

2 足ロボットの用途拡大のための機構設計と実験検証  
(Mechanisms Design and Experimental Verification  
for Expansion of Applications of Biped Robots)

2017 年 1 月

博士（工学）

間宮 祥太郎

豊橋技術科学大学

Date of Submission:

平成 30 年 2 月 26 日

Department 機械工学専攻	Student ID Number 学籍番号	第 041104 号	Supervisors 指導教員	内山 直樹
Applicant's name 氏名	間宮 祥太郎			

Abstract

論文内容の要旨（博士）

Title of Thesis 博士学位論文名	2 足ロボットの用途拡大のための機構設計と実験検証 (Mechanisms Design and Experimental Verification for Expansion of Applications of Biped Robots)
----------------------------	---

(Approx. 800 words)

(要旨 1,200 字程度)

多くの先進国において平均寿命が向上し、また出生率が低下したことにより少子高齢化が進み、これに伴い不足する社会的労働力を補てんする必要がある。人間に代わり作業を行わせるため、人間の生活環境に適した形態を持つ 2 足ロボットが期待されている。2 足ロボットは本質的に不安定系であり、2 実用的な用途の拡大には、歩行の安定化や軟らかい地面や凹凸を有する地面などの様々な不整地への適応が必要である。多くの 2 足ロボットには底が硬く平らな足が用いられており、不整地歩行においては着地時の衝撃および接地の不安定性が問題となる。これらの問題を解決するため、ばね機構を備え地面との接触部を工夫した足およびそれを用いた着地制御法を提案し、有効性を示した。また、それに下記の着地制御法の適用し、不整地への着地実験によってそれらの有効性を検証した。提案する足機構は軟らかい地面での沈み込み、凹凸からの滑落の可能性を小さくするため地面との接触部が平面であるが、接触面を 4 つに分割し移動可能とすることで接触の不安定性を補う。接触面の移動は、面の法線方向への並進移動のため、地面による機構の拘束が起こりにくい。また、各並進機構が備えるバネの変位から足に作用する床反力およびトルクを求められる。整地に対して着地を行った場合の床反力とトルクを計測し、目標値として設定する。不整地への着地において、仮想の整地に対する実際の地面の高さと傾きがあった場合の床反力とトルクを目標値へ近づけるよう足高さと角度を制御することで、整地を想定して着地を行うロボットの姿勢への影響を軽減する。

また、上記課題に対し、人間の生産性向上の面からも検討を行った。作業者の肉体的負担軽減や、下肢機能の低下した高齢者の自立歩行支援を目的としたパワーアシストスーツ(PAS: Power Assist Suit)が注目されている。現在の PAS の問題として、移動効率の低さが挙げられる。各脚関節のアクチュエータは上体自重を支えるために出力の多くを消費し運動に利用できる出力は限られており、エネルギーを効率よく利用できていない。また、構造的に制限が多いためアクチュエータの出力に限界がある。PAS の移動の際のエネルギー効率改善のため、その下肢に注目し、脚歩行の鉛直・水平方向の運動成分に対し、鉛直方向の動作のみ支持する方式を提案した。下肢用 PAS においては自重を支えることが重要であり、鉛直方向に駆動する直動アクチュエータのみを用いることで構造を簡単化できる。また、支持脚時においてのみ自重を補償し、遊脚時にはアクチュエータを駆動しない効率的で簡易な制御方式の応用が可能になる。鉛直方向と水平方向の動作を分離するために、本研究ではパンタグラフ機構の応用し、実験によってその有効性を検証した。

以上の研究より、2 足ロボットの不整地適応性の向上および低自由度の下肢用自重補償機構の構成に関する知見が得られた。

Date of Submission:

平成 30 年 2 月 26 日

Department Mechanical Engineering	Student ID Number 学籍番号 第 041104 号	Supervisors 指導教員 Naoki Uchiyama
Applicant's name 氏名 Shotaro Mamiya		

## Abstract

## 論文内容の要旨 (博士)

Title of Thesis 博士学位 論文名	2 足ロボットの用途拡大のための機構設計と実験検証 (Mechanisms Design and Experimental Verification for Expansion of Applications of Biped Robots)
-----------------------------------	--

(Approx. 800 words)

(要旨 1,200 字程度)

Due to decreasing birthrate and aging population in many developed countries, it is necessary to compensate for the shortage of social workforce. Robotic systems are expected to provide such workforce. In particular, biped robots can be suitable partners of human beings because of not only their appearance but also locomotion ability in human living environment including stairs, steps and uneven terrains. However, current commercially available biped robots are mainly used only for entertainment purpose, and they are seldom used to support human physical activities such as industrial tasks, housework and nursing. The author considers two main reasons for biped robots not to be used in the above area. One reason is that biped locomotion is intrinsically unstable, and its safety in human living environment is difficult to be guaranteed. Another reason is that most biped robots consist of many links and actuators, and hence several problems arise such as difficulty in control system design, heavy weight and increase of production cost. This study presents design of two mechanisms for stable locomotion and lower degrees of freedom.

First, the author presents a design of a foot mechanism with landing control for stable locomotion on rough terrain. Many biped robots have feet whose soles are rigid and flat. Such a foot may not be suitable for biped walking on rough terrain. Hence, a foot structure is required to adapt to an unknown ground surface with unknown geometry and hardness. The proposed foot structure consists of four flat soles with springs that can independently move in the vertical direction and reduce the impact force from the ground. The spring displacement is used to measure the reaction force and torque from the ground. The designed landing controller that feedbacks the measured reaction force and torque achieves stable landing on the ground. The effectiveness of the proposed foot structure is verified by comparative experiments with the other type of foot mechanism on the flat ground, soft ground, and protrusion existing ground.

Second, regarding to the lower degrees of freedom for a biped structure, the author presents a mechanism design for supporting human lower limb motion, which aims at reducing physical burdens of human workers and elderlies. Many wearable assist mechanisms for human motion have actuators with similar configuration of human joints, so sophisticated structures and controllers are generally required. In addition, a larger number of actuators increases the robot weight, which brings lower energy efficiency and higher cost. In order to solve these concerns, this study considers a mechanism design to reduce the required number of actuators. This study proposes a pantograph-based mechanism for supporting human's lower limb motion, by which human locomotion is divided into vertical and horizontal components. The proposed simple structure, which employs only one actuator for each leg, supports only a vertical motion component that is highly affected by human weight. The effectiveness of the proposed structure is verified by experiments with several human wearers by measuring myoelectricity of their legs. Peak values, average values and variance of the measured myoelectricity were compared with/without the proposed mechanism.

Finally, the author summarizes the design and experimental results of the proposed foot mechanism of a walking robot for improving the uneven terrain adaptability and the human upper body weight compensation mechanism with a single degree of freedom for each leg. Their effectiveness and future work for practical implementation are also described.

# 目次

第1章	緒論	3
1.1	研究背景	3
1.2	2足ロボットの安定歩行に関する研究	5
1.3	下肢動作支援装置に関する研究	6
1.4	研究目的と論文構成	7
第2章	関連研究	9
2.1	緒論	9
2.2	安定歩行のための既存の足機構	9
2.3	ばね機構を備えた点接触型足機構	12
2.4	既存の下肢動作支援装置	16
第3章	不整地安定歩行のための足機構と着地制御法	19
3.1	緒論	19
3.2	機構設計	20
3.2.1	バネを有する点接触型足機構	20
3.2.2	提案する足機構	24
3.3	着地制御法と安定性解析	25
3.3.1	制御器設計	26
3.3.2	着地の動特性モデル	27
3.3.3	制御系の安定解析	29
3.3.4	制御性能の解析	32
3.4	実験	35
3.4.1	実験装置	35
3.4.2	実験条件	41
3.4.3	歩行パターン生成	41



3.5	結論 . . . . .	48
第4章	垂直・水平動作の分離による省自由度な下肢動作支援装置	57
4.1	緒論 . . . . .	57
4.2	機構設計 . . . . .	57
4.3	実験 . . . . .	61
4.3.1	椅子からの起立・着席動作実験 . . . . .	63
4.3.2	階段昇降実験 . . . . .	69
4.4	結論 . . . . .	74
第5章	結論と今後の展望	77
5.1	結論 . . . . .	77
5.2	今後の展望 . . . . .	78
	謝辞	80
	参考文献	83

# 第 1 章

## 緒論

### 1.1 研究背景

多くの先進国において平均寿命が向上し、また、出生率が低下したことにより少子高齢化が進み、高齢化社会・高齢社会が問題となっている。総務省の予想では、2050 年に多くの先進国における老年人口（65 歳以上）が総人口に占める割合が 20 % を超えるとされている [1]。我が国では殊更この傾向が顕著であり、2000 年に 17.3 % であった老年人口の割合は 2050 年には 38.8 % となると予想されている。また、これに伴い生産年齢人口（15～64 歳）が減少し 2050 年には 50 % 程度になると予想されており、不足する社会的労働力を補てんする必要がある。

従来から、人間の作業を機械に代替させることによる省力・高効率化、高度化が行われてきた。近年ではモータ、センサ、コンピュータ、情報処理技術など要素技術の進歩によって複雑で高度な作業まで自動化が可能なロボットが開発され、様々な分野での機械化は一層盛んになっている。その中で、我が国は産業用ロボット分野において 40 % 以上の世界シェアを占めており、高い競争力を有している [2,3]。ロボットは産業分野における労働力補てんのため今後は一層重要となるほか、人の居住・生活環境におけるサービスや高齢者の介護などにも利用範囲を広げていくことが期待され、経済産業省が策定した「技術戦略マップ 2010」においても様々な分野においてロボットが用いられるようになるとし、ロボット産業は大きな成長分野として位置づけられている [4]。このように、将来的にロボットが広く用いられることが期待されているが、そのためにはロボットが様々な環境において活動可能となる必要があるとされる。

現在、実用化されている移動ロボットの例として工場などにおける搬送ロボット（Automated guided vehicle）が挙げられる。このようなロボットを用いる場合、ロボットが正しく動作できるよう環境を整える必要があり、ロボット自身もそうした環境で用いられることを前提として製作されている。

移動ロボットの形態は車輪型，クローラ型，脚型に大別できる．現在，移動ロボットとして多く用いられているのは車輪型である．車輪型ロボットは移動効率に優れるが，段差などの移動には不向きである．クローラ型は段差・凹凸路の走破性に優れるが [5,6]，化学プラントの配管など乗り上げてはいけない障害物を回避することは困難である．脚歩行型は着地点をある程度任意に設定できるため障害物を回避して移動することが可能である．現在考案されている脚型ロボットには多くの形態が存在する．将来的にロボットの活躍が期待される人間の生活環境や労働力不足が懸念される工場や作業現場など人間の利用が前提として作られた場所に対しては，人間の動きを模することができる2足ロボットが適すると考えられる．

また，家庭などの人の居住環境においては人に近い形態をとれることも2足ロボットの有意な点である．適切にデザインが行われれば，人が持つ機械・異物への心理的抵抗を軽減することが期待できる．

こうした背景から多くの2足ロボット・機械に関する研究が行われているが，実用化されているもののほとんどはエンターテイメント目的である．その理由として，歩行安定性が十分でないことが挙げられる．現在発表されている2足ロボットの活動は多くの場合整地に限られ，実環境として想定される凹凸が存在する地面や柔らかい地面などへの適応性は不十分である．また，脚は車輪に比べて構造が複雑であり，多数のアクチュエータが必要となることから，移動や作業において正味の仕事量に対する質量が大きくエネルギー効率が低い，高コストであるといったことも普及を妨げる要因であると考えられる．

