な歩行に成功したことは, WL-15 の機構のバックラッシュやたわみが図らずも凹凸路面を歩行する場合に生じるモデル誤差に起因する着地衝撃を緩和していると考えられることもできる。

すなわち, 人間搭乗 2 足歩行の実現のためには, アクチュエータの出力増強や機構のバックラッシュの低減, 剛性の向上などの改良を図ることが必要であるが, これにより凹凸のある路面ではかえって歩行が困難となる可能性も否定できない。凹凸路面における歩行を安定化する手法が必要となると考えられる。

2.6 まとめ

本章では, はじめに脚と腰部のみで構成され, 小型・軽量で電池により自立歩行が可能であり, 重量物を積載して歩行するのに適した構造の 2 足歩行ロボット WL-15 の機械モデルと歩行制御法, 評価実験と考察について述べた。



Figure 2.33 Outdoor walking experiment of WL-15.

(Walking forward and sideward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

WL-15 は2本のスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムの脚と腰部で構成されており、脚機構は片足につき6本の直動アクチュエータと上下の受動ジョイントを備えた。バッテリーやDCサーボドライバ、3軸姿勢角センサは骨盤上部に搭載され、制御用コンピュータは骨盤後部に搭載された。足部は足底に床反力取得用6軸力覚センサを備えた。各部の設計には軽量化が施されており、重量は57kgとなった。

歩行制御法は本学で開発された、ZMP安定判別規範に基づく2足ヒューマノイド・ロボットの2足歩行制御法をもとに開発した。この手法は任意の足先軌道による歩行動作に対し、フーリエ変換によるモーメント補償軌道算出アルゴリズムを用いて腰部のモーメント補償軌道を算出し、それらの軌道を設定歩行パターンとして歩行ロボットをプログラム制御するものである。

開発した WL-15 と歩行制御法を用いてその歩行能力を評価したところ、基本的な歩行能力に関してはその有効性を確認した。

一方で、重量物積載歩行能力に関しては、積載歩行時の安定性とアクチュエータの出力の2つの点において十分な性能を持つとは確認できず、今後の改善を必要とする結果となった。

これらの問題点に関する改善策の提案と評価については、次章以降に報告する。

第3章 人間搭乗型2足歩行ロボット

WL-16の開発

- 3.1 はじめに
- 3.2 基本設計
- 3.3 ハードウェアの改良設計
- 3.4 歩行制御法
- 3.5 評価実験と考察
- 3.6 まとめ

3.1 はじめに

第2章では、実際に人間が搭乗できる2足歩行ロボットの開発に対する先行試作機として、脚と腰部のみで構成され、小型・軽量で電池により自立歩行が可能であり、重量物を積載して歩行するのに適した構造の2足歩行ロボット WL-15を開発したことについて、その機械モデルと歩行制御法、評価実験と考察について述べた。

このWL-15により、基本的な歩行能力に関してはその有効性を確認した一方で、重量物積載歩行能力に関しては、積載歩行時の安定性とアクチュエータの出力の2つの点において十分な性能を持つとは確認できず、今後の改善を必要とする結果となったことは第2章で述べたとおりである。

そこでつぎに、WL-15の開発で得られた知見を元に、主に以下の2点を開発要件として、新たに実際に人間が搭乗できる2足歩行ロボットの試作機を開発することを考えた：

- ・ 体重50 kg程度の間が搭乗して歩行できること。
- ・ 1~2 mm程度の凹凸のある路面においても安定に歩行できること。

この2次試作機WL-16 (Waseda Leg - No. 16) は2002~2003年に開発された、実際に人間が搭乗して歩行できる2足歩行ロボットである。本章では、WL-16について、機械モデルの開発と仮想コンプライアンス制御の導入、またこれらを用いて行った評価実験と考察について述べる。

3.2 基本設計

WL-15 の基本設計は以下のような特徴を有していた：

- ・ 高い機構剛性と出力，共通部品を多く用いることによる量産効果を実現するため，脚機構はスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムにより構成されること。
- ・ 小型，軽量であること。
- ・ バッテリ駆動が可能であること。

WL-16 の開発においては，これらの特徴は継承し，また人間搭乗歩行を実現するために新たに以下の要件を基本設計方針として取り上げた。

- ・ 骨盤上に人間が搭乗できるシートを備えること。
- ・ 脚機構各部のバックラッシを可能な限り低減すること。
- ・ 高可搬重量化を図ること。
- ・ 広可動範囲化を図ること。
- ・ 更なる軽量化を図ること。

脚機構は WL-15 と同様のスチュワート・プラットフォーム型として自由度構成も第 2 章図 2.1 に示した WL-15 のものを踏襲し，各部受動ジョイントの設計見直しや直動減速機構の設計見直し，電装系のレイアウト見直しなどを行うことにより，これらの設計方針を満足しようと試みた。

3.3 ハードウェアの改良設計

3.3.1 直動アクチュエータの設計

WL-15 の直動アクチュエータの問題点としては以下の 3 つが挙げられた：

- ・ 推力が小さいこと。
- ・ ストロークが小さいこと。
- ・ 滑りねじの軸方向隙間が大きいこと。

これらを改善すべく，新たな直動アクチュエータを設計した。

まず，推力の増加に関しては，原動機をより大出力のものに変更するのが一番簡単な方法であったが，WL-15 で採用した 150 W の DC サーボモータは現在市場において比較的容易に手に入るものの中ではかなり出力重量比に優れており，これより大出力

の原動機を採用することは機構の肥大化につながる。WL-15の外形寸法は2足歩行車いすや2足歩行台車としての使用という最終目標に対し既に決して小さくはなく、これ以上の機体の肥大化は好ましくないと判断した。そのため原動機はWL-15で採用したDCサーボモータをそのまま使い、ねじ軸のリードを半減することにより対応した。

ストロークの増加に関しては、WL-15ではねじ軸と同軸に配置されていたモータをボールねじの軸からオフセットさせて配置し、ベルトを介して駆動することで、リニアアクチュエータの最小長さを若干短縮しながらストロークをWL-15の200 mmから350 mmへと増加した。

ねじ軸の軸方向隙間に起因するバックラッシュに関しては、バックラッシュの大きい滑りねじに替えて転造ボールねじを採用することにより低減を図った。ボールねじの使用は推力増加の目的よりリードを半減したことにより可能となったものだが、バックラッシュの低減と効率の向上も見込むことができる。このほかりニアガイドもWL-15で用いたものより大きいサイズのものを使用している。

新たに製作した直動アクチュエータの分解図と写真を図3.1と3.2に示す。

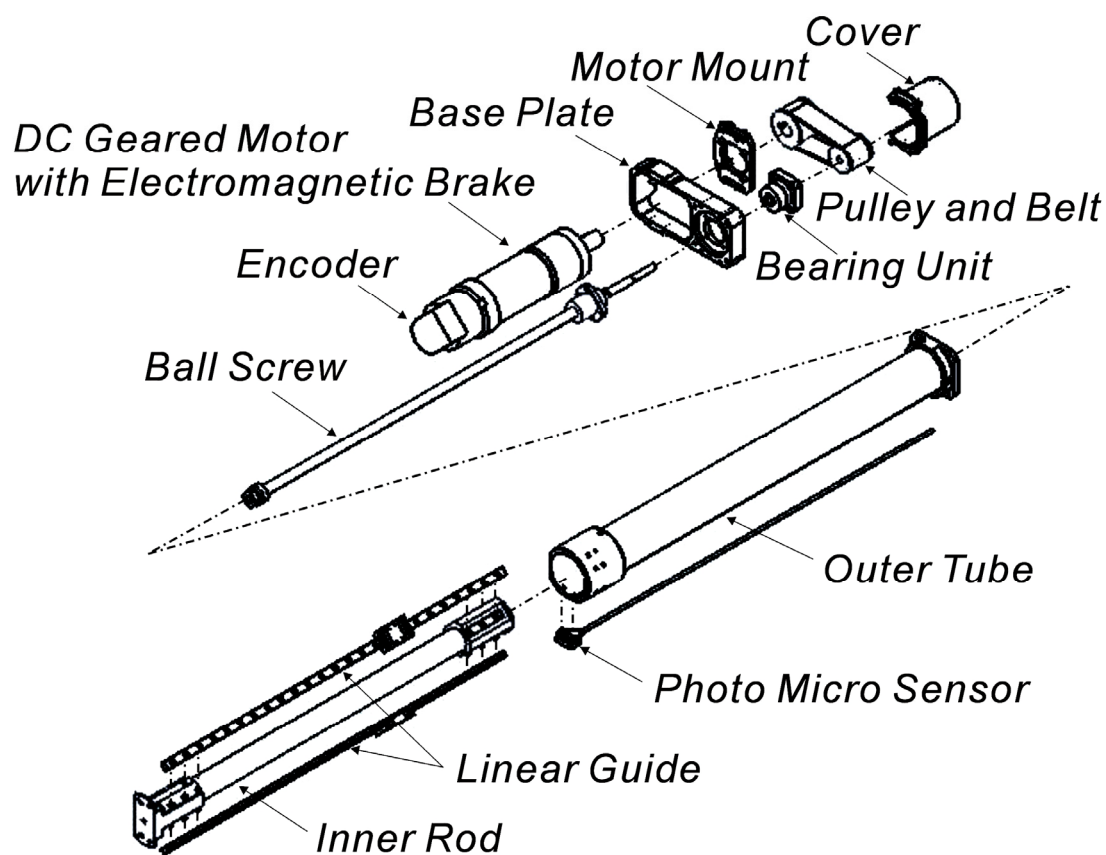


Figure 3.1 Exploded view of linear actuator developed for WL-16.

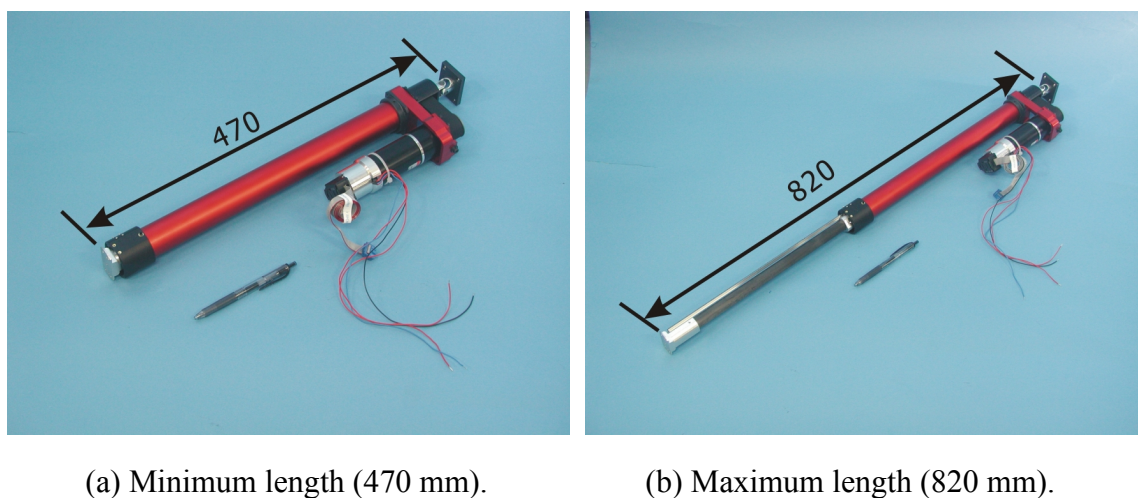


Figure 3.2 Photograph of linear actuator developed for WL-16.

上記の改良点のほか、WL-15ではインナーロッドの両側面に向かい合って取り付けられていた2本のリニアガイドに関して、横方向の外力に対する剛性を持たせるために垂直に向かい合わせて取り付けられている。また軽量化のためにほとんど外力のかからないアウターチューブには安価・軽量なアルミニウムパイプと樹脂製のフランジ、主として圧縮を受けるインナーロッドにはCFRPを材料として用いている。

開発した直動アクチュエータは重量が1.9 kgとなり、WL-15のものより100 g程度軽量となっている。大幅な軽量化にはならなかったが、ストロークが1.75倍となりバックラッシの低減を図っていることを考えると満足できる数値と考える。

3.3.2 下部受動ジョイントの設計

WL-15の下部受動ジョイントの問題点としては、以下の2つがあげられた：

- ・ バックラッシが大きいこと。
- ・ 材料に樹脂を用いたために剛性が不足していること。

これらを改善すべく、新たに下部受動ジョイントを設計した。

まずバックラッシの低減に関しては、WL-15の下部受動ジョイントは軸受に無給油ブッシュを用いたことと各軸のバックラッシの累積するジンバル対偶となっていたことにより、バックラッシが発生しやすい構造となっていた。そこで2自由度ジンバル対偶に替えて、3自由度ボールジョイントの使用を検討した。一般に市場のボールジョイントの振角は20 deg程度と小さく不十分なものが一般的であるが、ヒーハイト精工株式会社の協力により、最大振角が40 degと大きく、小型・軽量でガタの少ない

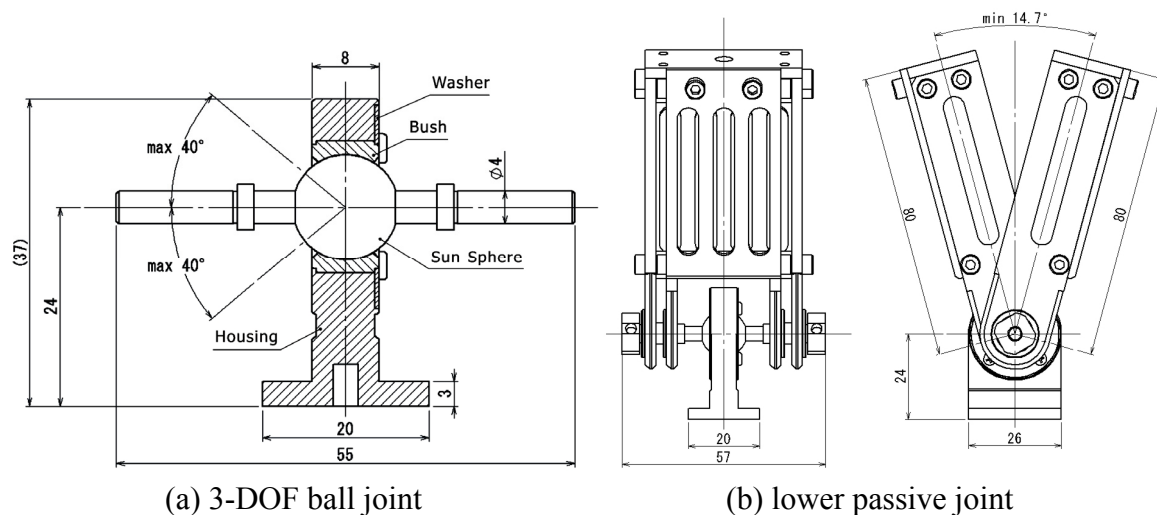


Figure 3.3 3-DOF ball joint and assembled lower passive joint for WL-16.



Figure 3.4 Photograph of lower passive joint for WL-16.

3自由度ボールジョイントを新たに開発した。

開発した3自由度ボールジョイントの断面図と組み立てた下部受動ジョイントを図3.3に、下部受動ジョイントの写真を図3.4に示す。

図3.3に示す3自由度ボールジョイントは、中央の太陽球と2本の軸は一体部品となっており、すでにこの部分で3自由度を持つ。太陽球の回転は太陽球とMCナイロンで出来たブッシュとの間の滑り潤滑によって行われる。各リンクに接続される2個のヨークは、太陽球の軸に各2つの転がり軸受を介して予圧をかけて取り付けられている。これによりすべての方向に対しバックラッシュを少なく抑えることができる構造となっている。

材質はプラスチックブッシュ以外はアルミニウム合金 A5052 を用いた。

開発した下部受動ジョイントの重量は 150 g となっており，金属材料を用いたにもかかわらず WL-15 の下部受動ジョイントの約 380 g と比較して約 6 割削減という大幅な軽量化に成功した。

3.3.3 上部受動ジョイントの設計

WL-15 の上部受動ジョイントの問題点としては，下部受動ジョイントと同様に以下の 2 つがあげられた：

- ・ バックラッシが大きいこと。
- ・ 材料に樹脂を用いたために剛性が不足していること。

これらを改善すべく，新たに WL-16 の上部受動ジョイントには，ニードルベアリングを使用した小型・軽量でバックラッシの少ない市販のユニバーサルジョイントに追加工を施して用いた。これは本来トルク伝達のために用いられるものであり，ユニバーサルジョイントの軸方向荷重などの仕様がメーカーより提示されなかったが，ケーシングは S45C を用いており，軸受にもニードルベアリングが用いられているために問題ないと判断した。

上部受動ジョイントの組立図を図 3.5 に示す。

重量は 36 g であり，WL-15 の上部受動ジョイントの 145 g と比較すると約 1/4 という大幅な軽量化に成功した。

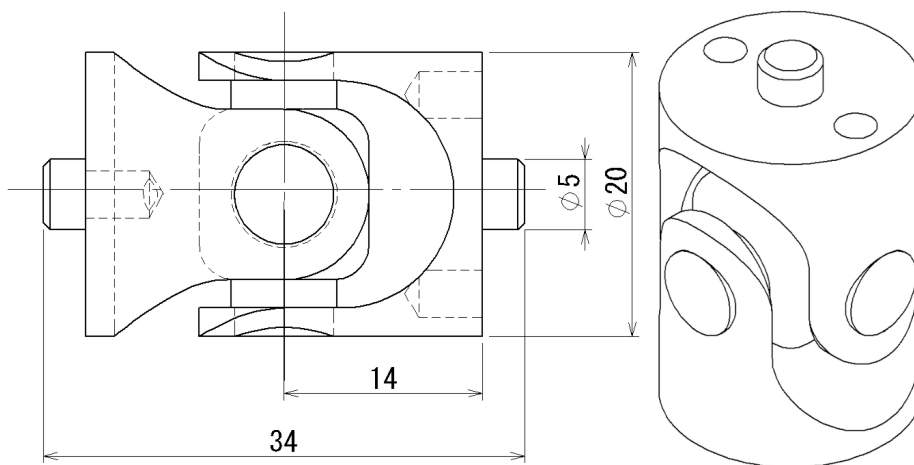


Figure 3.5 Assembly drawing and isometric view of upper passive joint for WL-16.

3.3.4 WL-16 の仕様

開発した WL-15 の外形寸法図を図 3.6 に、仕様を表 3.1 に示す。また各部の名称を図 3.7 に、外形写真を図 3.8 に示す。

WL-16 は、WL-15 と同様 2 本のスチュワート・プラットフォーム型の脚と腰部で構成されている。脚機構は片足につき 6 本の直動アクチュエータと上下の受動ジョイントを備える。対偶配置は WL-15 のものを完全に踏襲している。

電装品のうち制御用コンピュータは骨盤後部、バッテリーや DC サーボドライバ、姿勢角センサなどは骨盤内に配置し、骨盤上部には人間の搭乗を目的としたシートを備えた。足部は足底に床反力取得用 6 軸力覚センサを備える。

WL-16 は全高 1217 mm、全幅 610 mm、全長 620 mm と WL-15 とほぼ同じ大きさであるが、重量は WL-15 の 57 kg (バッテリー搭載時 65 kg) に対し 48 kg (バッテリー搭載時 56 kg) と約 10 kg の軽量化に成功している。

また、脚の可動範囲は図 3.9 に示すように、前後方向は最大 1020 mm、左右方向は 1360 mm、上下方向は 340 mm を確保した。

3.4 歩行制御法

第 2 章で詳説した WL-15 の歩行制御法は、モーメント補償軌道算出アルゴリズムを用いて任意の下肢軌道および ZMP 軌道から腰部の補償軌道を算出し、それらの軌道を設定歩行パターンとして生成し、この歩行パターンのおりにロボットをプログラム制御するものであった。これはすなわちある種のフィードフォワードを行っていることに等しく、これにより初期値問題では非発散解を求めることが困難な ZMP 方程式の解を用いてロボットを制御することができる反面、その実際の制御性能はパターン生成に用いる仮定やモデルの妥当性に大きく左右される。

この歩行パターン生成時においては 2.4 節にて述べたような仮定をおくことが必要となり、この仮定が成り立たないような環境下ではロボットは安定に歩行できなくなる可能性がある¹。

歩行パターン生成時のモデルと実環境の間に大きな誤差を生ずるような状況の例としては：

¹ ただし ZMP 安定判別規範において、理論的には ZMP が支持多角形の十分内側にあれば、必ずしも ZMP 軌道は設定値にきれいに追従する必要はなく、多少の ZMP 偏差があってもロボットは転倒しない。

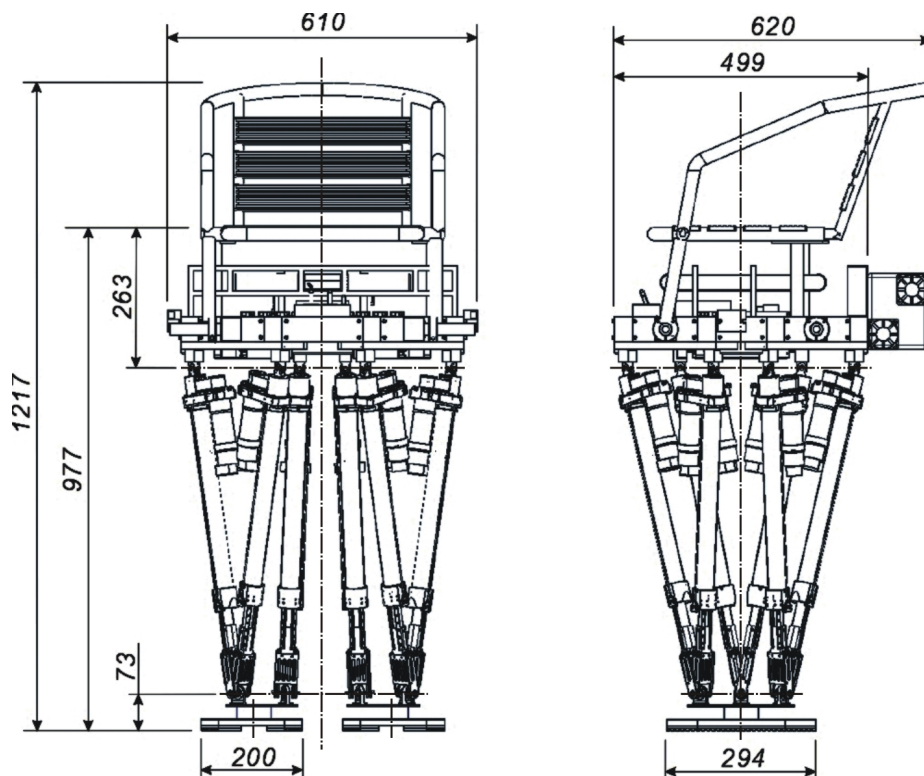


Figure 3.6 Assembly drawing of WL-16.

Table 3.1 Specifications of WL-16.

Model No.	WL-16
Dimension / Weight	
Height	1217 mm
Weight	48 kg
Mechanism	
Link Mechanism	Stewart Platform
Degrees of Freedom	6 x2
Actuator	
Motor	DC Servomotor
Rated Power	150 W
Lead of Ball Screw	12 mm
Stroke	350 mm
Computer / Electric System	
CPU	Pentium III 850 MHz
DC Servo Driver Type	Titech Driver Ver.1
Batteries	
Type	Ni-MH
Nominal Voltage	21.6 x2 V
Equipment	
Force / Moment sensor	IFS-67M25T50 x2
3-axis Angle Detector	GU-3024

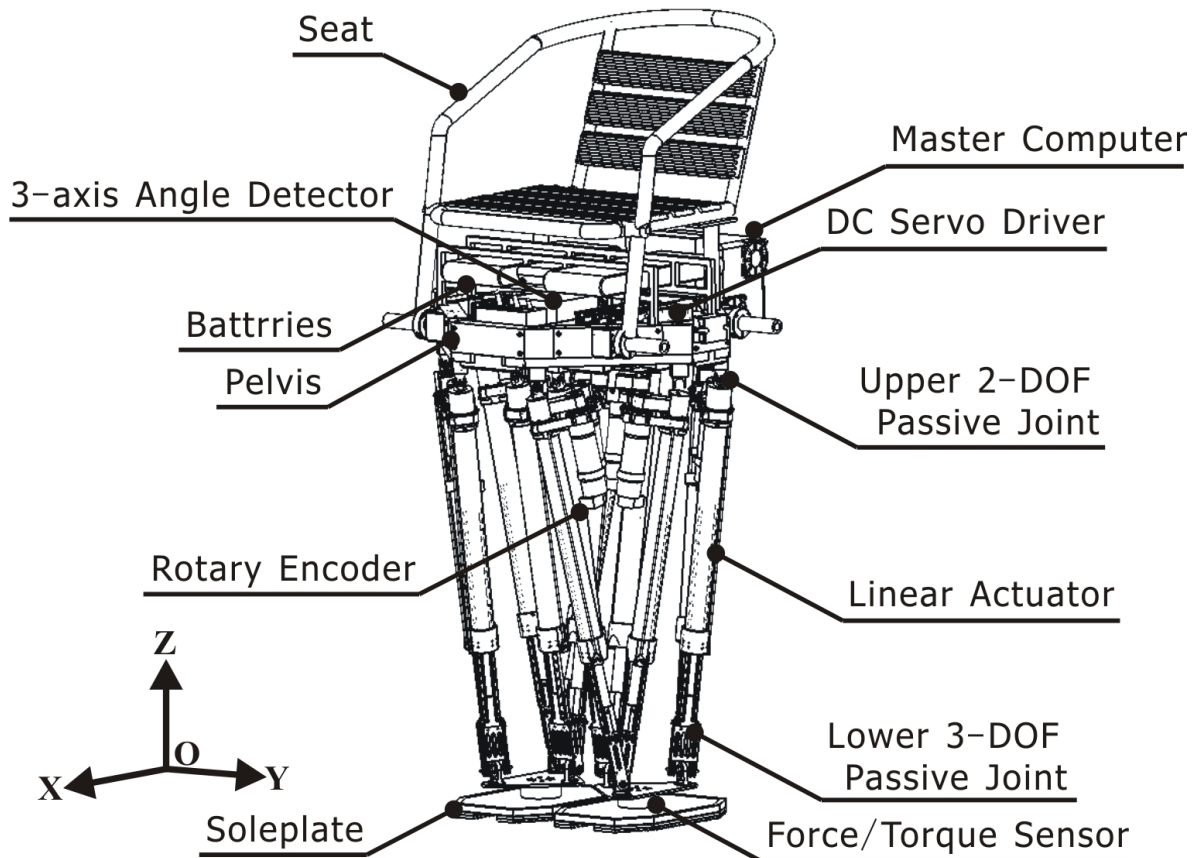


Figure 3.7 Outline of WL-16.



(a) Front view.

(b) Isometric view.

(c) Side view.

Figure 3.8 Photograph of WL-16.

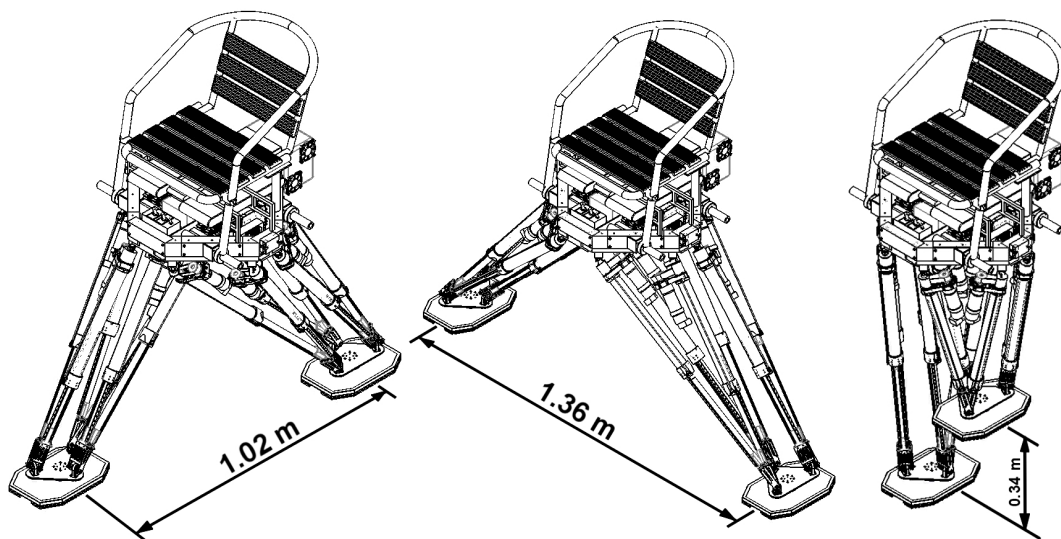


Figure 3.9 Movable range of WL-16's leg.

- ・ ロボットの体重などにより路面が変形する場合 (2.4.3 項仮定②不成立).
- ・ ロボットの足部が路面に対し滑りを生ずる場合 (2.4.3 項仮定⑥不成立).

のような場合があるが、これ以外にも：

- ・ ロボットを構成する各リンクの微小なたわみ
- ・ 路面の微小な凹凸

のように、正確なモデル化が困難な現象も (モデル化を行っていないために) モデル誤差を生じ、これらがある程度大きくなるとロボットが転倒する原因となる。

一方、第 2 章で述べた試作機 WL-15 は機構にバックラッシュが多くまた剛性も低かったが、歩行パターンを用いたプログラム制御のみで若干の凹凸のある屋外路面での歩行に成功している。この理由が、機構のバックラッシュや剛性の低さがモデル誤差に起因する着地衝撃を緩和していたと考えれば、バックラッシュの低減と高剛性化を図り開発した WL-16 は、着地衝撃を吸収し振動を抑制する何らかのフィードバック制御が必要となると考えられる。

そこで WL-16 においては、WL-15 で用いた ZMP 安定判別規範に基づくフーリエ変換によるモーメント補償軌道算出法により生成された歩行パターンを用いたプログラム制御に加え、重量物積載歩行時の構造部材のたわみなどのモデル誤差を原因として生じる着地衝撃の吸収と振動の抑制を目的として、脚の動作に仮想コンプライアンス制御を導入した。仮想コンプライアンス制御は、6 軸力覚センサにより足部にかかる力とモーメントを測定し、このデータよりバネ-ダンパ系の運動方程式に基づいて算出した操作量を足部の目標軌道に足し合わせながら制御を行うもので、各アクチュエータは位置制御のみを行いながらも足部は仮想的に力制御されるものであり、具体

的な手法としては平林らの方法[123]を位置制御へ適用したものをを用いた。

2足歩行ロボットの安定化を目的としたインピーダンス制御の実施例は多く[124-126]、ほとんどのものが不整地歩行時における着地衝撃の吸収を目的としている。

これらに対し、重量物積載歩行を行う必要のある本ロボットでは、これを重量物積載時の構造部材のたわみやアクチュエータの応答偏差に起因する着地衝撃と振動の抑制を主な目的として仮想コンプライアンス制御を適用した。また特に、本ロボットは脚機構に6自由度パラレルメカニズムを用いており、逆運動学演算が容易なために6自由度仮想コンプライアンス制御を適用した。

仮想的なコンプライアンスを実現する運動は以下の式で記述される。

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\Delta\bar{\mathbf{x}}_f + \mathbf{C}\dot{\bar{\mathbf{x}}}_f \quad (3.1)$$

また、 $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^6$ と $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^6$ は以下のような仮想ばね係数、仮想粘性係数である：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & & & & & 0 \\ & K_y & & & & \\ & & K_z & & & \\ & & & K_{mx} & & \\ & & & & K_{my} & \\ 0 & & & & & K_{mz} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_x & & & & & 0 \\ & C_y & & & & \\ & & C_z & & & \\ & & & C_{mx} & & \\ & & & & C_{my} & \\ 0 & & & & & C_{mz} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

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。

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}}_f(t) = \frac{\bar{\mathbf{x}}_f(t) - \bar{\mathbf{x}}_f(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.4)$$

これを用いて式(3.1)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。

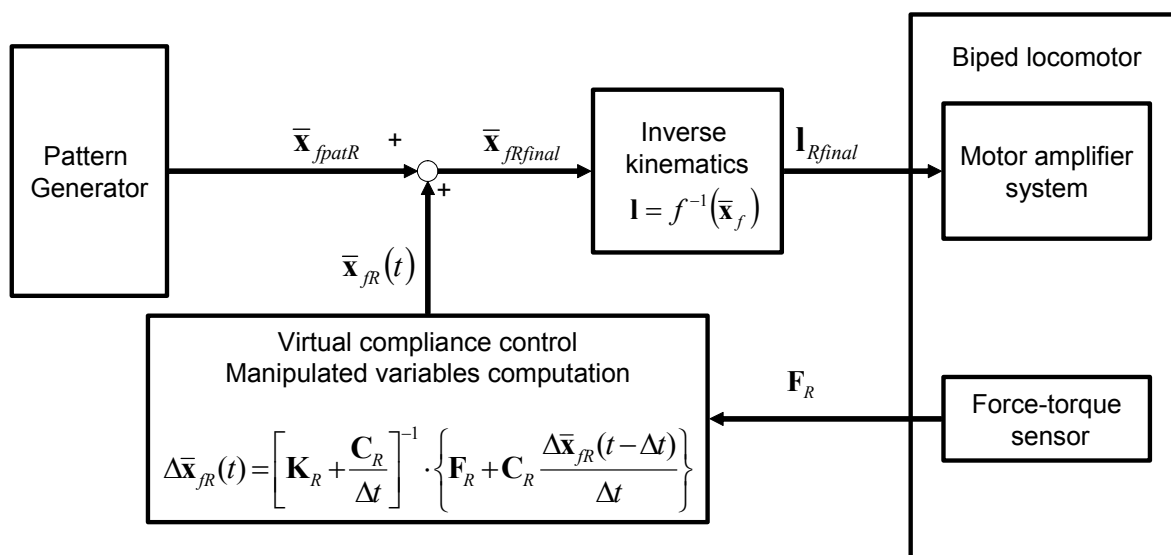


Figure 3.10 Control system including virtual compliance control of leg motion.

$$\Delta\bar{\mathbf{x}}_f(t) = \left[\mathbf{K} + \frac{\mathbf{C}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ \mathbf{F} + \mathbf{C} \frac{\Delta\bar{\mathbf{x}}_f(t-\Delta t)}{\Delta t} \right\} \quad (3.5)$$

図 3.10 に、この仮想コンプライアンス制御を含む歩行制御系の構成を示す。

式(3.5)よりもとめられる $\Delta\bar{\mathbf{x}}_f(t)$ はすなわちコンプライアンス移動量の目標値であり、これは 2.4 節で述べた方法によりオフラインで生成された歩行パターンに足しあわされ、足先位置・姿勢の目標値が求められる。この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。

3.5 評価実験と考察

開発した WL-16 とその歩行制御法を用い、複数の評価実験を行った。

評価する項目は以下のものである：

- ・ バックラッシュ低減の評価
- ・ 可動範囲拡大に伴う最大歩幅の評価
- ・ 凹凸路面における歩行の評価
- ・ 可搬重量の評価
- ・ 人間搭乗歩行能力の評価

これらについて以下に述べる。

3.5.1 バックラッシュ評価実験

エンドエフェクタのヨー軸周りのバックラッシュを評価するため、充分水平かつ平坦な路面上において、比較的ガタの影響が出やすい歩幅 100 mm/step, 歩行周期 1.92 s/step, 前進の歩行パターンで歩行実験を行った。

歩行パターン生成時に設定した ZMP 軌道および実測した ZMP 軌道を図 3.11 に示す。また、ロボットの骨盤に設置した姿勢角センサのデータのうち Yaw 軸まわりの姿勢角を、WL-15 を同様の条件のもとで歩行させたときの Yaw 軸まわりの姿勢角と比較した図を図 3.12 に示す。

WL-15 は、この条件（歩幅 100 mm/step, 歩行周期 1.92 s/step, 前進）での歩行においては、歩き出した直後に -6 deg 程度の Yaw 軸姿勢角偏差をもち、この後も元の軌道に復帰することは無かった。この現象は機構のバックラッシュが原因であるといえる。WL-16 においてはこのような現象は見られず、また振幅も最大が 1 deg 程度とかなり低減できていることが確認できる。また図 3.11 より、ZMP 軌道も大きな振動は見られず、安定に歩行できていることが確認できる。

この結果より、脚機構の Yaw 軸まわりのバックラッシュの低減が確認できた。

3.5.2 大歩幅歩行実験

可動範囲の拡大を検証するために、充分水平かつ平坦な路面上において、WL-15 では可動範囲が不足して実現できなかった歩幅 300 mm, 歩行周期 1.92 s/step の歩行を行わせた。歩行実験の様子を図 3.13 に示す。また、ZMP 軌道を図 3.14 に示す。

図 3.14 の ZMP 軌道より、大きな振動も無く安定に歩行できていることが分かる。

これより、可動範囲を拡大でき、これにより WL-15 に比べ歩行可能な最大歩幅を改善できたことを確認した。

3.5.3 凹凸路面足踏み実験

仮想コンプライアンス制御の凹凸路面歩行における有効性を検証するために、充分平坦な床面の上に、厚さ 5 mm のアクリル板を敷き、擬似的な不整地を作成し、歩行周期 0.96 s/step の歩行パターンを参照軌道として、仮想的な不整地として厚さ 5 mm の板を右足で踏むようにし、継続的な足踏みが可能かどうかを調べる実験を行った。

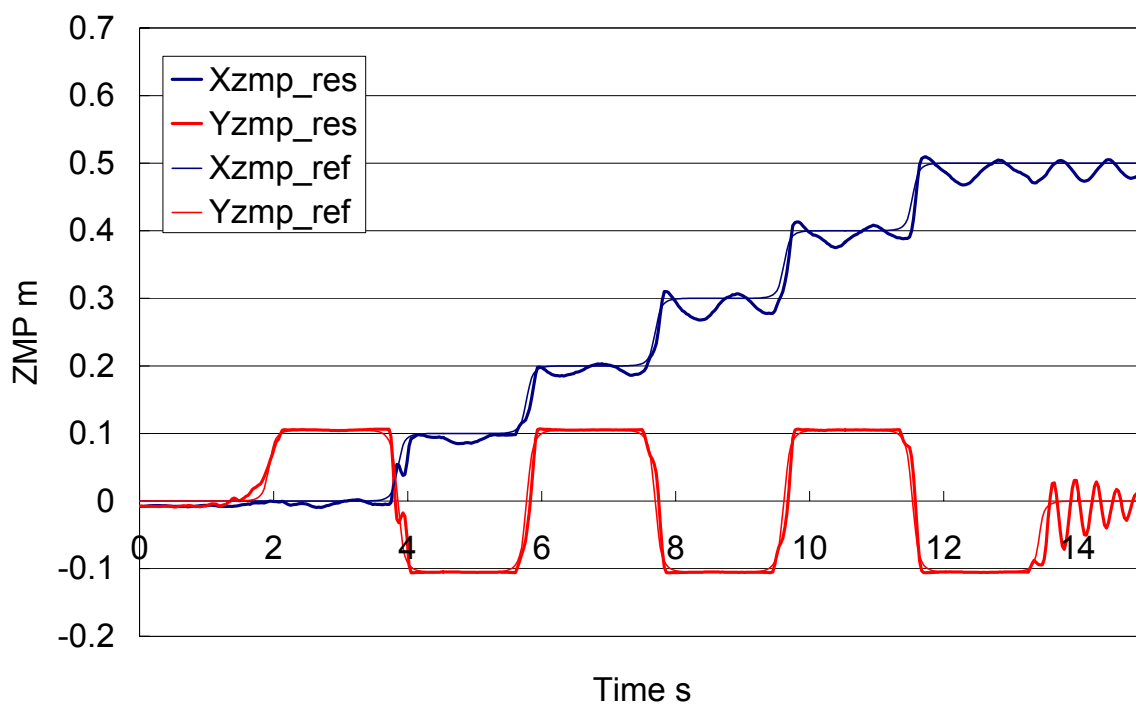


Figure 3.11 ZMP trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 1.92 s/step, step length: 100 mm/step)

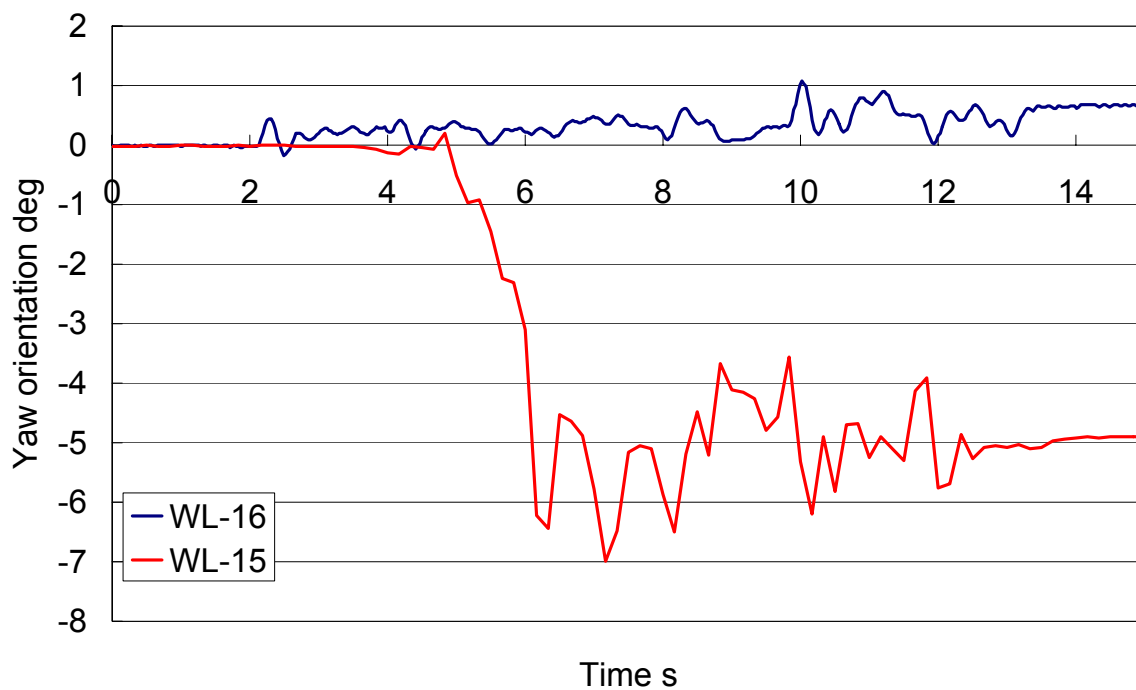


Figure 3.12 Waist orientation about Yaw axis of WL-15 and WL-16.