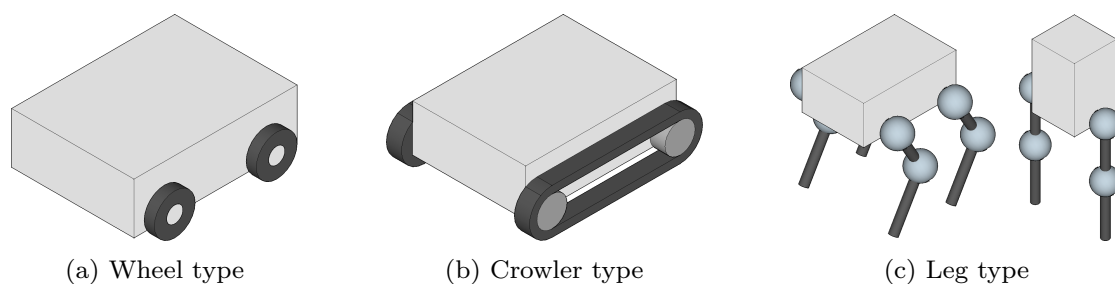


Fig. 1.1 Classification of mobile robots

他に2足ロボットの産業分野，生活支援分野への応用例として，パワーアシストスーツ (PAS: Power assist suit) が挙げられる．PASは装着者の運動に伴う筋電位や床反力を検出し，運動の補助という作用を生じるロボットで

あると考えられる。ロボットによる自動化が期待される高負荷作業の中には、技術的問題やコストの面から自動制御されたロボットによる代替が困難なものも多く存在する。この問題に対し、PASの利用によって人の能力を増幅することで作業者の負担軽減、作業の効率化が期待されており、実用例も存在する。また、運動機能が低下した人の生活補助やリハビリテーションにも用いられている。現在実用化されているPASの多くは人体の関節構造に合わせたリンクで構成され、各関節に必要な応じてアクチュエータが設けられている。多数のアクチュエータを備えるため高コストであり、装置には複雑な制御が必要となる。

ここまで2足ロボットの実用化および普及のために解決すべき問題について述べた。本研究では、この実現のために重要な歩行安定性および脚構造の問題に着目し、機構的な面から解決を試みた。2足ロボットの不整地における歩行安定性、脚の低自由度化の問題解決のための機構を提案し、それらの有効性を実験的に検証した結果について述べる。

## 1.2 2足ロボットの安定歩行に関する研究

2足ロボットに関する研究は古くから行われていたが [6–9], 1996 年の本田技術研究所によって P2 が発表されたことで大きく注目されることとなった。近年ではアクチュエータ、センサやコンピュータが高性能・低価格化したことでロボットを製作する面での技術的問題が緩和された結果、多くの機関で研究・開発が行われている。中でも本田技術研究所の ASIMO、産業技術総合研究所の HRP シリーズは2足ロボット分野における著名な成果であり、それ以前には困難とされてきた2足ロボットによる動的かつ安定的な歩行を実現している。これらをはじめとして人間の作業の代行、支援に関しては開発が行われているが、現状においては実用的な域に達しているとはいえず、エンターテインメント目的 [10–17] での利用にとどまっている。その原因として、多くの2足ロボットは整地を歩行することを前提として開発がなされているのに対し、実際に歩行を行う地面は傾きや凹凸が存在する不整地であるためである。

ロボットが不整地歩行を行う場合、地面と足の接触状態の不安定性が問題となる。移動ロボットは多くの産業用ロボットのように地面に固定されておらず、2足ロボットの場合には足を振り出す際に片足で姿勢を維持しなければならない期間が存在する。足と地面の接触状態を評価する1つの基準として、支持多角形が用いられる。支持多角形は、すべての接触点を内包する

最小の領域として定義される [18]. 2足ロボットにおいて広く用いられる ZMP (Zero-Moment-Point) や重心の投影点などの安定指標がこの支持多角形の範囲内であれば, ロボットは足と地面との接触状態を維持でき, 姿勢を安定に保つことができる [19]. よって, 一般に支持多角形は大きいほど望ましく, 十分な大きさの支持多角形を構成できない場合, しばしば接触状態が点接触や線接触といった不安定な状態になり, 地面へと効果的な力の伝達が困難となる.

さらに, 着地する地面形状の正確な計測が困難であることもロボットの不整地歩行において問題となる. 多くの歩行ロボットは, 着地する地面の高さや傾きを既知として足を地面へつける制御を行うが, 実際には想定した地面と, 実際の地面の高さと傾きとの間に偏差が生じる. 想定よりも実際の地面が高い場合には, 着地時に大きな衝撃が発生し, 機体の破損が生じる過大な床反力によって後方へ転倒するといったおそれがある. また, 想定より実際の地面が低い場合には, 姿勢を維持するために必要な床反力を受けられないため, 前方へ転倒するおそれがある. 近年, カメラや距離センサの高性能化, 低価格化が進んでいるが, 不整地の3次元形状をリアルタイムに, かつ正確に計測することは未だ困難である. また, 砂地, ぬかるみの硬さなどの物理的特性を計測することは困難である.

### 1.3 下肢動作支援装置に関する研究

現在, PAS の研究・開発が研究機関や民間企業で盛んに行われている. 山海らの装着型 PAS 「HAL」を制作し, 人の動作支援および予測型動作制御を行った [39]. 村岡らは PAS の骨格構造に着目し, リンクを大腿部の内側に配置した装着型歩行補助ロボット「WPAL」を開発し, 歩行訓練システムを制作した [40]. 上記の他, アクティブリンク社の能動的な歩行アシスト技術と受動歩行制御を両立した「パワーローダーライト PLL-04 忍者」[41] や ReWalk 社の「Re-Walk」[42] など様々な PAS が開発されている. PAS は人体に取り付けて使用するため, 軽量で柔軟なアクチュエータである空気圧アクチュエータが使われる例も多く存在する [44–46].

現在の PAS の問題として, 移動効率の低さが挙げられる. 各脚関節のアクチュエータは上体自重を支えるために出力の多くを消費し運動に利用できる出力は限られており, エネルギーを効率よく利用できていない. このことから各脚関節のアクチュエータのパワーウエイトレシオの低下を招き, それに伴ってコストや消費電力, 安全性などに悪影響を与えていると考え

る．また，構造的に制限が多いためアクチュエータの出力に限界がある．

重力補償の研究として，ヒューマノイドの上体自重による脚出力低下の問題を機械ばねを用いた重力補償機構を用いて屈伸動作の自重トルクを除去する手法 [47] や，弾性力の切替が容易なガススプリングを用いて遊脚と立脚期の補助が可能な自重支持トルク低減機構が提案されている [48]．このように脚機構の自重支持トルクの影響により，パワーウエイトレシオに構造的限界があること，その解決策として重力補償機構が有効であることが示されている．しかし，上述の重力補償機構では，脚姿勢に補償トルクが影響され，一部動作のみ適切な補償が可能であることや遊脚時に逆バイアストルクが発生する，機構が占有する空間が大きいといった問題がある．

## 1.4 研究目的と論文構成

本研究の最終的な目的は，現在主にエンターテイメント分野で利用されている2足ロボットの基本的な問題である不整地での安定歩行と低自由度化に関する提案を行い，応用範囲を拡大することである．前者のために新たな足構造と制御法を提案する．また後者のための新たな機構を提案しPASへの応用を試みる．具体的には，下記の提案を行う．

2足ロボットの不整地への適応性を向上させ，実用的な速度で安定な動歩行を実現するためには，凹凸のある地面との接触状態による不安定性，未知の地形への着地による床反力の過不足が問題となる．これらに対応するため，バネを有する点接触型足は有効であるが，実際の使用環境においてはその構造上，十分に機能できない可能性がある．そこで，これらの問題を解決しうる足機構を提案・製作する．また，足機構で測定した床反力およびトルクを用いた着地制御法を提案する．

低自由度機構については，次のような方針に基づくPASの設計法を提案する．足を用いた運動において，装着者の自重を支えることが重要であるため，鉛直方向と水平方向の動作を分離し，鉛直方向の動作のみ支持する方式を提案する．これにより，鉛直方向に駆動する直動アクチュエータのみを用いての補償が可能となり，構造を簡単化できる．また，支持脚時においてのみ自重を補償し，遊脚時にはアクチュエータを駆動しない効率的で簡易な制御方式の応用が可能になる．鉛直方向と水平方向の動作を分離するために，本研究ではパンタグラフ機構の応用を提案する．

第1章では，本研究の背景および関連する2足ロボット研究の概略について述べた．第2章では，関連研究についてさらに詳しく説明し，現状の課題を明

らかにする．第3章では，2足ロボットの不整地適応性向上を目的とした足機構について，既存のバネを有する点接触型足機構の問題点に対応した足機構を提案する．提案機構の動特性および提案機構を用いた制御法の性能の解析，既存機構との比較実験によりその有効性を検証する．第4章では，PAS装着者の自重補償を目的とした低自由度機構を提案し，実験において有効性の検証を行う．第5章では，本研究の結論および今後の展望を述べる．

## 第2章

# 関連研究

### 2.1 緒論

本章では，本研究で対象とする不整地歩行のための足機構および下肢動作支援装置に特に関係する研究について1章よりさらに詳しく説明をし，現状の課題を明らかにする．

まず，不整地適応性を高めるための足構造として，ロボットの足底へゴム等の柔軟な材料を取り付け，地面の凹凸や着地時の衝撃を吸収することが広く行われている [20,21]．しかし，これが有効となるのは微小な凹凸に対してのみであり，過度に柔軟性を高めた場合にはロボットの歩行安定性に悪影響を及ぼす可能性がある．

不整地歩行のための足機構については，不確かな不整地への着地の問題に対し，橋本ら [27,28]，中野ら [29]，中嶋ら [30] によってコンプライアンス制御を用いることが提案されている．しかし，従来の足を用い，床反力による入力のみによってフィードバック制御を行う場合，着地時に生じるインパルス状の衝撃を抑えることは困難である．各関節の角度制御ゲインを調整することでコンプライアンス制御を実現する方法であれば，地面に対して比較的柔らかい接地動作が実現できるため，着地時の衝撃抑制に優れている．しかし，関節の角度制御ゲインが小さくなることで位置の制御性能が低下する問題がある．

### 2.2 安定歩行のための既存の足機構

橋本らは足にアクチュエータを備えたセミアクティブな機構により，足の接地部を地面の凹凸に適応することで接地を安定化する手法を提案した [22]．橋本らの機構は4つのスパイクを備え，それらの先端が接地部となる．着地時，スパイクが地面に押し当てられるとそれぞれが独立して押し上げられる．スパイクの押し上げ過程において，足内部のカム機構によりスパ



イクを任意の時点で固定することにより凹凸のある地面に対して安定な接地を可能としている。

これにより積極的な地面への適応が可能となるが、この方法は重量増加を招くと共にエネルギー効率を低下させるほか、歩行の高速化を妨げる可能性がある。エネルギー効率および地面との滑りの問題に対し、Hashimotoらは接地部リンクの動作を並行運動に変更するとともに、リンクを固定する機構を設けることでエネルギー効率の問題を軽減している [23]。

質量は片側の足のみで2.93kgであるが、人搭乗型ロボットへ適用し実証をしており、上体の質量に比して小さいため、この点は問題とならない。

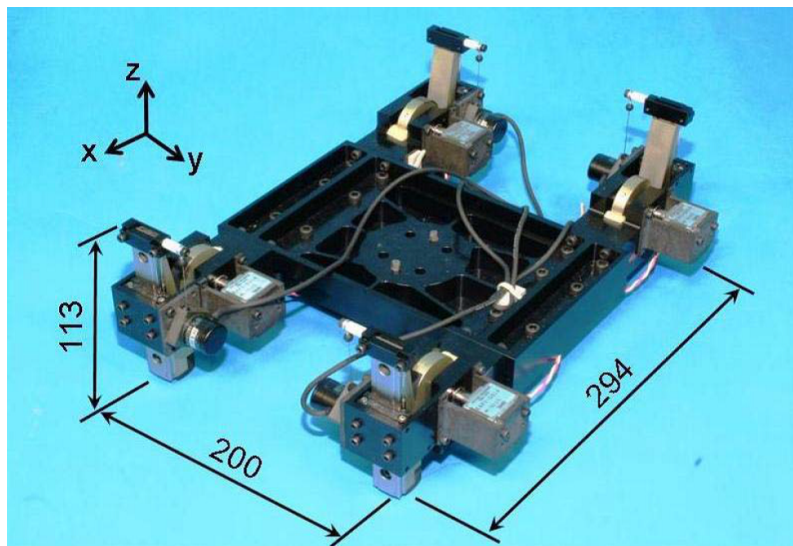


Fig. 2.1 Biped foot system capable of dealing with uneven terrain [22]

山口らは、衝撃力の抑制と段差の推定のためセンサと緩衝材料を持つ足構造を提案した [24]。この方法はアクチュエータを用いる手法と比較して重量の増加を抑えて実装することが可能である。着地面が平らで、かつ高さが想定と異なる地面に対しては効果的であるが、衝撃緩衝材による接地部リンクのストロークは5.5mmと短いため凹凸のある不整地への適用は困難である。

また、足構造が複雑となる問題がある。

GarciaらはSEA(Series Elastic Actuator)を用いた脚を開発し、歩行時の衝撃緩和について検討した [25]。実用的な速度での歩行を実現するためには着地時の衝撃緩和やエネルギーの回生SEAの弾性で対応可能な領域とアクチュエータによる応答を調査し、相補的に用いることで広い周波数の衝撃に対応可能である。また、磁性流体を用いた可変ダンパーによりSEAを用いた

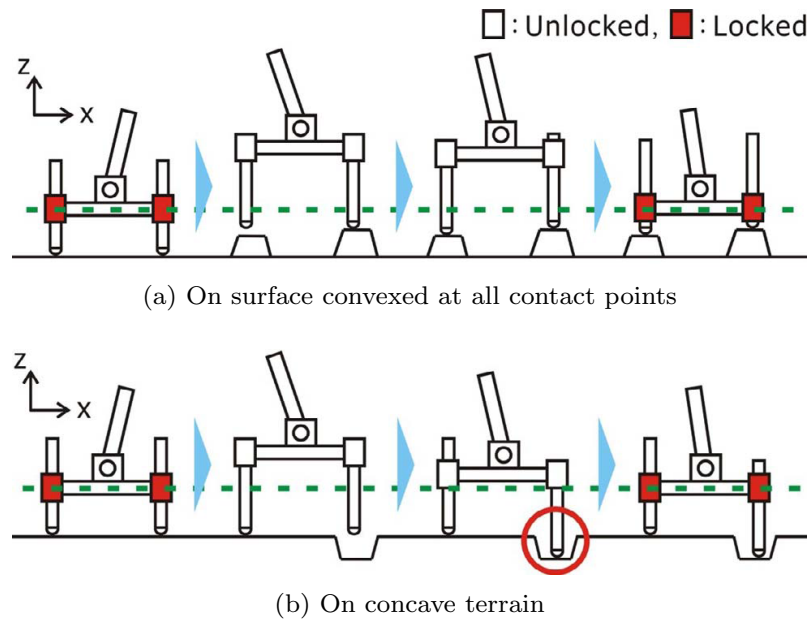


Fig. 2.2 Locking system [22]

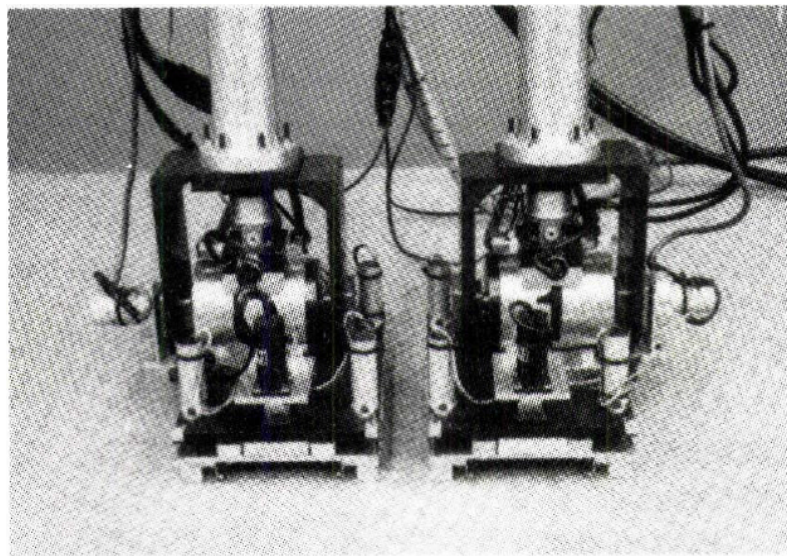


Fig. 2.3 Anthropomorphic foot [24]

脚移動のエネルギー効率向上について調査した。さらに，人が違和感を感じない歩容の生成法についても触れている。多くの二足ロボットは地面からの衝撃を受けないよう，接地直前に地面との速度が0に近くなるよう歩容の生成を行う。移動速度や周囲からの印象などを考慮した場合，そのような歩容の生成法では制限が多く，不適當である場合が考えられる。そのため，機

構に弾性を持たせ，アクチュエータによる制御と複合し衝撃に対応する手法は有効であると考えられる．関節のブレーキを用いることで支持脚期など間接角を保持する必要がある場面でのエネルギー効率改善を図った．磁性流体を用いた電磁ブレーキにより関節角度を保持し消費電力を削減する．

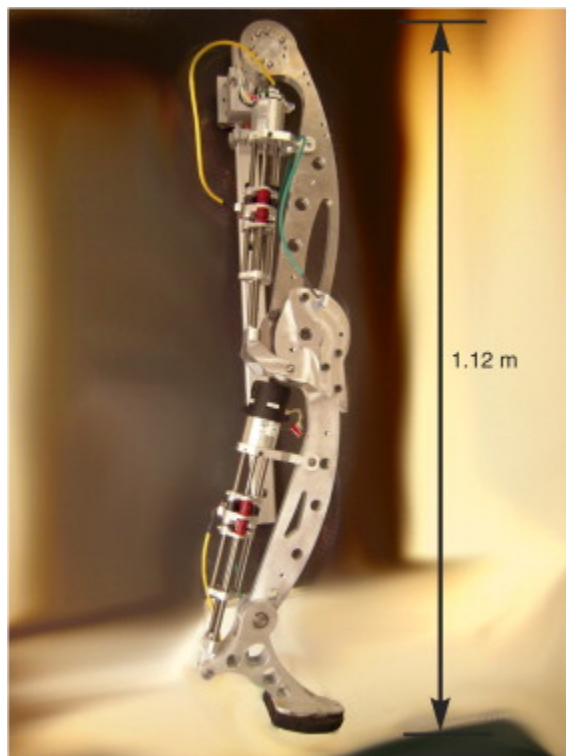


Fig. 2.4 Leg with series elastic actuation and magneto-rheological damping

### 2.3 ばね機構を備えた点接触型足機構

上記の研究に対し，山田らはバネを有する点接触足とそれを用いた着地制御法を提案した [37]．地面との接触部を4点とし，各点がリンクによって足の基部と接続された構造を持つ．リンクの関節部に備えられたばねによって各接触部が地面形状に合わせて高さを変えることで，着地時の衝撃吸収，接地状態の安定化を図る．また，各バネの変位を計測することで足が地面から受ける反力やトルクを推定することができ，これを用いて不確かな地面形状に対応する制御を行うことで，地面の状態がロボットの姿勢に与える影響を軽減する制御を行うことが可能である．

2足歩行は片脚支持期における重心移動と両足支持期における支持脚の切

り替えに分けられ、これら2つの期間を繰り返すことで連続した歩行が実現される．第1.2節において不整地における問題として挙げた「接地状態の不安定性」と「地面形状の不確かさ」は、それぞれの期間に対応する (Fig. 2.5). すなわち、不整地において、片脚支持期での重心移動における主問題は足と地面との接地状態の不安定性であり、支持脚切り替えにおいては地面形状の不確かさが問題となる．

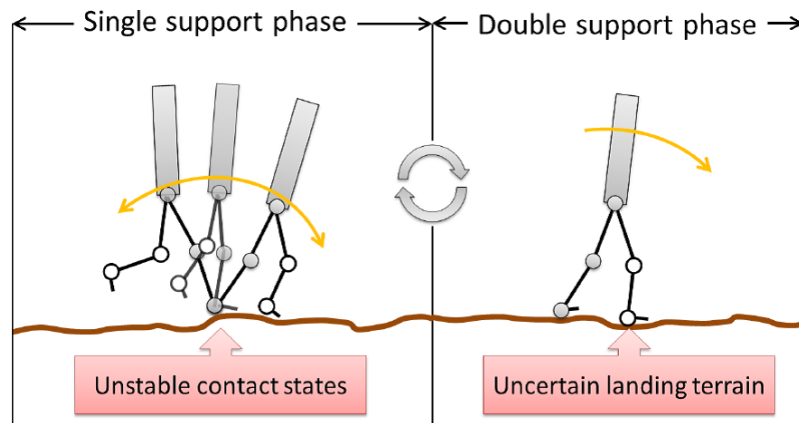


Fig. 2.5 Problems in walking on uncertain terrain [37]

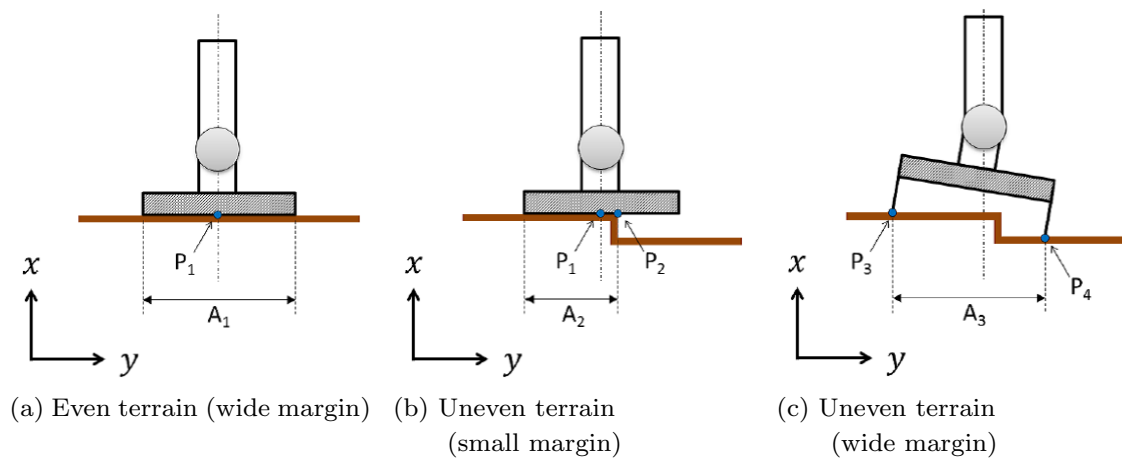


Fig. 2.6 Contact states and stability margin [37]

片脚支持期における接地状態の不安定性は、十分な支持多角形を確保できないことに起因する． Fig. 2.6 は、地面と足との接地状態と支持多角形の  $x - y$  平面における長さを示している． Fig. 2.6a の接地面が平ら場合 ( $A_1$ ) に