(Walking forward, walking cycle: 1.92 s/step, step length: 100 mm/step)

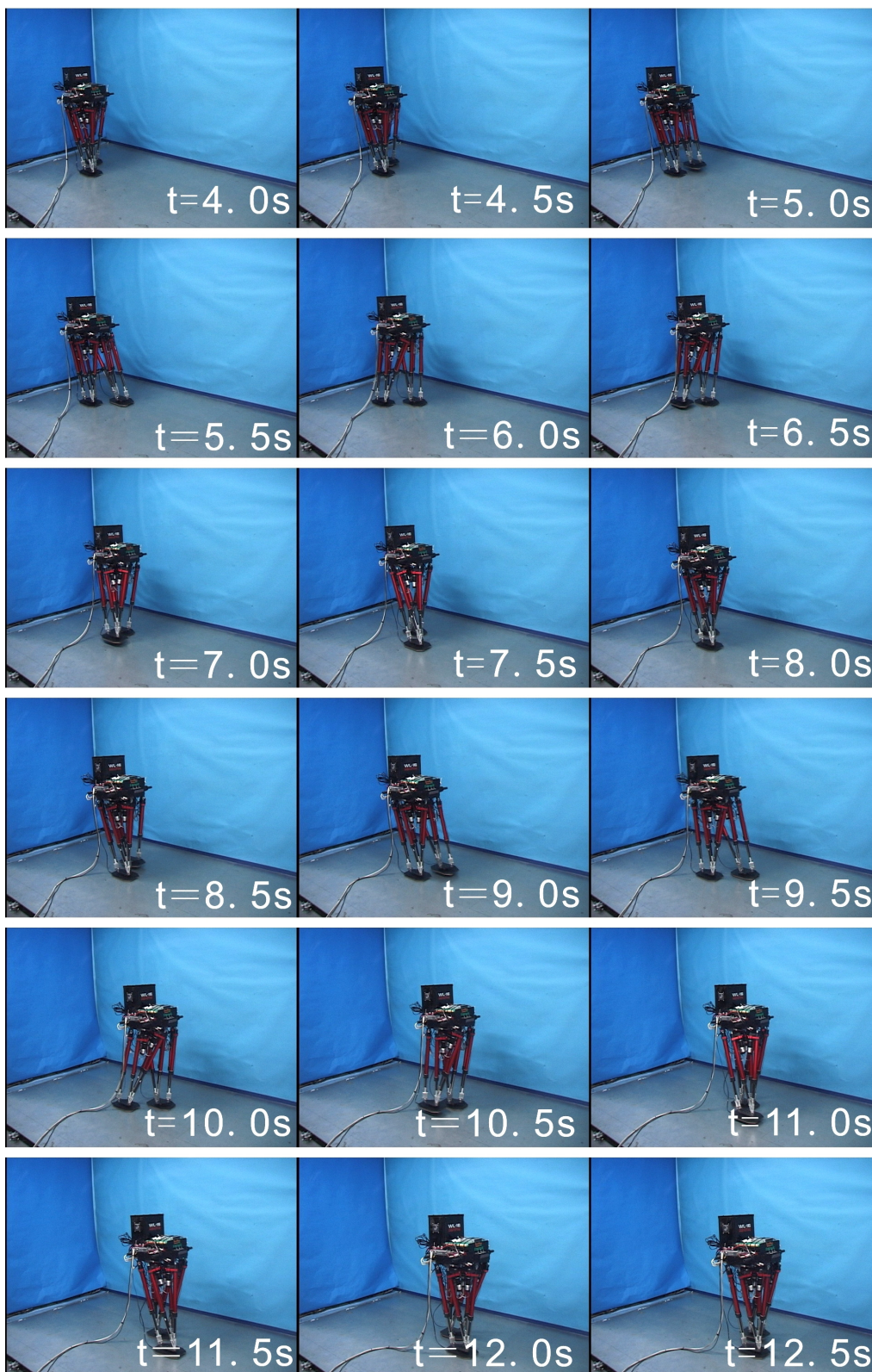


Figure 3.13 Walking experiment of WL-16.

(Walking forward, walking cycle: 1.92 s/step, step length: 300 mm/step)

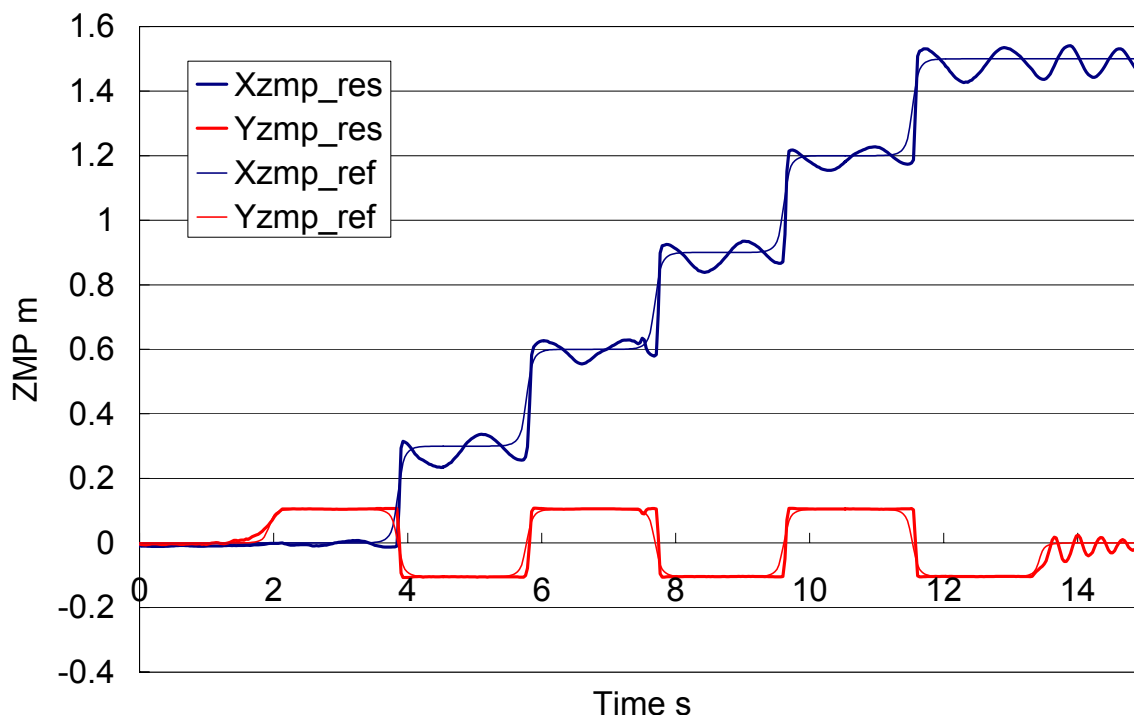


Figure 3.14 ZMP trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 1.92 s/step, step length: 300 mm/step)

コンプライアンス係数は発振しないよう定め, $K_z = 100 \text{ N/mm}$, $C_z = 10 \text{ Ns/mm}$, K_{mx} , $K_{my} = 30000 \text{ Nm/rad}$, C_{mx} , $C_{my} = 2400 \text{ Nms/rad}$ とした. その他の軸に関してはコンプライアンスを持たない設定とした.

歩行実験の様子を図 3.15, 3.16 に示す. 図中黄色い板が厚さ 5 mm のアクリル板であり, 図 3.15 は仮想コンプライアンス制御を用いた場合, 図 3.16 は仮想コンプライアンス制御を用いない場合の連続写真である.

この結果, 仮想コンプライアンス制御を用いない場合は転倒してしまったが, 仮想コンプライアンス制御を用いることで転倒せずに足踏みを続けることができた. 仮想コンプライアンス制御を用いた場合と用いない場合の ZMP 軌道を図 3.17, 図 3.18 に, それぞれの場合の骨盤姿勢角を図 3.19 に示す. 各図中 X の文字はロボットが転倒を始めてしまい介助者がロボットを支えたため計測を打ち切ったことを示す.

図 3.19 に示す骨盤の姿勢角に関しては, 仮想コンプライアンス制御を用いた場合にも最大で 5 deg ほどの比較的大きなゆれがあるが, 歩行終了後すぐに減衰して収まっていることがわかる.

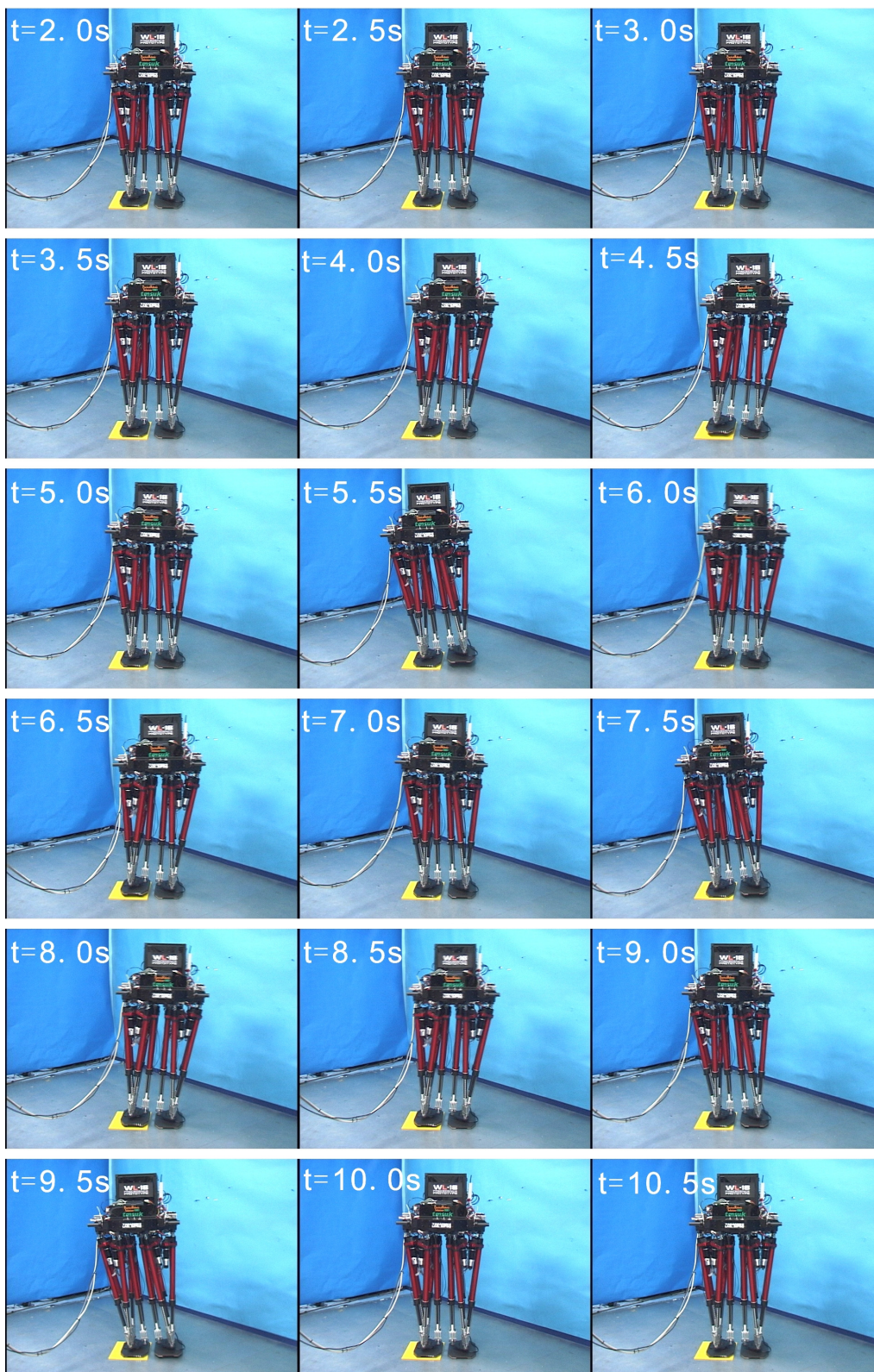


Figure 3.15 Stepping experiment of WL-16.
(Stepping, walking cycle: 0.96 s/step, height of unevenness: 5 mm)



Figure 3.16 Stepping experiment of WL-16.
(Stepping, walking cycle: 0.96 s/step, height of unevenness: 5 mm)

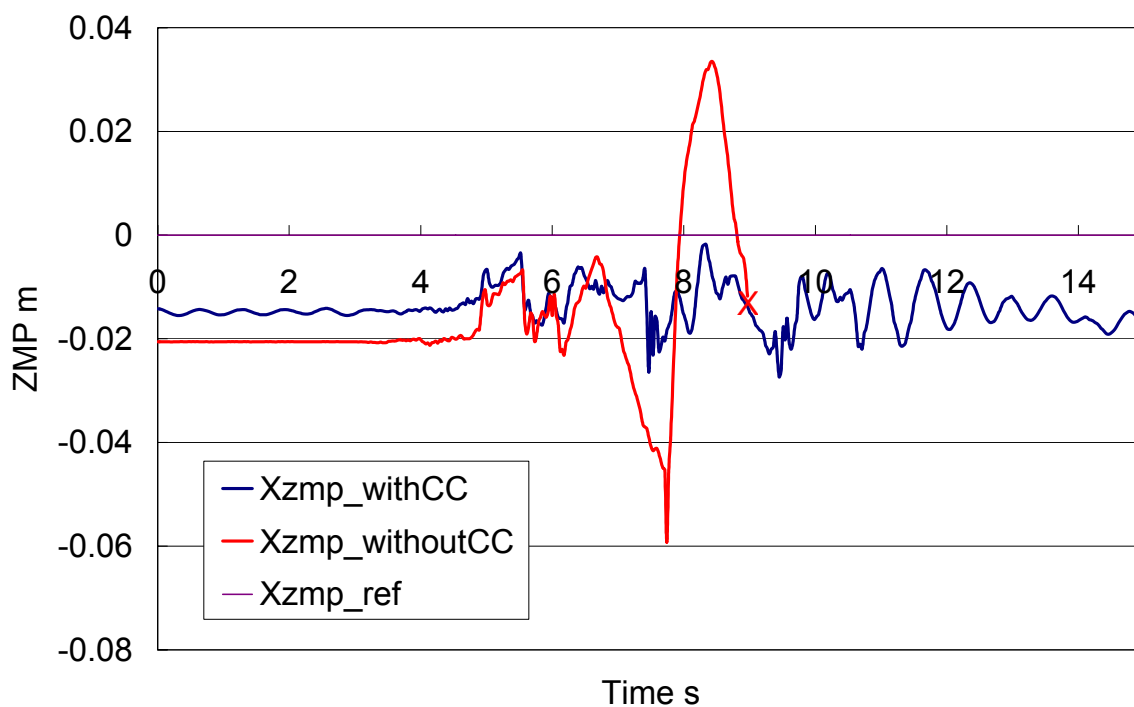


Figure 3.17 ZMP trajectories along X axis.
(Stepping, walking cycle: 0.96 s/step, height of unevenness: 5 mm)

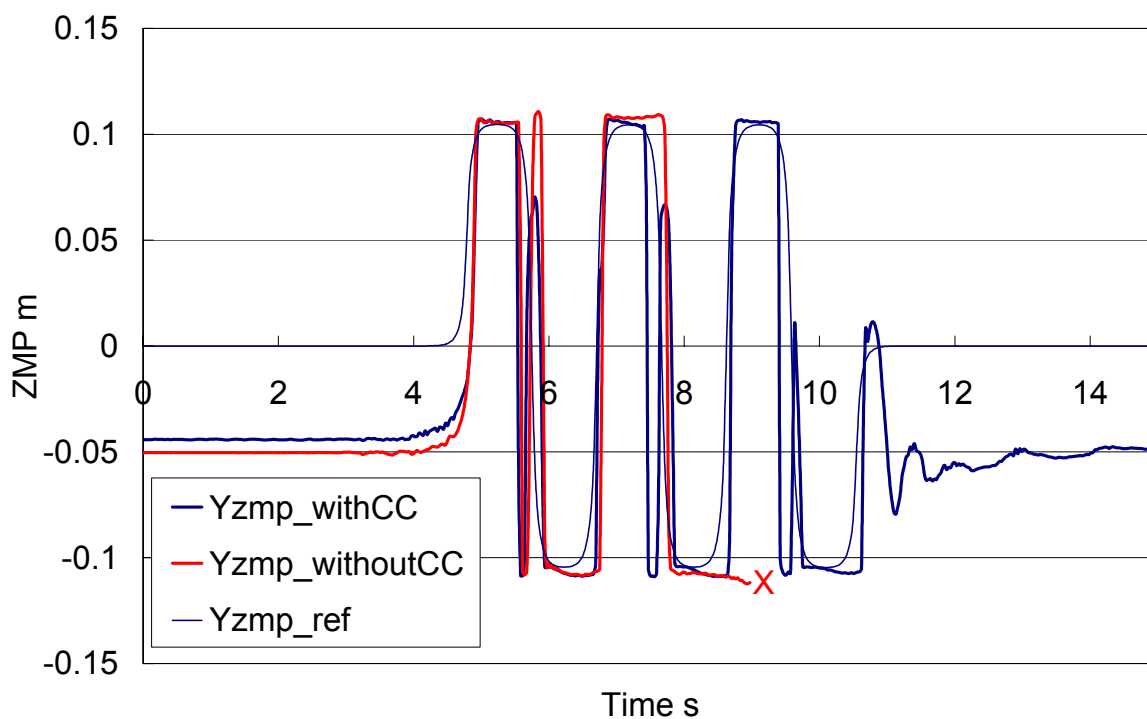


Figure 3.18 ZMP trajectories along Y axis.
(Stepping, walking cycle: 0.96 s/step, height of unevenness: 5 mm)

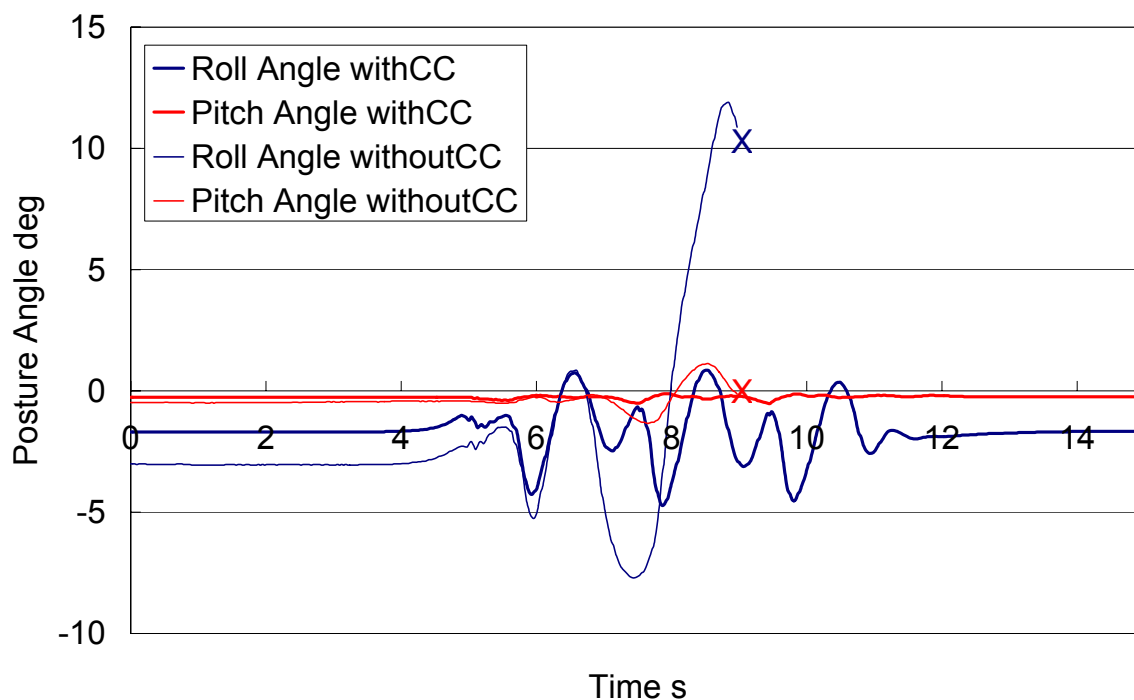


Figure 3.19 Posture orientation angle of the waist.

(Stepping, walking cycle: 0.96 s/step, height of unevenness: 5 mm)

一方図 3.18 からわかるように、実測 ZMP 軌道は両脚支持期では参照値と大きく偏差を持っているが、これはこのときには右足が多く荷重を負担しているために床反力が右足のほうに多くかかり、計算された ZMP が右側にずれてしまっていると考えられる。単脚支持相では ZMP は参照値におおむね一致していることから安定した歩行が継続できることがわかる。また、歩行終了後の ZMP のゆれはすばやく減衰している。

これらより、仮想コンプライアンス制御を適用することにより、着地衝撃の緩和と着地時に生じた振動をすばやく減衰させるのに効果があることがわかった。

これらのことから、仮想コンプライアンス制御の適用により微小な凹凸のある路面での歩行が可能になる見通しが得られた。

3.5.4 凹凸路面歩行実験

先ほどと同様な水平・平坦かつ十分な剛性を持つ床面の上に直径 150 mm、厚さ 2 mm のアクリル板をランダムにならべて擬似的な不整地を作成し、歩幅 100 mm/step、歩行周期 0.96 s/step の歩行パターンを用いて歩行実験を行った。コンプライアンス定数は先ほどの実験と同じものを用いた。

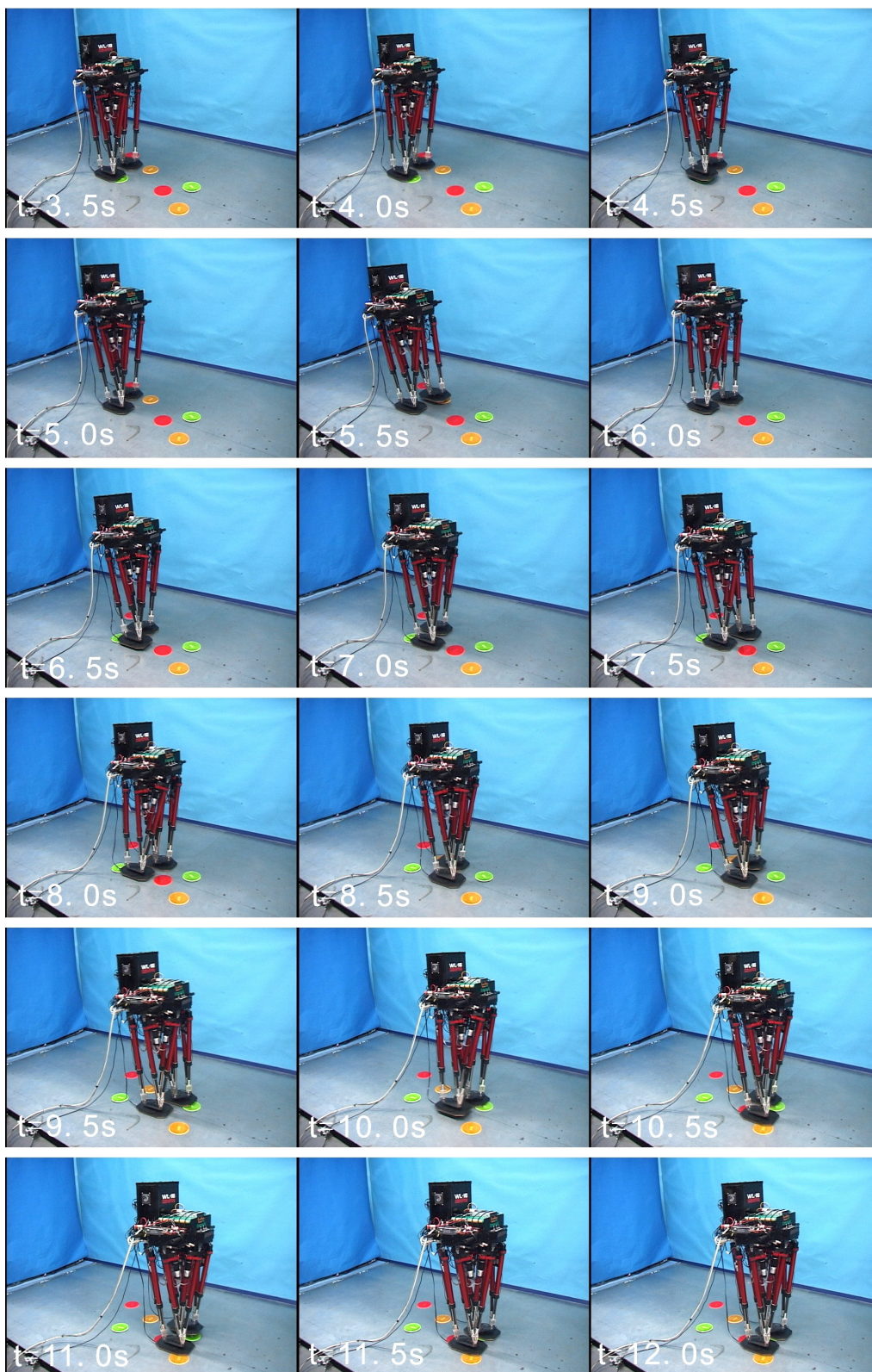


Figure 3.20 Walking experiment on uneven surface.

(Walking Forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 2 mm)

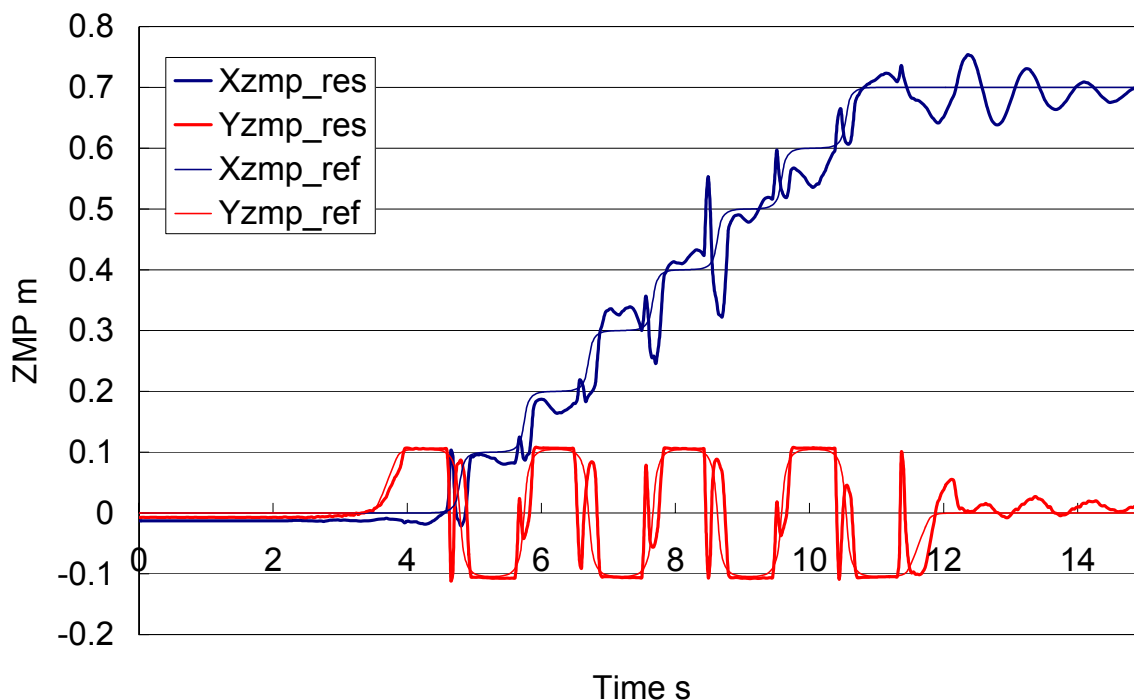


Figure 3.21 ZMP trajectories.

(Walking Forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 2 mm)

歩行実験の様子を図 3.20 に示す。図中赤色，黄色，緑色などの板が厚さ 2 mm のアクリル板である。また図 3.21 に ZMP 軌道を示す。

図 3.21 より，振動は大きいながらも時間がともに発散してゆく傾向は無く，不安定ながら最後まで歩行を継続できていることが分かる。仮想コンプライアンス制御の適用により微小な凹凸のある路面での歩行が可能になることが確認できた。

3.5.5 重量物積載歩行実験

可搬重量を評価するため，水平・平坦かつ十分な剛性を持つ床面において，骨盤上の搭乗者用シートに 50 kg の錘を固定した状態で歩幅 100 mm/step，歩行周期 0.96 s/step の歩行パターンを用いて歩行実験を行った。

歩行実験の様子を図 3.22 に示す。図中搭乗者用シートに固定されているのが 50 kg の錘である。ZMP 軌道を図 3.23 に示す。



Figure 3.22 Walking experiment carrying 50 kg load.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

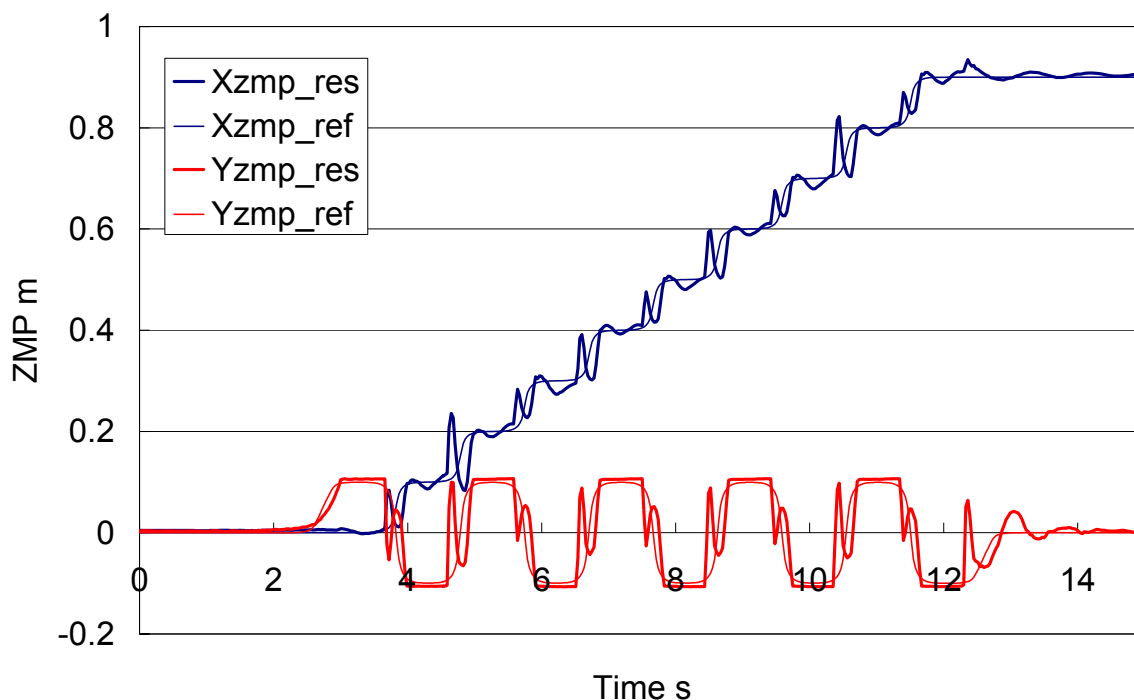


Figure 3.23 ZMP trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

コンプライアンス係数は、 $K_z = 200 \text{ N/mm}$ 、 $C_z = 20 \text{ Ns/mm}$ 、 $K_{mx} = 200000 \text{ Nm/rad}$ 、 $C_{mx} = 6000 \text{ Nms/rad}$ 、 $K_{my} = 60000 \text{ Nm/rad}$ 、 $C_{my} = 4800 \text{ Nms/rad}$ とした。その他の軸に関してはコンプライアンスを持たない設定とした。

図 3.23 よりわかるとおり、水平平坦路面での歩行にもかかわらず振動は大きいですが、歩行には成功している。WL-15 では最大可搬重量が 18 kg であったのに対し、開発した WL-16 と仮想コンプライアンス制御を用い、設計仕様の 50 kg を積載した状態でも安定した歩行を実現した。

3.5.6 体重 50 kg 以下の成人女性搭乗 2 足歩行実験

人間を搭乗させて歩行することが可能であることを確認するため、水平・平坦かつ十分な剛性を持つ床面において、骨盤上の搭乗者用シートに体重 50 kg 以下の成人女性を搭乗させ、歩幅 100 mm/step、歩行周期 0.96 s/step の歩行パターンを用いて歩行実験を行った。

歩行実験の様子を図 3.24 に示す。また ZMP 軌道を図 3.25 に示す。



Figure 3.24 Walking experiment carrying an adult woman.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: adult woman)

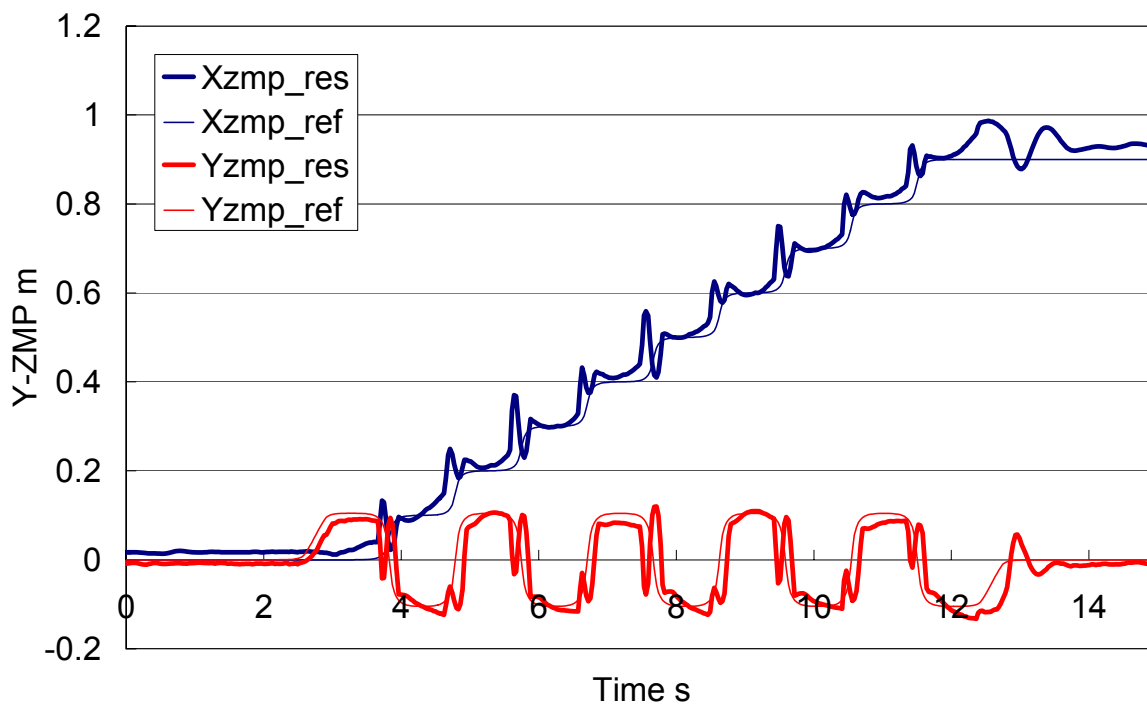


Figure 3.25 ZMP trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

搭乗者は2足歩行に関する予備知識は無く、なるべく動かないように注意してほしいことは伝えたが、倒れないように本人が能動的に運動してはいない。

コンプライアンス定数は3.5.5項の重量物積載歩行実験と同様のものを用いた。

図3.24, 図3.25よりわかるとおり、やはり多少の振動は見られるが、50 kgの重りを積載しての歩行に比べ急激なZMPの移動も少なく、比較的安定にWL-16に成人女性を搭乗させての歩行に成功した。

3.5.7 体重60 kgの成人男性搭乗2足歩行実験

積載可能重量を評価するため、水平・平坦かつ十分な剛性を持つ床面において、骨盤上の搭乗者用シートに体重60 kgの成人男性を搭乗させ、歩行周期0.96 s/step、歩幅100 mm/stepの前進、後退、左右方向および旋回を含む歩行パターンを用いて歩行実験を行った。

歩行実験の様子を図3.26~3.28に示す。図3.26には歩幅100 mm/stepでの前進歩行、図3.27には左旋回歩行、図3.28には左方向への歩行の様子を示した。



Figure 3.26 Walking experiment carrying a 60 kg adult man.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg adult man)



Figure 3.27 Walking experiment carrying a 60 kg adult man.
(Turning walking, walking cycle: 0.96 s/step, load: a 60 kg adult man)



Figure 3.28 Walking experiment carrying a 60 kg adult man.
(Walking leftward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg adult man)

これらの図よりわかるように、体重 60 kg の成人男性を搭乗させた状態で、前進、左右方向の歩行と旋回動作に成功した。同様に後退歩行にも成功しており、水平面内においてのさまざまな方向への歩行を実現した。

3.5.8 考察

以上の実験結果のように、開発した WL-16 は、脚機構のバックラッシの低減と可動範囲の拡大に成功し、歩幅 300 mm での歩行に成功した。このことは一般に可動範囲が狭いことが知られているスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムを用いた脚機構であっても、平面内の歩行であれば比較的大きな歩幅での歩行も可能であることを示せたものと考えられる。

また仮想コンプライアンス制御の導入により微小な凹凸のある路面での歩行と重量物積載歩行に成功した。このことにより、モデル誤差に起因する着地衝撃の吸収と振動の抑制に仮想コンプライアンス制御の導入が効果があることを確認できたと考えられる。不整路面における歩行に関しては、過去に足底にハードウェア的なコンプライアンスを持たせるといったアプローチ[127]も行われてきたが、機構の付加が必要でありパラメータの変更が容易でなく、これらの点に関しては本手法がより有効であると考える。しかしながら一方、パラメータの変更が容易であることにより、良好な結果をもたらすパラメータの絞込みが困難であるという問題もある。何らかの評価関数を用いて歩行中に自律的にパラメータを調整するという方法も検討できると思われる。

また、開発した WL-16 と仮想コンプライアンス制御の導入により、50 kg の重量物積載歩行や体重 50 kg 以下の成人女性を搭乗させての 2 足動歩行、体重 60 kg の成人男性を搭乗させての 2 足動歩行に世界で初めて成功した。とくに重量物積載時の歩行安定化に仮想コンプライアンス制御が有効であることが実証できた。

重量物積載歩行に関しては、図 3.23 のように平坦路面にもかかわらず比較的大きな振動が確認できる。この振動にはこれには 2 つの原因が考えられる。ひとつは積載物の重量による構造部材のたわみであり、もうひとつは積載物の重さや重心位置などのモデル誤差である。これらのモデル誤差はこれら自身を直接厳密にセンシングするのは困難であるが、ある程度モデルを同定した上で何らかの安定化制御により安定歩行を可能にするのが有効であろうと思われる。

同様のことは人間搭乗歩行にも指摘できる。図 3.25 よりわかるとおり、X 方向の ZMP は全歩行周期を通じてやや前にずれているが、これは搭乗者の重心位置が力学モデルのそれよりずれていることによると考えられる。今回の実験では、搭乗者には

なるべく動かないよう注意してもらっていたが、このように人間が動かないようにすることは乗り物としては望ましい状況ではない。搭乗者の力学モデルは刻一刻と変化し、またその運動は歩行系全体に影響するのが当然であるから、これら搭乗者の力学モデルをある程度推定してフィードバック的（もちろんフィードフォワード的に用いることも考えられる）に用いる制御法の開発が必要であると考えられる。

また、WL-16の積載可能重量である60 kgという数値は、2足歩行車いすとしての実用化を考えた場合には十分な仕様ではなく、何らかの手法により更なる改良が必要であると考えられる。

さらには、WL-16では平面内歩行のみの人間搭乗歩行の成功であり、階段昇降性能の開発が必要と考えられる。

しかしながら、体重50 kg以下の成人女性を搭乗させての2足動歩行、体重60 kgの成人男性を搭乗させての2足動歩行に世界で初めて成功し、これらより人間搭乗型2足歩行ロボットの開発という技術課題が提案した手法により実現可能であることを示せたことは意義があると考えられる。

3.6 まとめ

本章では、実際に人間を搭乗させて2足動歩行を行う事が可能なロボット WL-16の開発について、その機械モデルと仮想コンプライアンス制御の導入、またこれらを用いて行った評価実験と考察を述べた。

WL-16は体重50 kg程度の人間を搭乗させて歩行できること、および多少の凹凸がある路面においても安定に歩行できることを開発要件として開発したもので、基本的な自由度配置はWL-15のものを踏襲し、広可動範囲化、高可搬重量化を目指してバックラッシュの少なく推力とストロークの大きい直動アクチュエータと、同じくバックラッシュが少なく小型・軽量の上下の受動ジョイントを新たに設計した。また特に骨盤上部には人間が搭乗するためのシートを備え、その大きさはWL-15とほぼ同じであるが約10 kgの軽量化に成功した。

歩行制御法に関しては、WL-15で用いたZMP安定判別規範に基づくフーリエ変換によるモーメント補償軌道算出法により生成された歩行パターンを用いたプログラム制御に加え、重量物積載歩行時の構造部材のたわみや路面の凹凸などのモデル誤差を原因として生じる着地衝撃の吸収と振動の抑制を目的として、脚の動作に仮想コンプライアンス制御を導入した。仮想コンプライアンス制御は、6軸力覚センサにより

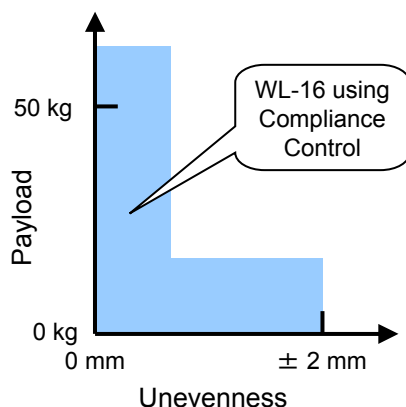


Figure 3.29 Performance of WL-16.