比べ、Fig. 2.6bの平らではない場合 ( $A_2$ ) ではこの長さが短くなっていることがわかる。静歩行の場合について考えれば、ロボット全体の重心位置の地面への投影点が支持多角形内にあれば地面と足の安定接地を継続できる。このため、一般に、この重心位置の投影点が足裏の中心である点  $P_1$  に留まり続けるように制御する。ロボットの姿勢を精密に制御できれば、接触状態が Fig. 2.6a と Fig. 2.6b のどちらであっても安定歩行が可能である。しかし、実際には、Fig. 2.6b の場合では転倒する可能性が高い。重心位置の計算誤差や各関節角度の制御性能などにより、投影点の位置に誤差が発生するため、すなわち Fig. 2.6b では  $y$  軸の正方向に少しでも ZMP がずれると、点  $P_2$  より右からは反力を得ることができず、点  $P_2$  まわりにモーメントが発生し転倒してしまうおそれがある。このように、十分な支持多角形が得られない場合、接地状態が安定せず片脚支持期における重心移動が困難となる。

したがって、山田らは「バネを有する点接触型足」と呼ぶ新しい足構造を提案し、不整地における十分な大きさの支持多角形の構成、すなわち、接地の安定化を試みた (Fig. 2.6c)。すなわちバネの変形を利用して、支持多角形を広く構成する趣向である。十分な支持多角形を構成できれば、Fig. 2.6a のような整地での歩行を想定した重心軌道を用いた場合でも、重心位置の投影点を安定な領域に収めることが可能である。つまり、整地を対象に提案されている従来の軌道生成法を利用して、不整地での安定した重心移動を実現できる。しかしながら点接触型足では柔らかい地面での陥没が起こるなどの問題があり、本研究ではこれを改善する平らな足を検討した。

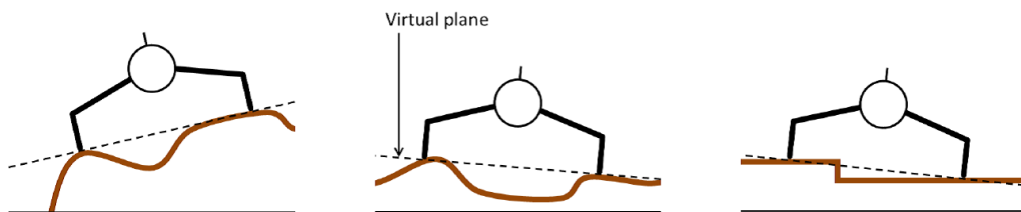


Fig. 2.7 Virtual plane [37]

より高速な動歩行の場合では、重心位置の軌道への追従が十分可能な場合でも、ZMPの支持多角形中心からの誤差が大きくなり転倒するおそれがある。したがって、次に述べる提案する着地制御法を応用し、適切な支持脚を切り替えを実現する。

提案する足構造により地面との安定接地が実現されている状態において、接地点を通過する仮想平面 (Virtual plane) を考える (Fig. 2.7)。この仮想平面

を着地面とみなせば，地面形状が不確かな地面への着地問題は，傾きと高さが不確かな平らな地面への着地問題へと置き換えることができる．支持脚切替時には，過度な衝撃によるロボットの転倒を抑制しなくてはならない．また，支持足による支持多角形を最大にするため，足の位置と姿勢を実際の地面にならうように修正することが求められる．提案する「不確かな地面に対する着地制御法」では，整地での歩行の際の反力とトルクを目標値として用い，着地時にこの目標反力とトルクに追従するように足の着地位置と姿勢を修正する．これにより，両足支持期において重心やZMPを現在の支持脚から次の支持脚へと安定的に移行させ，次の片脚支持期を適切な状態で開始することができる．ただし，高速な動歩行では，支持脚切り替え前後での重心の高さの変化が問題となるため，両足支持期後期において重心の高さの制御が同時に必要とされる．例えば，Fig. 2.8に示すように，段差にならうように遊脚の着地位置を変化させたまま次の片脚支持期に移行すると，重心の高さが $z_1$ から $z_2$ に変化することで動的な安定性に影響を及ぼす．しかし，動歩行における実時間軌道修正はそれ自体が大きな挑戦である．本研究では，想定地面と実地面のずれに着地時の足からの情報のみを用いて対応する．したがって，歩行速度は比較的低速であるとし，さらにロボットの構造により重心の高さ変化の影響を軽減することで，支持脚切り替え前後でのその影響は無視できる．以上の2つの手法の組み合わせにより，不整地における安定歩行を実現する．しかし，着地時の地面との滑り，点接触による荷重集中という問題があり，軟らかい地面での陥没，地面凸部での滑落などが発生しうる．

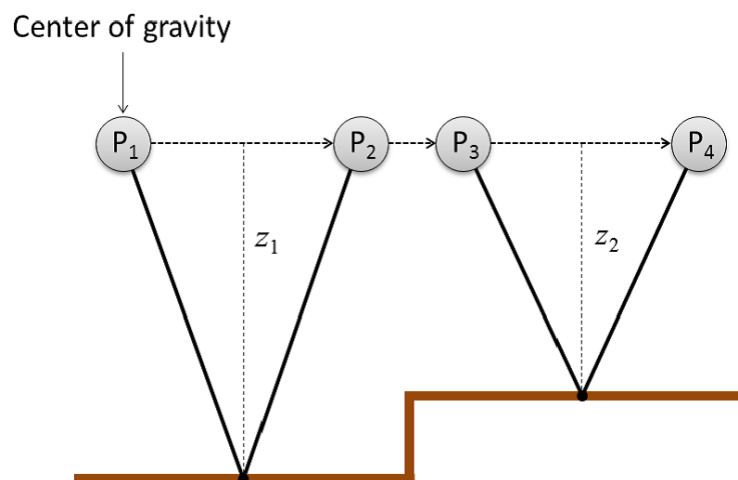


Fig. 2.8 Movement of center of gravity [37]

ここまで述べた既存研究で提案された足機構について Table 2.1 にまとめる.

Table 2.1 Comparison of foot structures

	Adaptation to uneven terrain	Shape of contact parts	Impact force reduction
Hashimoto [22]	Yes	Point	Yes (By control)
Yamaguchi [24]	Yes (Stroke is short (5mm))	Point	Yes
Garcia [25]	-	-	Yes
Yamada [37]	Yes	Point	Yes

本研究では, 地面との接触状態の安定化および着地時の衝撃軽減の機能を持ち, かつ, 地面との点接触による荷重集中の問題を解決する足機構の提案を行う.

## 2.4 既存の下肢動作支援装置

全身および下肢動作支援装置については, 山海らの「HAL」[39], 他アクティブリンク社の「パワーローダーライト PLL-04 忍者」[41] や ReWalk 社の「ReWalk」[42] などが製品化されている.

山海らは, 人体の表面筋電位信号を用いた装着型 PAS「HAL」を制作し, 人の動作支援および予測型動作制御を行った [39]. この装置は人体の主要な関節構造に合わせたリンク構造を持ち, 各関節にアクチュエータを備えるため, エネルギー効率の問題がある. また, 多数のアクチュエータ, コントローラを備えることから高コストとなる.

村岡らは PAS の骨格構造に着目し, リンクを大腿部の内側に配置した装着型歩行補助ロボット「WPAL」を開発し, 歩行訓練システムを制作した [40]. リンクの大腿部および下腿部への装着時には調整などの手間がかかるため, 田中らは脚部非固定式の歩行補助機を試作し, 実験により歩行や階段昇降での有効性を示した.

白田は PAS と同様にパワーウエイトレシオの問題がある 2 足ロボットの脚機構における上体自重による脚出力低下の問題を機械的な自重補償機構を用いて改善する方法を提案している. 2 足ロボットの脚関節に機械ばねを用いた重力補償機構を取り付け, 屈伸動作の自重トルクを除去できること

を示した [47]. 脚機構の自重支持トルクの影響により, パワーウエイトレシオの向上には構造的限界があること, その解決策として重力補償機構が有効であることを述べた. しかし, 脚姿勢に補償トルクが影響され, 一部動作でのみ適切な補償が可能であることや遊脚時に逆バイアストルクが発生するという問題点が残されている.

その他の重力補償の研究として, 菅原らは弾性力の切替が容易なガススプリングを用いて遊脚と立脚期の補助が可能な自重支持トルク低減機構を提案している [48].

また, 山田らは水圧シリンダを用いた脚機構を提案し, 補償力の切替に外力が不要な重力補償機構を提案した [49].

菅原らや山田らの手法は脚姿勢による補償トルクへの影響の問題や, 遊脚時の逆バイアストルクの問題を解決しているが, 3次元パラレルリンク機構などの特殊なものを用いているため, 機構が占有する空間が大きい問題がある.

このように, PASは人体に装着して使用されるため機構的な制約が大きい, 人体や作業対象物の支持のため寸法に比して大きな出力が要求される. ここまで述べたPASおよび重力補償機構のうち, 人もしくは人に近い形態の歩行ロボットの下肢用に用いるために提案されたものについて, Table 2.2にまとめる.

本研究では, 人の下肢機能を補助するうえで特に重要であると考えられる自重の補償に機能を限定し, かつ, 移動のための動作を妨げない機構を提案することで, 上記の問題の解決を試みる.

Table 2.2 Comparison of weight compensation mechanisms

	Number of actuators	Remarks
Sankai [39]	4 (lower limb)	
Muraoka [40]	6	Mobility aid required Reverse bias torque
Shirata [47]	0	occurs in swing phase
Yamada [49]	0	Occupy a relatively larger space





## 第3章

# 不整地安定歩行のための足機構と 着地制御法

### 3.1 緒論

人間に代わり作業を行わせるため，人間の生活環境に適した形態を持つ2足ロボットが期待されている．2足ロボットの実用化には，軟らかい地面や凹凸を有する地面などの様々な不整地への適応が必要である．多くの2足ロボットには底が硬く平らな足が用いられており，不整地歩行においては着地時の衝撃および接地の不安定性が問題となる．

ロボットが不整地歩行を行う場合，地面と足の接触状態の不安定性が問題となる．移動ロボットは多くの産業用ロボットのように地面に固定されておらず，2足ロボットの場合には足を振り出す際に片足で姿勢を維持しなければならない期間が存在する．足と地面の接触状態を評価する1つの基準として，支持多角形が用いられる．一般に支持多角形は大きいほど望ましく，十分な大きさの支持多角形を構成できない場合，しばしば接触状態が点接触や線接触といった不安定な状態になり，地面へと効果的な力の伝達が困難となる．さらに，着地する地面形状の正確な計測が困難であることもロボットの不整地歩行において問題となる．近年，カメラや距離センサの高性能化，低価格化が進んでいるが，不整地の3次元形状をリアルタイムに，かつ正確に計測することは未だ困難である．また，砂地，ぬかるみの硬さなどの物理的特性を計測することは困難である．

これらの問題を解決するため，山田らはばね機構を備え地面との接触部を工夫した足およびそれを用いた着地制御法を提案し，有効性を示した [37]．しかし，着地時の地面との滑り，点接触による荷重集中という問題があり，軟らかい地面での陥没，地面凸部での滑落などが発生する．本研究ではこれらの問題に対応しうる足機構を考案，製作を行った．また，着地制御法を適用し，不整地への着地実験によって有効性を検証した．

## 3.2 機構設計

### 3.2.1 バネを有する点接触型足機構

多くの2足ロボットでは一般に底が固く平らな足で不整地を歩行した場合に着地時の衝撃、接地の不安定性の問題を有する．このため山田らはバネを有する点接触型足機構（PCFS）を提案した [37]．PCFSは地面との接触部を4点とし、各点がリンクによって足の基部と接続された構造を持つ．リンクの関節部に備えられたばねによって各接触部が地面形状に合わせて高さを変えることで、着地時の衝撃を吸収するとともに、様々な形状の地面に対する接地状態の安定化が行える．また、ポテンショメータを用いて各バネの変位を計測することで各接触部が地面から受ける反力を推定することができ、それらから足全体が地面から受ける反力やトルクを推定することができる．Figs. 3.1, 3.2に本機構の概略図および実際に製作された機構の写真を示す．