足部にかかる力とモーメントを測定し、このデータよりバネダンパ系の運動方程式に基づいて算出した操作量を足部の目標軌道に足し合わせながら制御を行うもので、各アクチュエータは位置制御のみを行いながらも足部は仮想的に力制御されるものである。

開発した WL-16 と歩行制御法を用いて性能を評価したところ、歩幅 300 mm での歩行や微小な凹凸のある路面での安定歩行、50 kg の重量物を積載しての歩行、また史上初となる人間搭乗 2 足動歩行に成功し、その有効性を確認した。

図 3.29 に、WL-16 の不整地における歩行性能と重量物積載性能を図示した。図中水色の範囲が WL-16 によって実現できた領域である。重量物を積載して不整路面を歩行することには成功していないが、WL-16 のハードウェアと仮想コンプライアンス制御を用いることによって、2 mm 程度の凹凸のある路面における無積載での歩行、および 50 kg の重量物積載歩行、また人間搭乗 2 足歩行に成功した。この人間搭乗歩行実験の成功により、水平平坦路面においては積載重量比 r_{pw} 1.25 を実現した。

一方で、積載可能重量の増加や階段昇降性能の開発などに関しては未確認であり、今後はこれらの問題点に関する改善策の提案と評価について次章以降に報告する。

第4章 自重支持トルク低減機構の開発

- 4.1 はじめに
- 4.2 基本設計
- 4.3 自重支持トルク低減機構の設計
- 4.4 評価実験と考察
- 4.5 まとめ

4.1 はじめに

第3章では、実際に人間を搭乗させて2足動歩行を行う事が可能なロボット WL-16 の開発について、その機械モデルと仮想コンプライアンス制御の導入、またこれらを用いて行った評価実験と考察を述べた。

この WL-16 により、体重 50 kg 以下の成人女性を搭乗させての2足動歩行、体重 60 kg の成人男性を搭乗させての2足動歩行に世界で初めて成功した一方で、積載可能重量は最大 60 kg となっており、この仕様は2足歩行型車いすや汎用移動台車としての応用には十分とは言えず、今後の改善を必要とする結果となった。

そこで、以下の2点を開発要件として、WL-16 の改良を行うことを考えた：

- ・ 積載可能重量を 80 kg まで増加すること。
- ・ 消費エネルギーの低減を図ること。

本研究では特に、ロボット本体のアクチュエータの出力の増加を行わず、準受動的な機構により脚にかかる主に垂直方向の荷重を低減することにより上記2点の開発要件を満たすことを図った。本章ではこの「自重支持トルク低減機構」について、予備実験とその基本設計、構造と動作原理およびこれを用いて行った評価実験と考察を述べる。

4.2 基本設計

積載可能重量を増加するのにもっとも単純で容易な方法は、高出力なアクチュエータを採用すること、あるいはアクチュエータの減速比を上げ出力トルクを増加させる

ことなどが挙げられる。しかしながら前者は大型化・高コスト化につながり、後者はロボットの高速移動に不利である。すでに WL-16 の寸法は人間の住環境下で稼働するロボットとしては決して小さくはなく、これ以上の大型化は望ましくないと判断した。アクチュエータの減速比に関してもこれ以上大きく取ると歩行周期 1 s/step 程度の歩行すら困難となり、これも望ましくないと考えた。

これらの問題に対し、ロボットアームの研究分野においては、アーム自身の重量を機構的に補償することによりモータに求められる出力トルクを低減する手法が提案されている[128-130]。これら自重補償機構は、機構自体は複雑な構造となるものの、非常に出力の小さいアクチュエータですばらしい運動性能を実現するものである。

広瀬らは複雑なワイヤー機構と重りを用いた自重補償機構を提案している。これは主に平行リンクからなるシリアルマニピュレータの形を取っており、アームの中心を通るワイヤーの張力を二重プーリにより適切な値に調節するものである[128]。

森田らはバネとワイヤーを用いた自重補償機構を開発している[129, 130]。これは引張りばねと定荷重ばねを巧みに使い、3 軸直行型の自重補償を実現するものである。

しかしながら、マニピュレータとしての利用であれば問題にならないが、2 足歩行型のような全体が軽量に作られる歩行ロボットではベース部の重量増加は大きな問題となる。特に広瀬らの機構はベース部に何らかの重りを必要とするため、脚機構に用いる場合には非常に大きな重りが必要となる。

また、こういった機構の研究はアームの自重による悪影響の問題になりやすいシリアルメカニズムに関する研究が多く、スチュワート・プラットフォームにおいてはそのまま利用できる手法の提案例は無かった。

そこで本研究においては、歩行中に脚部に働く力の大半がロボットの自重を支持する力であるという実験結果に注目し、機構的にロボットの全重量を補償するのではなく、単純な機構により重量を支持するのに必要なモータトルクを低減する機構の開発を着想した。

次節以下では、この「自重支持トルク低減機構」の開発に先立って行った予備実験について報告し、最後に基本設計について述べる。

4.2.1 予備実験 1：歩行中に足部にかかる力について

図 4.1 は 50 kg の重量物を骨盤上に積載して歩行した場合に、足部 6 軸力覚センサに働く力を示したものである。これより、この程度の歩行周期と歩幅であれば、歩行中に足部すなわち脚機構に働く力はその大部分が垂直方向すなわちロボットの自重と積載物の重量を支持する力であることがわかる。

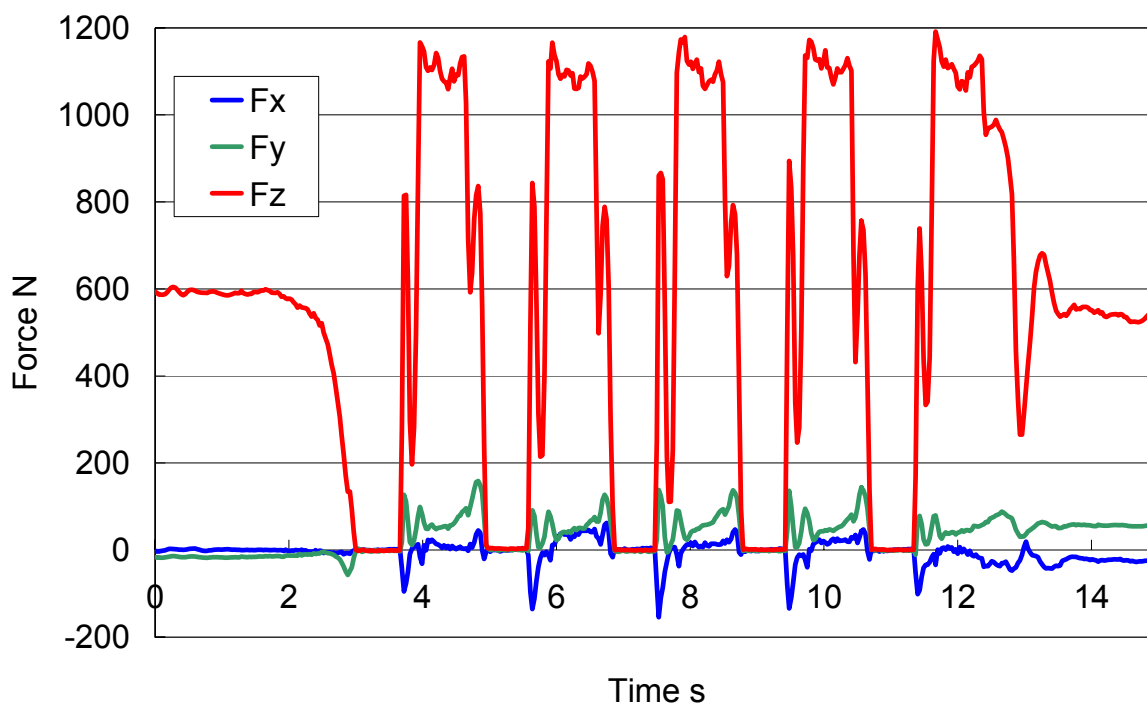


Figure 4.1 Forces acting on robot's foot during walking with 50 kg load.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 sec/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

このことより、単に簡便なばね要素を用いた機構によって、垂直方向の力を負担してやることによって、積載歩行時のアクチュエータの必要トルクを軽減することができることがわかった。

4.2.2 予備実験2：脚部各直動アクチュエータのトルク配分について

図4.2は、WL-16が両脚支持期から右足のみで立つ単脚支持期、そして再び両脚支持期に戻る、といった歩行パターンを用いて行った実験により得られた、右脚直動アクチュエータのモータ電流を図示したものである。各直動アクチュエータのリンク番号と位置の関係も図中に示した。

0番と1番リンクには引張荷重がかかっていることがわかる。したがって各アクチュエータにばね要素を付加した場合は、それがかえって負担となるアクチュエータも存在することになる。各アクチュエータに付加することは脚機構の肥大化を招くリスクもあり、本研究では、ばね要素は各脚に1本ずつ取り付けることとした。

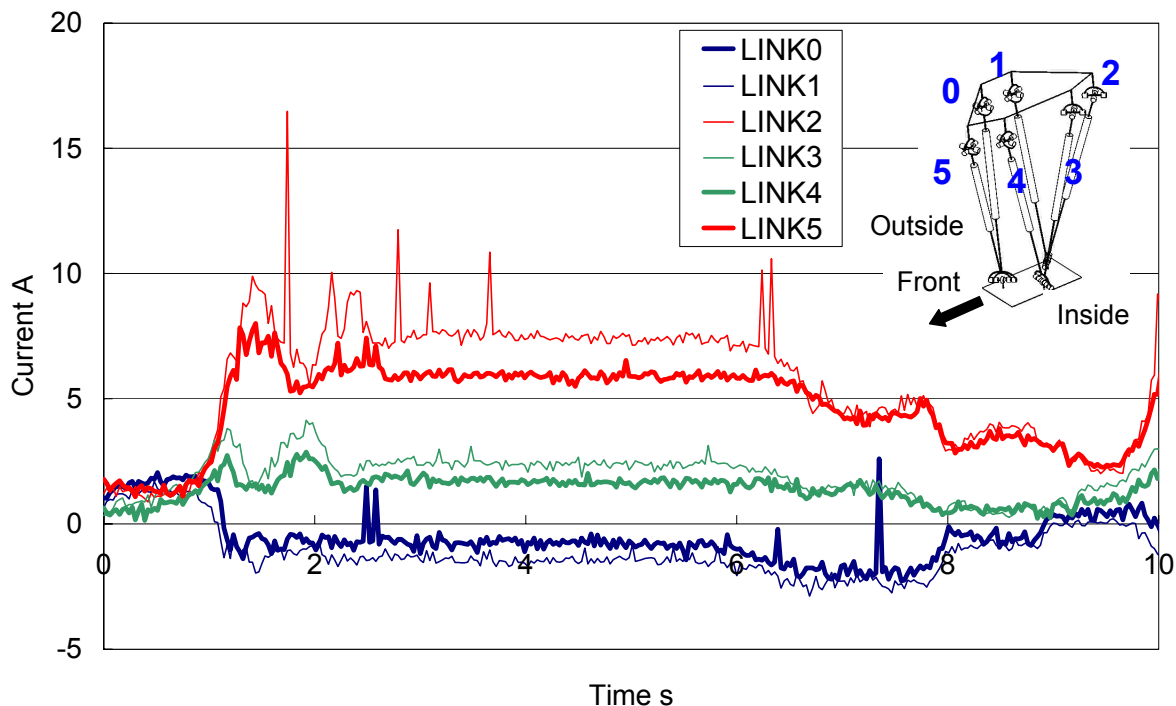


Figure 4.2 Motor current of right leg actuator.
(Standing with only right leg)

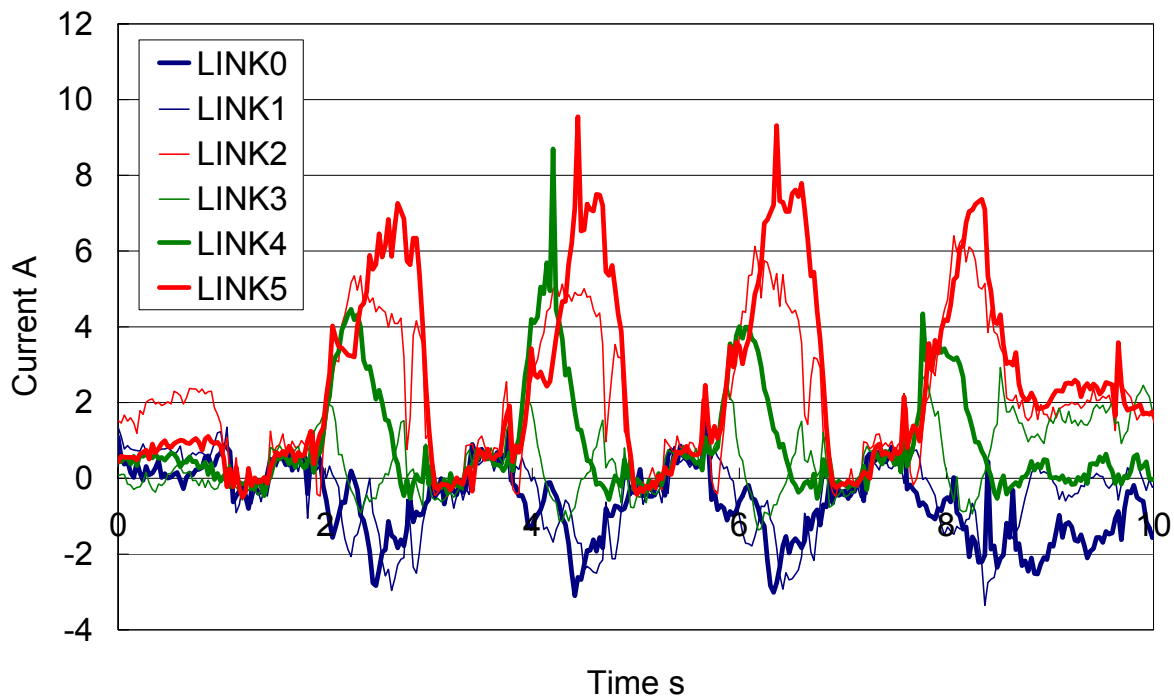


Figure 4.3 Motor current of right leg actuator.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

4.2.3 予備実験3：全歩行周期におけるトルク推移について

図4.3は、前進歩行中の右脚各直動アクチュエータのモータ電流の推移を図示したものである。各直動アクチュエータのリンク番号と位置の関係は図4.2に示したとおりである。

図より、大きくトルクを発生している期間とほとんどトルクを発生しない期間が1秒おきに交互に繰り返していることがわかる。この大きくトルクを発生している期間が、右脚が支持脚となっている期間であり、ほとんどトルクを発生しない期間は遊脚となっている期間である。したがってばね要素を各脚に取り付けた場合には、立脚期には必要トルクの低減に有効であるが、遊脚期には必要トルクが増加することになる。

これより、支持脚期・遊脚期に応じてばね要素の働きを切り替える何らかのメカニズムが必要であると考えられる。

4.2.4 概念設計

前項までに述べた予備実験の結果より、WL-16に有効な自重支持トルク低減機構は、以下のような機能的要求を満足することが必要であると考えられた：

- ・ 脚にかかる主に垂直方向の力を負担すること。
- ・ 脚に1本ずつ、計2本装着されること。
- ・ 支持脚期・遊脚期に応じてばね要素の働きを切り替えるメカニズムを備えること。

これらの機能的要求を満足するべく開発した自重支持トルク低減機構の動作イメージを図4.4に示す。

この機構は、脚機構であるスチュワート・プラットフォームの内側のクリアランスを利用して、ロボット腰部と足部の間に各直動アクチュエータと並列に各脚1本ずつ取り付けられる。各機構はそれぞれガススプリングとスライダ機構により構成され、これらはそれぞれ何らかのロック機構を持つ。立脚期にはスライダはロックされてガススプリングのロックは解除され、これによりこの機構は上下方向に推力を持つ。遊脚期にはスプリングはロックされてスライダのロックが解除され、この場合は推力は発生しない。

この概念設計に基づき開発した実際の自重支持トルク低減機構に関して次節に述べる。

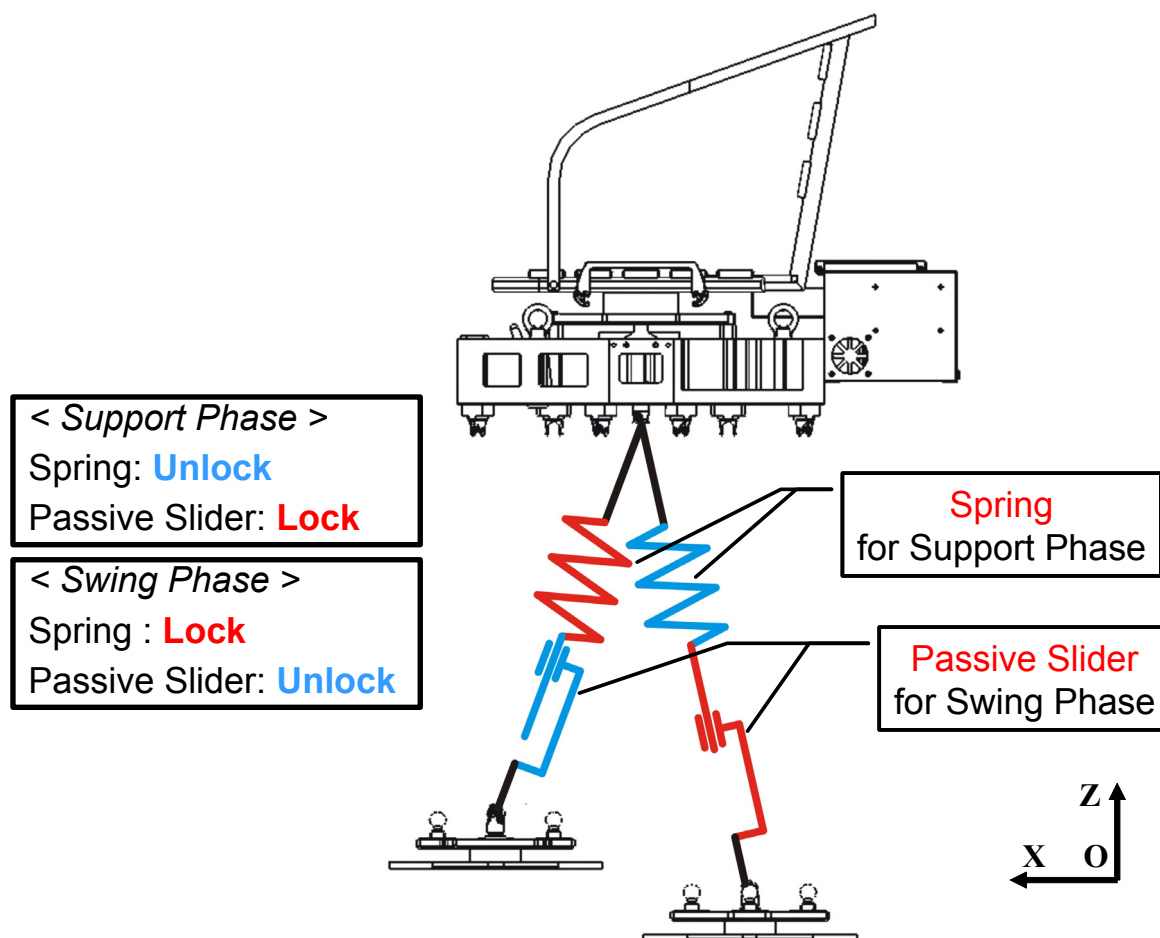


Figure 4.4 Concept of Support Torque Reduction Mechanism.

4.3 自重支持トルク低減機構の設計

開発した自重支持トルク低減機構は、バネ反力の異なる2本のロック機能付きガススプリングが直列に配置された構造を持っており、各脚に対して1ユニットずつ組込まれる（図4.5）。この機構は立脚期・遊脚期に応じて反力の異なる2本のバネの効果を切替えることができ、また主として鉛直方向の荷重を負担する機構となっている。

また、この機構は骨盤下面の中心近くと各足部上面の中心を結ぶように取り付けられるが、図4.6に示したように、ロボット骨盤の重心は骨盤下面の中心から比較的近く、また単脚支持期の設定ZMPは足部上面の中心に比較的近くに位置する（人間が搭乗しない状態では重心は図よりやや下に位置する）。このためこの機構の配置はロボット骨盤の重心と設定ZMPを結ぶ直線に近く配置されることになる。このことは骨盤や積載物の自重を支持する上で効果的であることを狙ったものである。

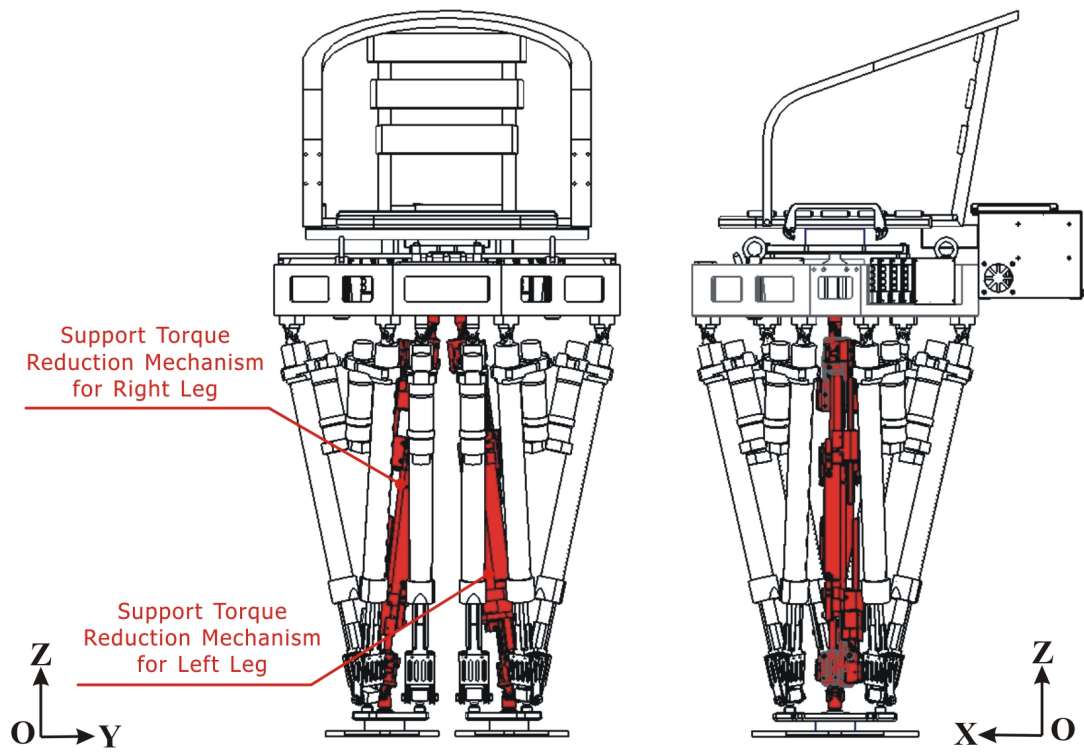


Figure 4.5 WL-16R with Support Torque Reduction Mechanism.

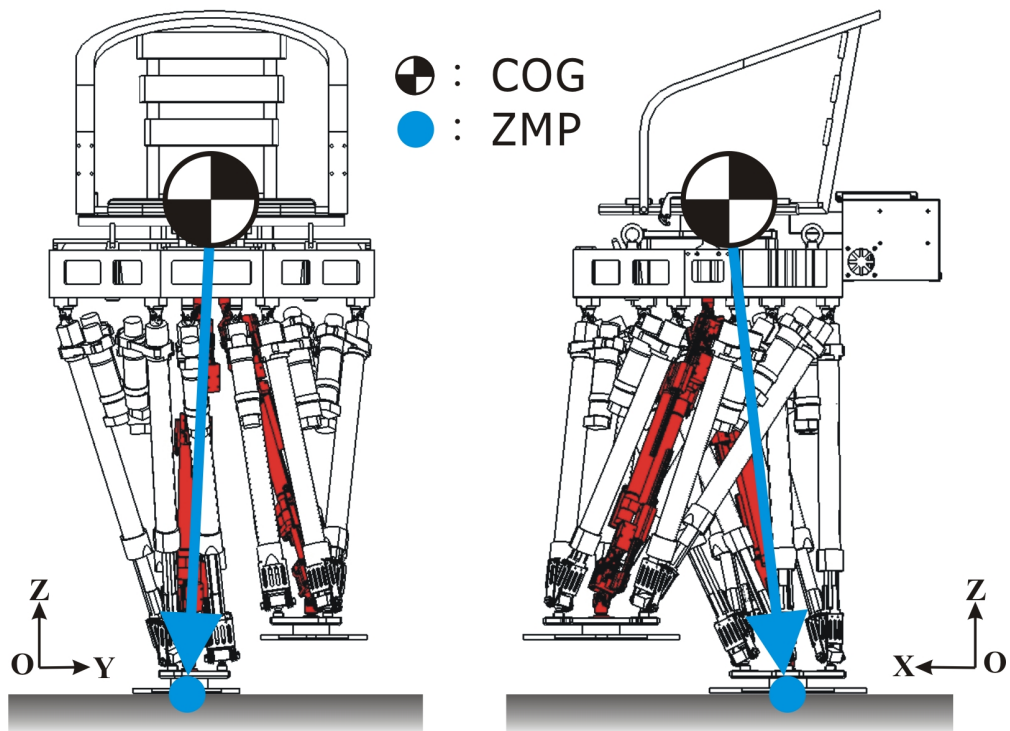


Figure 4.6 Location of COG, ZMP and Support Torque Reduction Mechanism.

図 4.7 はガススプリングの動作を切り替えるシーケンスを示したものである。立脚時には、反力の大きいガススプリングはロックを解除されて推力を発生し、一方反力の小さいガススプリングはロックされる。対して遊脚時には、反力の大きいガススプリングはロックされ、一方反力の小さいガススプリングはロックを解除されて推力を発生する。立脚期・遊脚期が切替わる時、バネの効果はソレノイドを用いてガススプリングのスイッチピンを吸引、開放することで切り替えられる。

自重支持トルク低減機構の概観図を図 4.8 に、写真を図 4.9 に示す。またこの機構の仕様を表 4.1 に示す。

本機構はガススプリング部、スイッチ機構部、ボールスプライン部から構成されており、以下各部の設計について詳述する。

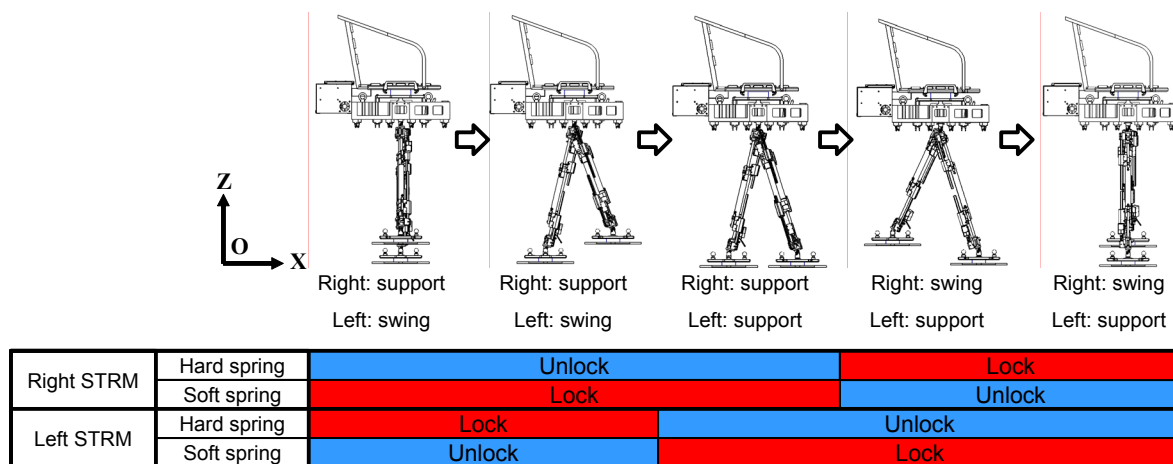


Figure 4.7 Operation sequence of Support Torque Reduction Mechanism.

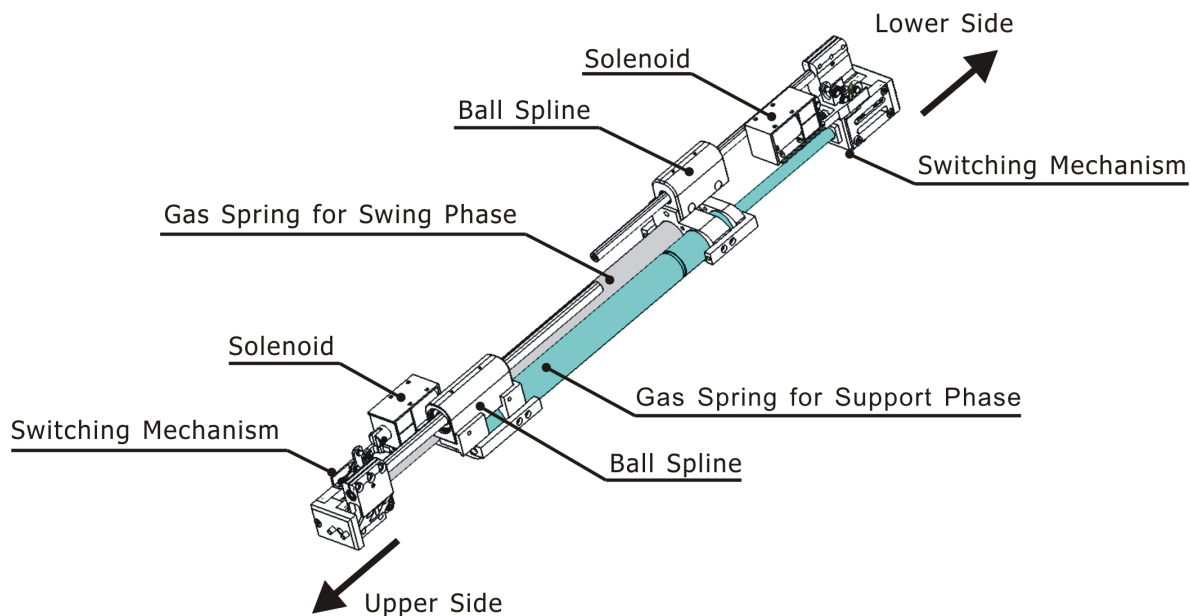


Figure 4.8 Outline of Support Torque Reduction Mechanism.

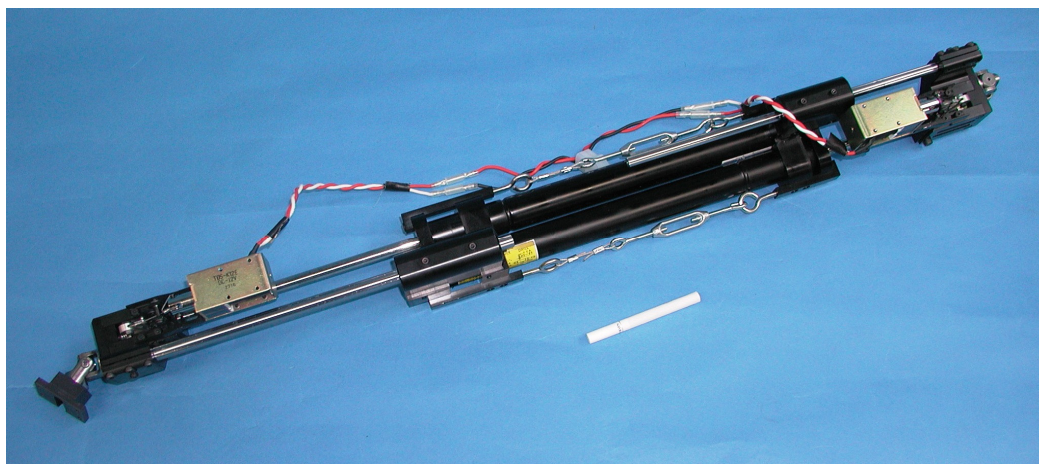


Figure 4.9 Photograph of Support Torque Reduction Mechanism.

Table 4.1 Specifications of Support Torque Reduction Mechanism.

Min. Length		465 mm
Stroke		350 mm
Reaction Force of Gas Spring for Swing Phase	Max.	229 N
	Min.	196 N
Reaction Force of Gas Spring for Support Phase	Max.	456 N
	Min.	392 N
Weight		2.6 kg

4.3.1 ガススプリング部の設計

この機構の要となるばね要素に必要な特徴としては、ロック機構を備えること、ストロークによる反力の変化が少ないこと、直動アクチュエータと同程度のストロークを確保できること、なるべく小型であることなどである。

本研究ではロック機能付ガススプリングを採用した。これはコイルバネや定荷重バネにくらべストロークが大きいこと、定荷重バネほどではないが反力変化がコイルスプリングより少ないこと、コンパクトであることなど理由である。

ガススプリングは、シリンダ部とロッド付ピストン部から構成されており、シリンダ内に充填されたガス圧力により反力を得、バネ作用をもたらす構造となっている。またロック機能付のものは、ピストンに設けられたバルブを開閉することによりピストンロッドの伸長を任意の位置で停止させることができる。

また, 4.2.4 項で述べた概念設計においては遊脚期用にロック機構付きのスライダ機構が必要であったが, 製作が困難であったために今回は非常に反力の弱いガススプリングで代用した.

図 4.10 にガススプリング部の組立図を示す. 遊脚用と立脚用の 2 種類のガススプリングを隣り合わせて配置している. 重量は 1700 g となった.

4.3.2 スイッチ機構部の設計

前項で述べたガススプリングのロック機能の切替はロッド先端部のピンを伸縮させることにより行うものであり, このピンを駆動する自己保持型ソレノイドを用いたスイッチ機構部を設計した.

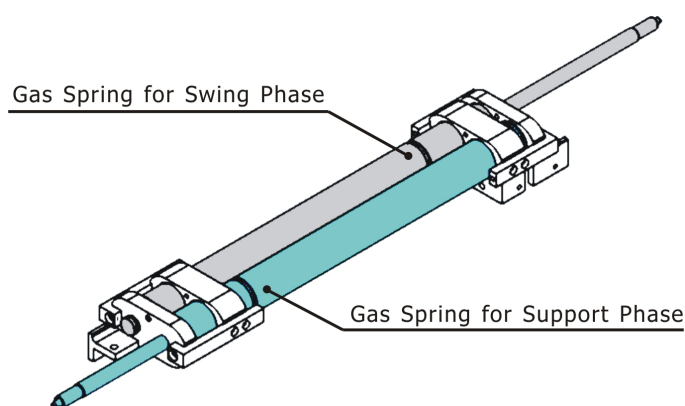


Figure 4.10 Gas spring unit.

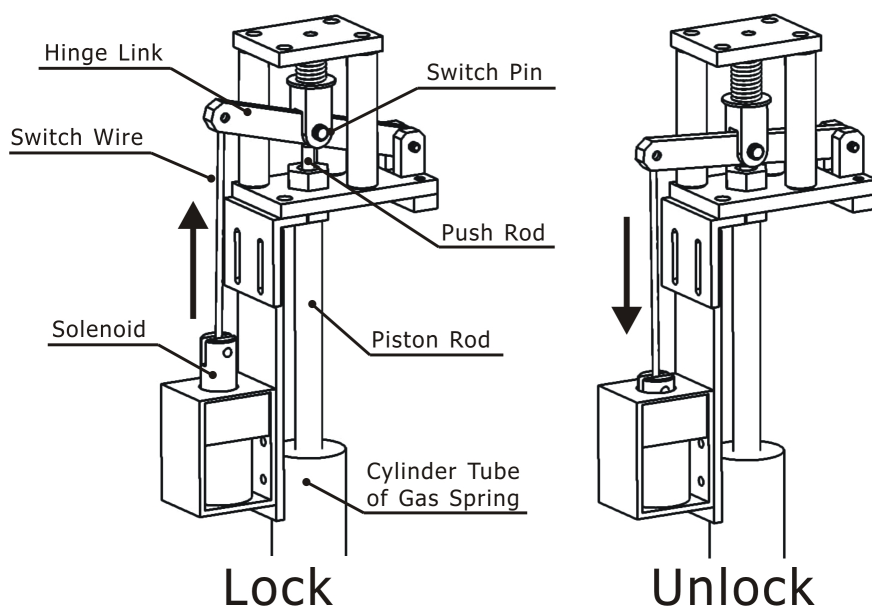


Figure 4.11 Theory of operation of switching unit.

動作原理を図 4.11 に示す。てこを利用しヒンジリンクがスイッチピンを押すことでロックが解除される。逆にスイッチピンを元の位置に戻すことでロックされる。てこの駆動には応答性および消費電力の観点から、吸引・開放時以外は無通電状態で位置を維持できる自己保持型ソレノイドを採用した。ユニット重量は 296 g である。

4.3.3 ボールスプライン部の設計

レイアウトの関係上、1 対のガススプリングを並列に組付けたため、各バネの軸は機構の中心軸より偏心しており、各ロッドには曲げモーメントが発生する。そのため、ボールスプラインを組付け、ロッドにかかる曲げモーメントを軽減している。

4.3.4 WL-16R の仕様

開発した自重支持トルク低減機構を取り付けるために、WL-16 の骨盤と足部に改良を施し WL-16R (Waseda Leg - No. 16 Refined) とした。仕様を表 4.2 に示す。また外形寸法図を図 4.12 に、外形写真を図 4.13 に示す。

Table 4.2 Specifications of WL-16R.

Model No.	WL-16R
Dimension / Weight	
Height	1290 mm
Weight	54 kg
Mechanism	
Link Mechanism	Stewart Platform
Degrees of Freedom	6 x2
Actuator	
Motor	DC Servomotor
Rated Power	150 W
Lead of Ball Screw	12 mm
Stroke	350 mm
Computer / Electric System	
CPU	Pentium III 850 MHz
DC Servo Driver Type	TD12770-48W10
Batteries	
Type	Ni-MH
Nominal Voltage	21.6 x2 V
Equipment	
Force / Moment sensor	IFS-67M25T50 x2
3-axis Angle Detector	GU-3024

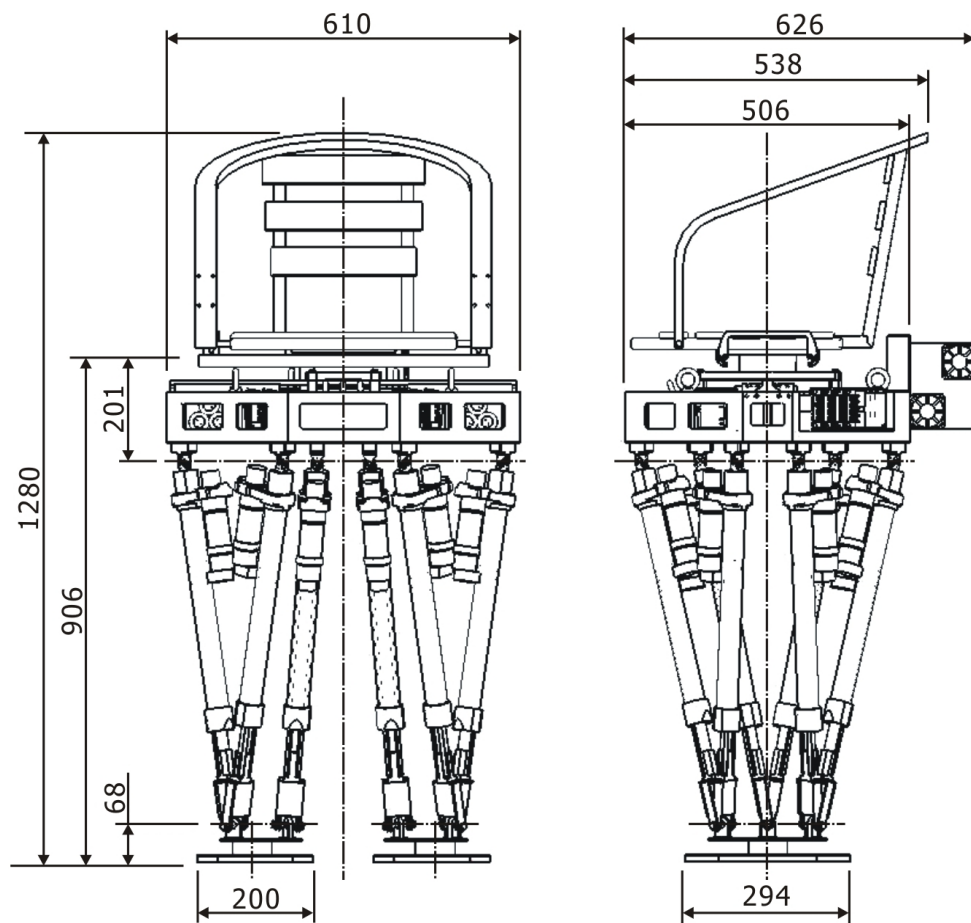
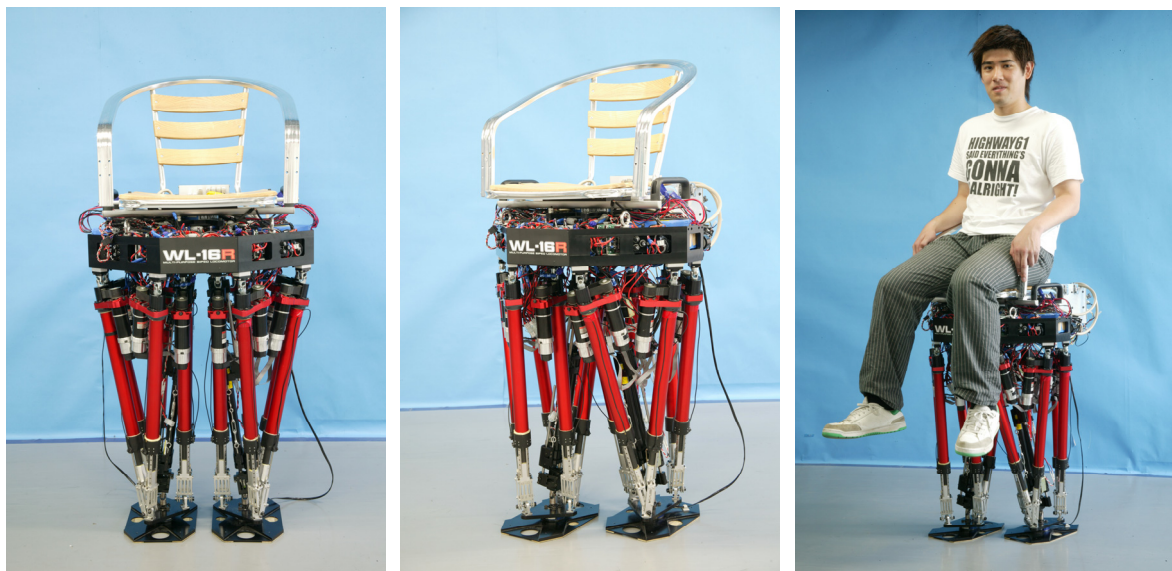


Figure 4.12 Assembly drawing of WL-16R.



(a) Front view.

(b) Isometric view.

(c) View carrying a man.

Figure 4.13 Photograph of WL-16R with STRM.

WL-16R は全高 1290 mm, 全幅 610 mm, 全長 626 mm となっており, 重量は 54 kg (バッテリー搭載時 61 kg) である.

新たに製作した骨盤はその内部にモータドライバやバッテリーなどを収納できるように設計したため, 重量は WL-16 に比べやや重くなったが, 搭乗者シートの座面の高さは骨盤下面から 160 mm となり, WL-16 における 220 mm より 60 mm 下げることができた.

4.4 評価実験と考察

開発した自重支持トルク低減機構と WL-16R を用いて, 複数の評価実験を行った. 評価する項目は以下のものである:

- ・ 自重支持トルク低減機構のモータ電流低減効果
 - ・ 自重支持トルク低減機構の消費電力低減効果
 - ・ 自重支持トルク低減機構を用いた場合の最大積載重量
- これらについて以下に述べる.

4.4.1 モータ電流低減の検証

開発した自重支持トルク低減機構の評価のため, 前進, 歩幅 100 mm/step, 歩行周期 0.96 s/step の歩行パターンを用い, 50 kg の重量物を積載して歩行実験を行った. 自重支持トルク低減機構はこれを組み込まない場合, 自重支持トルク低減機構は組み込むがスイッチング機能を用いない場合, 自重支持トルク低減機構を組み込みスイッチング機能も用いる場合の 3 通りの条件でそれぞれ電流を測定した.

右脚のリンク番号 0, 1, 2, 3, 4, 5 の直動アクチュエータの歩行中のモータ電流の測定結果を図 4.14~図 4.19 に示す. 図中赤線は自重支持トルク低減機構を組み込まない場合, 紺色の細線は自重支持トルク低減機構は組み込むがスイッチング機能を用いない場合, 紺色の太線は自重支持トルク低減機構を組み込みスイッチング機能も用いる場合を示している.

図 4.16 と図 4.19 にみられるように, リンク 2 とリンク 5 のモータ電流に大幅な低減が見られる. 特に遊脚時では, 本機構を用いない場合のモータ電流よりはマイナスに, つまり引張方向に大きい電流値で負担は増加しているものの, バネ効果の切替をしない場合と比較すると大幅な低減が確認できる. 図 4.14 と図 4.15 を見ると, リンク 0 とリンク 1 に関しても, 程度は小さいが電流の減少が見られる.

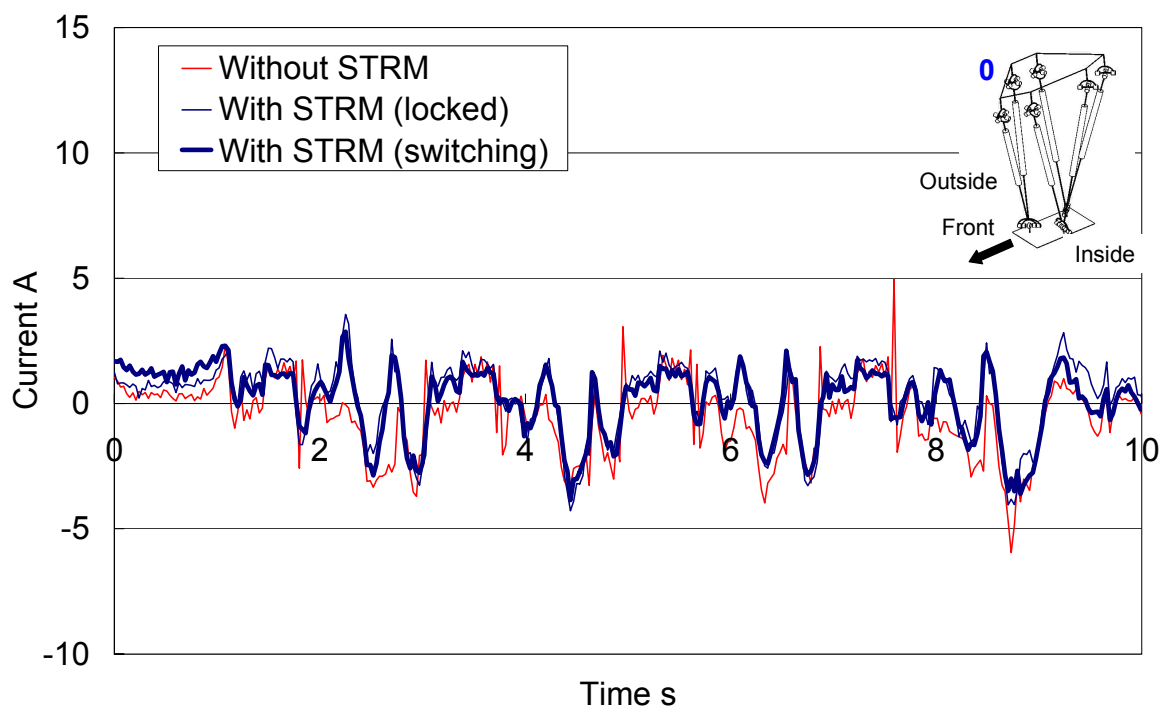


Figure 4.14 Motor current of right leg actuator 0.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

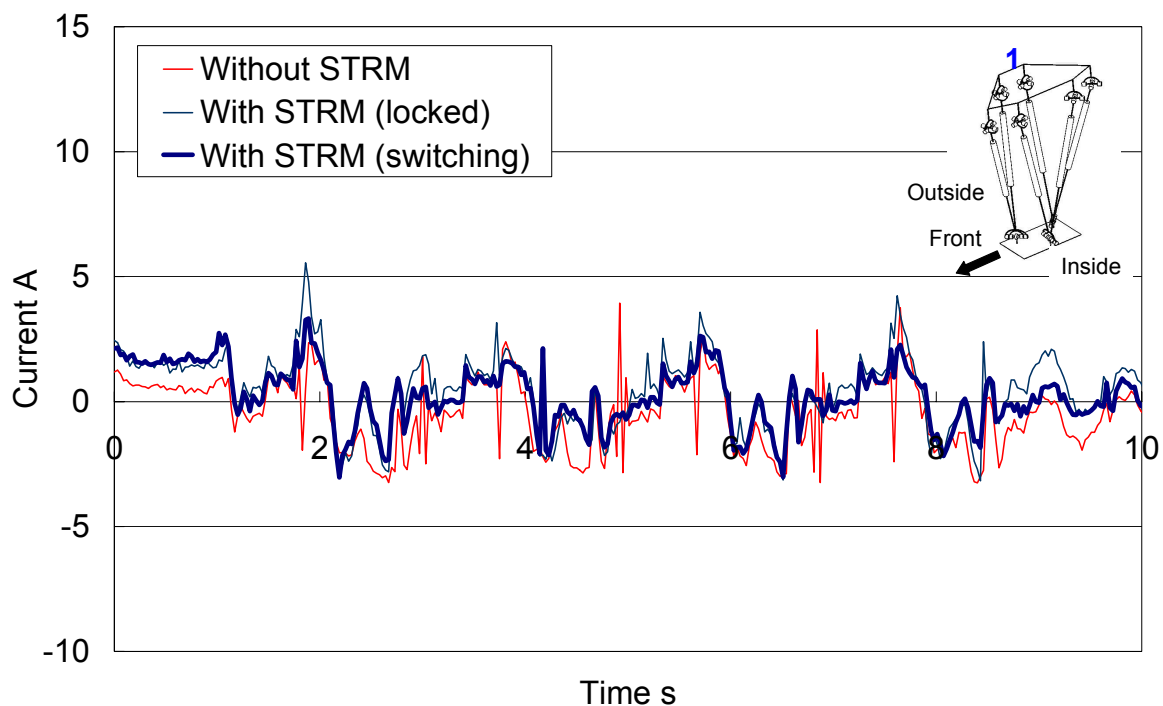


Figure 4.15 Motor current of right leg actuator 1.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

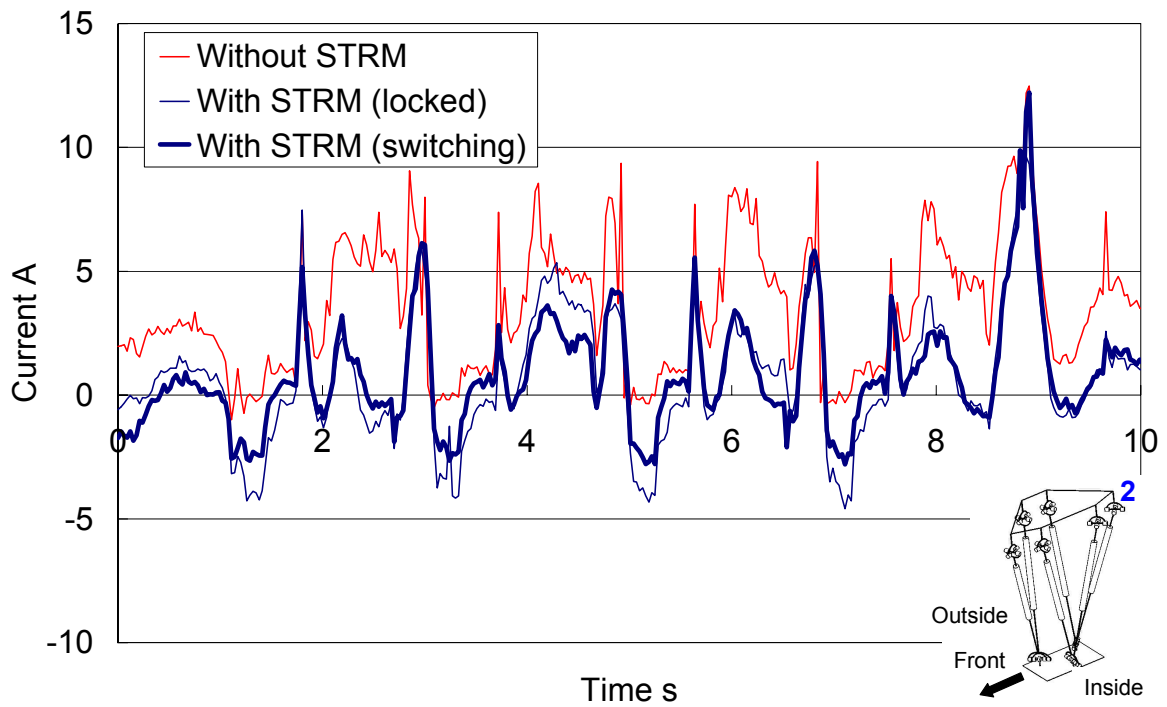


Figure 4.16 Motor current of right leg actuator 2.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

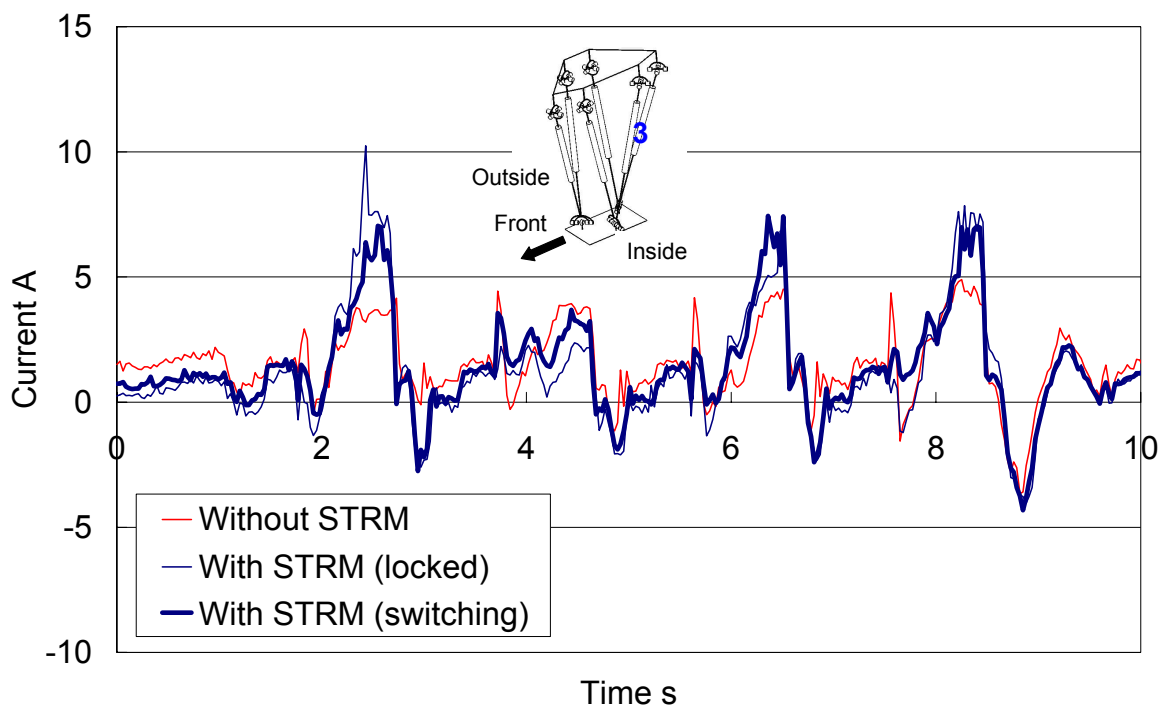


Figure 4.17 Motor current of right leg actuator 3.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

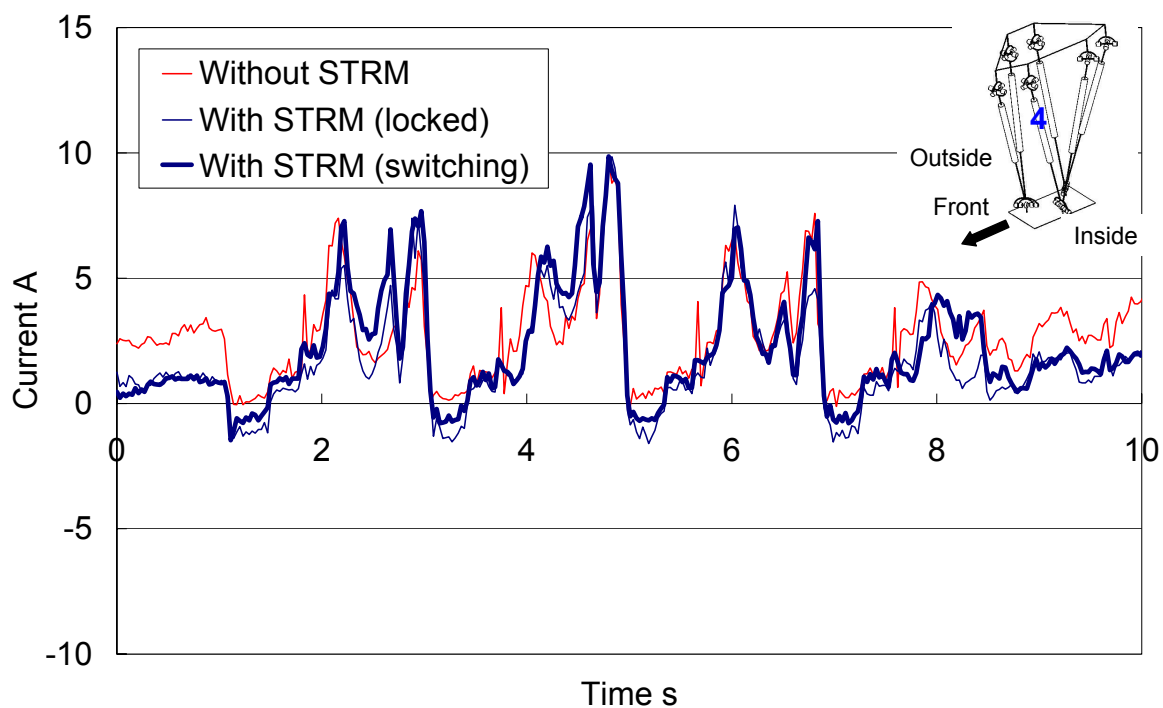


Figure 4.18 Motor current of right leg actuator 4.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

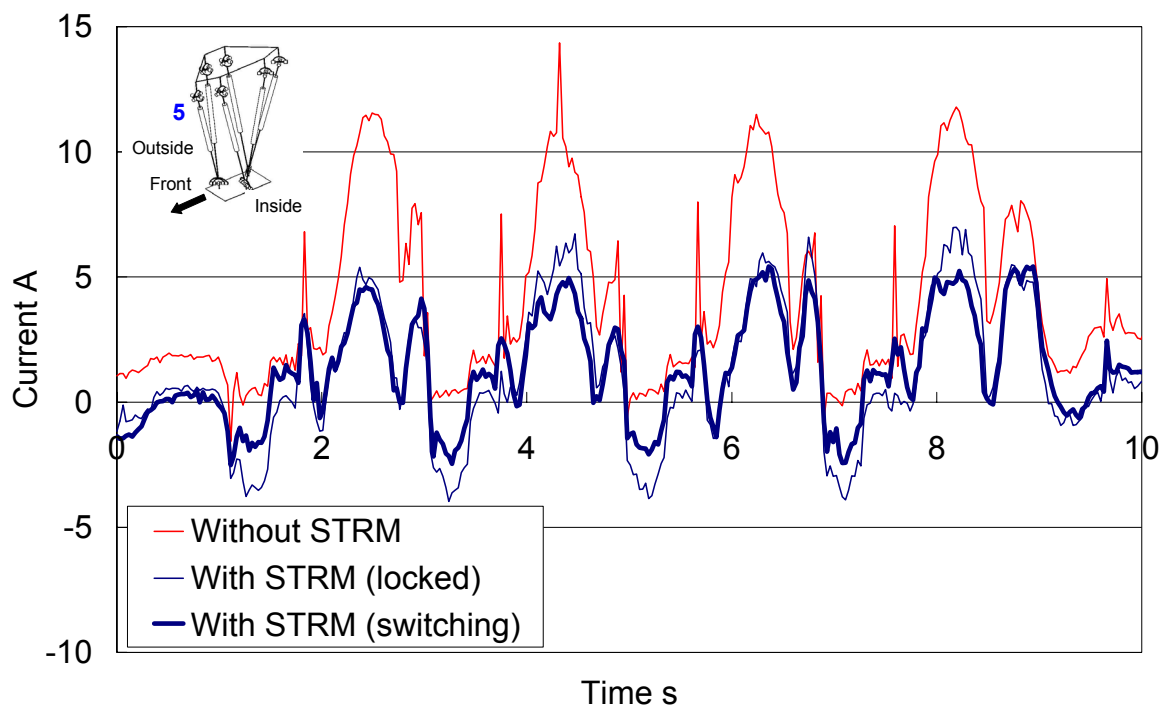


Figure 4.19 Motor current of right leg actuator 5.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

一方骨盤内側に位置するリンク3とリンク4に関しては時刻により電流が増加しているのが確認できるが程度は小さく、全体としては31%のモータ電流の削減に成功している。

4.4.2 消費電力低減の検証

次に、消費電力が低減されているかどうか、また積載重量との関係性を評価するために、積載重量を0 kgと50 kgの2通りについて、先ほどと同様の歩行パターンにより歩行実験を行い、サーボドライバへの供給電流を測定した。自重支持トルク低減機構はこれを組み込まない場合、自重支持トルク低減機構を組み込むがスイッチング機能を用いない場合、自重支持トルク低減機構を組み込みスイッチング機能も用いる場合の3通りの条件で実験を行った。

図4.20に、歩行時における左足消費電力の測定結果を示す。図中紺色は自重支持トルク低減機構を組み込まない場合、緑色は自重支持トルク低減機構を組み込むがスイッチング機能を用いない場合、赤色は自重支持トルク低減機構を組み込みスイッチング機能も用いる場合を示した。

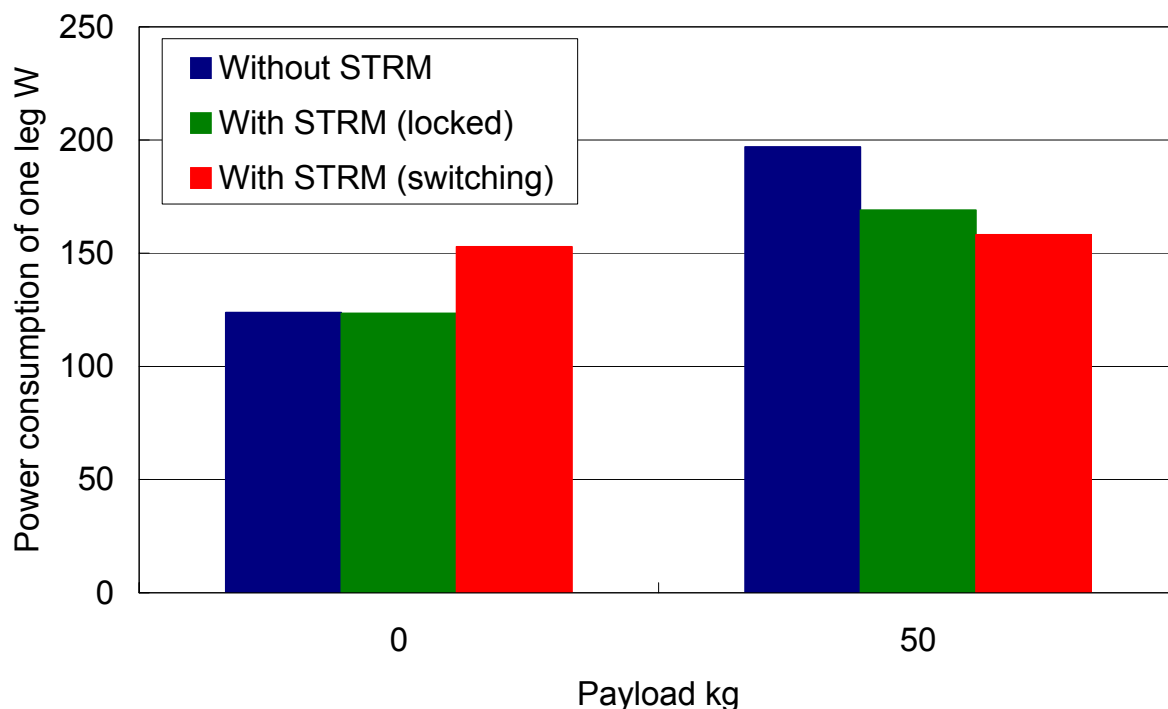


Figure 4.20 Power consumption of the left leg during walking.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step)

積載物が無い状態では、自重支持トルク低減機構を用いた場合には消費電力が増加していることがわかる。積載物がない状態では自重が小さいために、バネによる逆向きの推力発生がアクチュエータの負担を増加させ、消費電力の増加につながったと考えられる。しかし、50 kg の重量物積載歩行時においては本機構による消費電力の低減が確認できる。また切替機能の有効性も確認された。

4.4.3 最大積載能力の評価

自重支持トルク低減機構を用いて、最大積載重量の評価実験を行った。

80 kg の重量物を骨盤上に積載し、歩幅 100 mm/step, 歩行周期 0.96 s/step の前進歩行パターンを用いて実験を行ったところ、安定しているとは言えないものの歩行に成功した。実験の様子を図 4.21 に示す。また右脚モータ電流の測定結果を図 4.22 に、ZMP 軌道を図 4.23 に示す。

図 4.22 より、モータ電流のピークは約 30 A もあるが、これは瞬時の電流値であり、主に機構剛性の低さによる着地衝撃の大きさに起因すると考えられる。また、このデータを図 4.3 と比較すると、自重支持トルク低減機構を用いた場合の 80 kg 積載時でのモータ電流値と、機構を用いない場合の 50 kg 積載時のそれに近い程度であることが確認でき、モータ電流の低減が確認できた。

また、体重 94 kg の成人男性を搭乗させ、歩幅 100 mm/step, 歩行周期 0.96 s/step の前進歩行パターンを用いて歩行実験を行ったところ、歩行に成功した。実験の様子を図 4.24 に示す。またこのときの ZMP 軌道を図 4.25 に示す。

以上により、最大積載重量は 94 kg であると確認できた。

4.4.4 考察

以上の実験結果のように、開発した自重支持トルク低減機構により、重量物積載歩行時の各モータ電流の低減が確認できた。また、同様に重量物積載歩行時のエネルギー消費が低減できることもわかった。これらは2足歩行ロボットの脚機構においても自重補償機構やこれに準ずる機構がその性能向上に有効であることを示すものであり、またこれとパラレルメカニズム型脚機構を採用することにより、150W の DC モータを用いたロボットでも 94 kg の人間搭乗歩行が可能であることを示せたことは意義があると考えられる。ロボットの自重は自重支持トルク低減機構を合わせても約 60 kg であることから積載重量比 r_{pw} は 1.57 となり、最大積載重量がこの程度であれば2足歩行型車いすや汎用移動台車としての応用も現実的といえると考えられる。



Figure 4.21 Walking experiment carrying a 80 kg load.
(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 80 kg)

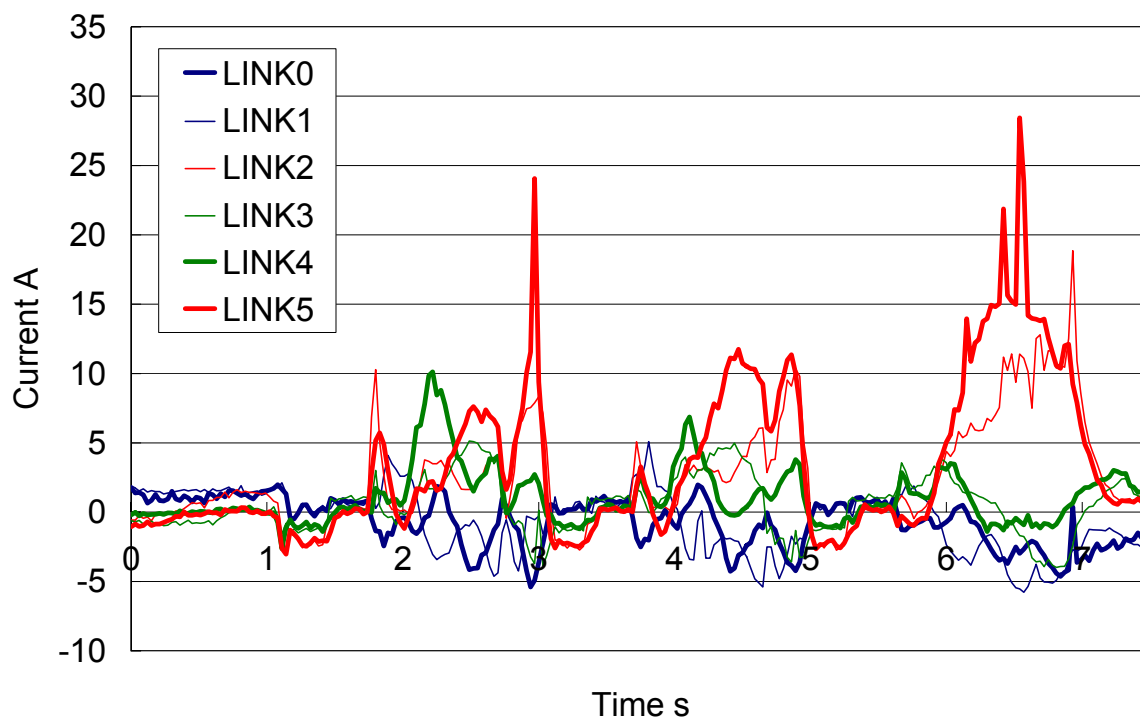


Figure 4.22 Motor current of right leg actuator.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 80 kg)

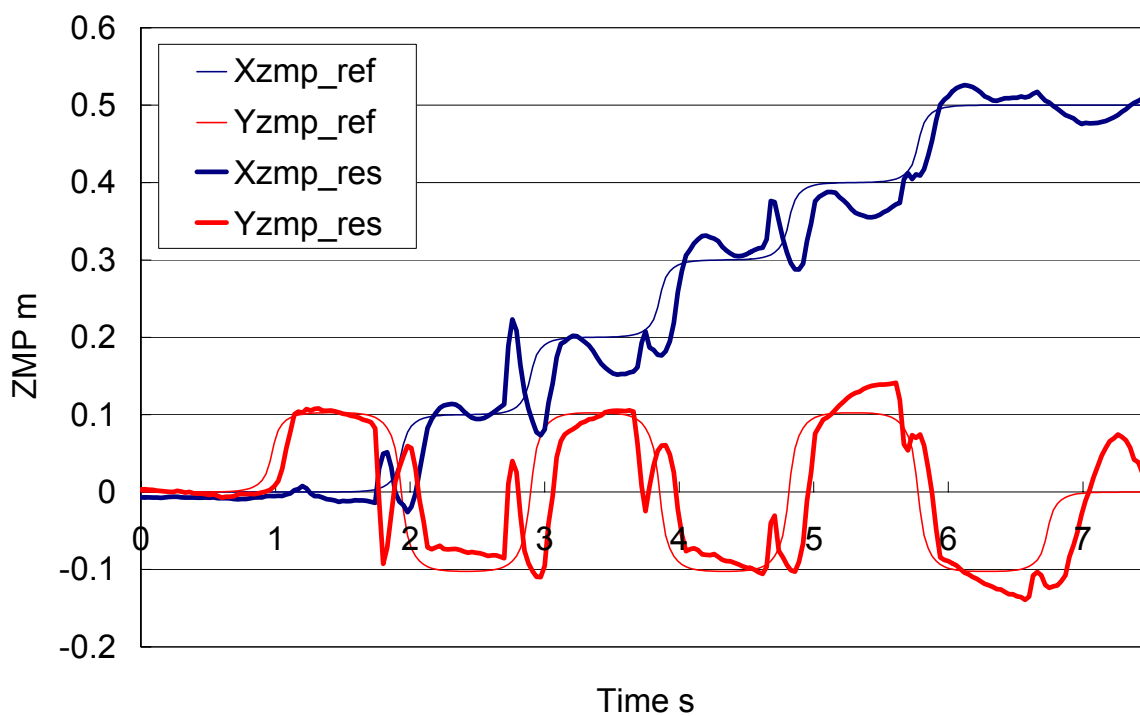


Figure 4.23 ZMP trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: 80 kg)



Figure 4.24 Walking experiment carrying a 94 kg adult man.
 (Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 94 kg adult man)

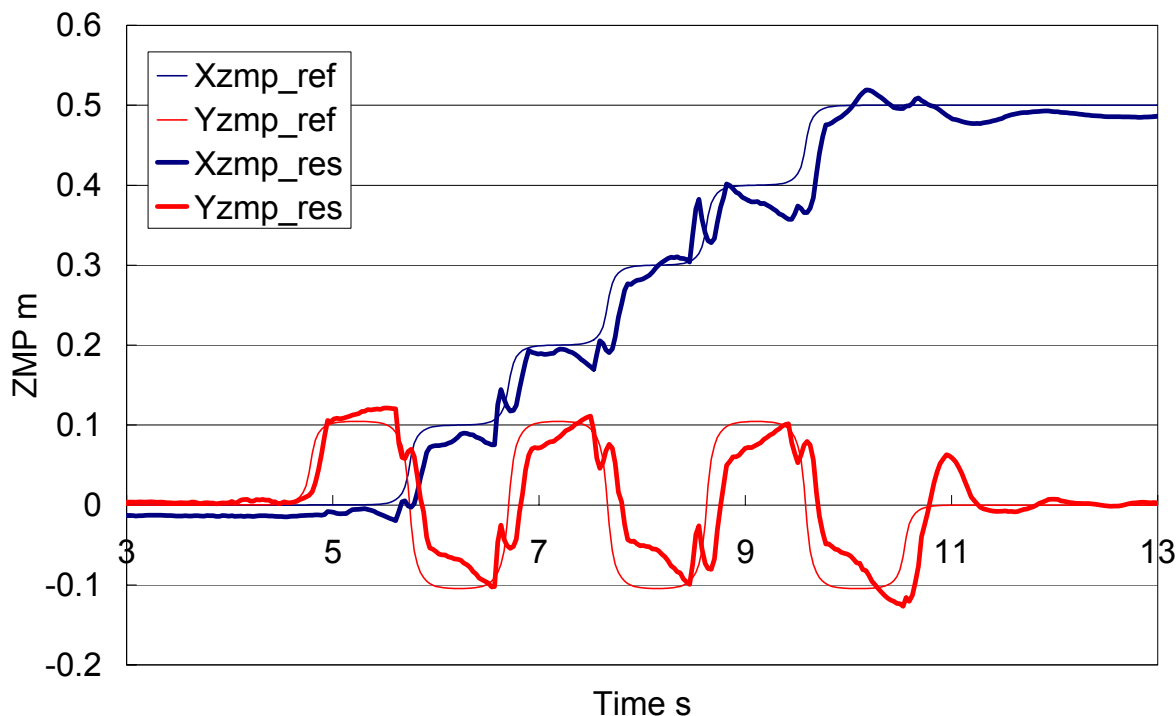


Figure 4.25 ZMP trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 94 kg adult man)

しかしながら今回開発した自重支持トルク低減機構は、考えられるさまざまなアイデアの中から、実際に予算内で製作が可能なものを選ばざるを得なかったことも事実である。図 4.4 に示した基本的アイデアのように、ロック機能を持つ受動直動スライダ機構は設計・製作が困難であり本研究では断念したが、これを製作できれば遊脚期における消費電力の増加は回避できると思われる。また、ロック機能付ガススプリング本体を再設計することで、電磁弁によるスイッチングを可能とすることや、内側に受動直動スライダを内蔵させることが可能であれば、ボールスプライン部やスイッチ機構部が不要になる可能性もある。

これらの点は将来的に検討を続けていくべきと考える。

4.5 まとめ

本章では、積載可能重量の増加と消費電力の低減を目的として開発した自重支持トルク低減機構について、予備実験とその基本設計、構造と動作原理およびこれをを用い

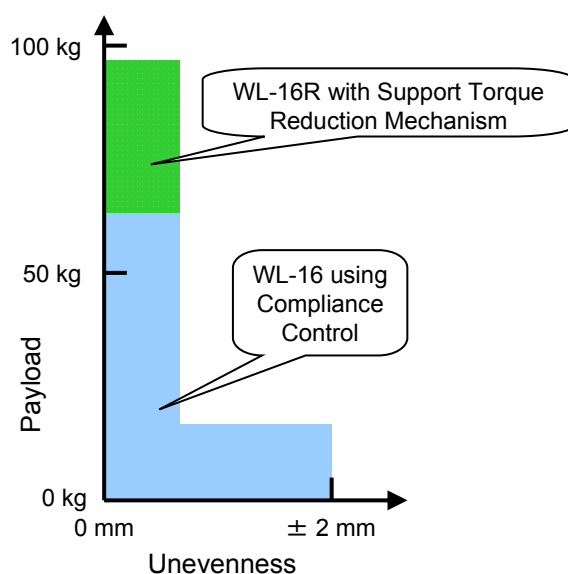


Figure 4.26 Performance of WL-16R.

て行った評価実験と考察を述べた。

自重支持トルク低減機構は脚機構の内側に各直動アクチュエータと並列に組み込まれ、主として鉛直方向の荷重を負担する機構である。構造は反力の異なる2本のロック機能付きガススプリングを直列に配し、脚機構にかかる荷重の異なる立脚・遊脚の2つの相に応じてバネの効果を切替えることにより、立脚時には各アクチュエータの必要推力を軽減させ、遊脚時にはその必要推力を増大させないことを狙った。

開発した自重支持トルク低減機構をWL-16の改良機WL-16Rに装着して評価を行ったところ、各モータ電流の減少、消費電力の減少、積載可能重量の増加などが確認された。また、体重94 kgの成人男性を搭乗させての歩行に成功し、この機構の有効性を確認した。

図4.26に、WL-16Rの不整地における歩行性能と重量物積載性能を図示した。図中水色の範囲は第3章で述べたとおりWL-16によって実現できた領域であり、図中緑色の領域が本章に述べた自重支持トルク低減機構によって実現できた領域である。やはり重量物を積載して不整路面を歩行することには成功していないが、体重94 kgの成人男性を搭乗させての歩行に成功し、水平平坦路面においては積載重量比 r_{PW} 1.59を実現した。

第 5 章 姿勢補償制御法の開発

- 5.1 はじめに
- 5.2 姿勢補償制御法
- 5.3 評価実験と考察
- 5.4 まとめ

5.1 はじめに

第 3 章では、ZMP 安定判別規範に基づくフーリエ変換によるモーメント補償軌道算出法により生成された歩行パターンを用いたプログラム制御に加え、重量物積載歩行時の構造部材のたわみや路面の凹凸などのモデル誤差を原因として生じる着地衝撃の吸収と振動の抑制を目的として、脚の動作に仮想コンプライアンス制御を導入したことで、これを用いて行った評価実験と考察を述べた。

これにより、微小な凹凸のある路面での歩行や 50 kg の重量物を積載しての歩行、また人間搭乗 2 足動歩行に成功した一方で、歩行可能な路面の凹凸の高低差は前進歩行の場合最大で 2 mm となっており、この仕様は 2 足歩行型車いすや汎用移動台車としての応用には十分とは言えず、今後の改善を必要とする結果となった。

そこで、以下の 3 点を研究目的とした：

- ・ 仮想コンプライアンス制御を改良することにより、安定な挙動を実現する
- ・ ZMP 偏差をフィードバックすることにより、ZMP の定常偏差を低減する
- ・ 上記 2 点と姿勢角のフィードバックにより、未知の 3 deg 程度の傾斜路面における歩行を実現する

これらについてその制御法と評価実験、考察について述べる。

5.2 姿勢補償制御法

姿勢補償制御法は以下の 2 点より成り立っている：

- ・ 仮想コンプライアンス制御における足部位置に応じた係数変化法
- ・ 姿勢補償制御法

これらについて以下に述べる.

5.2.1 仮想コンプライアンス制御における足部位置に応じた係数変化法

第3章ではコンプライアンス係数は一定値のまま用いたが, 遊脚時においてばね定数が大きい場合, 路面との衝撃を緩和することはできず, 反対に立脚時においてばね定数が小さい場合, 立脚が沈み込むことによって, やはり遊脚が着地する際に路面を蹴るといった問題が生じる. そのため定数ではなく立脚時と遊脚時で異なった値をとる方がより効果的と考え, 本手法では足部位置に応じたコンプライアンス係数の一設定法を定式化する.

腰座標系における足座標原点の位置と, 設定 ZMP 座標の相対距離は以下のようになる.

$$L_{CCR} = \sqrt{(\bar{x}^w_{ZMP} - \bar{x}^w_{JR})^2 + (\bar{y}^w_{ZMP} - \bar{y}^w_{JR})^2 + (\bar{z}^w_{ZMP} - \bar{z}^w_{JR})^2} \quad (5.1)$$

ただし設定 ZMP 軌道の Z 座標は路面にあるものとする.

遊脚期において ZMP 位置は立脚側にあるため相対距離 L_{CCR} は大きくなり, 逆に立脚期においては ZMP 座標と足座標の相対距離 L_{CCR} は 0 に近くなる.

これを用い, 式(3.2), 式(3.3)における \mathbf{K} と \mathbf{C} を以下のように再定義する.

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_R &= \mathbf{K}_T(\mathbf{E} - L_{CCR}\mathbf{H}_{CC}) \\ \mathbf{C}_R &= \mathbf{C}_T(\mathbf{E} - L_{CCR}\mathbf{H}_{CC}) \end{aligned} \quad (5.2)$$

この式を用いた場合, 足の位置が立脚側足部中心より離れるほどコンプライアンス移動量が大きくなることになるため, 立脚は遊脚より仮想的にやわらかくなる. また歩幅が大きいときや遊脚が想定した位置より高い位置で着地が起きた場合は, L_{CCR} が大きくなり脚は仮想的により柔らかくなる. 脚位置に応じて変化させたくない軸がある場合には, 行列 \mathbf{H}_{CC} におけるその軸の成分を 0 とすればよい.

5.2.2 姿勢補償制御法

屋外における路面は, 実際には凹凸だけでなくある程度の大きさの傾斜をもつ場合がほとんどである. 傾斜路面においては, コンプライアンス制御のみでは対応が困難であり, 路面の傾斜角に応じた骨盤位置・姿勢の補償が必要となる.

そこで本研究では、ロボットの骨盤に搭載されている姿勢角センサの値をフィードバックし補償することで骨盤姿勢角を 0 に保つよう制御する。また、ZMP の位置を設定値に保つよう低ゲインの腰位置制御も組み込んだ。

制御量の算出には以下の式を用いた。

$$\Delta\ddot{\theta}_{cm} = -\mathbf{K}_{p\theta} \cdot \Delta\theta - \mathbf{K}_{v\theta} \cdot \Delta\dot{\theta} \quad (5.3)$$

$$\Delta\ddot{\mathbf{x}}_{cm} = -\mathbf{K}_{px} \cdot \Delta\mathbf{x}_{zmp} - \mathbf{K}_{vx} \cdot \Delta\dot{\mathbf{x}}_{waist} \quad (5.4)$$

ここでもとめた操作量は加速度の次元を持つので、2 階積分して角度補償量および腰位置補償量を算出し、歩行パターンを基準にした運動学計算により補償操作後の足先位置・姿勢を計算する。角度補償の回転中心は腰座標原点の路面上の投影点を取った。

提案する制御法のブロック線図を図 5.1 に示す。

5.3 評価実験と考察

開発した姿勢補償制御法を用いて、複数の評価実験を行った。

評価する項目は以下のものである：

- ・ 水平平坦路面足踏み動作における仮想コンプライアンス制御，姿勢補償制御の効果
 - ・ 傾斜路面足踏み動作における仮想コンプライアンス制御，姿勢補償制御の効果
 - ・ 傾斜路面歩行における仮想コンプライアンス制御，姿勢補償制御の効果
- これらについて以下に述べる。

5.3.1 予備実験

平坦な路面において 8 歩の足踏みを行った。通常の位置制御のみを用いた場合，仮想コンプライアンス制御とパラメータ変化法を用いた場合，これに姿勢補償制御を用いた場合について，ZMP 軌道を図 5.2, 5.3 に，骨盤姿勢角を図 5.4, 図 5.5 に示す。図中 ref の文字は設定軌道，servo の文字は仮想コンプライアンス制御も姿勢補償制御も用いない場合，cc は仮想コンプライアンス制御のみ用いる場合，pc は仮想コンプライアンス制御も姿勢補償制御も用いる場合を示す。

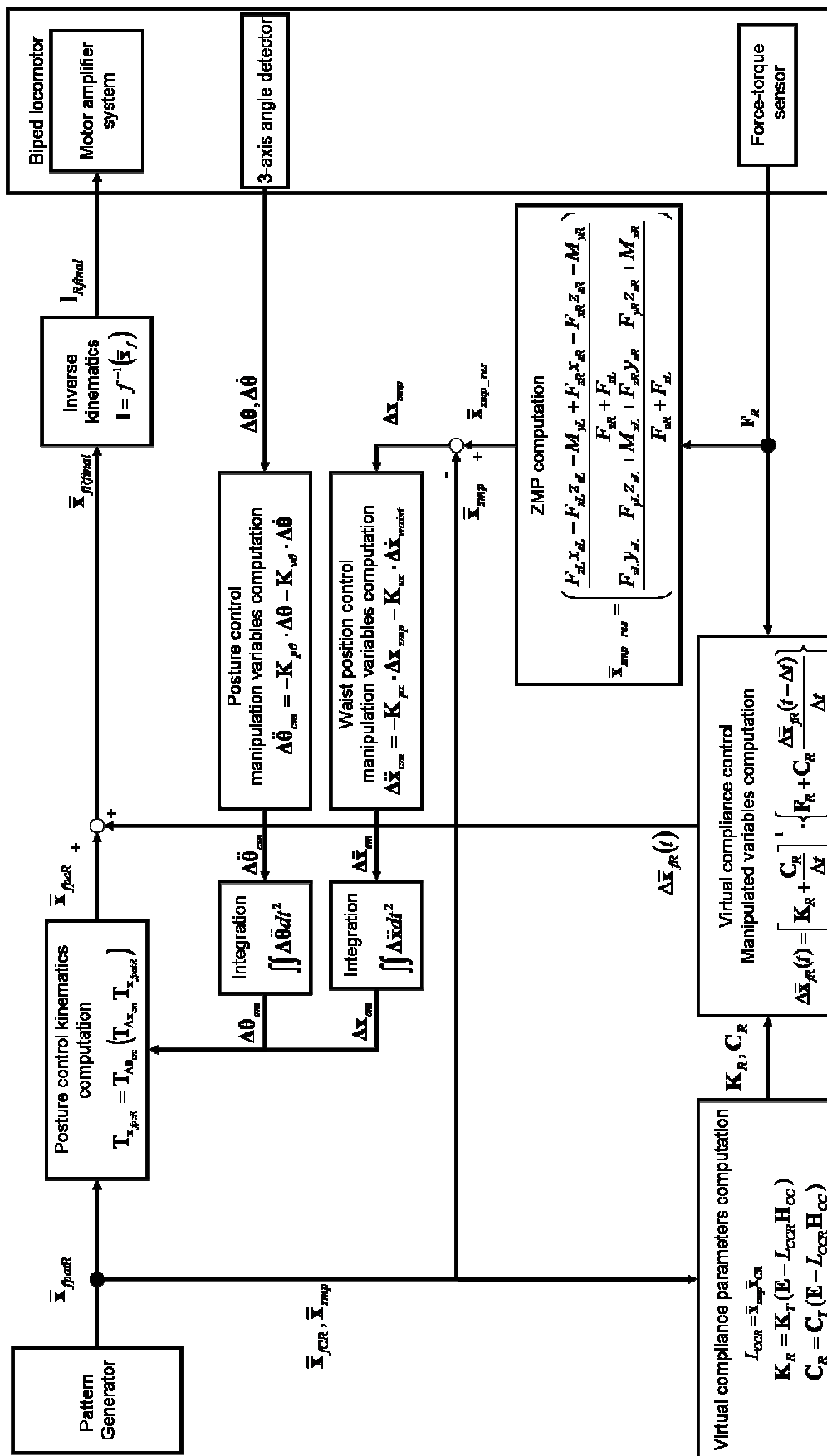


Figure 5.1 Block diagram of proposed control method including virtual compliance control and posture control.