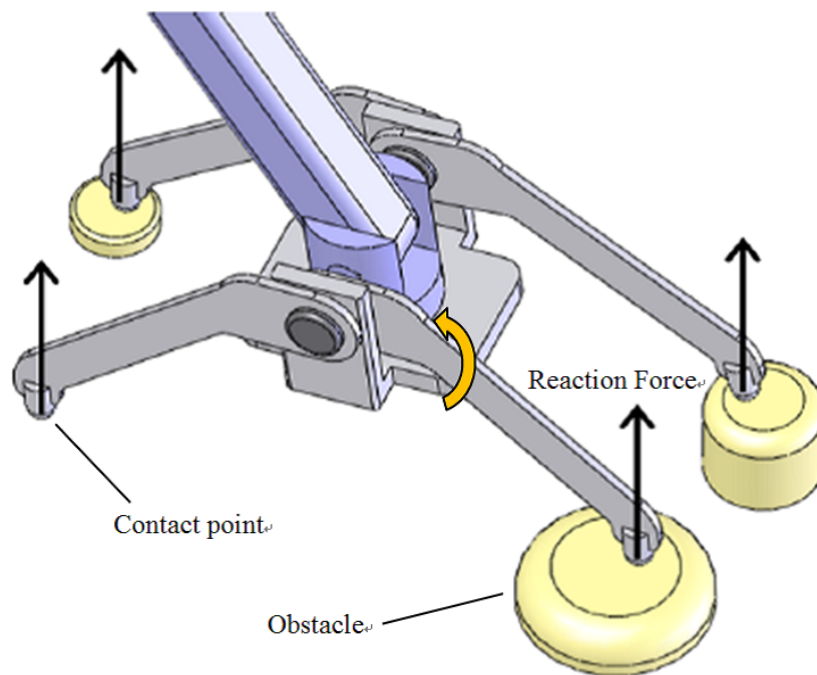


Fig. 3.1 Structure of Point contact foot [37]

本機構は2足ロボット不整地適応性を向上させるために有効であることが過去の研究で示されているが [37]，後述する第3章の実験結果で示すように

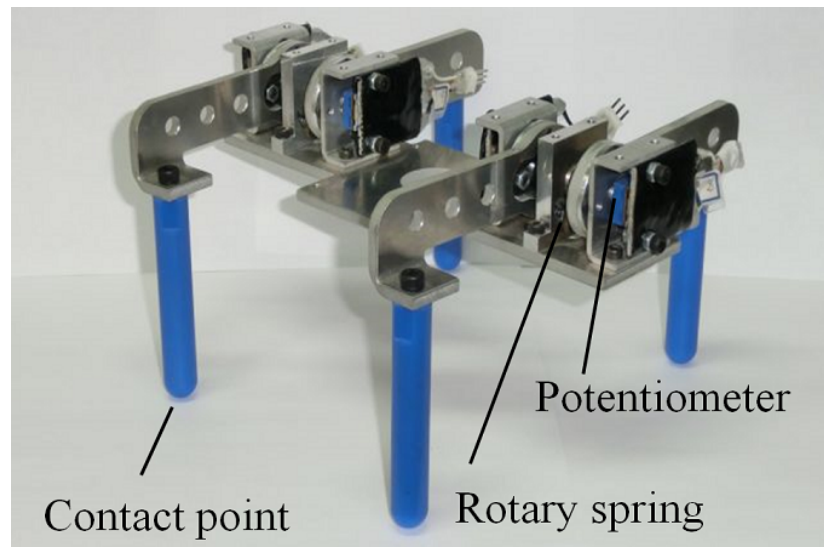


Fig. 3.2 Point contact foot [37]

以下の状況では正常に機能しないことが確認されている。

1. 回転運動を行う機構であるため着地後に地面との間にすべりが発生するが、この滑りが妨げられた場合機構が正しく動作しない (Fig. 3.3)
2. 点接触であるため、岩場、突起部などの乗り上げられる部分が小さい箇所に設置した場合、接地後に滑落が起こる (Fig. 3.4)
3. 地面の凹部に入り込む、やわらかい地面では陥没が起こる (Fig. 3.5)

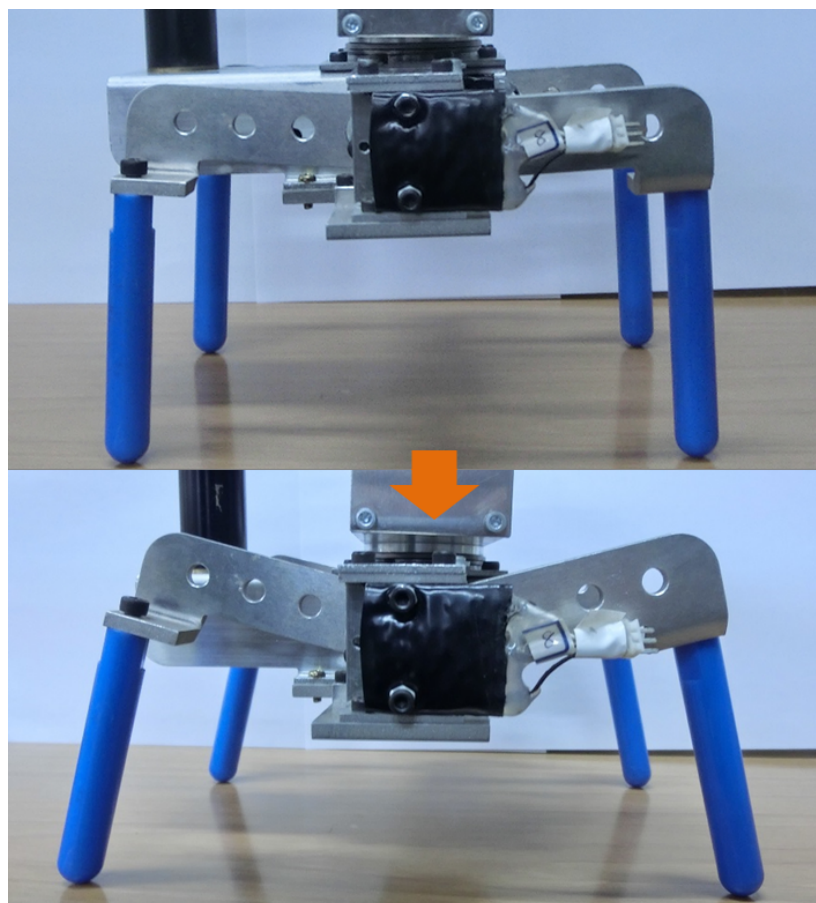


Fig. 3.3 Slipping of contact points



Fig. 3.4 Slipping down from obstacle



Fig. 3.5 Sinking to ground

### 3.2.2 提案する足機構

3.2.1 で述べた問題に対応するため、新しい足機構の考案・作成を行った。本機構と PCFS との相違点は以下の2点である。

1. 接地部の形状が、従来多くの2足ロボットで用いられているような平面である。ただし、足底が分割されており、ばねを有する機構によって各接触面の高さを変えることができる。
2. ばねを有する並進機構を持ち、接触面の移動方向が面の法線方向である。

1. のように地面との接触部形状が面であるため、障害物上に乗り上げた状態からの滑落が起こりにくいことが期待できる。また、接地部の圧力が PCFS に比べて広い範囲へ分散するため軟らかい地面において陥没が起こりにくい、接地部が地面の凹部へ入り込む可能性が小さいといった特徴がある。さらに、2. のように接触面が、面の法線方向へ並進運動を行うため、機構の動作に際して地面との間にすべりが発生せず、地面との摩擦や障害物によって機構の動作が妨げられることがないと予想する。

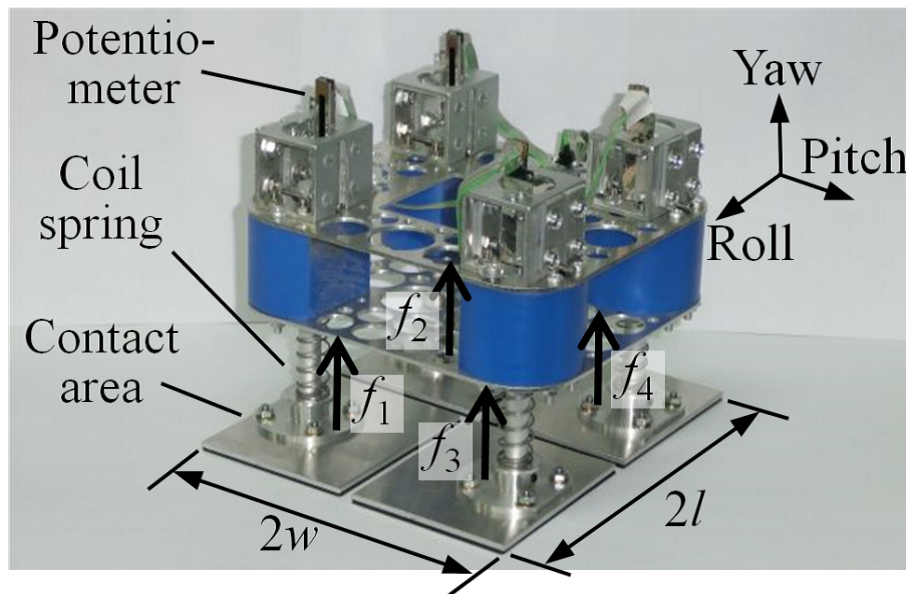


Fig. 3.6 Proposed flat surface contact foot

本機構は PCFS と同様にばねの変位をポテンシオメータで計測し、その値から各接地部が受ける床反力  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$  を求め、式 (3.1)~(3.3) を用いて



足が地面から受ける垂直力  $f$  とトルク  $\tau_{roll}$ ,  $\tau_{pitch}$  を推定することができる．本機構の構造では1つの接地面中が，地面と接触しているかを特定することはできないため，トルクを算出する際，各接地面が受ける床反力は面の中心への集中荷重として扱うとする．すなわち計測した垂直力とトルクの制御応用を目的としているため，精密な計測は目的としていない．実際には，各可動平面での垂直力の作用位置が変わる可能性があるが，ロボット本体にはバネを介して力が伝わるため本式は妥当である． $l$ ,  $w$  をそれぞれ1つの接触面の Roll, Pitch 軸方向長さであるとする，

$$f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (3.1)$$

$$\tau_{roll} = \frac{w}{2}(-f_1 - f_2 + f_3 + f_4) \quad (3.2)$$

$$\tau_{pitch} = \frac{l}{2}(f_1 - f_2 + f_3 - f_4) \quad (3.3)$$

本足機構の設計においては，PCFS との比較実験を行うため，接触面の分割数は4とし，すべての接触部がなす支持多角形が同じ大きさとなるようにした．また，両機構とも接触部の高さ方向の移動距離は最大約20mmとし，この時，PCFSの接触部1つあたりのばね反力は実測で約11Nとなるものを用い，提案する足機構については，最大のばね反力がPCFSと近くなるものからばねを選定し，約9Nとなるものを用いた．

### 3.3 着地制御法と安定性解析

2.3節で述べたように，提案する足構造により地面との安定接地が実現されている状態において，接地点を通過する仮想平面 (Virtual plane) を考える (Fig. 2.7)．この仮想平面を着地面とみなせば，地面形状が不確かな地面への着地問題は，傾きと高さが不確かな平らな地面への着地問題へと置き換えることができる．ここで，提案機構における接地点は各平板の中心点である．支持脚切替時には，過度な衝撃によるロボットの転倒を抑制しなくてはならない．また，支持足による支持多角形を最大にするため，足の位置と姿勢を実際の地面にならうように修正することが求められる．提案する「不確かな地面に対する着地制御法」では，整地での歩行の際の反力とトルクを目



標値として用い，着地時にこの目標反力とトルクに追従するように足の着地位置と姿勢を修正する．

### 3.3.1 制御器設計

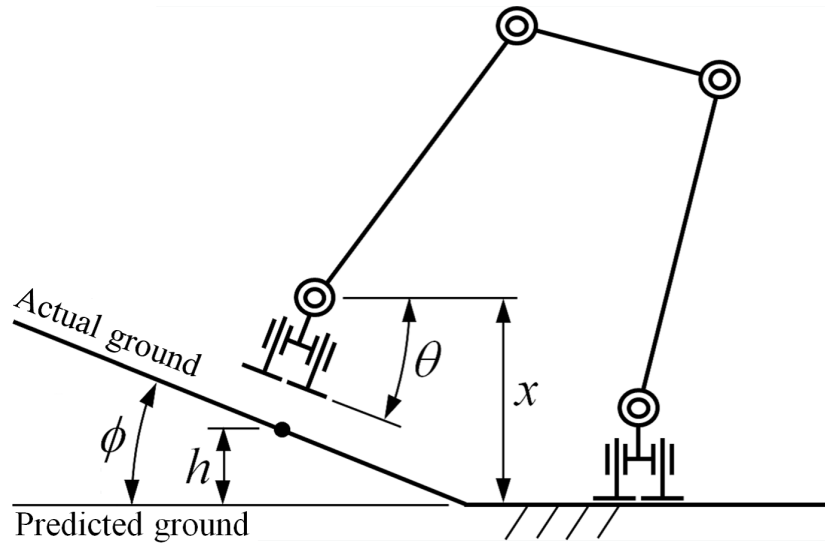


Fig. 3.7 Landing motion

本節では，形状が不確かな地面への着地制御法について述べる．このような地形への着地では，過大な床反力とトルクを抑制しつつ実際の地面への安定な接地を行う必要がある．よって，この着地制御には，望ましい反力およびトルク軌道への追従と足高さおよび姿勢の修正が求められる．本制御法は，提案する足機構のばね変位から推定した反力とトルクを用いて足の位置と姿勢をリアルタイム制御し，複雑な地面形状への安定した着地を実現する．

Fig. 3.7に示すような，想定している地面（以下，想定地面）と実際の地面（実地面）に高さおよび傾きの偏差が存在する着地について考える．足の底面はFig. 3.6のようにサジタル（Roll-Yaw）平面，フロンタル（Pitch-Yaw）平面に沿って4つに分割されている．提案する制御法では過大な床反力を吸収するために足の高さおよび傾きを制御する．そのため，式(3.4)，(3.5)に示すPI制御器を用いた．ただし，足の高さ $x$ および足の傾き $\theta$ を制御するための追従性の高い一般的なサーボ制御器が用意されているとし，これらを制御入

力とする．

$$x = x_{ref} - K_{Px}(f_{ref} - f) - K_{Ix} \int_0^t (f_{ref} - f)dt \quad (3.4)$$

$$\theta = \theta_{ref} - K_{P\theta}(\tau_{ref} - \tau) - K_{I\theta} \int_0^t (\tau_{ref} - \tau)dt \quad (3.5)$$

ここで， $K_{Px}$ ， $K_{Ix}$ ， $K_{P\theta}$  および  $K_{I\theta}$  制御器ゲイン， $x_{ref}$  および  $\theta_{ref}$  は想定地面に対する足の高さおよび傾きの目標軌道， $f$ ， $\tau$ ， $f_{ref}$  および  $\tau_{ref}$  は実際の床反力および床反力によるトルク（式 (3.2)，(3.3) 中の  $\tau_{roll}$ ， $\tau_{pitch}$ ），床反力の目標軌道，トルクの目標軌道である．目標軌道  $x_{ref}$ ， $\theta_{ref}$ ， $f_{ref}$  および  $\tau_{ref}$  は想定地面を歩行するときの足の高さおよび傾きと，それに対する床反力とトルクを設定した．これらの設定法については3.4節で後述する．

本制御器の性質としては，基本的には位置，姿勢の目標値である  $x_{ref}$ ， $\theta_{ref}$  となるよう実際の位置  $x$  と姿勢  $\theta$  を指令するが，床反力とトルク誤差に応じてそれらが小さくなるよう補正するものである．これにより未知の着地面や地形に沿う動作が可能となる．本制御器の有効性を次節以降で解析する．

### 3.3.2 着地の動特性モデル

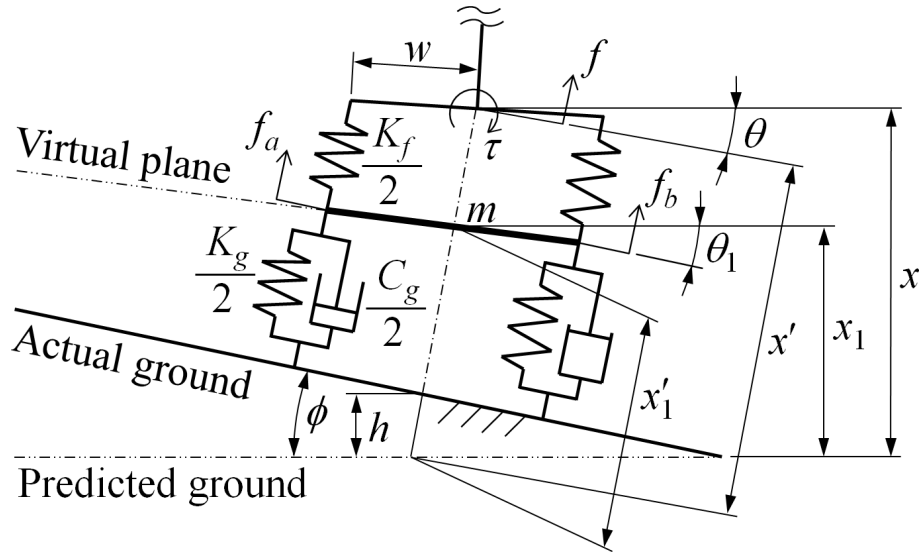


Fig. 3.8 Landing model

前節で述べた制御器の有効性を示すために着地の挙動を表す数式モデルが必要であり，本節で導出する．なお，サジタル，フロンタル面は独立して解析できるものとし，2次元モデルを検討する．Fig. 3.8 に本小節で用いる着地動特性モデル（着地モデル）を示す．また，本モデルと3.4節で述べる着地実験で使用する足機構（Fig. 3.6）の関係について，床反力は，足の分割されたそれぞれの接地面の中心に作用するものとして扱う（Fig. 3.11）．ここで， $m$  は接地部を持つリンクの総質量， $w$  は足幅の半値， $C_g$  および  $K_g$  は地面と足の間の仮想的な粘性および弾性係数， $K_f$  は足機構が有する4つのばねの弾性係数の総和， $x$  および  $x_1$  は仮想平面の midpoint（足先の代表位置）と足のバネ上部の垂直位置， $x'$  および  $x'_1$  は実地面に垂直な方向の位置， $\theta$  および  $\theta_1$  は想定地面に対する仮想平面と足のバネ上部の傾きである．

Fig. 3.8 に示すモデルの運動方程式は次式となる．

$$m\ddot{x}'_1 = f_a + f_b - mg \cos \phi \quad (3.6)$$

$$I\ddot{\theta}_1 = (f_a - f_b)w \cos(\theta_1 - \phi) \quad (3.7)$$

ここで， $f_a$  および  $f_b$  は次式で表される．

$$\begin{aligned} f_a = & \frac{K_g}{2} \{l_1 - x'_1 + h' + w \sin(\phi - \theta_1)\} \\ & - \frac{C_g}{2} \left\{ \dot{x}'_1 - \frac{d}{dt} [w \sin(\phi - \theta_1)] \right\} \\ & - \frac{K_f}{2} \{l_2 - x' + x'_1 - w \sin(\phi - \theta_1) + w \sin(\phi - \theta)\} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} f_b = & \frac{K_g}{2} \{l_1 - x'_1 + h' - w \sin(\phi - \theta_1)\} \\ & - \frac{C_g}{2} \left\{ \dot{x}'_1 + \frac{d}{dt} [w \sin(\phi - \theta_1)] \right\} \\ & - \frac{K_f}{2} \{l_2 - x' + x'_1 - w \sin(\phi - \theta_1) - w \sin(\phi - \theta)\} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$l_1$  および  $l_2$  はそれぞれ地面と足との相互作用を表すばね成分  $K_g$  と足に取り付けられているばね  $K_f$  の自然長であり， $I$  は足先リンクの慣性モーメント，

$h' = h / \cos \phi$  である。

式 (3.8) および (3.9) を式 (3.6) および (3.7) へ代入し,  $\phi - \theta_1 \approx 0$ ,  $\phi - \theta \approx 0$  とみなして線形化し次式を得る。

$$m\ddot{x}'_1 + C_g\dot{x}'_1 + (K_g + K_f)x'_1 = K_f(x' - l_2) + K_g(l_1 - h') - mg \cos \phi \quad (3.10)$$

$$I\ddot{\theta}_1 + C_g w^2 \dot{\theta}_1 + (K_g + k_f)w^2 \theta_1 = K_f w^2 \theta + K_g w^2 \phi \quad (3.11)$$

地面の高さおよび傾きが想定したものであるとき ( $h = 0$  かつ  $\phi = 0$ ), 式 (3.10), (3.11) から次の運動方程式が得られる。

$$m\ddot{x}_{1ref} + C_g\dot{x}_{1ref} + (K_g + K_f)x_{1ref} = K_f(x_{ref} - l_2) + K_g(l_1 - h') - mg \quad (3.12)$$

$$I\ddot{\theta}_{1ref} + C_g w^2 \dot{\theta}_{1ref} + (K_g + k_f)w^2 \theta_{1ref} = K_f w^2 \theta_{ref} \quad (3.13)$$

ここで,  $x_{1ref}$  および  $\theta_{1ref}$  はそれぞれ  $x_1$  および  $\theta_1$  の目標値である。式 (3.10), (3.12) と, 式 (3.11), (3.13) の差から次の誤差方程式が得られる。

$$m\Delta\ddot{x}_1 + C_g\Delta\dot{x}_1 + (K_g + K_f)\Delta x_1 = K_f\Delta x + K_g \frac{h}{\cos \phi} - mg(1 - \cos \phi) \quad (3.14)$$

$$I\Delta\ddot{\theta}_1 + C_g w^2 \Delta\dot{\theta}_1 + (K_g + k_f)w^2 \Delta\theta_1 = K_f w^2 \Delta\theta - K_g w^2 \phi, \quad (3.15)$$

ここで,  $\Delta x$ ,  $\Delta x_1$ ,  $\Delta\theta$  および  $\Delta\theta_1$  は次式で表される誤差の値である。

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_{ref} - x', \\ \Delta x_1 &= x_{1ref} - x'_1, \\ \Delta\theta &= \theta_{ref} - \theta, \\ \Delta\theta_1 &= \theta_{1ref} - \theta_1. \end{aligned} \quad (3.16)$$

### 3.3.3 制御系の安定解析

本節では, 前節で導出した着地モデルと提案する制御則をもとに安定性を解析する。

Fig. 3.8 のモデルにおける床反力  $f$  およびトルク  $\tau$  ( $\tau_{roll}$  /  $\tau_{pitch}$ ) は以下で表される.

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{K_f}{2}(l_2 - x' + x'_1 - d_1 + d_2) + \frac{K_f}{2}(l_2 - x' + x'_1 + d_1 - d_2) \\
 &= K_f(l_2 - x' + x'_1), \\
 \tau &= w \left\{ \frac{K_f}{2}(l_2 - x' + x'_1 - d_1 + d_2) - \frac{K_f}{2}(l_2 - x' + x'_1 + d_1 - d_2) \right\} \\
 &= K_f w(-d_1 + d_2) \\
 &\approx K_f w^2(\theta_1 - \theta),
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

ただし,  $d_1 = w \sin(\phi - \theta_1)$ ,  $d_2 = w \sin(\phi - \theta)$  である. 床反力およびトルクの目標軌道は次式で表される.

$$\begin{aligned}
 f_{ref} &= K_f(l_2 + x_{1ref} - x_{ref}), \\
 \tau_{ref} &= K_f w^2(\theta_{1ref} - \theta_{ref}).
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

式 (3.17), (3.18) を式 (3.4), (3.5) へ代入し次式を得る.