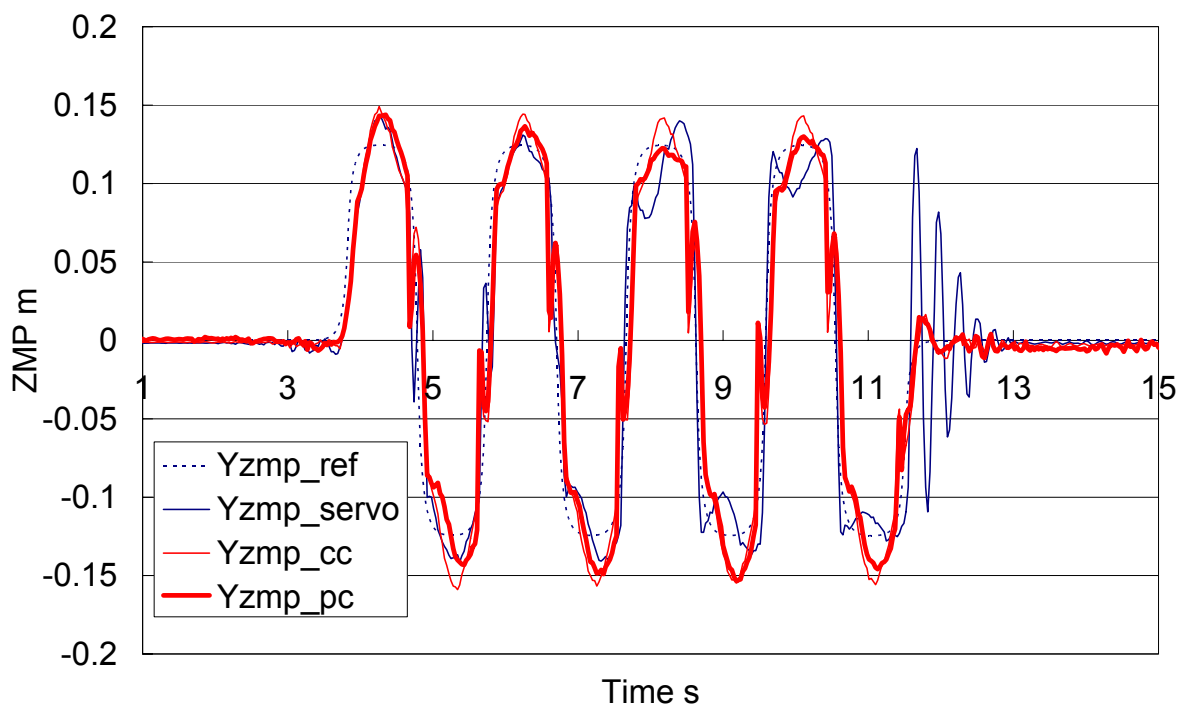


Figure 5.2 ZMP trajectories (Y-axis) of footfall on even terrain.
(Stepping, walking cycle: 0.96 sec/step)

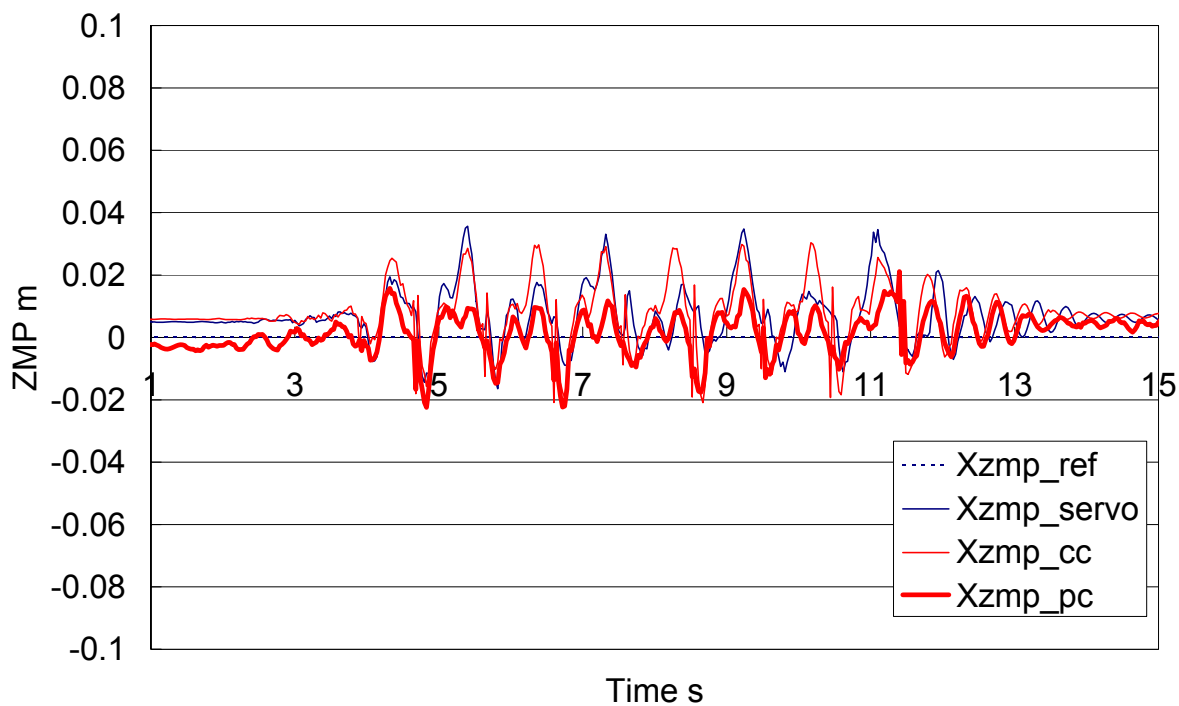


Figure 5.3 ZMP trajectories (X-axis) of footfall on even terrain.
(Stepping, walking cycle: 0.96 sec/step)

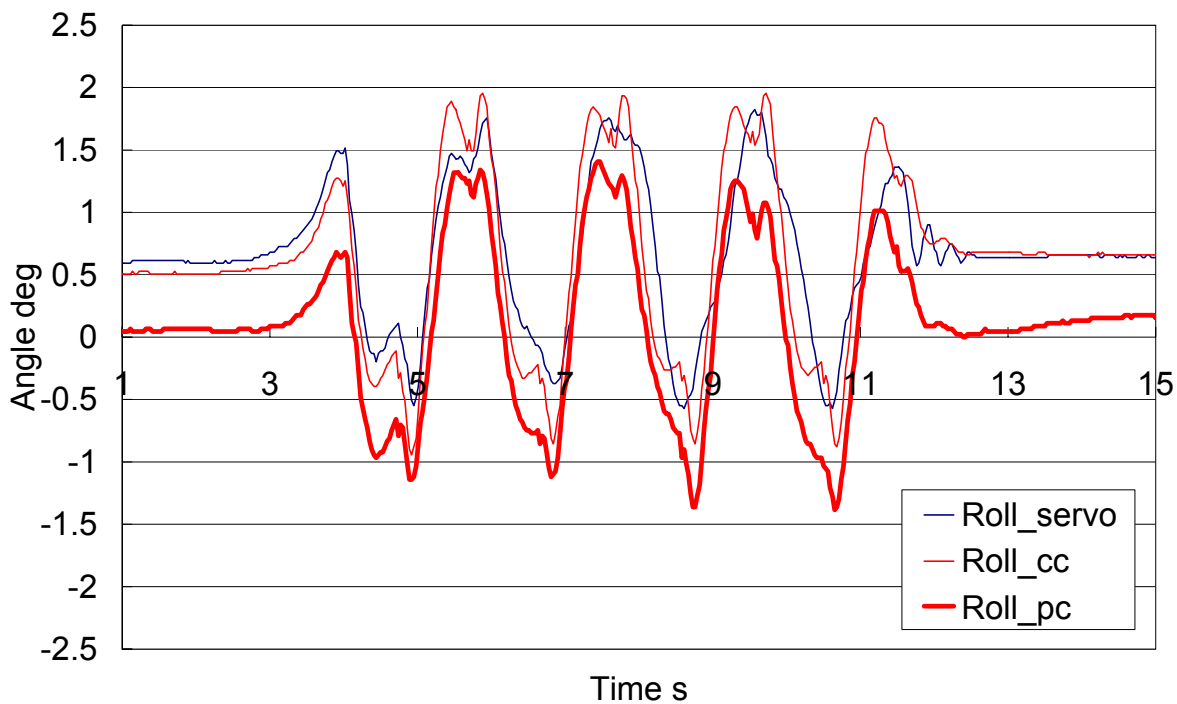


Figure 5.4 Attitude angle (Roll Axis).
(Stepping, walking cycle: 0.96 sec/step)

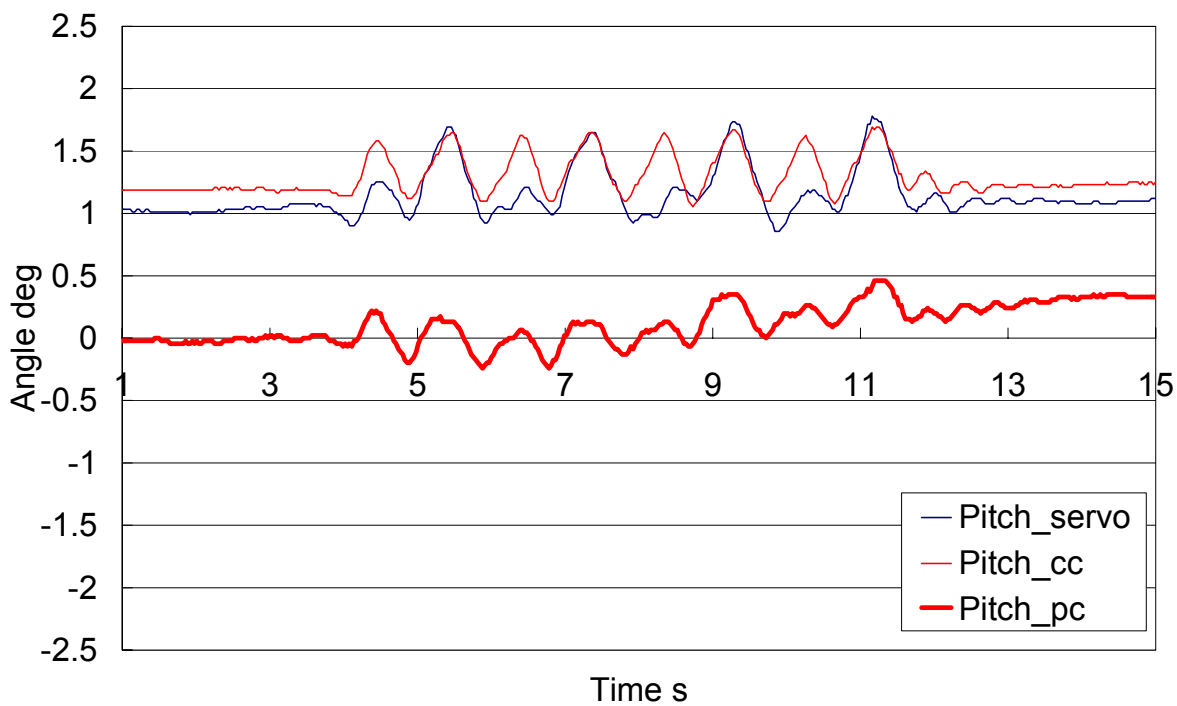


Figure 5.5 Attitude angle (Pitch Axis).
(Stepping, walking cycle: 0.96 sec/step)

図 5.2 より，仮想コンプライアンス制御を用いた場合に高周波の振動が抑制できることがわかる．また図 5.3 より，姿勢補償制御を用いた場合に ZMP 軌道のオフセットが低減でき，同様に図 5.4，図 5.5 より，姿勢補償制御を用いることにより，姿勢角偏差のオフセットが低減できていることがわかる．一方ある程度の振幅を持つ急激な姿勢角の変化に対してはほとんど対応できていないが，これは姿勢角や腰位置の操作が直接 ZMP に影響を及ぼすために，発振を防ぐためには原理的にゲインをあげられないことによる．ただし傾斜角が緩やかに変化する路面においての歩行はこの制御法を用いて可能となる見通しが得られた．

次に，仮想コンプライアンス制御，パラメータ変化法，姿勢補償制御を全て用い，通常は歩行できない 8 deg の傾斜路面における 8 歩の足踏みを行ったところ，安定した足踏み動作に成功した．図 5.6，図 5.7 に ZMP 軌道および腰位置操作量，図 5.8 に姿勢角推移および姿勢角操作量を示す．

図 5.6，図 5.7 より，ZMP 軌道に平地歩行の場合より大きい振動が見られるが，オフセットは腰位置操作量の増加に伴って設定値に追従してゆくことが確認できる．図 5.8 に示す姿勢角に関しても同様のことが言え，特に Pitch 方向の姿勢角操作量は最終的に路面の傾斜角度と同じ 8 deg に収束しており，姿勢補償制御の有効性が確認できる．コンプライアンス制御に関しては，歩行中の ZMP および姿勢角の振動の発散がないことから有効性が確認できる．

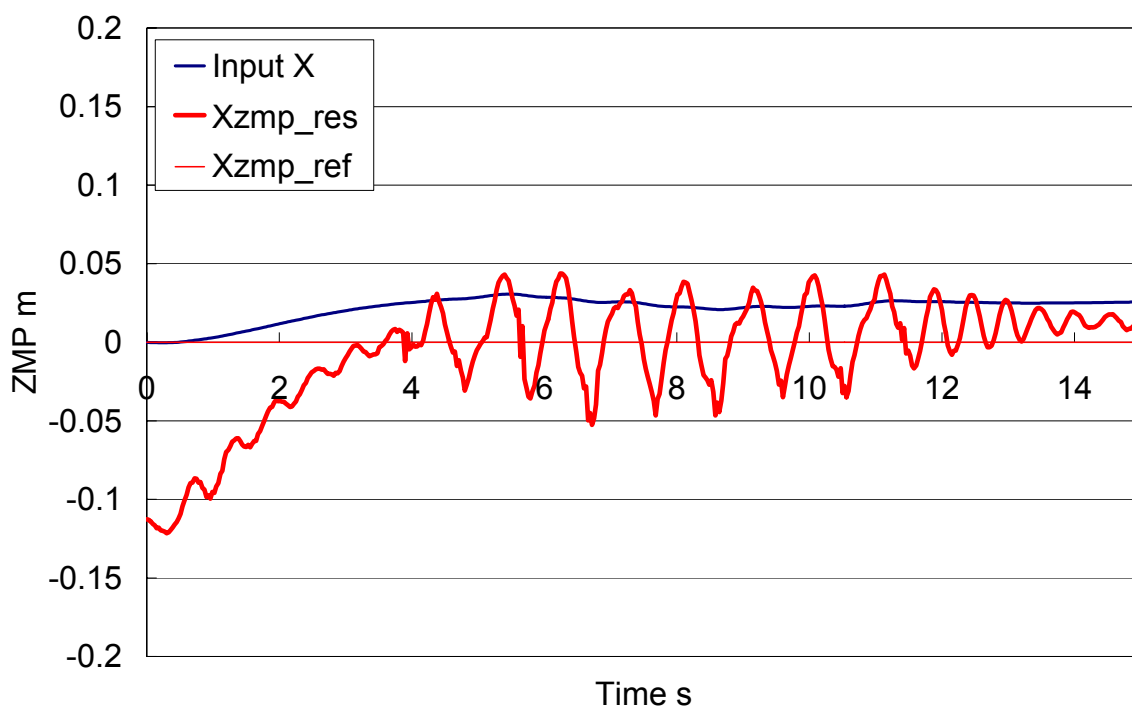


Figure 5.6 ZMP trajectories and manipulated variables of waist position (X axis).
(Stepping, walking cycle: 0.96 s/step, inclination: 8 deg)

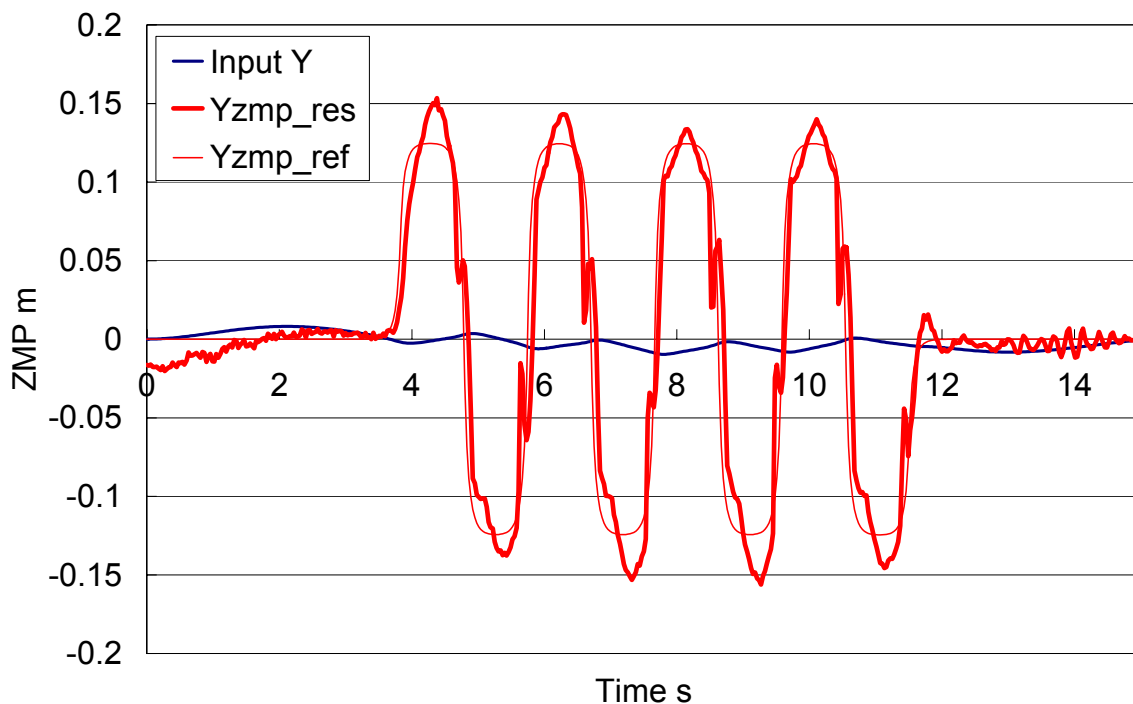


Figure 5.7 ZMP trajectories and manipulated variables of waist position (Y axis).
(Stepping, walking cycle: 0.96 s/step, inclination: 8 deg)

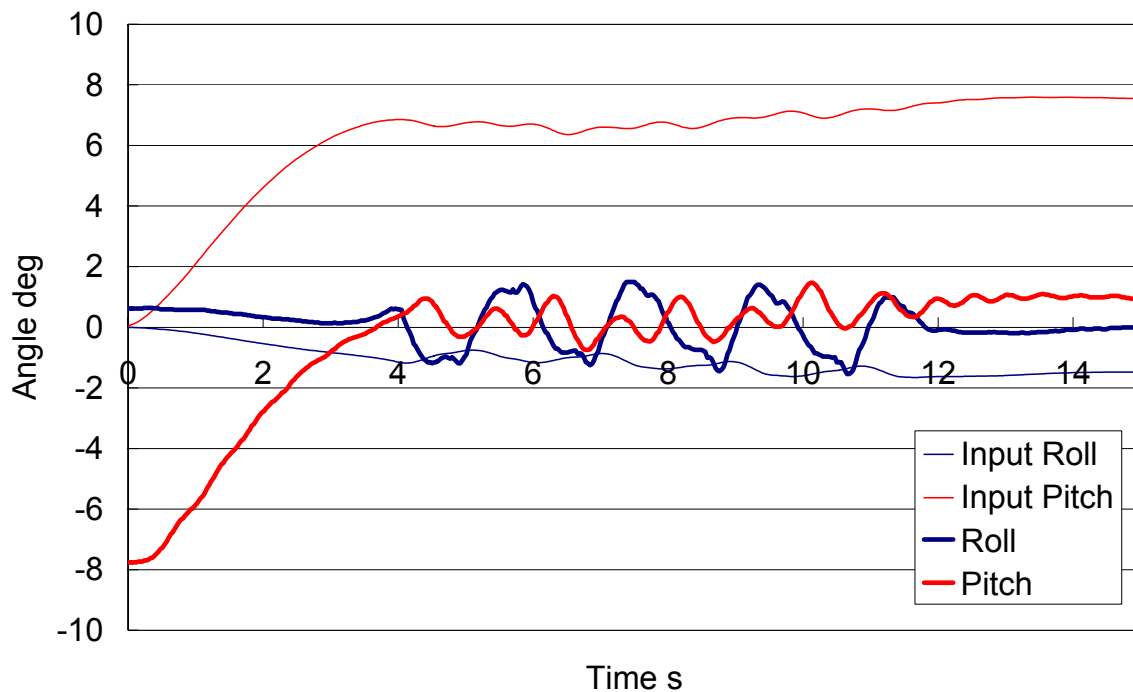


Figure 5.8 Attitude angle and manipulated variables of waist orientation.
(Stepping, walking cycle: 0.96 s/step, inclination: 8 deg)

5.3.2 傾斜路面歩行実験

提案する制御手法を全て用い、水平路面から 3 deg の傾斜路面にかけて歩幅 100 mm/step, 歩行周期 0.96 s/step にて 8 歩の前進歩行を行ったところ、最後まで歩行を継続できた。図 5.9 に実験の様子を示す。また、図 5.10, 図 5.11 に ZMP 軌道および腰位置操作量, 図 5.12 に姿勢角推移および姿勢角操作量を示す。

姿勢角の操作量は Roll 軸, Pitch 軸まわりともに歩行開始の時点で既に -1 deg 程度の偏差を持っているが、これはロボット本体のアクチュエータのキャリブレーション不全や姿勢角センサの組み付け誤差に起因すると思われる。このオフセット量を含めて考えれば、大きな振動は見られるものの歩行終了の時点で路面の傾斜と同程度の値に近づいていることがわかる。

ZMP 軌道にもやはり大きな振動が見られるが、この振動が発散していくことは無く、歩行を継続することができた。

5.3.3 考察

以上の実験結果のように、開発した足部位置に応じた可変仮想コンプライアンス制御と姿勢補償制御法により、0 deg から 3 deg まで緩やかに傾斜の変化する未知の傾斜路面における歩行に成功した。これは提案した姿勢補償制御法が未知の傾斜路面において有効であることを示すものと考えられる。

しかしながらより大きな凹凸と傾斜の混在する未知の不整路面における歩行の実現には至らなかった。これは姿勢角や角速度をフィードバックする制御系では、ゲインを大きく取ることにより不安定になることが原因であった。これは同様のことが ZMP のフィードバックにも言える。

長阪ら[131]の手法や吉野[132]の手法のように、ロボットのモデルから適切なゲインを求めて用いればこの制御性能は向上できると考えられるが、本研究で対象とするロボットは上部に人間を乗せて歩行するものであり、搭乗者も含めたモデルの取得が困難なことを考えればこの方法の適用は難しい。

歩行時に路面の凹凸や傾斜をフィードフォワード的に取得しそれに合わせて軌道修正を行う制御法が必要であると考えられる。これに関しては第7章の今後の展望の節にて再論する。

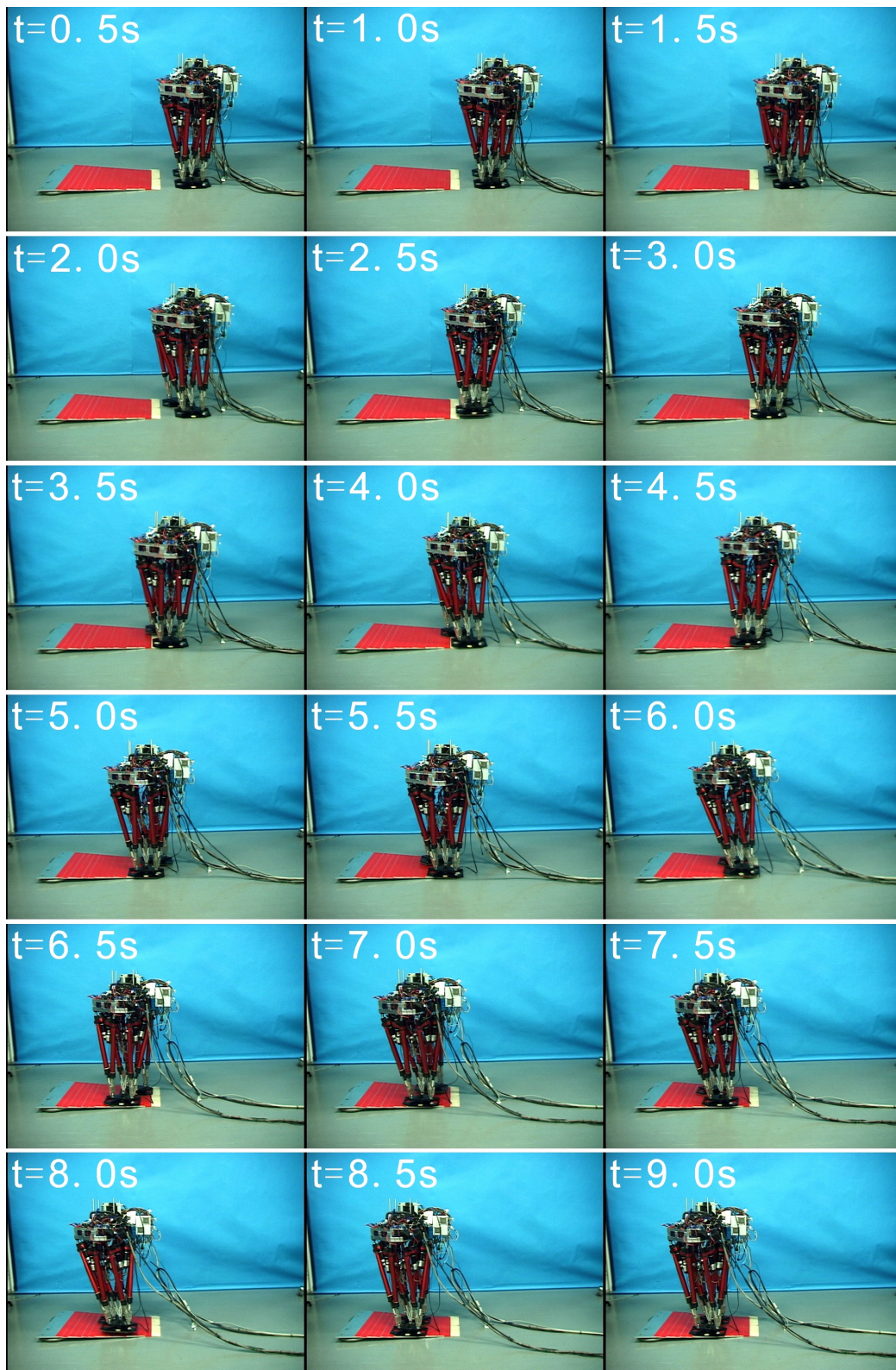


Figure 5.9 Walking experiment on 0~3 deg inclined plane.

(Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, inclination: 0~3 deg)

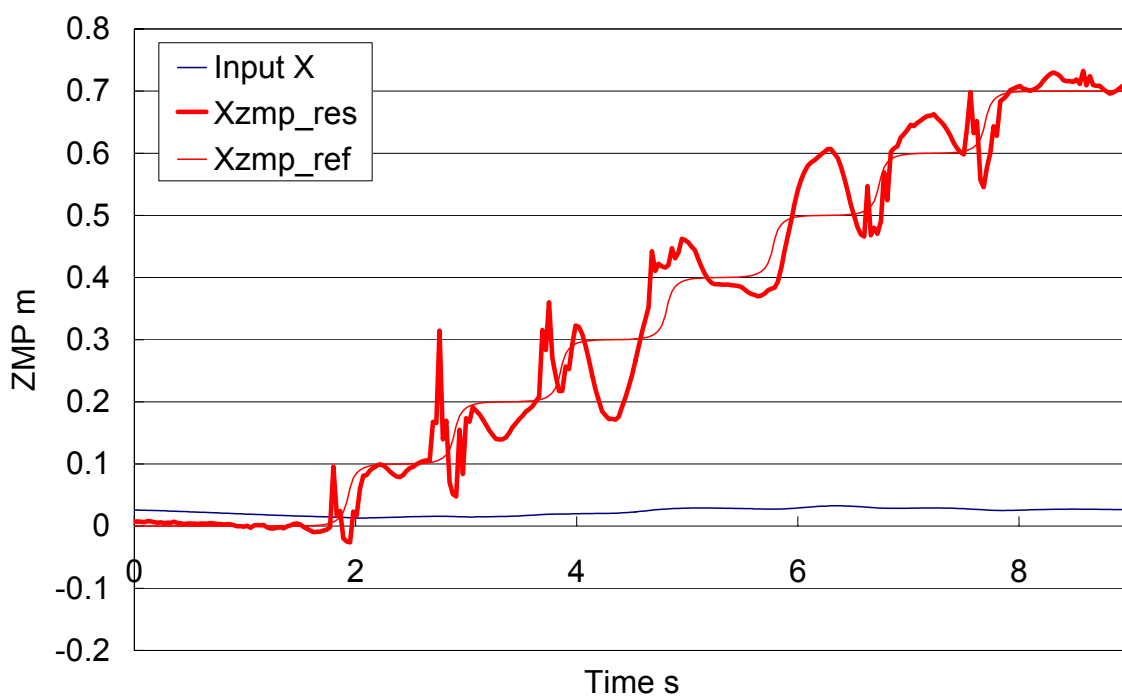


Figure 5.10 ZMP trajectories and manipulated variables of waist position (X axis).
 (Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, inclination: 0~3 deg)

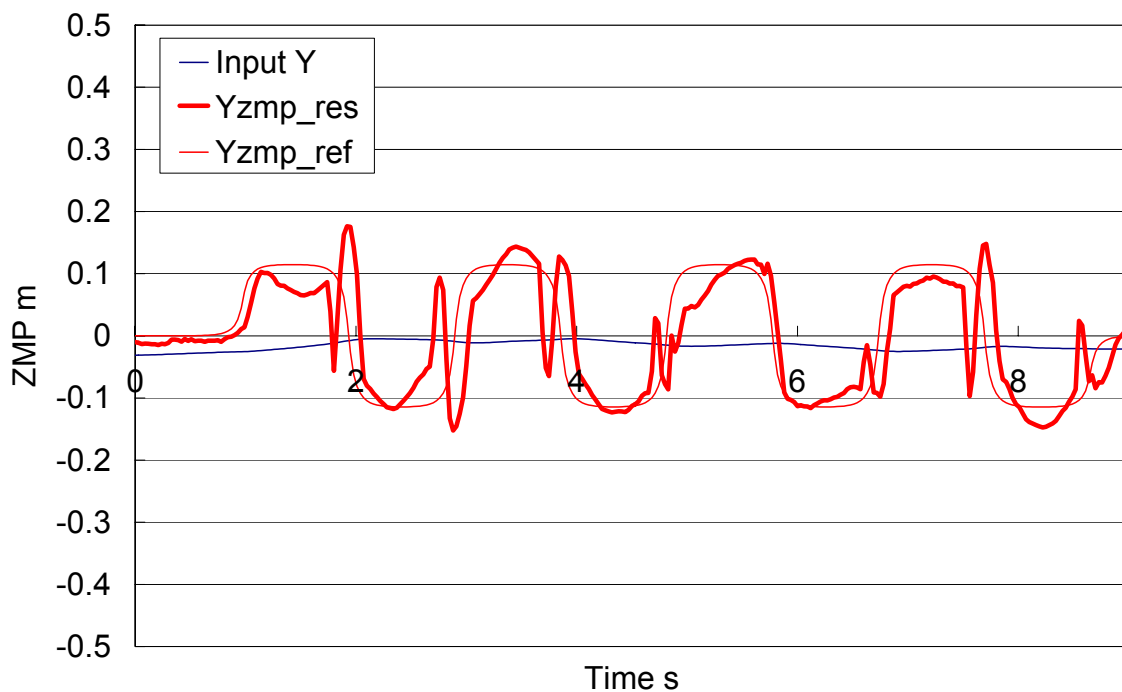


Figure 5.11: ZMP trajectories and manipulated variables of waist position (Y axis).
 (Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, inclination: 0~3 deg)

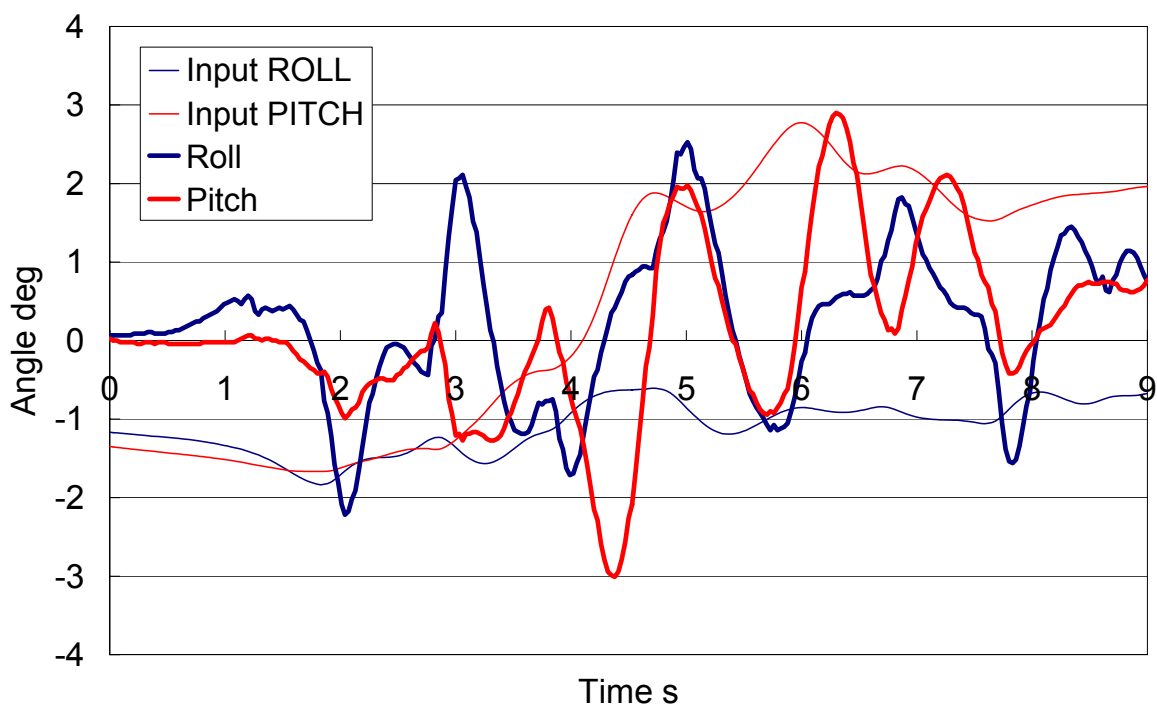


Figure 5.12: Posture angle and manipulated variables of waist orientation.
 (Walking forward, walking cycle: 0.96 s/step, step length: 100 mm/step, inclination: 0~3 deg)

5.4 まとめ

本章では、第3章において述べた仮想コンプライアンス制御の改良と姿勢補償制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。

仮想コンプライアンス制御に関しては、第3章では全歩行周期を通じて一定値としていた各コンプライアンス係数を足部の位置に応じて変化させることでより安定な挙動を実現することを図った。姿勢補償制御に関しては、ロボットの腰部に搭載された姿勢角センサの検出量と、足部6軸力覚センサにより測定されるZMP偏差を用い、低ゲインのフィードバック制御を行うことで未知の傾斜路面における安定歩行の実現を図った。

これらの制御法をWL-16Rを用いた実験により評価したところ、仮想コンプライアンス制御を用いた場合では高周波振動の抑制が確認でき、また姿勢補償制御によりロボット腰部姿勢角のオフセット量が低減できていることが確認できた。またこれらを用い、緩やかに傾斜の変化する未知の傾斜路面においての安定歩行に成功し、開発した手法の有効性を確認した。

第6章 人間搭乗2足階段昇降の実現

- 6.1 はじめに
- 6.2 歩行パラメータの調整
- 6.3 ハードウェアの改良設計
- 6.4 評価実験と考察
- 6.5 まとめ

6.1 はじめに

第3章では、実際に人間を搭乗させて2足動歩行を行う事が可能なロボット WL-16 の開発について、その機械モデルと仮想コンプライアンス制御の導入、またこれらを用いて行った評価実験と考察を述べた。また第4章では自重支持トルク低減機構を備えた人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R について、そのハードウェアと評価実験、考察について述べた。

この WL-16 と WL-16R により、体重 50 kg 以下の成人女性を搭乗させての2足動歩行、体重 60 kg の成人男性を搭乗させての2足動歩行に世界で初めて成功し、また体重 94 kg の成人男性を搭乗させての2足動歩行に成功したが、その一方で階段昇降能力に関しては未確認であった。

本研究で提案する2足歩行型の車いすや汎用移動台車では、その2足歩行であることの優位性を証明するためにも、階段昇降能力は最も重要となる能力のひとつであり、人間搭乗2足階段昇降を実現する必要があった。

人間と同様のシリアルメカニズムの脚機構を持つ2足歩行ロボットでは、2足階段昇降の実現例は多い[133-137]。高西らは上体部にカウンターウェイトを搭載した2足歩行ロボット WL-12 でけあげ 100 mm の階段に於ける動的階段昇降を実現している[133]。西脇らは爪先関節を持つヒューマノイド・ロボット H6 を用いて階段昇降を行った[134, 135]。また原田らはヒューマノイド・ロボット HRP-2 を用い、ハンドで手すりを把持し一般化 ZMP の存在範囲を大幅に拡大することにより、けあげ 280 mm の段差昇降を実現した[136, 137]。人間搭乗型2足歩行ロボットに関しては、トヨタ自動車株式会社の i-foot は階段昇降に成功していると発表しているが、具体的な仕様は公開されていない。

いずれにせよ、シリアルメカニズムの脚機構を用いた2足歩行ロボットによる階段昇降は、アクチュエータの出力さえ十分であれば、低速なものであればさほど困難ではないといえる。一方本研究で脚機構に用いているスチュワート・プラットフォームは垂直方向の推力の出力が大きいという長所の反面、一般的に可動範囲が狭いという決定的な短所を持つことが知られていることは第2章で述べたが、平面内歩行に比して広い可動範囲を必要とする階段昇降においては不利となる。このためにこの機構を脚機構に用いると階段昇降は不可能であるとの指摘も多かった。

ところで、建築基準法施行令において、一般的な建築物に関して、階段のけあげと踏面の寸法が表6.1のように定められている[138]。これによれば、劇場や公会堂、大型店舗や学校など大型の建物などに関しては、そのけあげを200 mm以下とするよう

Table 6.1 Dimensions of the width, rise and pedal tread of stairs [138].

	階段の種類別	階段及び踊場の幅	けあげの寸法	踏面の寸法
1	小学校の児童用	≥ 140 cm	≤ 16 cm	≥ 26 cm
2	中学校, 高等学校, 中等教育学校の生徒用。床面積合計が 1500 m ² 超の店舗用。劇場, 映画館, 演芸場, 観覧場, 公会堂, 集会場の客用	≥ 140 cm	≤ 18 cm	≥ 26 cm
3	直上階の居室床面積合計が 200 m ² 超の地上階又は居室床面積合計が 100 m ² 超の地階, 若しくは地下工作物内におけるもの	≥ 120 cm	≤ 20 cm	≥ 24 cm
4	1~3 以外のもの	≥ 75 cm	≤ 22 cm	≥ 21 cm
5	屋外階段 (直通)	≥ 90 cm	1~4 による	
6	その他屋外階段	≥ 60 cm		
7	住宅用 (共同住宅の共用を除)	≥ 75 cm	≤ 23 cm	≥ 15 cm
8	エレベータ機械室用	任意	≤ 23 cm	≥ 15 cm

- ・ 建築基準法施行令第23条, 120条, 121条による。
- ・ 1, 2に該当する階段で高さが3 mを超えるものは3 m以内ごとに, その他の階段で高さが4 mを超えるものについては4 m以内ごとに, 1.2 m以上の踏幅の踊り場を設けなければならない。
- ・ 階段に変わる傾斜路は勾配は1/8を超えないこと (第26条)。

定められている。

そこで具体的目標としては、けあげ 200 mm の階段を人間搭乗状態で昇降することと定めた。

本章では、この階段昇降性能の開発について、手法の提案と機械モデルの改良、評価実験と考察を述べる。

6.2 歩行パラメータの調整

WL-16R の自由度構成は、第2章の図 2.1 に示した WL-15 のものに基本的には準じており、各脚機構はスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムを構成している。この機構は出力や剛性が高いといった長所の反面、一般的に可動範囲は狭い。これが通常の平面内歩行に関しては問題にならないことは第3章で触れたとおりだが、平面内歩行に比して広い可動範囲を必要とする階段昇降においては不利となる。

図 6.1 はけあげ 140 mm の階段を上る際の直動アクチュエータの長さ（上下ジョイント間距離）を図示したものである。図中青い線は右脚の各直動アクチュエータ長さ、赤い線は左脚のそれらを示しており、図中黒い線は直動アクチュエータのストローク

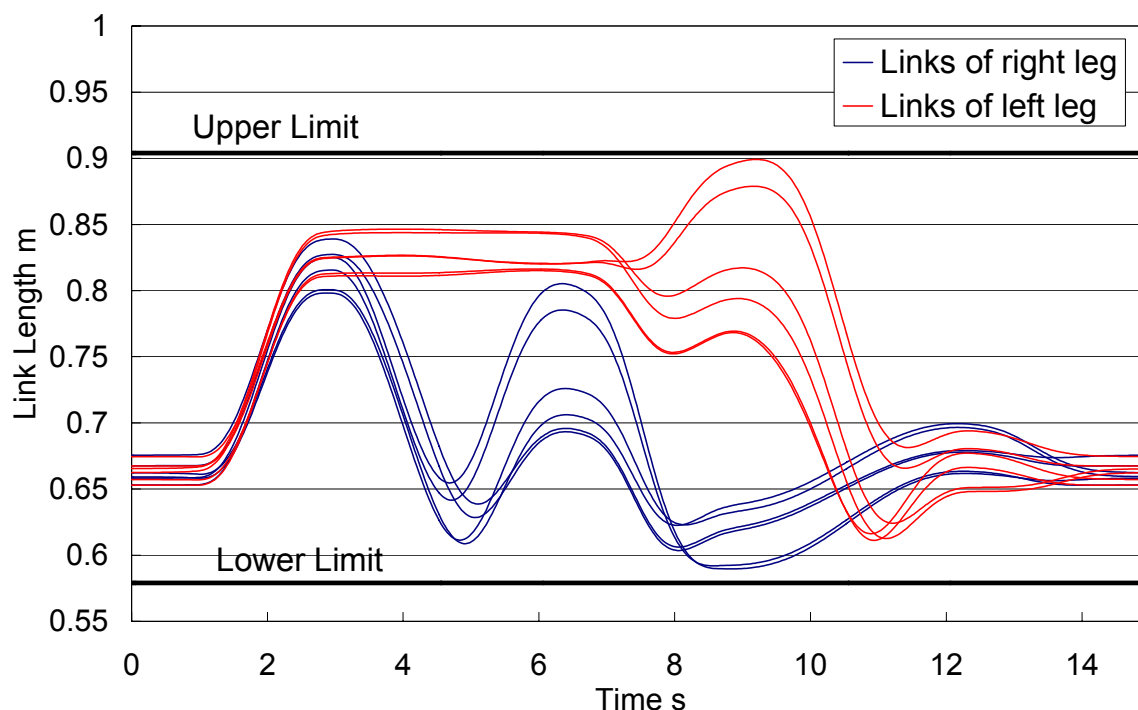


Figure 6.1 Length pattern of linear actuator.
(Ascending a stair, rise: 140 mm, Pedal tread: 300 mm)

の出力範囲の限界を示す。図からわかるように、直動アクチュエータの長さが出力可能範囲の限界まで迫っており、これ以上のけあげを持つ階段の昇降は不可能である。

もちろんもっとも容易な解決法は直動アクチュエータのストロークを伸長することである。しかしながら直動アクチュエータのストロークを伸長するにはその最短長さも長くしなければならず、重量増加につながるのみならずその分搭乗者の乗降が困難となるため望ましくない。

そこで、歩行パターン生成時に設定するいくつかの歩行パラメータを調整することで、リンク長さを出力可能範囲に収めることを考えた。

調整を行った歩行パラメータは以下の2つである。

- ・ 腰旋回角
- ・ 単脚支持期における設定 ZMP 軌道

これらについて以下に述べる。

6.2.1 腰旋回角の調整

階段昇降という運動も歩行の一種であるから、骨盤から見れば左右の足部は交互に前後に動くことになる。このことから、右足が前方向に動くときに腰を左に回転させ、逆に左足が前方向に動くときに腰を右側に回転させることにより、上部受動ジョイントと下部受動ジョイントの距離を狭めることができる。

図 6.2 は、けあげ 200 mm、踏み代 300 mm の階段を上るときの、左右の足部の腰座標系における X 軸方向の位置と Yaw 軸まわりの腰旋回角を図示したものである。図より、右足が前方向に進むときに腰の回転が始まり、左足が前に向かうときには腰が逆向きに回転していることがわかる。

けあげ 250 mm、踏面 300 mm の階段を昇降する場合のリンク長さを、腰の回転を用いない場合と用いた場合について、図 6.3 と図 6.4 に示す。腰の回転を用いることにより、リンク長さの使用範囲が少なくなっていることがわかる。

この手法の短所は、腰を大きく回転させすぎると、スチュワート・プラットフォームは Z 方向に推力を発生しにくくなることである。このため腰旋回角は最大でも 30 deg 程度を用いた。他にもいくつかの条件にてシミュレーションを行った結果、30 deg 程度がもっともリンク長さの使用範囲の低減に効果があることもわかった。

しかしながら図 6.4 に示すように、この調整法を用いてもリンク長さを使用範囲内に収めることはできていない。

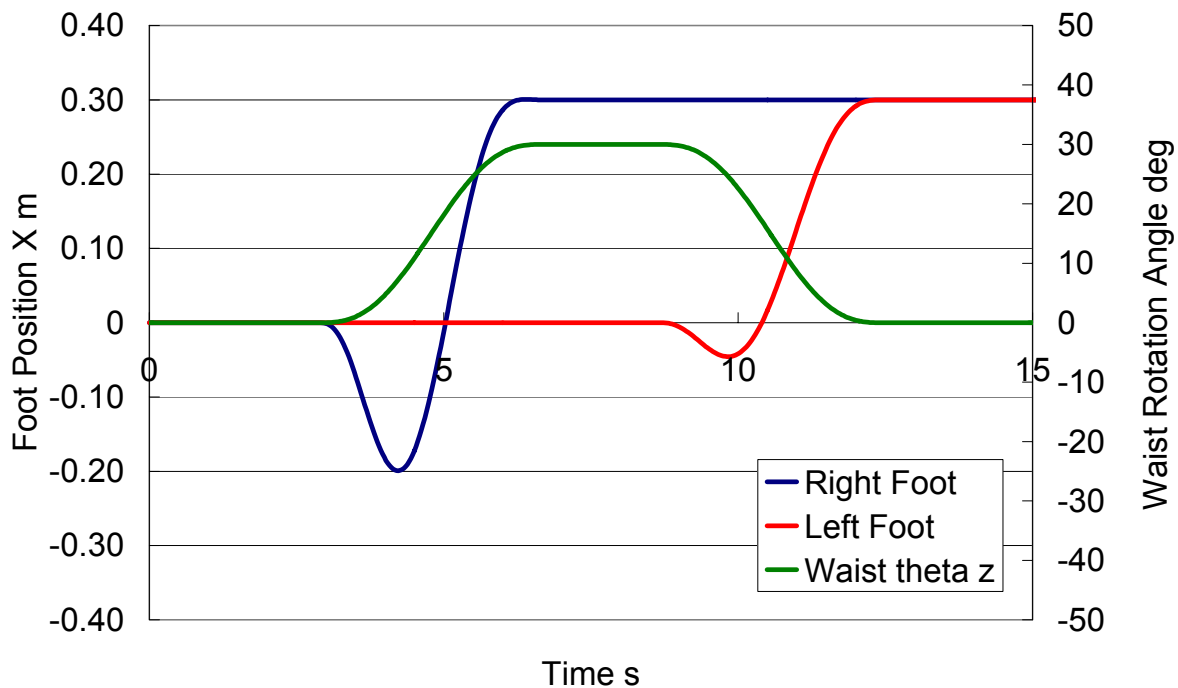


Figure 6.2 Tuned waist yaw angle trajectory and trajectories of each foot with respect to the waist. (Rise: 200 mm, Pedal tread: 300 mm)

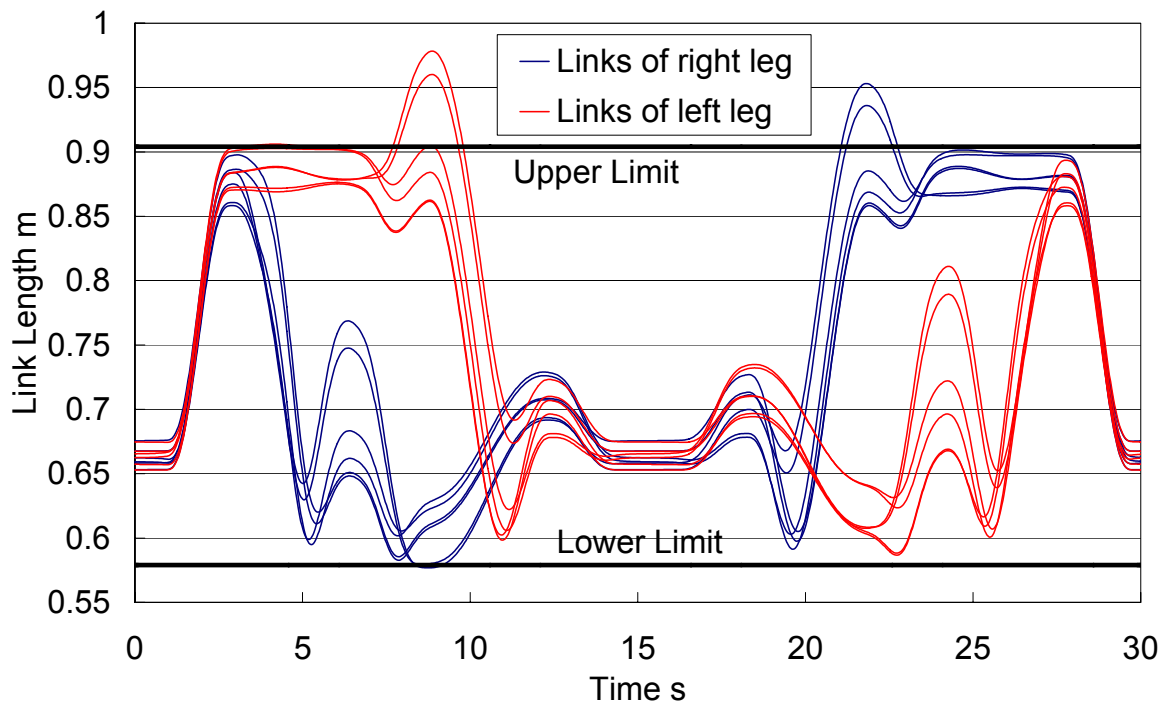


Figure 6.3 Length of linear actuator without tuning up. (Rise: 250 mm, Pedal tread: 300 mm)

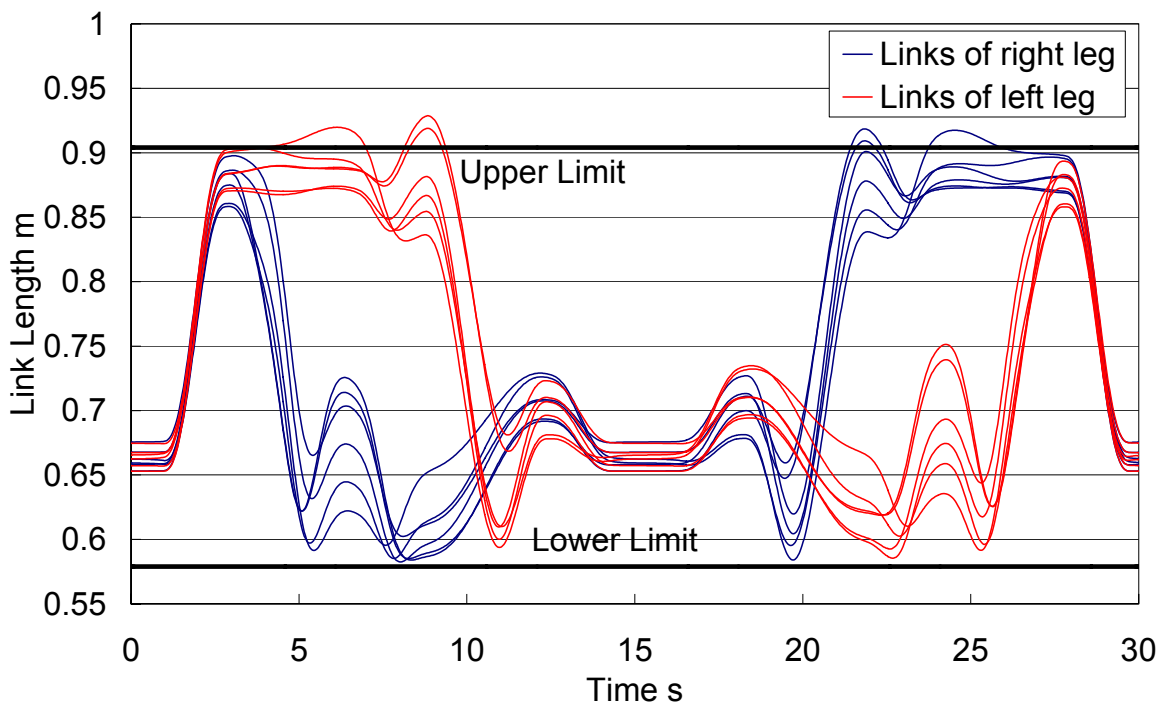


Figure 6.4 Length of linear actuator with tuning up the waist yaw angle.
(Rise: 250 mm, Pedal tread: 300 mm)

6.2.2 単脚支持期における設定 ZMP 軌道の調整

第 2 章第 4 節で述べた歩行パターン生成法により歩行パターンを生成する際には、単脚支持期においては設定 ZMP は立脚側足部の中心に設定することが安定性の面から有効である。しかしながら（安定性を若干犠牲にしても）この設定 ZMP の位置を調整することにより、リンク長さの使用範囲を若干狭めることができる。

図 6.5 は、けあげ 200 mm、踏面 300 mm の階段を上るときの単脚支持期における設定 ZMP 軌道について、通常の立脚側足部中央に位置する ZMP と、リンク長さの使用範囲を狭めるために調整した ZMP 軌道を図示したものである。図において赤い点は単脚支持期における立脚側足底中央に位置する設定 ZMP であり、青い線で示した調整された設定 ZMP 軌道は、Y 軸方向には中央から 30 mm 程度内側にある。また X 軸方向には、下段ではロボットの腰の前方向への運動とともに少しずつ前に進んでゆき、上段では単脚支持期の初めには後ろ側に残っていたものがその後腰の運動にあわせて前に進んでゆく。

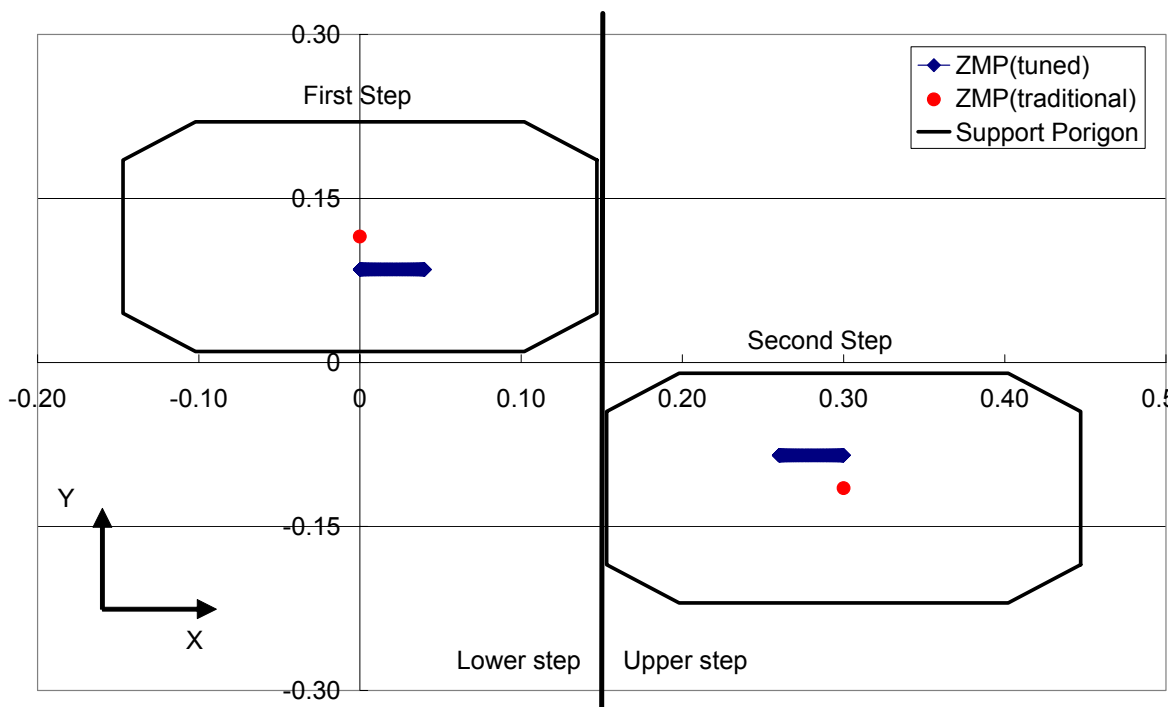


Figure 6.5 Traditional and tuned preset ZMP pass.
(Rise: 200 mm, Pedal tread: 300 mm)

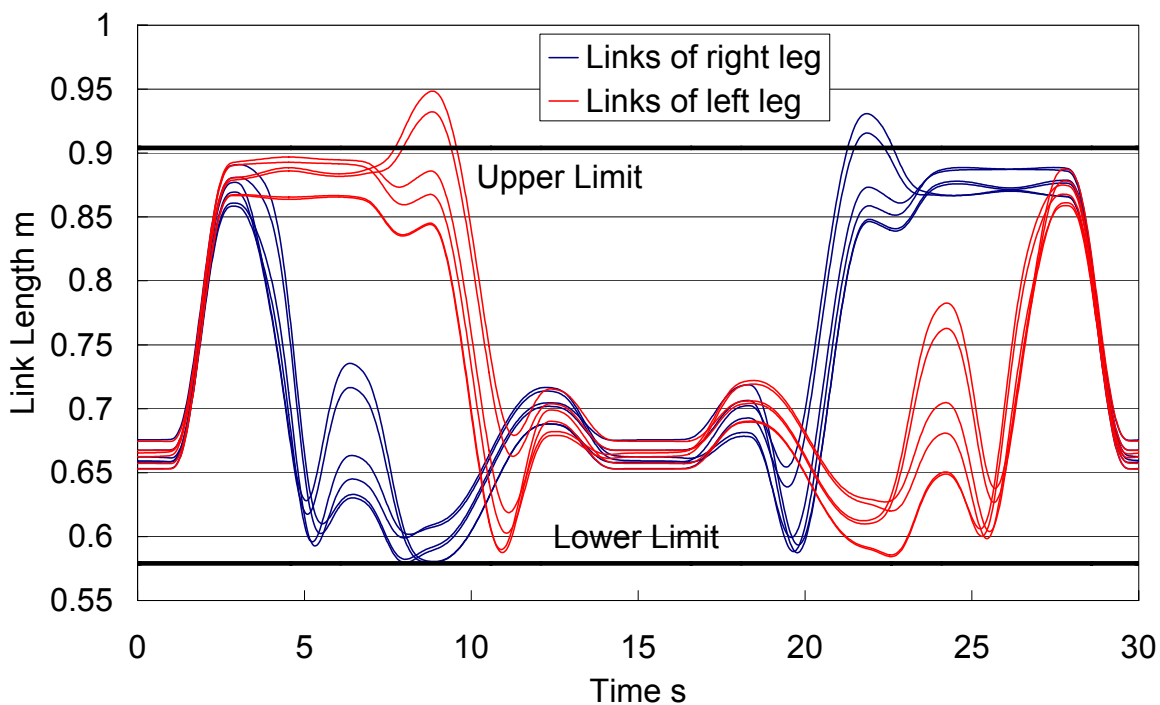


Figure 6.6 Length of linear actuator with tuning up preset ZMP pass
in the single support phase. (Rise: 250 mm, Pedal tread: 300 mm)

図 6.6 は、上記のような ZMP 軌道の調整を行ったときの、けあげ 250 mm、踏面 300 mm の階段を昇降する場合のリンク長さを示す。図 6.3 と比較すると、設定 ZMP 軌道の調整によりリンク長さの使用範囲が狭まっていることが確認できる。

この手法の短所は、設定 ZMP が立脚側足底中央から離れれば離れるだけ歩行が不安定になりやすいことである。

このために、やはりこの方法単体ではリンク長さを使用範囲内に収めることはできていない。

6.2.3 両手法の併用

以上で述べた 2 種類の手法を併用した、けあげ 250 mm、踏面 300 mm の階段を昇降する場合のリンク長さを図 6.7 に示す。リンク長さが使用範囲内に収まっていることがわかる。これにより、提案する手法を用いて、一般的に狭い可動範囲を持つスチュワート・プラットフォームを脚機構に用いても、けあげ 250 mm の階段を昇降できる見通しが得られた。

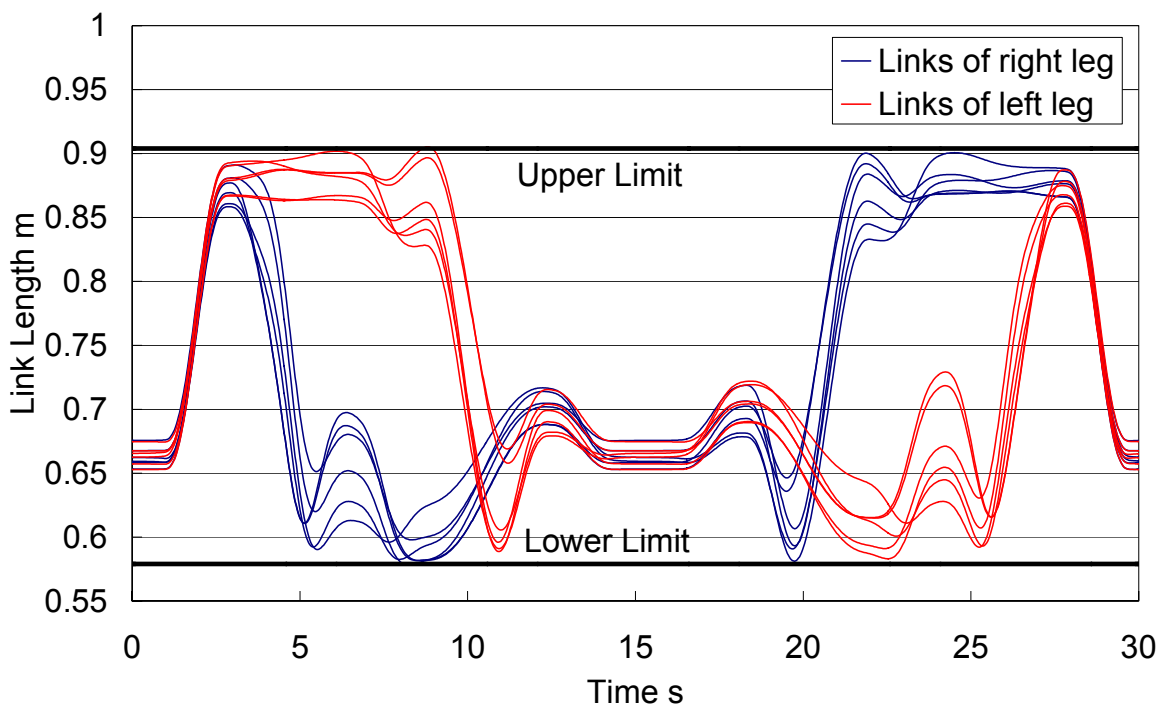


Figure 6.7 Length of linear actuator with tuning up the waist yaw angle and preset ZMP pass. (Rise: 250 mm, Pedal tread: 300 mm)

6.3 ハードウェアの改良設計

前節で述べた調整法による歩行パターンは下部受動ジョイントに大きい可動角を必要とし、また ZMP を立脚側足底中央から動かすことで剛性の高い足部を必要とする。そのためこれらの部品を再度設計したが、これについて以下に述べる。

6.3.1 下部受動ジョイントの設計

第3章にて図3.3, 図3.4に示した WL-16 の下部受動ジョイントは Yaw 軸まわりの可動角が構造的に大きく取れないもので、そのために腰を旋回させる歩行パターンの

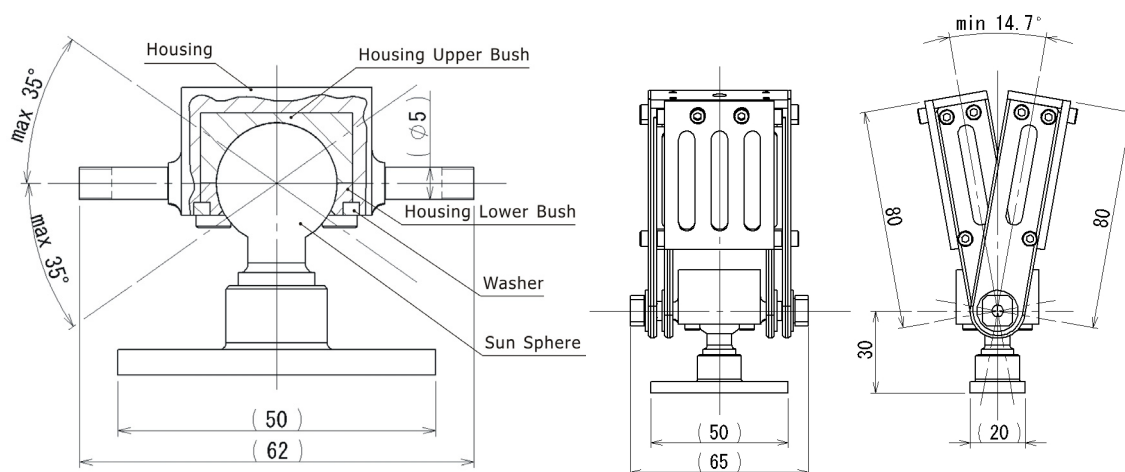


Figure 6.8 Assembly drawings of lower passive joint developed for WL-16RII.



Figure 6.9 Photograph of lower passive joint developed for WL-16RII.

出力は困難であった。そこで Yaw 軸まわりに大きな可動角を持つ新たな下部受動ジョイントを設計した。

図 6.8 にこの受動ジョイントの断面図と組立図を、図 6.9 に写真を示す。

図からわかるように球面ジョイントの中心にあたる太陽球を下側から支えることで、Yaw 軸まわりに 360 deg の可動角をもたせる構成となっており、Roll, Pitch, Yaw の 3 軸に関して可動角の干渉が避けられている。太陽球とベースの締結部はインローを持つ構成となっており、組み立て精度の向上と高剛性化を図った。

重量は 297 g となっている。

6.3.2 足天板の設計

下部受動ジョイントの変更に伴い、下部受動ジョイントが取り付けられる足部側の部品である足天板もこれに合わせ設計した。下部受動ジョイントと 6 軸力覚センサの取り付け面を座ぐり加工により低くすることで、足部底面からのジョイントの高さを低くとることができるようにし、また高剛性化を図った。

新たな足天板の写真を図 6.10 に示す。

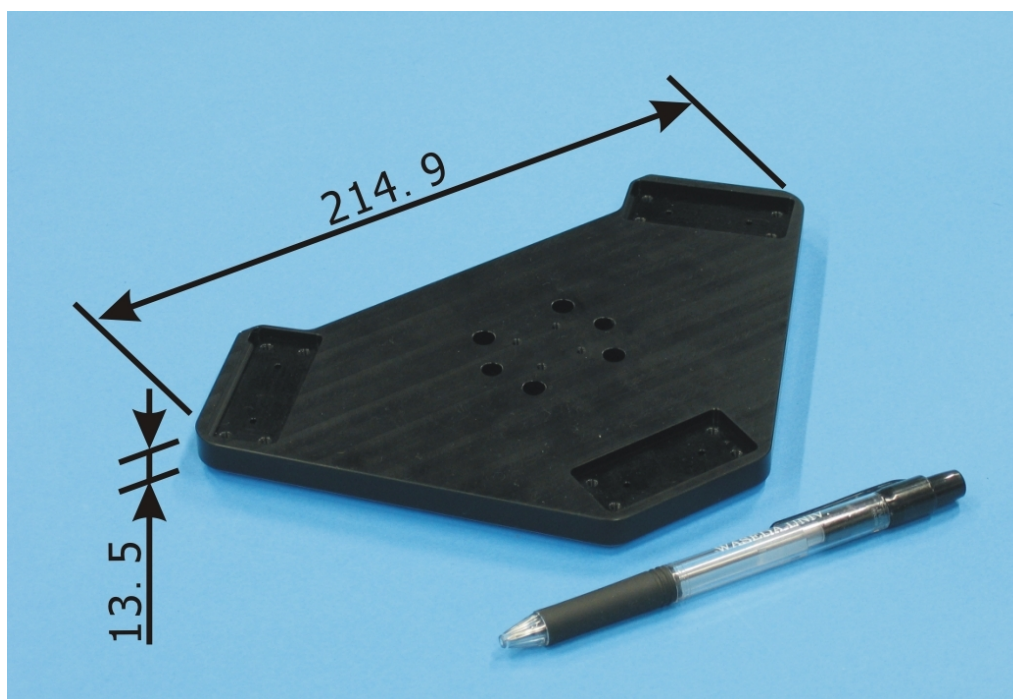


Figure 6.10 Photograph of upper foot plate developed for WL-16RII.

6.3.3 WL-16RIIの仕様

WL-16Rの下部受動ジョイントと足部に改良を施しWL-16RII (Waseda Leg - No. 16 Refined II) とした。組立図を図6.11に、外形写真を図6.12に示す。また各部の名称を図6.13に、仕様を表6.2に示す。

WL-16Rは全高1280 mm、全幅610 mm、全長688 mmとなっており、重量は57 kg (バッテリー搭載時62 kg) である。

6.4 評価実験と考察

提案した歩行パターンの調整と改良を施したWL-16RIIを用いて、複数の評価実験を行った。

評価する項目は以下のものである：

- ・ 階段昇降能力の評価
- ・ 人間搭乗時の階段昇降能力の評価
- ・ 実環境における階段昇降能力の評価

これらについて以下に述べる。

6.4.1 けあげ250 mmの段差昇降

提案した歩行パターンの調整を用いてけあげ250 mm、踏面300 mmの段差昇降パターンを作成し、歩行実験を行った。歩行パターンは図6.7に示したものである。段差は市販のOAフロアを用いて作成した。

この実験について、図6.14に階段に昇る様子を、図6.15に降りる様子を示す。

図よりWL-16RIIの腰が旋回している様子がわかる。提案した手法により、WL-16RIIはけあげ250 mmの段差昇降に成功した。このけあげが本論文執筆時までに昇降に成功した最大のけあげとなっている。

6.4.2 けあげ200 mmの人間搭乗段差昇降

提案した歩行パターンの調整のうち腰旋回角のみを利用して、体重60 kgの成人男性を搭乗させた状態でのけあげ200 mm、踏面300 mmの段差昇降パターンを作成し、歩行実験を行った。

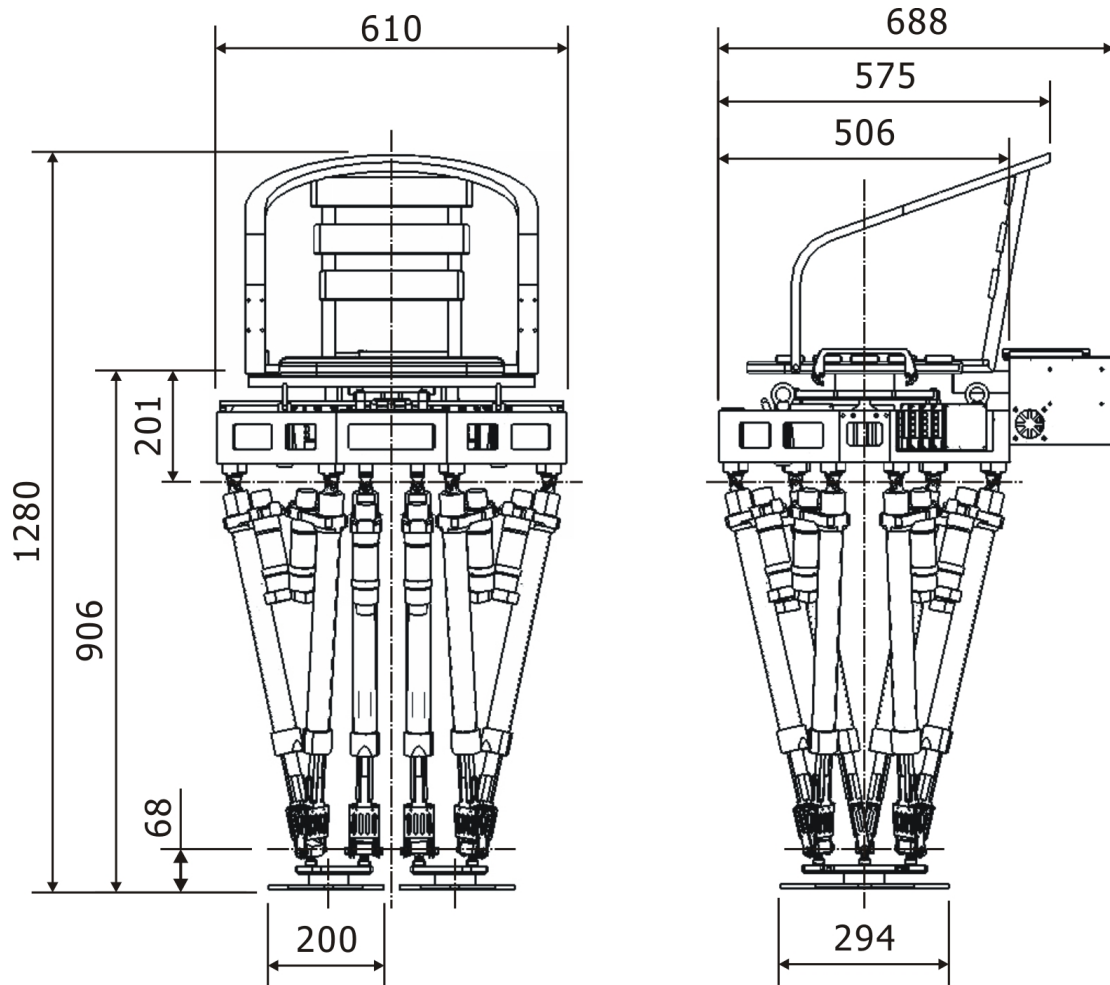
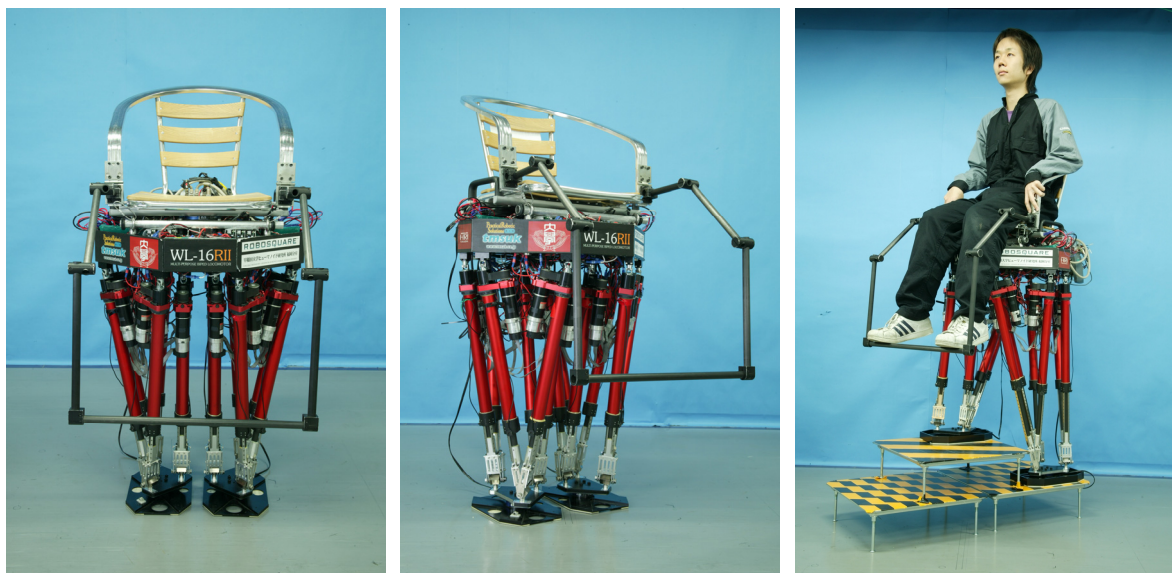


Figure 6.11 Assembly drawing of WL-16RII.



(a) Front view.

(b) Isometric view.

(c) Carrying an adult man.

Figure 6.12 Photograph of WL-16RII.

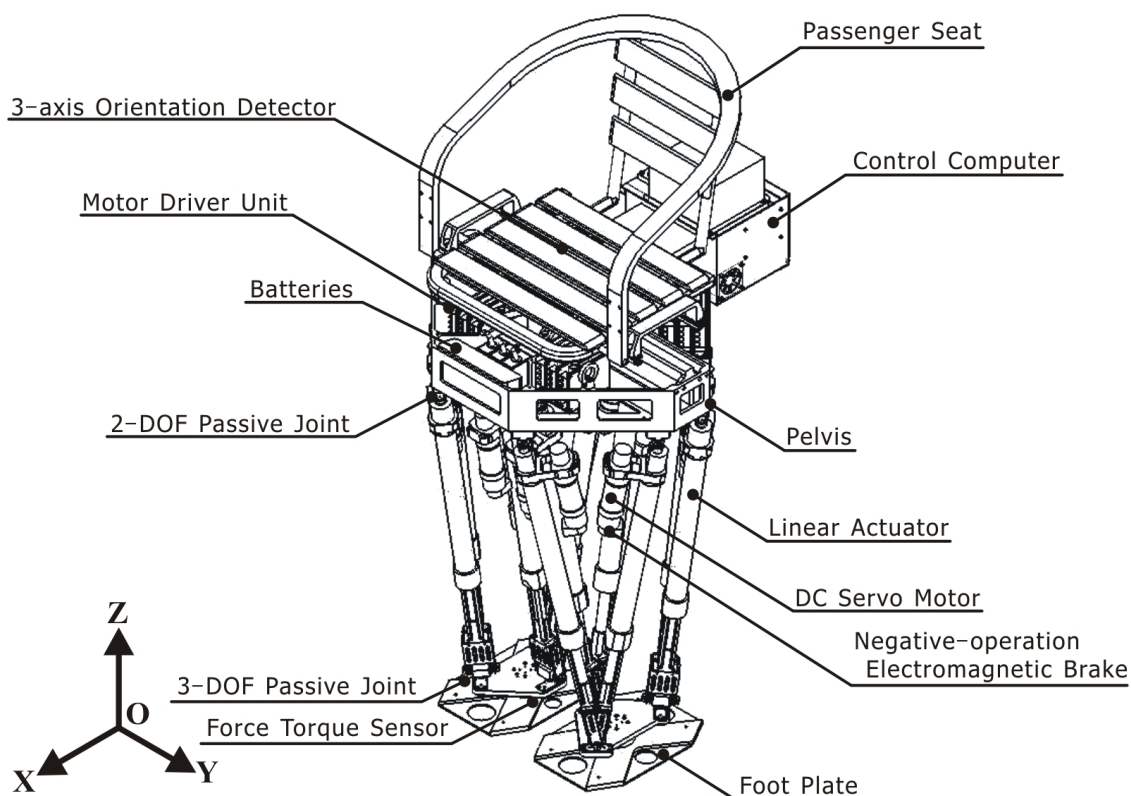


Figure 6.13 Outline of WL-16RII.

Table 6.2 Specifications of WL-16RII.