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= \frac{K_{Px} K_f \Delta x_1 + K_{Ix} \int_0^t \Delta f dt - (1 - \cos \phi) x_{ref}}{\cos \phi + K_{Px} K_f}, \\
 \Delta \theta &= \frac{K_{P\theta} K_f w^2 \Delta \theta_1 + K_{I\theta} \int_0^t \Delta \tau dt}{1 + K_{P\theta} K_f w^2}.
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

床反力およびトルクの誤差  $\Delta f$ ,  $\Delta \tau$  は以下で表される.

$$\Delta f = f_{ref} - f, \tag{3.20}$$

$$\Delta \tau = \tau_{ref} - \tau. \tag{3.21}$$

式 (3.19) を式 (3.14), (3.15) へ代入し以下の状態空間表現を得る.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = A \mathbf{x} + D \tag{3.22}$$

ただし,

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1 & \Delta x_1 & \int_0^t \Delta f dt \end{bmatrix}^T, \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{C_g}{m} & -\frac{(K_g+K_f) \cos \phi + K_{Px} K_g K_f}{m(\cos \phi + K_{Px} K_f)} & \frac{K_{Ix} K_f}{m(\cos \phi + K_{Px} K_f)} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_f \cos \phi}{\cos \phi + K_{Px} K_f} & -\frac{K_{Ix} K_f}{\cos \phi + K_{Px} K_f} \end{bmatrix}, \\ D &= \begin{bmatrix} -\frac{K_f(1-\cos \phi)}{m(\cos \phi + K_{Px} K_f)} x_{ref} - \frac{K_g}{m} \frac{h}{\cos \phi} - g(1 - \cos \phi) \\ 0 \\ \frac{K_f(1-\cos \phi)}{\cos \phi + K_{Px} K_f} x_{ref} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \boldsymbol{\theta} = E \boldsymbol{\theta} + G \quad (3.23)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta} &= \begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta}_1 & \Delta \theta_1 & \int_0^t \Delta \tau dt \end{bmatrix}^T, \\ E &= \begin{bmatrix} -\frac{C_g w^2}{I} & -\frac{w^2(K_g+K_f+K_{P\theta} K_g K_f w^2)}{I(1+K_{P\theta} K_f w^2)} & \frac{K_{I\theta} K_f w^2}{I(1+K_{P\theta} K_f w^2)} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_f w^2}{1+K_{P\theta} K_f w^2} & -\frac{K_{I\theta} K_f w^2}{1+K_{P\theta} K_f w^2} \end{bmatrix}, \\ G &= \begin{bmatrix} -\frac{K_g w^2 \phi}{I} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

式 (3.22) による足高さの特性方程式は以下となる.

$$s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3 = 0 \quad (3.24)$$

ただし,

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \left( \frac{C_g}{m} + \frac{K_{Ix}K_f}{\cos \phi + K_{Px}K_f} \right), \\ \alpha_2 &= \frac{(K_g + K_f) \cos \phi + K_{Px}K_gK_f + K_{Px}K_fC_g}{m(\cos \phi + K_{Px}K_f)}, \\ \alpha_3 &= \frac{K_{Ix}K_gK_f}{m(\cos \phi + K_{Px}K_f)}.\end{aligned}$$

式 (3.23) による足の傾きの特性方程式は以下となる.

$$s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 = 0 \quad (3.25)$$

ただし,

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \left( \frac{C_g w^2}{I} + \frac{K_{I\theta}K_f w^2}{1 + K_{P\theta}K_f w^2} \right), \\ \beta_2 &= \frac{w^2 \{K_g + K_f + w^2(K_{P\theta}K_gK_f + K_{P\theta}K_fC_g)\}}{I(1 + K_{P\theta}K_f w^2)}, \\ \beta_3 &= \frac{K_{I\theta}K_gK_f w^2}{I(1 + K_{P\theta}K_f w^2)}.\end{aligned}$$

これらの特性方程式は, ラウス・フルビッツの安定条件より次式が満たされれば安定である [61]

$$\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 > 0, \alpha_1\alpha_2 - \alpha_3 > 0, \quad (3.26)$$

$$\beta_1 > 0, \beta_2 > 0, \beta_3 > 0, \beta_1\beta_2 - \beta_3 > 0. \quad (3.27)$$

よって,  $K_g$  および  $C_g$  は一般に正であるため, 全ての制御器ゲインが正であれば本システムは安定である

### 3.3.4 制御性能の解析

前節で本制御法が安定となる指標を示した. 本節では足の高さおよび角度の最終値について解析する.

前節の結果から状態量の収束を仮定し, 式 (3.22) の左辺を 0 とすると以下

の式を得る.

$$a_{11}\Delta x_1 + a_{12} \int_0^t \Delta f dt = a_{13}x_{ref} + a_{14}, \quad (3.28)$$

$$a_{11} = -\frac{(K_g + K_f) \cos \phi + K_{Px}K_gK_f}{m(\cos \phi + K_{Px}K_f)},$$

$$a_{12} = \frac{K_{Ix}K_f}{m(\cos \phi + K_{Px}K_f)},$$

$$a_{13} = \frac{K_f \cos \phi}{m(\cos \phi + K_{Px}K_f)},$$

$$a_{14} = \frac{K_g}{m} \frac{h}{\cos \phi} - g(1 - \cos \phi),$$

$$a_{21}\Delta x_1 + a_{22} \int_0^t \Delta f dt = a_{23}x_{ref}, \quad (3.29)$$

$$a_{21} = \frac{K_f \cos \phi}{\cos \phi + K_{Px}K_f},$$

$$a_{22} = -\frac{K_{Ix}K_f}{\cos \phi + K_{Px}K_f},$$

$$a_{23} = -\frac{K_f(1 - \cos \phi)}{\cos \phi + K_{Px}K_f}.$$

式 (3.28) および (3.29) を Predicted ground から Virtual ground までの高さ  $x'_1 (= x_{1ref} - \Delta x_1)$  について解き, 次式を得る.

$$x'_1 = x_{1ref} + h + \frac{mg}{K_g}(1 - \cos \phi) \cos \phi. \quad (3.30)$$

$\phi - \theta_1 \approx 0$  と仮定し, 次式を得る.

$$x_1 = x_{1ref} + h + \frac{mg}{K_g}(1 - \cos \phi) \cos \phi. \quad (3.31)$$

式 (3.31) は足位置  $x$  が実地面の高さ  $h$  および傾き  $\phi$  に適応することを示して



いる．式 (3.29) から以下の式を得る．

$$\int_0^t \Delta f dt = \frac{-\cos \phi \Delta x_1 + (1 - \cos \phi) x_{ref}}{K_{Ix}}. \quad (3.32)$$

ここで，式 (3.22) より  $\Delta \dot{x}_1 = 0$ ， $x_{ref}$  が定数であり， $\phi$  は十分小さいと仮定しているので次式を得る．

$$\Delta f(\infty) = 0. \quad (3.33)$$

同様に，式 (3.23) の左辺を 0 とし以下の式を得る．

$$b_{11} \Delta \theta_1 + b_{12} \int_0^t \Delta \tau dt = b_{13}, \quad (3.34)$$

$$b_{11} = -\frac{w^2(K_g + K_f + K_{P\theta}K_gK_fw^2)}{I(1 + K_{P\theta}K_fw^2)},$$

$$b_{12} = \frac{K_{I\theta}K_fw^2}{I(1 + K_{P\theta}K_fw^2)},$$

$$b_{13} = \frac{K_gw^2\phi}{I},$$

$$b_{21} \Delta \theta_1 + a_{22} \int_0^t \Delta \tau dt = 0, \quad (3.35)$$

$$b_{21} = \frac{K_fw^2}{1 + K_{P\theta}K_fw^2},$$

$$b_{22} = -\frac{K_{I\theta}K_fw^2}{1 + K_{P\theta}K_fw^2}.$$

式 (3.34)，(3.35) を  $\theta_1 (= \theta_{1ref} - \Delta \theta_1)$  について解き，次式を得る．

$$\theta_1 = \theta_{1ref} + \phi. \quad (3.36)$$

式 (3.35) から以下の式を得る．

$$\int_0^t \Delta \tau dt = \frac{\Delta \theta_1}{K_{I\theta}}. \quad (3.37)$$

式 (3.23) より  $\Delta\dot{\theta}_1 = 0$  なので次式を得る.

$$\Delta\tau(\infty) = 0. \quad (3.38)$$

上記より, 足の姿勢が想定地面と実地面の傾き偏差だけ修正された角度に収束することが分かる. このことから, 床からのトルクも目標値へと収束する. 以上より, 着地面の高さおよび傾きが不確かな地面に対しても, 地面の特性パラメータによらず, 足の位置および姿勢を修正しつつ足に加わる反力とトルクが目標値へと収束することが確認できた.

## 3.4 実験

Figs. 3.1, 3.2 に示す従来の足機構 (以降 Type 1) および Figs. 3.6, 3.11 に示す新しい足機構 (以降 Type 2), それを用いた着地制御の有効性を検証するため, 2 足ロボットに両足機構を実装し, 種々の地面への着地実験を行った. ロボットによって振り上げた足を各種の地面に着地させたときの床反力およびトルクを計測し, 歩行に及ぼす影響について評価・比較を行った.

### 3.4.1 実験装置

実験装置の全体図, 機械的なパラメータおよび機器構成をそれぞれ Fig. 3.9, 3.10, Table 3.1 および Fig. 3.12 に示す.

実験装置は股関節に 1 自由度, 足首に 3 自由度を持つ脚を左右に備え, 計 8 自由度を有する. 股関節には, メインのサーボモータで不足するトルクを補償するため, 補助モータがタイミングベルトで接続されている. 各関節に用いたサーボモータの諸元を Table. 3.2 に示す. サーボモータの駆動には, Fig. 3.13 に示す電圧電流変換回路をモータドライバとして用いた. 図中のオペアンプにより, 式 (3.39) のように入力電圧差を増幅率  $K_0$  で増幅する.

$$V_3 = K_0(V_1 - V_2) \quad (3.39)$$

入力端子への電流  $I_1$  を 0 とみなし, 式 (3.40), (3.41) を得る.

$$I_{in} = \frac{V_{in} - V_1}{R_1} = I_2 = \frac{V_1 - V_m}{R_2} \quad (3.40)$$

$$I_{out} = I_2 + I_3 = \frac{V_m}{R_3} \quad (3.41)$$

式(3.39)において  $K_0$  が十分大きい, また,  $V_2 = 0$  とすると  $V_1 \ll V_{in}$ ,  $V_1 \ll V_{out}$  であるので

$$V_1 \approx 0 \quad (3.42)$$

とみなせる. 式(3.40)-(3.42) より次式が成立する.

$$I_3 = -\frac{R_2 + R_3}{R_1 R_3} V_{in} \quad (3.43)$$

式(3.43) から,  $V_{in}$  によってモータへの出力電流  $I_3$  を制御できることがわかる. ロボットの関節に用いるアクチュエータの定格に合わせアンプは Texas Instruments 社製 OPA541AP および LM675T を用いた. 回路中の抵抗は前者の場合  $R_1 = 1.0[k\Omega]$ ,  $R_2 = 200[\Omega]$ ,  $R_3 = 0.51[\Omega]$ , 後者の場合は  $R_1 = 1.0[k\Omega]$ ,  $R_2 = 100[\Omega]$ ,  $R_3 = 0.47[\Omega]$  とした. Fig. 3.13 の回路図は OPA541AP を用いた場合である.