Model No.	WL-16RII
Dimension / Weight	
Height	1280 mm
Weight	57 kg
Mechanism	
Link Mechanism	Stewart Platform
Degrees of Freedom	6 x2
Actuator	
Motor	DC Servomotor
Rated Power	150 W
Lead of Ball Screw	12 mm
Stroke	350 mm
Computer / Electric System	
CPU	Pentium III 850 MHz
DC Servo Driver Type	TD12770-48W10
Batteries	
Type	Ni-MH
Nominal Voltage	21.6 x2 V
Equipment	
Force / Moment sensor	IFS-67M25T50 x2
3-axis Angle Detector	GU-3024

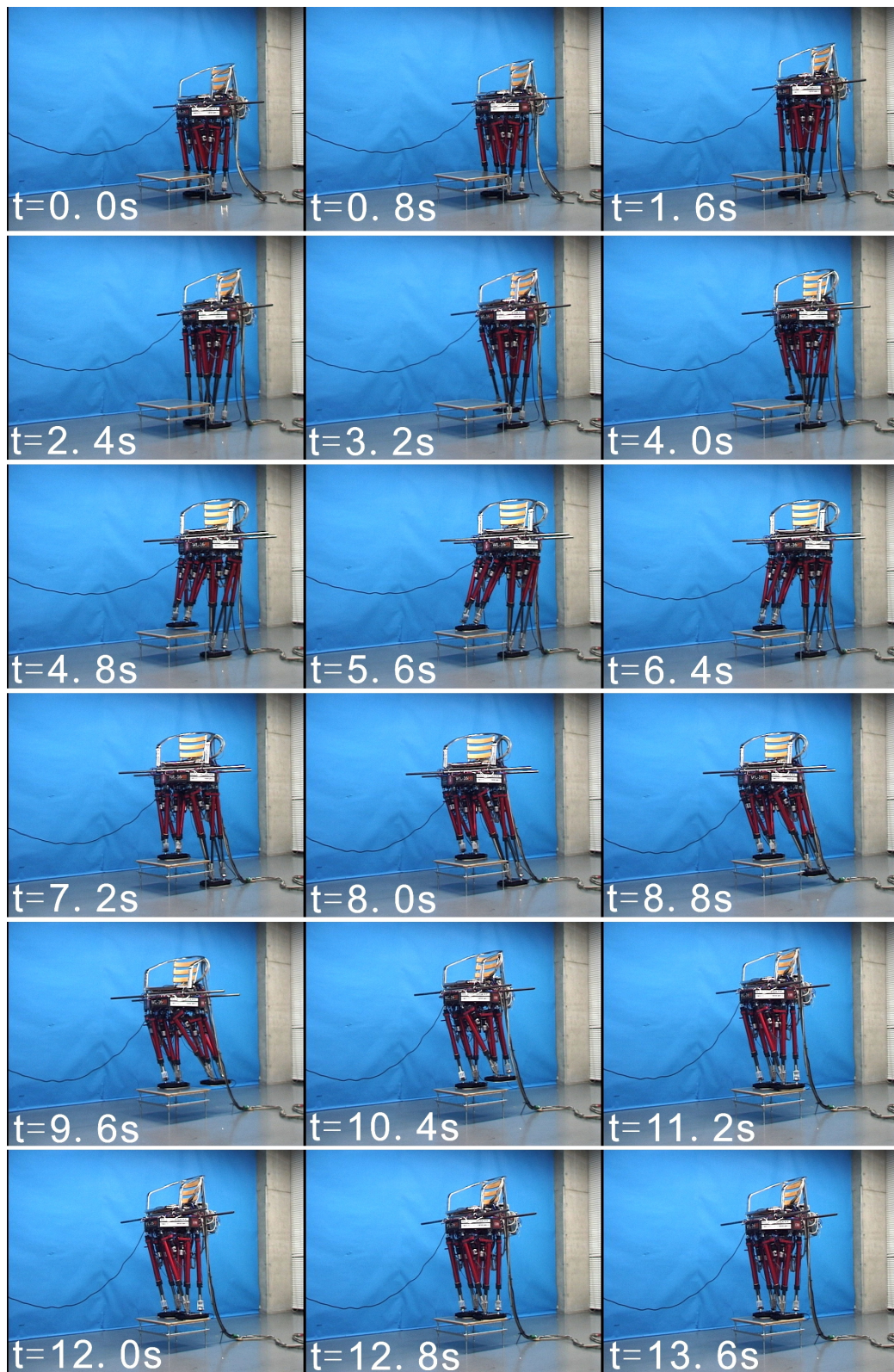


Figure 6.14 Walking experiment ascending a stair with a rise of 250 mm and pedal tread of 300 mm.

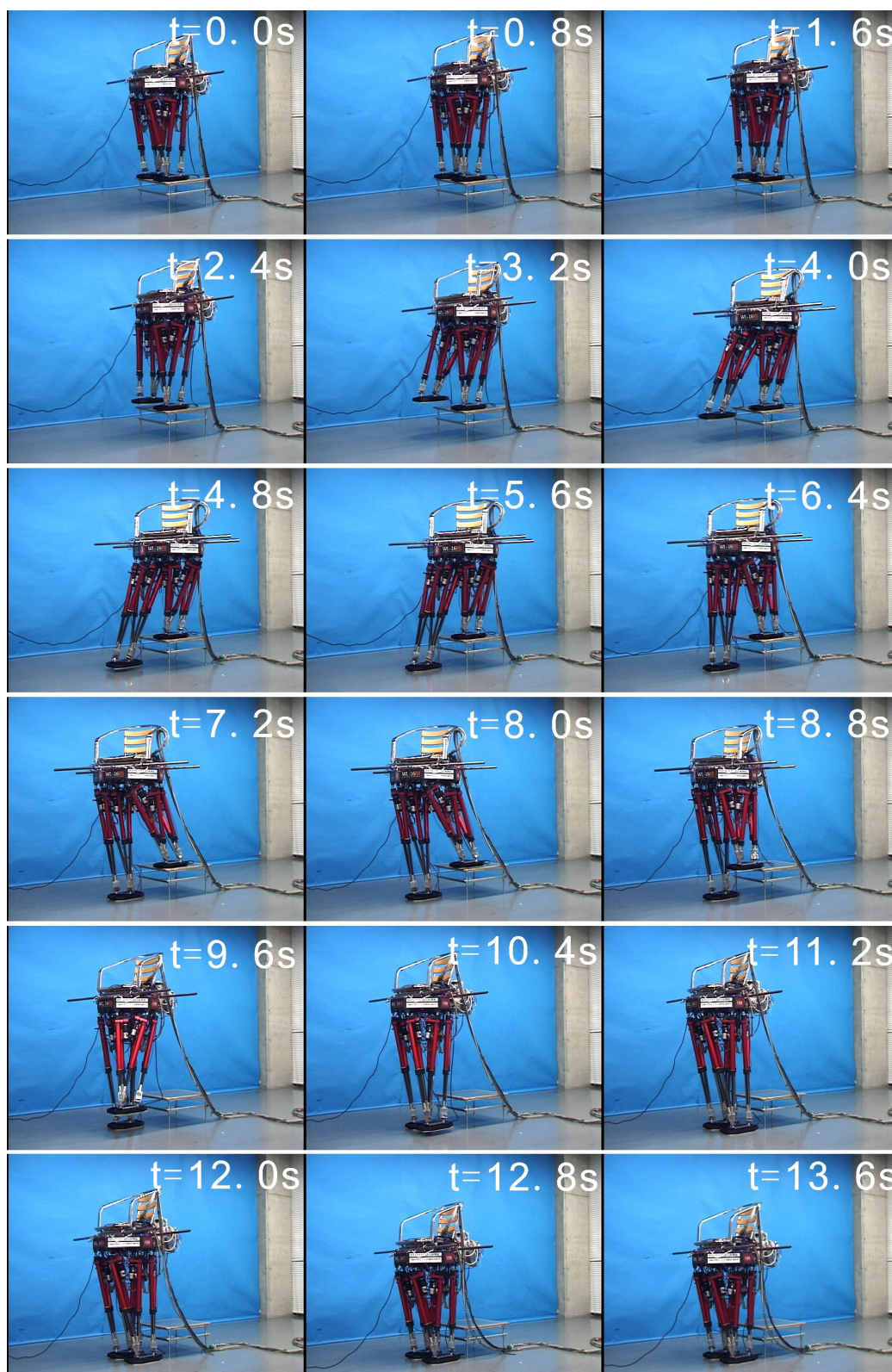


Figure 6.15 Walking experiment descending a stair with a rise of 250 mm and pedal tread of 300 mm.

この実験について、図 6.16 に階段に昇る様子を、図 6.17 に降りる様子を示す。

提案した手法により、WL-16RII は体重 60 kg の成人男性を搭乗させた状態でけあげ 200 mm の段差昇降に成功した。このけあげが本論文執筆時までには人間搭乗昇降に成功した最大のけあげとなっている。

6.4.3 けあげ 150 mm の人間搭乗連続階段昇降

提案した歩行パターンの調整のうち腰旋回角のみを利用して、体重 60 kg の成人男性を搭乗させた状態でのけあげ 150 mm、踏面 300 mm を 2 段昇り 2 段降りる連続階段昇降パターンを作成し、歩行実験を行った。まず段差を 2 段昇り、1 歩前進し、その後階段を 2 段降りて最後の 1 歩で足をそろえる都合 6 歩の歩行パターンとなっている。

この実験の様子を図 6.18 に示す。

提案した手法により、WL-16RII は体重 60 kg の成人男性を搭乗させた状態でけあげ 150 mm の 2 段連続階段昇降に成功した。

6.4.4 実際の屋外階段における 2 足階段歩行

実際に人間が通常使用している屋外の階段において歩行実験を行った。

階段は福岡ロボット開発・実証実験特区内の「鏡天満宮」と呼ばれる神社の入口に位置する石段を用いた。歩行パターンの調整法は腰旋回角調整と設定 ZMP 軌道調整を併用した。

実験の様子を図 6.19 に示す。

ここで実験に用いた階段は実験のために作られたものではなく、福岡市の住民が日常的に使用しているものであり、その実際のけあげや踏面の寸法にはかなりのばらつきが確認できた。今回の実験ではそのけあげは 128.9 mm から 143.2 mm の間でばらつきが認められ、この方法は決してスマートなものではないが、実験においてはすべての段のけあげを測定し、1 段ごとに異なるパターンを用いることによって対応した。

これと提案した手法により、WL-16RII は実際の屋外階段歩行に成功した。

6.4.5 実際の階段における人間搭乗 2 足階段歩行

実際に人間が通常使用している階段において、人間搭乗 2 足階段歩行実験を行った。



Figure 6.16 Walking experiment ascending a stair with a rise of 200 mm and pedal tread of 300 mm carrying a 60 kg adult man.



Figure 6.17 Walking experiment descending a stair with a rise of 200 mm and pedal tread of 300 mm carrying a 60 kg adult man.



Figure 6.18 Walking experiment ascending and descending stairs with a rise of 150 mm and the pedal tread of 300 mm, while continuously carrying a 60 kg man.

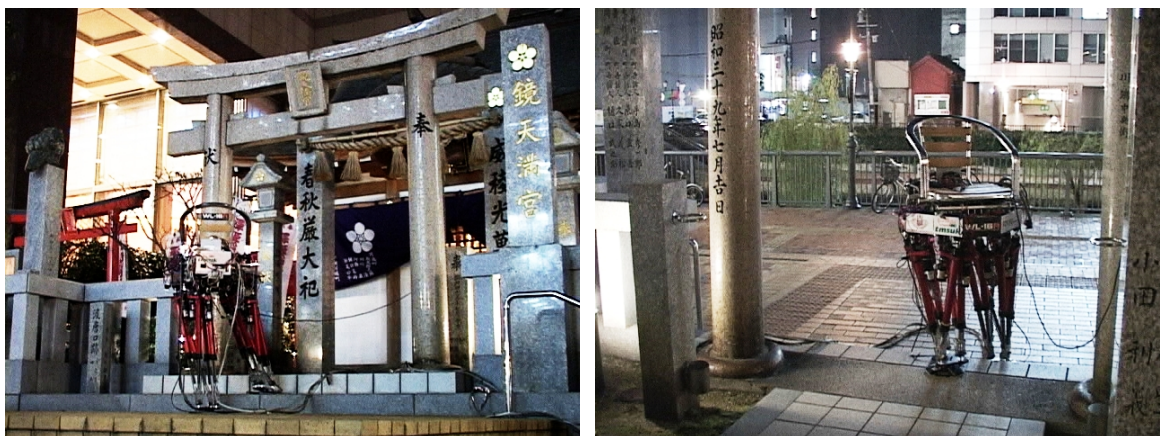


Figure 6.19 Walking experiment involving ascending the stairs at the entrance of an outdoor Japanese shrine.



Figure 6.20 Walking experiment involving ascending the stairs of a shopping complex carrying a human.

階段は福岡ロボット開発・実証実験特区内の「博多リバレイン」と呼ばれるショッピングモールのレストランフロア内に位置する木製階段を用いた。歩行パターンの調整法は腰旋回角調整のみを用いた。

実験の様子を図 6.20 に示す。

この階段も前項で述べた階段と同様、レストランフロアの利用客によって日常的に利用されているものであり、そのけあげは 138.5 mm から 147.5 mm の間でばらつきが確認できた。この実験においても各段のけあげを測定し 1 段ごとに異なるパターンを用いることによって対応した。

これと提案した手法により、WL-16RII は実際の階段における人間搭乗 2 足階段歩行に成功した。

6.4.6 考察

以上の実験結果のように、提案した歩行パラメータの調整法と開発した WL-16RIIにより、けあげ250 mmの階段昇降やけあげ200 mmの人間搭乗階段昇降に成功した。

人間搭乗階段昇降においては、十分な安定性が確保できなかったために、歩行パラメータの調整は腰旋回角のみとし、単脚支持期における設定 ZMP 軌道の調整は使用しなかった。設定 ZMP を多少ずらしても安定であるように機構の剛性を確保することができれば、直動アクチュエータのストロークやリンク配置を変更することなく人間を搭乗させた状態でのけあげ250 mmの階段昇降も可能になると考えられる。

また、今回は安全が確保できなかったために比較的低速な階段昇降のみしか実現できなかったが、これを高速化し動的に階段昇降を行わせれば、絶対座標系に対する腰の運動の振幅は小さくなることは ZMP 方程式より明らかである。アクチュエータの性能にも依存するが、階段昇降における安全確保と高速階段昇降に関しては今後の検討が必要であると考えられる。

また、歩行パラメータの調整は、リンク長さの目標値が出力可能範囲に入るように手作業で調整したが、何らかの方法による自動化について検討できると考える。

最後に、6.4.4 節、6.4.5 節で述べたように、実環境における階段はそのけあげや踏面、段上の絶対傾斜などの寸法にかなりばらつきがあることが今回の実験によりわかったが、これらをロボットが自動的に取得して軌道を修正するような制御が必要になると考えられる。これは不整地歩行制御と同様の考え方によって解決可能であると考えられる。

しかしながら、以上の実験結果により、一般に可動範囲の狭いスチュワート・プラットフォームを脚機構に用いた場合でも階段昇降が可能であることを示せたことは意義があると考えられる。人間搭乗時に昇降可能な最大のけあげである200 mmは、決して存在するすべての階段のけあげがこれ以下であるわけではないが、表6.1に示したような多くの階段が昇降可能になったことにより、2足歩行型車いすや汎用移動台車としての可能性を確認することができたと考えられる。

6.5 まとめ

本章では、本研究で提案する2足歩行型の車いすや汎用移動台車にもっとも重要となる階段昇降性能の開発について、手法の提案と機械モデルの改良、評価実験と考察

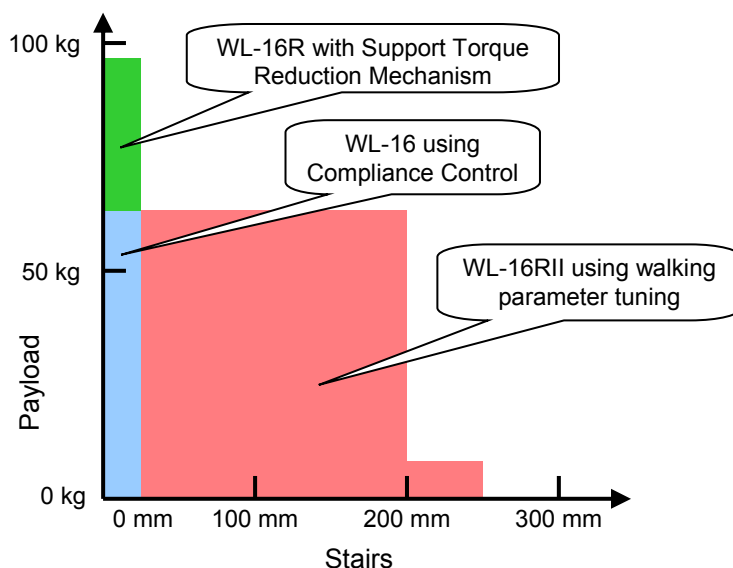


Figure 6.21 Performance of WL-16RII.

を述べた。

スチュワート・プラットフォームは、脚機構としてさまざまな長所がある反面、可動範囲が比較的狭いという決定的な短所を持つことが知られており、広い可動範囲を必要とする階段昇降においては不利となる。この問題に対し、足先位置に応じた腰旋回角軌道と設定 ZMP 軌道の変更を行うことにより、各リンクの可動範囲内で階段昇降が可能となることをシミュレーションにより確認した。またこの手法を用いて作成した歩行パターン出力のために、下部受動ジョイントと足底板を新たに設計した。

開発した手法を WL-16R の改良機 WL-16RII を用いた実験により評価したところ、最大でけあげ 250 mm の階段昇降と、体重 60 kg の成人男性が搭乗した状態でのけあげ 200 mm の階段昇降に成功し、開発した手法の有効性を確認した。

図 6.21 に、WL-16RII の重量物積載性能と階段昇降性能を図示した。図中水色の範囲は第 3 章で述べた WL-16 によって実現できた領域であり、図中緑色の領域が本章に述べた自重支持トルク低減機構によって実現できた領域、図中赤色の領域が本章で述べた手法によって実現できた領域である。水平平坦路面での歩行と同じ 94 kg を積載しての階段昇降には成功しなかったが、体重 60 kg の人間を搭乗させてのけあげ 200 mm の階段昇降に成功し、階段昇降に関しても積載重量比 r_{pw} 1.05 を実現した。

第7章 結論

7.1 結論

7.2 今後の展望

7.1 結論

本研究では、人間を搭乗させて歩行できる2足歩行ロボットについて、その機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に試作した人間搭乗型2足歩行ロボットを評価することによりその有効性を実証することを目的とした。具体的には、体重60 kg程度の成人を搭乗させての水平・平坦路面での歩行、および階段昇降を可能とする、重量60 kg程度の軽量な人間搭乗型2足歩行ロボットを機構および制御法の両面から開発し、評価を行った。

本論文では、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、脚と腰部のみで構成され、小型・軽量で電池により自立歩行が可能な2足歩行ロボットの先行試作機 WL-15 の開発について、その機械モデルと歩行制御法、評価実験と考察を述べた。WL-15 は2本のスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムの脚と腰部で構成されており、脚機構は片足につき6本の直動アクチュエータと上下の受動ジョイントを備えた。バッテリーやDCサーボドライバ、3軸姿勢角センサは骨盤上部に搭載され、制御用コンピュータは骨盤後部に搭載された。足部は足底に床反力取得用6軸力覚センサを備えた。各部の設計には軽量化が施されており、重量は57 kgとなった。歩行制御法は本学で開発された、ZMP安定判別規範に基づく2足ヒューマノイド・ロボットの2足歩行制御法をもとに開発した。この手法は任意の足先軌道による歩行動作に対し、フーリエ変換によるモーメント補償軌道算出アルゴリズムを用いて腰部のモーメント補償軌道を算出し、それらの軌道を設定歩行パターンとして歩行ロボットをプログラム制御するものとなっている。開発したWL-15 と歩行制御法を用いてその歩行能力を評価したところ、基本的な歩行能力に関してはその有効性を確認した。一方で、重量物積載歩行能力に関しては、積載歩行時の安定性とアクチュエータの出力の2つの点において十分な性能を持つとは確認できず、今後の改善を必要とする結果となった。

第3章では、実際に人間を搭乗させて2足動歩行を行う事が可能なロボット WL-16 の開発について、その機械モデルと仮想コンプライアンス制御の導入、またこれらを用いて行った評価実験と考察を述べた。WL-16 は体重 50 kg 程度の人間を搭乗させて歩行できること、および多少の凹凸がある路面においても安定に歩行できることを開発要件として開発したもので、基本的な自由度配置は WL-15 のものを踏襲し、広可動範囲化、高可搬重量化を目指してバックラッシの少なく推力とストロークの大きい直動アクチュエータと、同じくバックラッシが少なく小型・軽量の上下の受動ジョイントを新たに設計した。また特に骨盤上部には人間が搭乗するためのシートを備え、その大きさは WL-15 とほぼ同じであるが約 10 kg の軽量化に成功した。また歩行制御法に関しては、WL-15 で用いた ZMP 安定判別規範に基づくフーリエ変換によるモーメント補償軌道算出法により生成された歩行パターンを用いたプログラム制御に加え、重量物積載歩行時の構造部材のたわみや路面の凹凸などのモデル誤差を原因として生じる着地衝撃の吸収と振動の抑制を目的として、脚の動作に仮想コンプライアンス制御を導入した。仮想コンプライアンス制御は、6 軸力覚センサにより足部にかかる力とモーメントを測定し、このデータよりバネ・ダンパ系の運動方程式に基づいて算出した操作量を足部の目標軌道に足し合わせながら制御を行うもので、各アクチュエータは位置制御のみを行いながらも足部は仮想的に力制御されるものである。開発した WL-16 と歩行制御法を用いて性能を評価したところ、歩幅 300 mm での歩行や微小な凹凸のある路面での安定歩行、50 kg の重量物を積載しての歩行、また史上初となる人間搭乗 2 足動歩行に成功し、その有効性を確認した。この人間搭乗歩行実験の成功により、水平平坦路面においては積載重量比 r_{pw} 1.25 を実現した。

第4章では、積載可能重量の増加と消費電力の低減を目的として開発した自重支持トルク低減機構について、予備実験とその基本設計、構造と動作原理およびこれを用いて行った評価実験と考察を述べた。自重支持トルク低減機構は脚機構の内側に各直動アクチュエータと並列に組み込まれ、主として鉛直方向の荷重を負担する機構である。構造は反力の異なる2本のロック機能付きガススプリングを直列に配し、脚機構にかかる荷重の異なる立脚・遊脚の2つの相に応じてバネの効果を切替えることにより、立脚時には各アクチュエータの必要推力を軽減させ、遊脚時にはその必要推力を増大させないことを狙ったものである。開発した自重支持トルク低減機構を WL-16 の改良機 WL-16R に装着して評価を行ったところ、各モータ電流の減少、消費電力の減少、積載可能重量の増加などが確認された。また、体重 94 kg の成人男性を搭乗させての歩行に成功し、この機構の有効性を確認した。これにより、水平平坦路面においては積載重量比 r_{pw} 1.59 を実現した。

第5章では、第3章において述べた仮想コンプライアンス制御の改良と姿勢補償制

御の開発, およびこの評価実験と考察を述べた. 仮想コンプライアンス制御に関しては, 第3章では全歩行周期を通じて一定値としていた各コンプライアンス係数を足部の位置に応じて変化させることでより安定な挙動を実現することを図った. 姿勢補償制御に関しては, ロボットの腰部に搭載された姿勢角センサの検出量と, 足部6軸力角センサにより測定されるZMP偏差を用い, 低ゲインのフィードバック制御を行うことで未知の傾斜路面における安定歩行の実現を図った. これらの制御法をWL-16Rを用いた実験により評価したところ, 仮想コンプライアンス制御を用いた場合には高周波振動の抑制が確認でき, また姿勢補償制御によりロボット腰部姿勢角のオフセット量が低減できていることが確認できた. またこれらを用い, 緩やかに傾斜の変化する未知の傾斜路面においての安定歩行に成功し, 開発した手法の有効性を確認した.

第6章では, 本研究で提案する2足歩行型の車いすや汎用移動台車にもっとも重要となる階段昇降性能の開発について, 手法の提案と機械モデルの改良, 評価実験と考察を述べた. WL-15, WL-16, WL-16Rの脚機構に用いてきたスチュワート・プラットフォームは, 脚機構としてさまざまな長所がある反面, 可動範囲が比較的狭いという決定的な短所を持つことが知られており, 広い可動範囲を必要とする階段昇降においては不利となる. この問題に対し, 足先位置に応じた腰旋回角軌道と設定ZMP軌道の変更を行うことにより, 各リンクの可動範囲内で階段昇降が可能となることをシミュレーションにより確認した. またこの手法を用いて作成した歩行パターンの出力のために, 下部受動ジョイントと足底板を新たに設計した. 開発した手法をWL-16Rの改良機WL-16RIIを用いた実験により評価したところ, 最大でけあげ250 mmの階段昇降と, 体重60 kgの成人男性が搭乗した状態でのけあげ200 mmの階段昇降に成功し, 開発した手法の有効性を確認した. これにより, 階段昇降に関しても積載重量比 r_{PW} 1.05を実現した.

以上のように, 第2章と第3章で述べた試作機により人間を搭乗させての2足歩行が可能であることを世界で初めて実証し, またその積載可能重量, 未知の不整路面における安定性, 階段昇降能力という3種類の性能に関して, それぞれ第4章, 第5章, 第6章において述べた手法によりその強化が可能であることを示した. 結果として, 体重60 kg程度の成人を搭乗させて水平・平坦路面での歩行と階段昇降を可能とする重量60 kg程度の人間搭乗型2足歩行ロボットを開発し, 本研究の目的を達成した.

最後に, 第7章(本章)にて, 本研究の結論と今後の展望について報告する.

以上, 本論文の成果をまとめると, 次のようになる.

- ・ 2足歩行型車いすや2足歩行型汎用移動台車として用いることのできる汎用2足移動モジュールを提案(第1章)

- ・ 人間搭乗型 2 足歩行ロボットの積載性能を評価する指標として積載重量比 r_{pw} を提案 (第 1 章)
- ・ スチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムの脚機構と腰のみで構成された 2 足歩行ロボットを先行試作機として開発 (第 2 章)
- ・ ZMP 安定判別規範に基づくフーリエ変換によるモーメント補償軌道算出法による歩行パターン生成法をスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムの脚機構と腰のみで構成された 2 足歩行ロボットへ適用 (第 2 章)
- ・ 実際に人間が搭乗して歩行できる 2 足歩行ロボットを開発 (第 3 章)
- ・ 着地衝撃の吸収と振動の抑制のために脚の運動に仮想コンプライアンス制御を導入 (第 3 章)
- ・ 不整地歩行における仮想コンプライアンス制御の有効性を確認 (第 3 章)
- ・ 重量物積載歩行における仮想コンプライアンス制御の有効性を確認 (第 3 章)
- ・ 2 足歩行ロボットによる 50 kg の重量物積載歩行を実現 (第 3 章)
- ・ 2 足歩行ロボットによる成人女性搭乗 2 足動歩行を世界で初めて実現 (第 3 章)
- ・ 2 足歩行ロボットによる体重 60 kg の成人男性搭乗 2 足動歩行を世界で初めて実現 (第 3 章)
- ・ 水平平坦路面において積載重量比 r_{pw} 1.25 を実現 (第 3 章)
- ・ 遊脚期・立脚期における推力切替機構を持つ自重支持トルク低減機構を開発 (第 4 章)
- ・ 自重支持トルク低減機構により、各モータ電流の減少と消費電力の減少を確認 (第 4 章)
- ・ 自重支持トルク低減機構により、2 足歩行ロボットによる 80 kg の重量物積載歩行を実現 (第 4 章)
- ・ 自重支持トルク低減機構により、2 足歩行ロボットによる体重 94 kg の成人男性搭乗 2 足動歩行を実現 (第 4 章)
- ・ 自重支持トルク低減機構により、水平平坦路面において積載重量比 r_{pw} 1.59 を実現 (第 4 章)
- ・ 仮想コンプライアンス制御における脚位置に応じたパラメータの変化法を提案 (第 5 章)
- ・ 姿勢補償制御を導入 (第 5 章)
- ・ 3 deg 程度の未知の傾斜路面における安定歩行を実現 (第 5 章)
- ・ 階段昇降パターン生成におけるリンク長さ使用範囲の低減が可能な歩行パラメータの調整法を提案 (第 6 章)
- ・ 蹴上高さ 250 mm の階段昇降を実現 (第 6 章)

- ・ 体重 60 kg の成人男性が搭乗した状態での蹴上高さ 200 mm の階段昇降を実現(第 6 章)
- ・ 実環境屋外における階段歩行, 実環境における人間搭乗階段歩行を実現(第 6 章)
- ・ 階段昇降に関して積載重量比 r_{PW} 1.05 を実現(第 6 章)

以上要するに, 本論文では, 人間を搭乗させて歩行できる 2 足歩行ロボットについて, その機構と制御方式を提案し, これに基づき実際に試作した人間搭乗型 2 足歩行ロボットを評価することによりその有効性を実証することを研究の目的としており, その成果として, 実際に体重 60 kg 程度の人間が搭乗した状態での 2 足歩行と階段昇降が可能であり, また体重 94 kg の人間まで搭乗できる 2 足歩行ロボットを開発し, 本論文において述べたような手法によりこれが実現可能であることを主として報告した.

本研究の成果は, 2 足歩行型車いすの開発と実用化につながる基盤技術となるものであり, また本研究が 2 足歩行ロボットによる人間を搭乗させての歩行に世界で初めて成功したものであるから, 人間の住環境, 屋内外, 山野なども含めた環境をその対象とし, 人間の搭乗が可能な 2 足歩行型車いすを開発することを目標とした中長期的な研究が開始できると考える.

これにより歩行が困難な高齢者や歩行障害者に健常者と同様の移動能力を提供することによって, 歩行障害者や高齢者の行動範囲を飛躍的に拡大することができ, 真のバリアフリーの実現を目指すことができる. 2 足歩行型車いすにより移動の際の物理的障壁をクリアさせることができ, 歩行障害者や高齢者に健常者と同等の移動能力を提供できることはもちろんのこと, これにより車いす利用者の心的負担を軽減することも意義がある. 従来の階段昇降機などの運用では, 車いす利用者は駅や公共施設構内の随所にある階段や段差に差し掛かるたびに係員や周囲の人の手助けを必要としていた. 車いす利用者が外出を厭う原因として, 肉体的に苦勞を伴うこと以外に, 自分で乗り越えられないバリアがあるたびに周囲の人の助けを請わなければならないことによる精神的苦痛も大きいことは以前から指摘されてきた. 利用者が一人でバリアを越えることができるようになる 2 足歩行型車いすは, こういった車いす利用者の心的負担を軽減する「心のバリアフリー」実現にも有効である.

このように, 人間搭乗型 2 足歩行ロボットの実現可能性を世界で初めて証明した本研究は, 超高齢社会を迎える我が国において高齢者・障害者の高質な生活を支え, また高齢者や身体障害者に共に社会を支える重要な一員として活躍してもらうための重要な技術となり, 人とロボット技術, 社会の将来に大きく貢献するものであると考える.

7.2 今後の展望

今後の展望について述べる前に、本研究により開発できた人間搭乗型2足歩行ロボットの性能について述べておく。

第3, 4, 6章のまとめにおいて、その積載可能重量や歩行可能な路面の凹凸、階段のけあげなどを簡単に図示してきたが、これをひとつの図にまとめたものを図7.1に示す。また、本研究と第1章で詳述した関連研究との比較に関して、本研究により実際に開発したロボットの性能を加えて表7.1に採録する。

このように本研究の成果は、最大積載重量は平地歩行時と階段昇降時では異なり、また重量物積載状態での不整路面歩行には成功しておらず、図7.1のように若干いびつである。将来的にはこれを直方体状にする、つまり平地歩行時の最大積載重量はこれを階段昇降時にも満たせるようにし、また重量物積載状態での不整地歩行も実現する必要がある。またその基本的な性能も実用化に決して十分でなく、人間の住環境における運用を現実的とするには、自重は40 kg程度にして最大積載重量が100 kg程度を達成し、積載重量比は2.5程度が目標となるであろう。将来的には表中9列目の水色の網掛けをした部分にしめしたように、本論文においては重視しない不整地歩行能力や着地点選択能力についても研究を行うことが必要となると考えられ、これについては後述する。

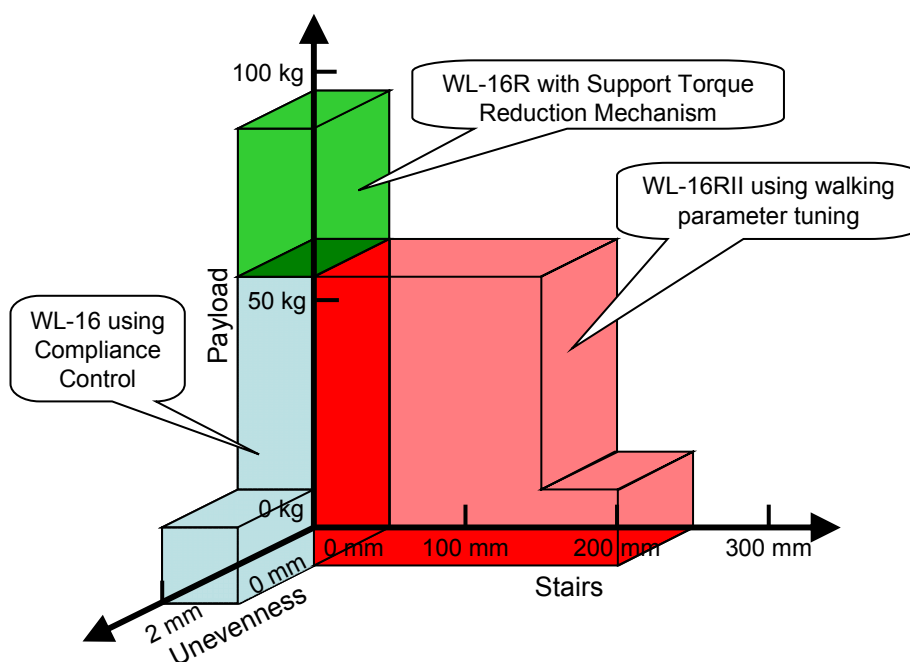


Figure 7.1 Performance diagram of WL-16/WL-16R/WL-16RII.

Table 7.1 Comparison between this research and related studies.

Developer	Independence Technology	Sugahara	Toyota Motor	Sugahara	Sugahara	Oh	Sugahara
Name	iBOT	WL-16	i-foot	WL-16R	WL-16RII	HUBO FX-1	(Long-term Objective)
Figure							
Year	2003	2003	2004	2004	2005	2005	2006-
Walking mode	Wheeled	Dynamic Biped	Dynamic Biped	Dynamic Biped	Dynamic Biped	Dynamic Biped	Dynamic Biped
Unladen Weight	131 kg	48 kg	200 kg	59 kg	57 kg	150 kg	40 kg
Payload	120 kg	60 kg	60 kg	94 kg	94 kg (60 kg)*	100 kg	100 kg
Payload-Weight Ratio	0.92	1.25	0.3	1.59	1.59 (1.05)*	0.67	2.5
Adaptable Area	Even terrain	○	○	○	○	○	○
	Uneven terrain	○	×	?	×	?	○
	Rough terrain	×	×	?	×	?	○
	Stairs	○	×	?	×	?	○
	Surface where the landable area is limited	×	×	?	×	?	○
Human-living Environment	○	×	×	×	×	×	○
Realization	○	○	○	○	○	○	○
Practical application	○	×	×	×	×	×	○

*Value in parentheses means the value of ascending and descending stairs.

しかしながら表 7.1 に示したように、本研究において開発したロボットの階段昇降性能や積載重量比は i-foot や HUBO FX-1 を上回っており、脚機構にスチュワート・プラットフォームを用いるなど（これら 2 つの研究例と本研究との最大の相違点はこの点である）本研究において提案した手法により、より実用化が現実的な人間搭乗型 2 足歩行ロボットが開発できることを示せたことは意義があると考えられる。

次に、本論文で述べた研究の流れについて再度触れておきたい。

図 7.2 は、本研究におけるテーマの流れを示したものである。図のように、これまで述べてきた研究成果は、大きくわけて赤線で示した「歩行性能」の向上と青線で示した「積載性能」の向上の二つの流れを形成していることがわかる。

歩行性能とはいわゆる 2 足歩行ロボットとして求められる性能であり、不整地歩行能力や階段昇降能力、歩行速度などがこれに属する。この内容は（脚機構の違いとこれに起因する問題があったとはいえ）他の 2 足歩行ロボットや 2 足ヒューマノイド・ロボットに求められる性能と本質的には代わりがない。

これに対し積載性能とはこと 2 足歩行ロボットでは本研究で提案するような重量物や人間を搭乗させて歩行するものに特有の性能であり、これまで触れたものでは最大積載重量がこれにあたる。

これらそれぞれの流れにおいて今後引き続き研究してゆくべきものとしては以下のようなものがあげられる：

- ・ 歩行性能に関して：人間の住環境や屋外公道など実際の環境における安定歩行を可能とする、実環境不整地歩行技術の構築
- ・ 積載性能に関して：搭乗者の運動に起因する外乱下での安定歩行を可能とする、搭乗者外乱補償技術の構築

また、第 3 の流れとして、実用化に向けた一連の問題領域があると考えている。具体的には以下のような課題について今後研究してゆく必要があると思われる：

- ・ 搭乗型 2 足歩行ロボットの操縦法
- ・ 搭乗型 2 足歩行ロボットの転倒回避・安全技術の構築

最後に、本研究の最も重要な応用分野である：

- ・ 福祉機器への応用に関する研究

に関しても注意深く検討すべき問題は多い。

以上の問題領域について以下にその展望を述べる。

7.2.1 実環境不整地歩行技術の構築

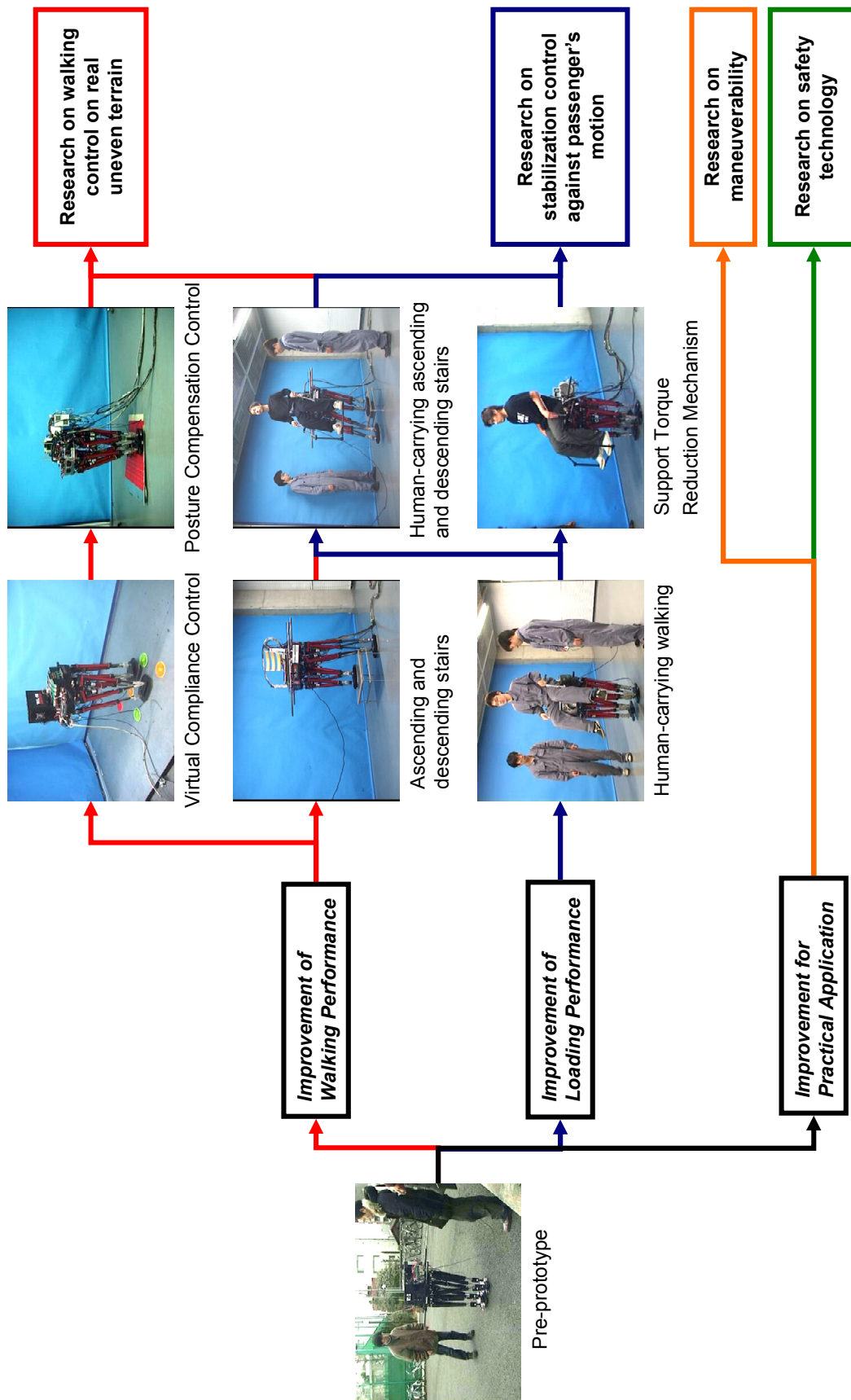


Figure 7.2 Previous and future steps towards biped walking vehicle.

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が、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、加速度偏差の急激な成長をセンシングし、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[131, 132]. 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が、人間を乗せて歩行する場合のように正確なモデル化が困難なロボットでは適用が難しい. これらに対しロボットの運動が路面形状の影響を受ける以前に路面に対する適応動作を開始する手法もあるが、いずれも路面を検知するセンサや機構の搭載が必要であった[139, 140].

人間搭乗型 2 足歩行ロボットには、遊脚が大きな床反力を発生し ZMP や姿勢角の偏差や加速度が発生する以前に、路面形状へのならい動作を完了することができるような制御法が必要であると考えている. これはコンプライアンス制御によって着地路面の形状検出とならい動作を行うような制御が有望と考え、筆者はすでに研究を開始している. この手法はまた第 6 章で述べたけあげ高さにばらつきのある階段においても有効であり、これにより路面の凹凸、傾斜、階段における統一的踏破手法として統合することが可能と考えている.

着地路面の検知には仮想コンプライアンス制御を用いることが有用だと思われるが、人間搭乗型 2 足歩行ロボットでは積載物や搭乗者の重量、歩行周期や歩幅によって固有振動数や発生する着地衝撃が変化することも考えられる. この際には積載物や搭乗者のパラメータ、歩幅や歩行周期などの歩行パラメータによって良好な結果をもたらすコンプライアンス係数が変化することもありうると思われ、その絞込みが困難となる. 第 5 章においては脚位置に応じて係数を変化させる手法を提案したがこれとて一例に過ぎず、GA や NN などと何らかの評価関数を用いて歩行中に自律的に係数を調整する手法を検討すべきと考える.

一方、平板からなる足底板では安定に支持多角形を確保できない路面が存在することがわかっており、ここにおいて安定に支持多角形を形成する足部機構の開発も必要であると考え、これに関してもすでに研究を開始している.

また、このように不整地歩行に関する研究を進める上では、いかに不整地における歩きにくさを評価するか、という問題もある. 「歩きにくさの定量化」に関する研究も必要であると考えられる. 不整地における静的安定性に関しては広瀬らの研究例があるが[141], 2 足動歩行に関する研究例は確認していない. 現段階では確たるアイデアは無いが、ロボットの足部が安定に接地した場合の足部の絶対角や両足部基準点の相対高さなどを足部の大きさで無次元化するなどが必要であろう.

重要なことは、実用化を目指した研究であれば、実際に存在する人間の住環境や屋

外の公道などにおいて評価し改良する実験的研究のスタンスをとるべきということと考える。筆者は2004年、2005年と福岡県および福岡市の「ロボット開発・実証実験特区」において横断歩道をはじめとする一般公道や福岡城址内の石畳など実環境における不整地における歩行実験を長期間行う機会を得た[142]が、その際にこのことを痛感した。本論文執筆時においては内外の研究機関はその2足歩行ロボットの歩行実験を実験室内において行っている場合がほとんどのようだが、筆者は、実験的研究によってのみ、実環境不整地歩行技術の構築が可能になると考える。

7.2.2 搭乗者外乱補償技術の構築

第3章で述べたように、搭乗者の力学モデルは刻一刻と変化し、またその運動は歩行系全体に影響するのが当然であるから、これら搭乗者の力学モデルをある程度推定してフィードバック的（もちろんフィードフォワード的に用いることも考えられる）に用いる制御法の開発が必要と考えられ、筆者はこれについてすでに研究を開始している。

また、未知外乱に対する補償制御の先行研究は数多くあり[131, 143]、ロボットに搭乗したものの運動による外乱に対してもある程度有効と思われる。しかしながら外乱補償運動に関しても積載物や搭乗者のダイナミクスが再度搭乗型ロボットの系全体に影響を及ぼすことになるので、その点に関しては操作量の算出に搭乗者の力学モデルを考慮することが必要であろう。ただし搭乗者がロボットの運動に対しどうふるまうかをモデル化するのには力学的特性のみで十分かどうかはいまだ不明であり、場合によっては何らかの生体的反射モデルまで考慮することも有効となる可能性がある。

2足歩行型車いすとして福祉分野への応用を考えた場合にも、搭乗者外乱の問題は重要である。単純に下肢運動機能が減退した高齢者と不随意運動がある運動機能障害を同一で論じることはできず、極端な例ではたとえば体幹や上肢に痙性等の不随意運動がある場合（本研究で提案する2足歩行車いすがこういった障害者に適しているかの議論も必要だが）、こういった運動を積極的に外乱として捕らえる必要性もあると思われる。

いずれにせよ、人間搭乗型2足歩行ロボットに関する研究例は、（筆者が研究を始めてから本論文執筆時までには散見されるようになったが）いまだ圧倒的に少なく、特に本研究で提案するように積載重量比の高い、すなわちロボット本体が搭乗者の体重に比して軽いロボットでは搭乗者の運動がロボットに与える影響は非常に大きく、今後大きな問題領域となる可能性を秘めていると考える。

7.2.3 搭乗型2足歩行ロボットの操縦法に関する研究

2足歩行ロボットをいかに操縦するべきかという問題は、2足ヒューマノイド・ロボットの分野では最近になってよく研究されるようになった[144-146].

しかしながら人間が搭乗する2足歩行ロボットの操縦, 操作性に関する研究は見当たらない. 歩行ロボットは路面において着地点を選択できるという大きなメリットがあり, 第1章で触れたような散らかった部屋での運用などにはこの特性は非常に有用であるが, これをすべて操縦者が指示するのは非常に煩雑である. ましてや福祉機器として高齢者や歩行障害者による利用を考えるのであれば, 電動車いすと同程度の操作性を確保することが必須となるだろう. また現在では電動車いすの操作性に関する研究も散見される[147-151]. これらの分野の研究成果も取り込んだ今後の研究が必要であろう.

7.2.4 搭乗型2足歩行ロボットの転倒回避・安全技術の構築

実用化のためには, いかに安全を確保するかという問題は非常に重要である. 2足ヒューマノイド・ロボットの分野では, いかにダメージを受けることなく転倒し再度立ち上がるかといった問題に関し藤原らが継続して研究を進めている[152, 153]. また最近では緊急停止に関する研究例もある[154, 155].

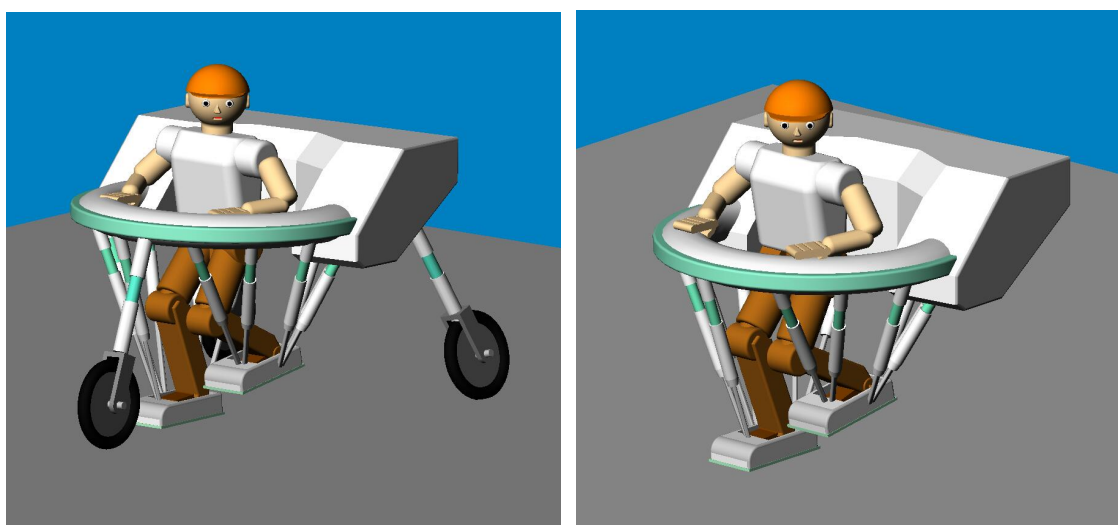
これらに対し搭乗型2足歩行ロボットでは, 搭乗者の安全のためにはなんとしてでも転倒してはならないことになり, これは大変困難な技術課題であるが, 実用化のためには研究すべき課題である.

筆者らもすでに, 緊急時に支持多角形を拡大して転倒を回避する足部機構の提案と試作を開始している.

7.2.5 福祉応用に関する展望

最後に福祉分野への応用に関しての展望について述べておく.

二瓶らの研究[156]によれば, 高齢者が移動支援機器を受け入れる際の印象や抵抗感には個人差があり, また機器使用による移動可能範囲の拡大と身体機能の回復・向上の間にジレンマを感じる場合が多いという. すなわち「外に出かけたいが足が悪いと見られるのがいや」, 「車いすに乗るとほんとうに足が悪くなるような気がする」といった意見が聞かれるとある. ここで対象としているのは高齢者のみであるが, 歩行障害者に関しても程度は異なれ同様の心理的負担があるものと考えられる.



(a): Wheeled type.

(b): Biped type.

Figure 7.3 Examples of robotic mobility aid.

本研究で提案する2足歩行型車いすは従来の電動車いすに比べより広い行動範囲を提供することを狙ったものであるが、やはり高齢者や歩行障害者はこれを受け入れる際に心理的負担を感じるようになると思われる。

本研究で提案したロボットはあくまで上部に人間が搭乗し歩行するものであり、搭乗者は受動的に座ってさえいれば移動できるものを目指しているが、利用者にとっては、二瓶らの移動支援機器[157]や山海らの外骨格型パワーアシストシステム[158]などのように、移動支援機能とリハビリテーション機能を備え持つ機器が有益である場合もある。すなわち、本研究で提案する2足歩行型車いすは全ての高齢者や歩行障害者に対し有益なものでは必ずしもないのである。ロボット技術で人間の生活をサポートする、という命題の解が、人間の身体機能をロボットで置き換えることだけではないということのをわれわれロボット工学者は理解しなくてはならない。

これに対し、たとえば本研究で開発した技術を用い、歩行時の負荷軽減と移動支援、リハビリテーション機能に加えバランス維持のアシストまで行う図7.3(a)のような移動支援機器や、さらに図7.3(b)のようなこの2足歩行型のものなどの可能性が検討できるのではないかと考えている。ただしこれとて見た目には相当大掛かりなものに見える可能性があり、二瓶らの指摘するジレンマによれば利用者の支持を得られるかどうかは疑わしい。いずれにせよ福祉ロボティクスにおいては利用者のニーズを的確に把握する必要があることを理解しなければ、本研究で提案する2足歩行型車いすを実用に供することはかなわないと認識している。

7.2.8 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、2足歩行型車いすの実用化がなれば、超高齢社会を迎える我が国における高齢者・障害者の高質な生活を支え、共に社会を支える重要な一員として活躍してもらうための重要な技術となることは間違いなく、人とロボット技術、社会の将来に大きく貢献するものであると考える。

参 考 文 献

第 1 章

- [1] 内閣府, 平成 14 年版高齢社会白書, 2002.
- [2] 厚生労働省社会・援護局障害保険福祉部企画課, 身体障害児・者実態調査結果の概要, (平成 13 年 6 月 1 日調査), 2002.
- [3] Rory A. Cooper 著, 田中理, 大鍋寿一監訳, 車いすのヒューマンデザイン, 医学書院, 2000.
- [4] チャールズ・シンガー他編, 技術の歴史, 第 1 巻, 筑摩書房, 1978.
- [5] 国土交通省, 交通バリアフリー法ホームページ, <http://www.mlit.go.jp/crd/city/bf/>, 2000.
- [6] 石松隆和, 茂地徹, 扇谷保彦, 杉山和一, 斜面市街地の移動手段の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 4, pp. 374-377, 2003.
- [7] U. S. Army, Logistical vehicle off-road mobility (Project TCCO 62-5), U. S. Army Transportation Combat Developments Agency, 1967.
- [8] 広瀬茂男, 梅谷陽二, 歩行機械の脚形態と移動特性, バイオメカニズム 5, pp. 242-250, 1980.
- [9] 藤江正克, 極限作業における 4 足歩行ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 366-371, 1993.
- [10] 山口仁一, 井上貞敏, 西野大助, 玄相昊, 高西淳夫, 視聴覚情報取得機構を有する人間形 2 足 2 腕ロボットの全体設計, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 723-724, 1996
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 杉原知道, 中村仁彦, 高機動性獲得に向けた運動制御実験のための小型ヒューマノイドの開発, 日本ロボット学会第 21 回学術講演会予稿集, 2A24, 2003.

- [15] 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
- [16] 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
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] トヨタ自動車株式会社, <http://www.toyota.co.jp/jp/special/robot/>, 2004.
- [21] 菅野重樹, 渋谷恒司, 非言語コミュニケーションのための人間型ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 975-978, 1997
- [22] 小菅一弘, 須田理央, 風村典秀, 佐藤学, 角谷啓, 人と双腕型移動ロボット “MR Helper” による物体の協調搬送, 日本機械学会論文集, C 編, 69 巻, 685 号, pp. 84-90, 2003.
- [23] 川内直人, 古結義浩, 長島是, 大西献, 日浦亮太, ホームユースロボット “wakamaru”, 三菱重工技報, Vol. 40, No. 5, pp. 270-273, 2003.
- [24] 塘中哲也, 古結義浩, 日浦亮太, 杉本喜一, 大西献, ホームユースロボット wakamaru の環境認識技術, 三菱重工技報, Vol. 42, No. 1, pp. 40-41, 2005.
- [25] 株式会社テムザック, <http://www.tmsuk.co.jp/artemis/>, 2004.
- [26] 松熊研司, 半田博幸, 横山和彦, 画像認識・把持機能を有する自律移動ロボット SmartPal の開発, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3D28, 2004.
- [27] 山高大乗, 空閑融, 柳瀬正和, 多田野宏之, 古川正信, 大塚英史, 器用な手を持ったロボットの開発, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3L12, 2004.
- [28] Muhamad Aizuddin, 三輪洋靖, 伊藤加寿子, 松本宗道, 今西一剛, 忽滑谷裕子, Massimiliano Zecca, Stefano Roccella, Maria Chiara Carozza, Paolo Dario, 高信英明, 高西淳夫, 情動表出ヒューマノイドロボット WE-4RII の開発ーヒューマノイドロボットハンド RCH-1 の統合ー, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会

- 予稿集, 3L13, 2004.
- [29] K. Chida, I. Okuma, S. Isoda, Y. Saisu, K. Wakamatsu, K. Nishikawa, J. Solis, H. Takanobu and A. Takanishi, Development of a New Anthropomorphic Flutist Robot WF-4, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 152-157, 2004.
- [30] 細田祐司, 柄川索, 玉本淳一, 山本健次郎, 中村亮介, 戸上真人, 人間共生ロボット“EMIEW”の開発ー開発コンセプトと全体システムー, 第23回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1I16, 2005.
- [31] 加藤一郎, 二足歩行ロボットーその歴史と課題ー, 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 164-166, 1983.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 加藤高明, 高西淳夫, 石川浩, 加藤一郎, 2足歩行機械システムの研究, バイオメカニズム 6, 東京大学出版会, pp. 252-260, 1982.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki and I. Kato, The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD, Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics, pp. 459-466, 1985.
- [39] 高西淳夫, 江草洋, 枳沢守, 武谷知明, 加藤一郎, 上体補償型2足歩行制御方式, 第26回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 505-506, 1987.
- [40] 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-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp. 68-79, 1988.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Y. Ogura, H. O. Lim and A. Takanishi, Stretch Walking Pattern Generation for a Biped Humanoid Robot, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, 2003.
- [52] 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, 2004.

- [53] Y. Ogura, T. Kataoka, K. Shimomura, H. O. Lim and A. Takanishi, A Novel Method of Biped Walking Pattern Generation with Predetermined Knee Joint Motion, Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004.
- [54] 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, 2005.
- [55] R. S. Mosher, Test and evaluation of a versatile walking truck, Proceedings of the Off-Road Mobility Research Symposium, International Society for Terrain Vehicle Systems, pp. 359-379, 1968.
- [56] R. S. Mosher, Exploring the potential of a quadruped, SAE Paper No. 960191, International Automotive Engineering Conference, 1969.
- [57] Miomir Vukobratovic 著, 加藤一郎, 山下忠訳, 歩行ロボットと人の足, pp. 247, 日刊工業新聞社, 1975.
- [58] W. R. Corliss and E. G. Johnson, Teleoperator Controls, NASA SP-5070, 1968.
- [59] I. E. Sutherland and M. K. Ullner, Footprints in the Asphalt, The International Journal of Robotics Research, Vol. 3, No. 2, pp. 29-36, 1984.
- [60] 小谷内範穂, 多足歩行ロボットの世界, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 379-384, 1993.
- [61] K. J. Waldron, V. J. Vohnout, A. Pery and R. B. McGhee, Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle, The International Journal of Robotics Research, Vol. 3, No. 2, pp. 37-48, 1984.
- [62] K. J. Waldron and R. B. McGhee, The Adaptive Suspension Vehicle, IEEE Control Systems Magazine, 6, pp. 7-12, 1986.
- [63] D. R. Pugh, E. A. Ribble, V. J. Vohnout, T. E. Bihari, T. M. Walliser, M. R. Patterson and K. J. Waldron, Technical Description of the Adaptive Suspension Vehicle, The International Journal of Robotics Research, Vol. 9, No. 2, pp. 24-42, 1990.
- [64] 鎌田徹, 実用的な人間型機械「マイエージェント」(第1報) —ユーザ搭載型下肢エージェントの開発—, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 315-316, 1994.
- [65] 鎌田徹, 人間動作を代行するパーソナルシステム“マイエージェント” —ユーザ搭載型下肢エージェントの開発—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp. 1107-1112, 1994.
- [66] 鎌田徹, ユーザの運動を代行するパーソナルシステム“マイエージェント”,

- 第 12 回ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 915-916, 1994.
- [67] 鎌田徹, ユーザの運動意思を実現するパーソナルアシスタント “マイエージェント”, 計測と制御, 第 34 巻, 第 4 号, pp. 299-302, 1995.
- [68] 南方英明, 堀洋一, Biped Bike に関する研究—矢状面運動の解析と制御—, 電気学会論文集 (D 編), 117 巻, 9 号, pp. 1057-1062, 1997.
- [69] 西川直樹, 村上俊之, 大西公平, 未知重量物体を積載する 2 足歩行ロボットの安定歩行制御, 電気学会産業計測制御研究会資料, IIC-97-44, 1997.
- [70] 川淵一郎, 武田行生, 舟橋宏明, 遊脚足部の着地時刻の早まり／遅れ情報に基づく歩行機械の対地適応機構の研究 (第 1 報, 適応アルゴリズムの提案と脚機構の構成), 日本機械学会論文集, C 編, 65 巻, 630 号, pp. 850-855, 1999.
- [71] 樋口勝, 武田行生, 舟橋宏明, 松下知己, 遊脚足部の着地時刻の早まり／遅れ情報に基づく歩行機械の対地適応機構の研究 (第 2 報, 対地適応機構を有する歩行機械の動特性), 日本機械学会論文集, C 編, 69 巻, 679 号, pp. 788-795, 2003.
- [72] 樋口勝, 川淵一郎, 舟橋宏明, 武田行生, 歩行ロボットの軽量化を目的とした脚剛性最適化, 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, 1P2-42-061, 1999.
- [73] 樋口勝, 舟橋宏明, 武田行生, 山田貴詩, 沖善成, 塚田雅士, 歩行椅子の開発 (基本構成とパワーアシスト駆動系の基礎的研究), 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集 (III), F-0438, 2001.
- [74] 清水和紀, 村井勉, 沖善成, 舟橋宏明, 武田行生, 樋口勝, 歩行椅子の開発 (軽量化プロトタイプ的设计・製作), 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集 (III), F-0439, 2001.
- [75] 樋口勝, 武田行生, 舟橋宏明, 山田貴詩, 松本貴宏, 歩行椅子用パワーアシスト駆動系の開発 (定常歩行に対するパワーアシスト駆動系の基礎的研究), 日本機械学会論文集, C 編, 69 巻, 683 号, pp. 1885-1891, 2003.
- [76] Y. Wu, M. Higuchi and Y. Takeda, Development of a Power Assisting System of a Walking Chair, Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3207-3212, 2004.
- [77] 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.
- [78] トヨタ自動車株式会社, http://www.toyota.co.jp/jp/news/04/Mar/nt04_0307.html, 2004.
- [79] トヨタ自動車株式会社, http://www.toyota.co.jp/jp/news/04/Dec/nt04_1201c.html,

- 2004.
- [80] Machine Control Laboratory, Korea Advanced Institute of Science and Technology, http://ohzlab.kaist.ac.kr/robot/fx_spec.html, 2006.
- [81] Independence Technology L. L. C., <http://www.independencenow.com/ibot/index.html>, 2003.
- [82] 菅原雄介, 細畠拓也, 御厨裕, 砂塚裕之, 林憲玉, 高西淳夫, 汎用2足ロコモータの人間搭乗歩行の実現, 第9回ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp. 96-101, 2004.
- [83] 早稲田大学, <http://www.waseda.jp/jp/pr05/050429.html>, 2005.
- [84] 株式会社テムザック, http://www.tmsuk.co.jp/admin_tools/data/050429_1.pdf, 2005.
- [85] 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, August, 2005.

第2章

- [86] 舟橋宏明, ロボット機構としてのパラレルメカニズム, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 6, pp. 699-704, 1992.
- [87] 内山勝, パラレルマニピュレータの機構と特性, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 6, pp. 715-720, 1992.
- [88] 広瀬茂男, 米田完, 荒井和彦, 井辺智吉, 直動脚4足歩行機械 TITAN VI の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 4, pp. 445-452, 1991.
- [89] A. Arakawa, T. Emura, M. Hiraki and L. Wang, Control of a Quadruped Robot using Double Crank-Slider Mechanism, IEEE International Conference on SMC, pp. 157, 1994.
- [90] 平木雅彦, 江村超, 荒川章, 千田陽介, 歩行ロボットの関節に用いる並列クラークスライダ機構 (第1報, 機構の運動学的解析), 日本機械学会論文集, C編, 61巻, 587号, pp. 3045-3050, 1995.
- [91] 広瀬茂男, 本間一哉, 松沢茂美, 早川慎一, パラレルリンク歩行ロボットの提案と基本的歩行実験, 第6回知能移動ロボットシンポジウム, pp. 7-14, 1992.
- [92] 太田祐介, 稲垣淑彦, 米田完, 広瀬茂男, 出力均一性の高いパラレルメカニズムを利用した省自由度歩行ロボットの研究, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 66-74, 2000.
- [93] H. Funabashi, K. Ogawa, Y. Gotoh and F. Kojima, Synthesis of Leg-Mechanisms of

- Biped Walking Machines (Part I, Synthesis of Ankle-Path-Generator), Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 237, pp. 537-543, 1985.
- [94] H. Funabashi, K. Ogawa, I. Honda and N. Iwatsuki, Synthesis of Leg-Mechanisms of Biped Walking Machines (Part II, Synthesis of Foot-Driving Mechanism), Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 237, pp. 544-549, 1985.
- [95] 武田行生, 舟橋宏明, 2足歩行機械の傾斜面および階段歩行時の脚機構の運動, 日本機械学会第69期全国大会講演会講演論文集, Vol. C, pp. 624-631, 1985.
- [96] 岩附, 舟橋, 2足歩行機械の非定常歩行(第1報, 脚機構の運動), 日本機械学会論文集, C編, 52巻, 484号, pp. 3339-3345, 1986.
- [97] 武田行生, 歩行ロボットにおけるパラレルメカニズム, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 6, pp. 745-750, 1992.
- [98] 広瀬茂男, 小林基也, 米田完, 太田祐介, 平田雅一, パラレルメカニズムを用いた動的歩行体の開発, 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 197-198, 1998.
- [99] 滝田謙介, 程島竜一, 広瀬茂男, 恐竜型2足歩行ロボット TITRUS の開発(第2報: TITRUS-II の機構設計と基本歩行実験), 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, 2P2-84-129, 2000.
- [100] 滝田謙介, 片山俊郎, 広瀬茂男, 恐竜型2足歩行ロボット TITRUS の開発(第3報: 小型実験機 CO-TITRUS の機構設計と基本概念), 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1451-1452, 2000.
- [101] K. Takita, R. Hodoshima and S. Hirose, Fundamental Mechanism of Dinosaur-like Robot TITRUS-II Utilizing Coupled Drive, Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1670-1675, 2000.
- [102] 片山俊郎, 滝田謙介, 広瀬茂男, 恐竜型2足歩行ロボット TITRUS の開発(第4報: 小型実験機 CO-TITRUS の機構設計とその制御), 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, 1A1-A5, 2001.
- [103] 片山俊郎, 滝田謙介, 広瀬茂男, 恐竜型2足歩行ロボット TITRUS の開発(第5報: 小型実験機 TITRUS-III における首・尻尾運動制御), 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 679-680, 2001.
- [104] D. Stewart, A Platform with Six Degrees of Freedom, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 180, Part 1, No. 15, pp. 371-386, 1966.
- [105] 内海真, 加藤隆, 山川新二, 内骨格式2足歩行ロボットの機構開発, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 189-190, 1996.
- [106] 内海真, 加藤隆, 山川新二, 内骨格式2足歩行ロボットの姿勢制御, 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, 2CIII1-3, 1998,
- [107] 内海真, 加藤隆, 山川新二, 内骨格式2足歩行ロボットの機構開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 4, pp. 491-498, 1998.
- [108] 内海真, 加藤隆, 山川新二, 内骨格式2足歩行ロボットの制御アルゴリズム, 日本機械学会論文集, C編, 65巻, 631号, pp. 1029-1036, 1999.
- [109] 西脇光一, 加賀美聡, 國吉康夫, 稲葉雅幸, 井上博允, 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.
- [110] 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.
- [111] 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度生成ー感覚行動統合全身型ヒューマノイドH6での実現ー, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 721-722, 2000.
- [112] 梶田秀司, 金広文男, 横井一仁, 比留川博久, モーメンタム・コントロール: 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, 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集, 1D15, 2002.
- [113] 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.
- [114] 梶田秀司, 金広文男, 比留川博久, 予見制御理論を応用した2足歩行パターン生成, 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集, 1D23, 2002.
- [115] 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.
- [116] 高西淳夫, 上体の運動によりモーメントを補償する2足歩行ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 348-353, 1993.
- [117] J. Yamaguchi, A. Takanishi and I. Kato, Development of Biped Walking Robot Compensating for Three-Axis Moment by Trunk Motion, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 561-566, 1993.
- [118] 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.
- [119] 菅原雄介, 金島義治, 安藤俊平, 佐藤基広, 林憲玉, 高西淳夫, 2 足ヒューマノイドロボットの準リアルタイムパターン生成に関する研究, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 987-988, 2001.
- [120] M. Vucobratovic and J. Stepanenko, On the Stability of Anthropomorphic Systems, *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, pp. 1-37, 1972.
- [121] 梶田秀司編著, ヒューマノイドロボット, オーム社, 2005.
- [122] 河合素直, 制御工学—基礎と例題—, 昭晃堂, 1983.

第 3 章

- [123] 平林久明, 杉本浩一, 荒井信一, 坂上志之, 多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 343-350, 1986.
- [124] 空尾謙嗣, 村上俊之, 大西公平, インピーダンス制御による 2 足歩行ロボットの歩行制御, 電気学会論文集, D 編, 117 巻, 10 号, pp. 1227-1233, 1997.
- [125] 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.
- [126] J. H. Park, Impedance Control for Biped Robot Locomotion, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, pp. 870-882, 2001.
- [127] 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.

第 4 章

- [128] 石井智之, 葉石敦生, 広瀬茂男, ワイヤ張力による自重補償機構を備えた Float Arm の性能評価, 第 8 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 216-221, 2003.
- [129] T. Morita, F. Kuribara, Y. Shiozawa and S. Sugano, A Novel Mechanism Design for Gravity Compensation in Three Dimensional Space, *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 163-168, 2003.
- [130] 森田寿郎, 栗原史好, 塩澤裕樹, 菅野重樹, 機械的自重補償装置, 特開 2003-181789, 2003.

第5章

- [131] 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, 日本ロボット学会第17回学術講演会予稿集, 3M13, 1999.
- [132] 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.

第6章

- [133] 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.
- [134] 西脇光一, 村上好文, 杉原知道, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允, つま先自由度を利用した人間型ロボットの歩行・全身運動能力拡大, 第6回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 113-118, 2001.
- [135] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue, Toe Joints that Enhance Bipedal and Fullbody Motion of Humanoid Robots, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3105-3110, 2002.
- [136] 原田研介, 比留川博久, 金広文男, 藤原清司, 金子健二, 梶田秀司, 中村優, 把握を利用したヒューマノイドロボットのバランス維持, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2P2-H-74, 2004.
- [137] K. Harada, H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, S. Kajita and M. Nakamura, Dynamical Balance of a Humanoid Robot Grasping an Environment, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1167-1173, 2004.
- [138] 日本ロボット学会編, 新版ロボット工学ハンドブック, コロナ社, 2005.

第7章

- [139] 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.
- [140] 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.

- [141] 広瀬茂男, 塚越秀行, 米田完, 不整地における歩行機械の静的安定性評価基準, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 8, pp. 1076-1082, 1998.
- [142] 菅原雄介, 橋本健二, 砂塚裕之, 川瀬正幹, 太田章博, 田中智明, 林憲玉, 高西淳夫, 福岡市ロボット開発・実証実験特区における2足歩行ロボットの公道歩行実験について, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005, 1P1-S-040, 2005.
- [143] 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.
- [144] Neo Ee Sian, 横井一仁, 梶田秀司, 谷江和雄, ヒューマノイドロボットの全身遠隔操作—足の遠隔操作手法—, 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3A11, 2003.
- [145] T. Nishiyama, H. Hoshino, K. Sawada, Y. Tokunaga, H. Shinomiya, M. Yoneda, I. Takeuchi, Y. Ichige, S. Hattori and A. Takanishi, Development of User Interface for Humanoid Service Robot System, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2979-2984, 2003.
- [146] 御船文里, 中嶋勝己, 小林政巳, 鷹取正夫, 蓮沼仁志, 森山尚, 家中良太, 自律・遠隔ハイブリッド型ヒューマノイドロボット操作システムの開発(第一報), 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3A12, 2003.
- [147] Cedric K. H. Law, Martin Y. Y. Leung, Y. Xu and S. K. Tso, A Cap as Interface for Wheelchair Control, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1439-1444, 2002.
- [148] J. W. Min, K. Lee, S. C. Lim and D. S. Kwon, Human-Friendly Interfaces of Wheelchair Robotic System for Handicapped Persons, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1505-1510, 2002.
- [149] 松永和之, 田中一男, 電動車椅子の脳動制御, 日本ロボット学会第21回学術講演会予稿集, 1I27, 2003.
- [150] 宍戸浩司, Urbano Juan, 北川秀夫, 三好孝典, 寺嶋一彦, 全方向移動型車椅子における操作支援システム, 日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集, 1I11, 2004.
- [151] 池山智之, 松本吉央, 小笠原司, 着席面の圧力分布を用いた車いすの操縦インタフェース, 日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集, 3D11, 2004.
- [152] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoi, H. Saito, K. Harada, K. Kaneko and H. Hirukawa, The First Human-Size Humanoid that can Fall Over Safely and Stand-up

- Again, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1920-1926, 2003.
- [153] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita and H. Hirukawa, Safe Knee Landing of a Human-size Humanoid Robot while Falling Forward, Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 503-508, 2004.
- [154] M. Morisawa, S. Kajita, K. Harada, K. Fujiwara, F. Kanehiro, K. Kaneko and H. Hirukawa, Emergency Stop Algorithm for Walking Humanoid Robots, Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 31-37, 2005.
- [155] 金子健二, 金広文男, 森澤光晴, 梶田秀司, 藤原清司, 原田研介, 比留川博久, ヒューマノイドのための動作一時停止システム, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2F21, 2005.
- [156] 二瓶美里, 井上剛伸, 藤江正克, 八巻知香子, 渡辺敏恵, 高齢者を対象とした移動機器の開発コンセプト (障害受容と福祉機器使用におけるジレンマの発生), 日本機械学会福祉工学シンポジウム 2004 講演論文集, pp. 201-204, 2004.
- [157] 二瓶美里, 金重裕三, 藤江正克, 井上剛伸, 歩行速度を増幅する移動支援機器の開発ー高齢者のジレンマ解消の解としてー, 第 19 回バイオメカニズムシンポジウム予稿集, pp. 173-182, 2005.
- [158] 山海嘉之, 川村祐一郎, 岡村純平, 李秀雄, 筋電位を用いた歩行支援のための外骨格パワーアシストシステム HAL-1 に関する研究, 日本機械学会茨城講演会論文集, pp. 269-270, 2000.

謝 辞

本研究を進めるにあたり，多大な御指導と御教示を賜りました早稲田大学理工学部高西淳夫教授に，深く感謝し心より御礼申し上げます．学部三年から現在に至るまで七年間，研究活動だけでなくあらゆる面において，温かく熱心な御指導を賜りましたこと，重ねて御礼申し上げます．そして本論文を纏めるにあたり，貴重な御時間を割いて頂いた上適切な御指導，御意見を賜りました早稲田大学理工学部梅津光生教授，藤江正克教授，人間科学部藤本浩志教授に，深く感謝し心より御礼申し上げます．

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纏めたものであり，機械工学，ロボット工学，福祉工学の各分野の先生方から数え切れないほどの御助言を頂きました．とりわけ，機械工学的観点から適切な御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，特に熱心なご指導を賜りました神奈川大学工学部林憲玉助教授に深い感謝の意を表します．又，福祉工学・リハビリテーション工学的観点から適切な御助言を頂きました国立身体障害者リハビリテーションセンターの高嶋孝倫先生と藤江正克研究室在籍の研究者の皆様に深い感謝の意を表します．更に，一ヶ月間御世話になり終日実り多い議論をさせて頂きました *Università degli Studi di Cassino* の Marco Ceccarelli 教授と Giuseppe Carbone 講師を始め *Laboratorio di Robotica e Meccatronica* の皆様に感謝の意を表します．

そして，本研究を共に遂行し，また文字通り寝食を共にして2足歩行車いすの夢を共に追った，高西淳夫研究室2足ロコモータ班の圓戸辰郎氏（平成十四年修士課程卒，現東京大学大学院博士後期課程三年在学），細島拓也氏（平成十六年修士課程卒，現住友重機械工業株式会社勤務），御厨裕氏（平成十六年修士課程卒，現日産自動車株式会社勤務），砂塚裕之氏（平成十七年修士課程卒，現株式会社リクルート勤務），川瀬正幹氏（現修士課程二年在学），橋本健二氏（現修士課程二年在学），太田章博氏（現修士課程一年在学），田中智明氏（現修士課程一年在学），遠藤信綱氏（現理工学部四年在学），沢戸瑛昌氏（現理工学部四年在学），林昭宏氏（現理工学部四年在学）に，心より感謝いたします．

また，本研究に際し多大な御協力を頂きました株式会社テムザックの皆様，福岡市役所の皆様，福岡県庁の皆様，財団法人福岡県産業・科学技術振興財団の皆様，ロボスクエアの皆様，三洋電機株式会社ソフトエナジーカンパニー様，ネオリウム・テクノロジー株式会社様，ソリッドワークス・ジャパン株式会社様，株式会社コスモスジャパン様に深い感謝の意を表します．本研究に際しご協力頂きましたヒーハリスト精

工株式会社様，特殊電装株式会社様，ニッタ株式会社様，有限会社エフテック様，御取引をさせて頂きました株式会社羽野製作所様，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，株式会社アスク様，高千穂交易株式会社様，株式会社三好キカイ様，ケーエスエス株式会社様，マクソンジャパン株式会社様に感謝いたします。

さらに，これまで七年の間色々御迷惑を御掛けした研究室秘書の太田久子女史，苦楽を共にし御指導頂きました高西研究室の諸先輩方，仲良くして頂いた同輩，陰日向無く支えて頂いた後輩方に感謝致します。また同時に博士論文を提出することになり色々御迷惑を御掛けした高西研究室の小椋優氏と藤江研究室の岡本淳氏に感謝いたします。

そして，学会等で御会いた折に議論に御付合い頂き御意見を頂きました全ての研究者の皆様，関係者の皆様に感謝致します。

最後に，筆者の研究活動を，理解し難いながらも理解し常に応援し支えてくれた，両親と家族，全ての友人達に心より感謝致します。

平成十八年三月八日

常陸小田城にて

筆者しるす

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				
○	Towards the Biped Walking Wheelchair	2006年2月	Proceedings of the first IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics	菅原雄介 橋本健二 砂塚裕之 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫
○	Walking Up and Down Stairs Carrying a Human by a Biped Locomotor with Parallel Mechanism	2005年8月	Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	菅原雄介 太田章博 橋本健二 砂塚裕之 川瀬正幹 田中智明 林憲玉 高西淳夫
○	Walking Control Method of Biped Locomotors on Inclined Plane	2005年4月	Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation	菅原雄介 御厨裕 橋本健二 細島拓也 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
○	Support Torque Reduction Mechanism for Biped Locomotor with Parallel Mechanism	2004年10月	Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	菅原雄介 御厨裕 細島拓也 砂塚裕之 川瀬正幹 橋本健二 林憲玉 高西淳夫
○	WL-15: Prototype of a Multi-purpose Biped Locomotor with Parallel Mechanism	2004年6月	Proceedings of the 15th CISM-IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY2004)	菅原雄介 圓戸辰郎 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫

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 の続き	○ Realization of Dynamic Human-Carrying Walking by a Biped Locomotor	2004年4月	Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation	菅原雄介 細島拓也 御厨裕 砂塚裕之 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)	2004年3月	日本機械学会論文集, 70-691, C編	菅原雄介 圓戸辰郎 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫
	○ Realization of Stable Dynamic Walking by a Parallel Bipedal Locomotor on Uneven Terrain Using a Virtual Compliance Control	2003年10月	Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	菅原雄介 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫
	○ Control and Experiments of a Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism	2003年9月	Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation	菅原雄介 圓戸辰郎 林憲玉 高西淳夫
	○ Design of a Battery-powered Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism	2002年10月	Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	菅原雄介 圓戸辰郎 林憲玉 高西淳夫
	Realization of Stable Biped Walking on Public Road with New Biped Foot System Adaptable to Uneven Terrain	2006年2月	Proceedings of the first IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics	橋本健二 菅原雄介 太田章博 砂塚裕之 田中智明 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫

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 の続き	Development of Foot System of Biped Walking Robot Capable of Maintaining Four-point Contact	2005 年 8 月	Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	Realization by Biped Leg-wheeled Robot of Biped Walking and Wheel-driven Locomotion	2005 年 4 月	Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation	橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	Stiffness Performances Estimation for Biped Locomotor WL-15	2003 年 7 月	Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics	Giuseppe Carbone 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫 Marco Ceccarelli
	Development of a Biped Locomotor Applicable to Medical and Welfare Fields	2003 年 7 月	Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics	林憲玉 菅原雄介 高西淳夫
	Interactive Biped Locomotion Based on Visual/Auditory Information	2002 年 9 月	Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication	小椋優 菅原雄介 金島義治 稗田修己 林憲玉 高西淳夫
	Stabilization Walking Control for Human-like Biped Robots	2002 年 7 月	Proceedings of the 2002 CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators	林憲玉 菅原雄介 高西淳夫

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	将来の‘ものづくり戦士’が熱く語る 僕らはヒューマノイドロボット（2足歩行ロボット）実用化へ向け研究・努力を惜しまない！	2005年10月	第2回eものづくりカンファレンス in 中部 2005	<u>菅原雄介</u>
	脚部に平行リンク機構を用いた2足ロコモータの開発（第9報：非線形コンプライアンス制御を用いた着地軌道修正法と不整地歩行の実現）	2005年9月	日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集	橋本健二 <u>菅原雄介</u> 砂塚裕之 田中智明 太田章博 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	脚部に平行リンク機構を用いた2足ロコモータの開発（第8報：スチュワートプラットフォーム型脚機構の1校正手法について）	2005年9月	日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集	橋本健二 田中智明 <u>菅原雄介</u> 砂塚裕之 太田章博 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	脚部に平行リンク機構を用いた2足ロコモータの開発（第7報：人間搭乗階段昇降の実現）	2005年9月	日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集	<u>菅原雄介</u> 太田章博 橋本健二 砂塚裕之 田中智明 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	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2報：保持機構の強化による不整地歩行の実現）	2005年9月	日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集	橋本健二 <u>菅原雄介</u> 太田章博 砂塚裕之 川瀬正幹 田中智明 林憲玉 高西淳夫

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	福岡市ロボット開発・実証実験特区における2足歩行ロボットの公道歩行実験について	2005年6月	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2005	菅原雄介 橋本健二 砂塚裕之 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫
	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	2005年6月	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2005	橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	2足歩行ロボットの移動効率向上を図った車輪式足部機構の開発	2004年9月	日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集	橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第6報:姿勢補償制御を用いた傾斜路面歩行)	2004年9月	日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集	菅原雄介 御厨裕 細島拓也 砂塚裕之 川瀬正幹 橋本健二 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第5報:自重支持トルク低減機構による可搬重量の増加と消費エネルギーの低減)	2004年9月	日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集	菅原雄介 川瀬正幹 御厨裕 細島拓也 砂塚裕之 橋本健二 林憲玉 高西淳夫

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	汎用2足ロコモータの 人間搭乗歩行の実現	2004年3月	第9回ロボティクス・ シンポジウム予稿集	菅原雄介 細島拓也 御厨裕 砂塚裕之 林憲玉 高西淳夫
	ヒトの搬送を目指した 2足移動モジュールの 開発	2003年11月	日本機械学会第3回福 祉工学シンポジウム講 演論文集	菅原雄介 圓戸辰郎 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク 機構を用いた2足ロコ モータの開発(第4報: 高可搬重量化・広可動範 囲化を図った新型ハー ドウェア)	2003年9月	日本ロボット学会第21 回学術講演会予稿集	菅原雄介 細島拓也 御厨裕 砂塚裕之 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク 機構を用いた2足ロコ モータの開発(第3報: 仮想コンプライアンス 制御を用いた不整地歩 行)	2003年9月	日本ロボット学会第21 回学術講演会予稿集	菅原雄介 細島拓也 御厨裕 砂塚裕之 林憲玉 高西淳夫
	汎用2足ロコモータの 開発	2003年3月	第8回ロボティクス・ シンポジウム予稿集	菅原雄介 圓戸辰郎 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク 機構を用いた2足ロコ モータの開発(第2報: 制御方式と歩行実験)	2002年10月	日本ロボット学会創立 20周年記念学術講演会 予稿集	菅原雄介 圓戸辰郎 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫

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	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第1報:ハードウェアの設計・開発)	2002年10月	日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集	菅原雄介 圓戸辰郎 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫
	2足ヒューマノイドロボットと人間とのインタラクションー視覚と音声による追従運動ー	2001年9月	日本ロボット学会第19回学術講演会予稿集	安藤俊平 金島義治 佐藤基広 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫
	2足ヒューマノイドロボットの準リアルタイムパターン生成に関する研究	2001年9月	日本ロボット学会第19回学術講演会予稿集	菅原雄介 金島義治 安藤俊平 佐藤基広 林憲玉 高西淳夫
3. 著書	パートナーロボット資料集成	2005年12月	株式会社エヌ・ティ ー・エス	比留川博久 他41名 (筆者は第 32著者)
4. 特許	基準位置合わせ具及びそれを用いた基準位置合わせ方法	平成17年9月 14日	特願2005-267697	高西淳夫 菅原雄介 砂塚裕之 橋本健二 川瀬正幹 太田章博 田中智明 高本陽一 馬場勝之 井野重秋

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
4. 特許 の続き	歩行パターン作成装置、 2足歩行ロボット装置、 歩行パターン作成方法、 2足歩行ロボット装置 の制御方法、プログラム および記録媒体	平成17年9月 14日	特願 2005-267720	高西淳夫 菅原雄介 砂塚裕之 橋本健二 川瀬正幹 太田章博 田中智明 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	足部安全機構及びそれ を備えた2足歩行ロボ ット並びにその制御構 造	平成17年9月 13日	特願 2005-266064	高西淳夫 田中智明 川瀬正幹 菅原雄介 橋本健二 砂塚裕之 太田章博 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	歩行パターン作成装置、 2足歩行ロボット装置、 歩行パターン作成方法、 2足歩行ロボット装置 の制御方法、プログラム および記録媒体	平成17年4月 27日	特願 2005-130631	高西淳夫 太田章博 砂塚裕之 菅原雄介 田中智明 橋本健二 川瀬正幹 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	歩行パターン作成装置、 2足歩行ロボット装置、 歩行パターン作成方法、 2足歩行ロボット装置 の制御方法、プログラム および記録媒体	平成16年9月 14日	特願 2004-267599	高西淳夫 御厨裕 川瀬正幹 菅原雄介 細島拓也 橋本健二 砂塚裕之 高本陽一 馬場勝之 井野重秋

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
4. 特許 の続き	自重支持装置及びそれを備えた2足歩行ロボット並びにその制御構造	平成16年8月 23日	特願 2004-242929	高西淳夫 川瀬正幹 御厨裕 菅原雄介 細島拓也 橋本健二 砂塚裕之 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	足部走行機構及びそれを備えた2足歩行ロボット	平成16年8月 23日	特願 2004-242725	高西淳夫 細島拓也 橋本健二 菅原雄介 御厨裕 川瀬正幹 砂塚裕之 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	多点接地型足部支持機構及びそれを備えた2足歩行ロボット並びにその制御構造	平成16年7月 30日	特願 2004-224565, PCT/JP2005/013882	高西淳夫 橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 川瀬正幹 砂塚裕之 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	2足歩行型ロボットの動作軌道制御方法	平成13年5月 21日	特願 2001-151562 特開 2002-346957	高西淳夫 林憲玉 金島義治 安藤俊平 佐藤基広 菅原雄介