Table 3.1 中の全質量  $M$  は各リンクの質量  $m_1, m_2, m_3$  および配線類の質量の和である. Type 1 は Type 2 より軽量であるが, 機構の幾何学的特徴による性能の比較を行うため両機構の質量が等しくなるよう Type 1 におもりを付加した.

制御用 PC とモータドライバ, ロボットとの入出力に用いるハードウェアを Table 3.3 に示す.

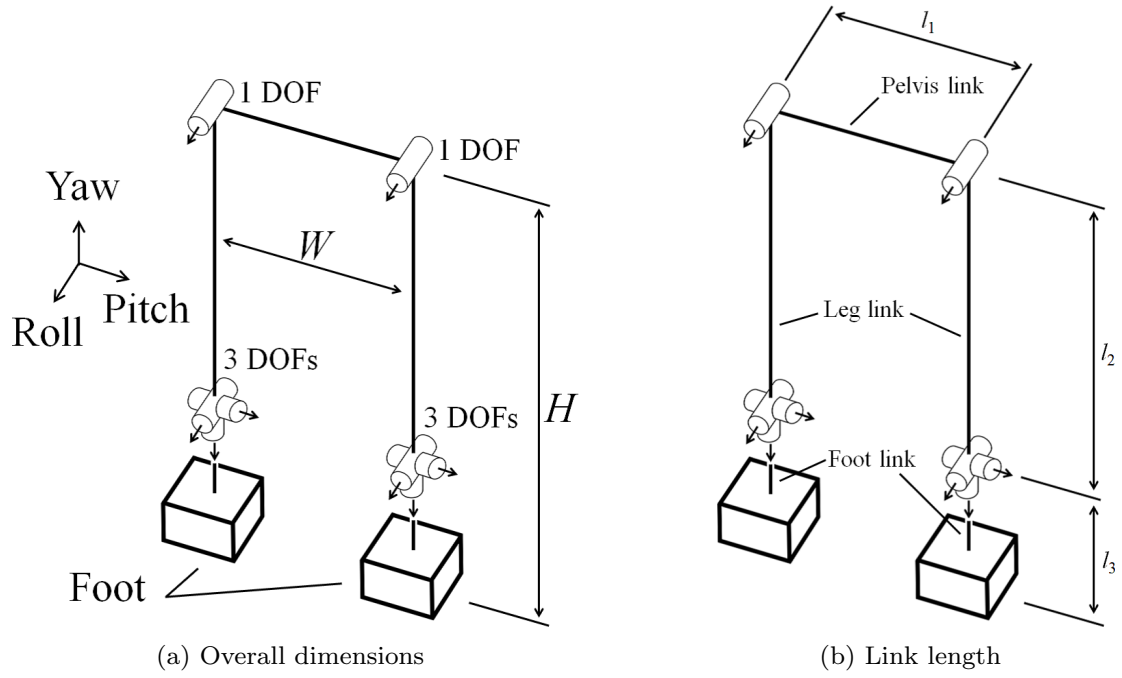


Fig. 3.9 Dimenstions of Experimental system

Table 3.1 Experimental parameters

Mechanical parameter	Value	Unit
Width $W$	240	[mm]
Height $H$	505	[mm]
Total mass $M$	7.90	[kg]
Length of pelvis link $l_1$	240	[mm]
Mass of pelvis link $m_1$	4.00	[kg]
Length of leg link $l_2$	370	[mm]
Mass of leg link $m_2$	0.52	[kg]
Length of foot link $l_3$	145	[mm]
Mass of foot link $m_3$	1.36	[kg]
Spring constant $K_f$	0.422	[N/mm]

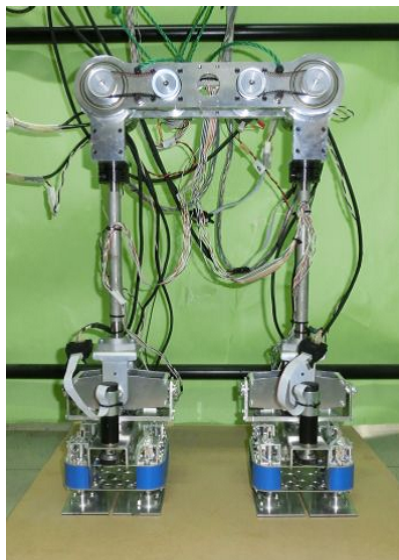


Fig. 3.10 Experimental system

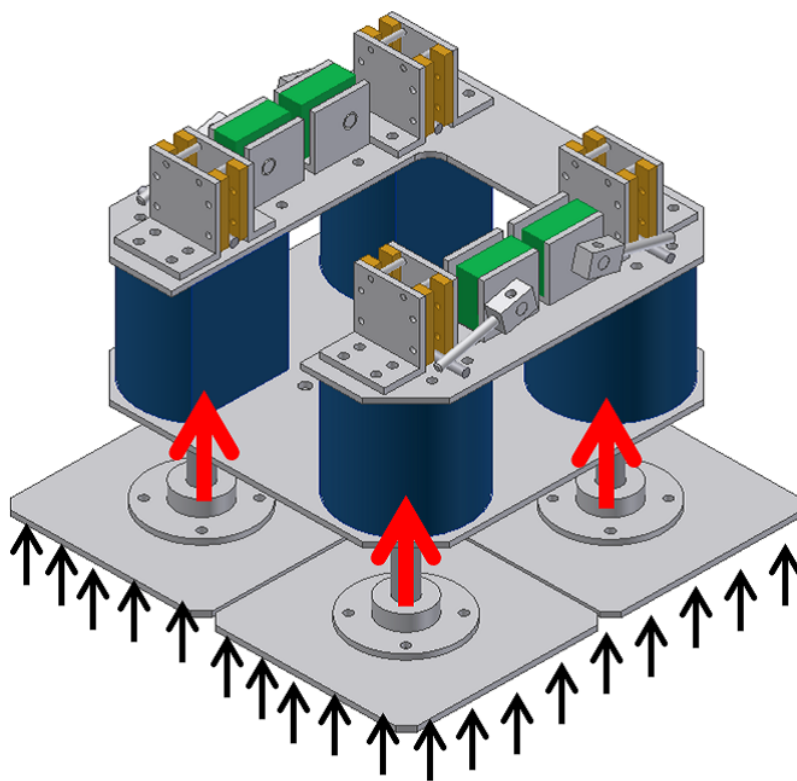


Fig. 3.11 Proposed mechanism

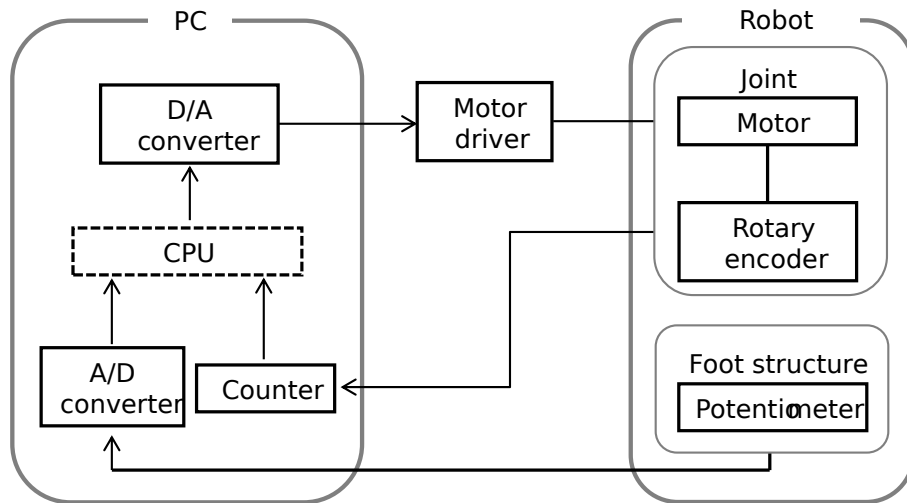


Fig. 3.12 Configuration of experimental system

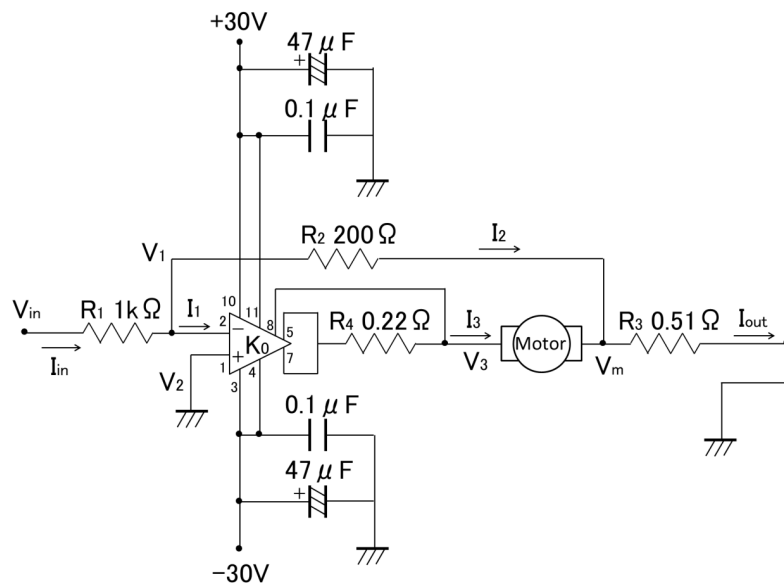


Fig. 3.13 Motor driver circuit

Table 3.2 Actuator spec

Hip joint		
Vender	Hermonic Drive Systems	
Model Number	RH-14D-3002-E100D0	
Rating output	18.5	[W]
Rating torque	5.9	[N·m]
Maximum torque	20	[N·m]
Max. rotational speed	50	[r/min]
Hip joint (support)		
Vender	Maxon moter	
Model Number		
Rating output	60	[W]
Rating torque	7.9	[N·m]
Maximum torque	94.2	[N·m]
Max. rotational speed	61	[r/min]
Ankle joint (Roll and Pitch axis)		
Vender	Hermonic Drive Systems	
Model Number	RH-8D-6006-E100D0	
Rating output	8.6	[W]
Rating torque	1.4	[N·m]
Maximum torque	2.7	[N·m]
Max. rotational speed	100	[r/min]
Ankle joint (Yaw axis)		
Vender	Maxon motor	
Model Number	RE-max 24 + GP22C	
Rating output	11	[W]
Rating torque	0.5	[N·m]
Maximum torque	2.9	[N·m]
Max. rotational speed	111	[r/min]

Table 3.3 I/O hardware

Item	Value	Unit
Vender	CONTEC Co., Ltd.	
Counter		
Model number	CNT-3208M-PE	
Response speed	10	[MHz]
A/D converter		
Model number	AD12-16(PCI)	
Resolution	12	[bit]
Sampling Rate	20	[ $\mu$ sec/ch] (Max.)
D/A converter		
Model number	DA12-8(PCI) DA12-4(PCI)	
Resolution	12	[bit]
Update rate	10	[ $\mu$ sec] (Max.)

### 3.4.2 実験条件

着地を行う地面の種類は、整地、畑などの軟らかい地面および小石などの障害物が存在する地面を想定した。実験に用いた地面の詳細を Figs. 3.14, 3.15 および Table 3.4 に示す。条件 C においては条件 A の地面上の 1 箇所に小石を模擬した障害物を配置した。Figs. 3.15b, 3.15c のように障害物の頂点が足の地面接触部のなす多角形の内部におさまるよう障害物を配置した。再現性を確認するため提案する足について各条件で 3 回の実験を行った。

### 3.4.3 歩行パターン生成

ロボットの着地動作は ZMP 予見制御を用いて生成した [58, 62]。歩行の安定指標として、Zero-Moment-Point (ZMP) [18, 19] が 2 足ロボットにおいて広く用いられている。ZMP に基づく重心軌道を生成する方法としては、線形倒立



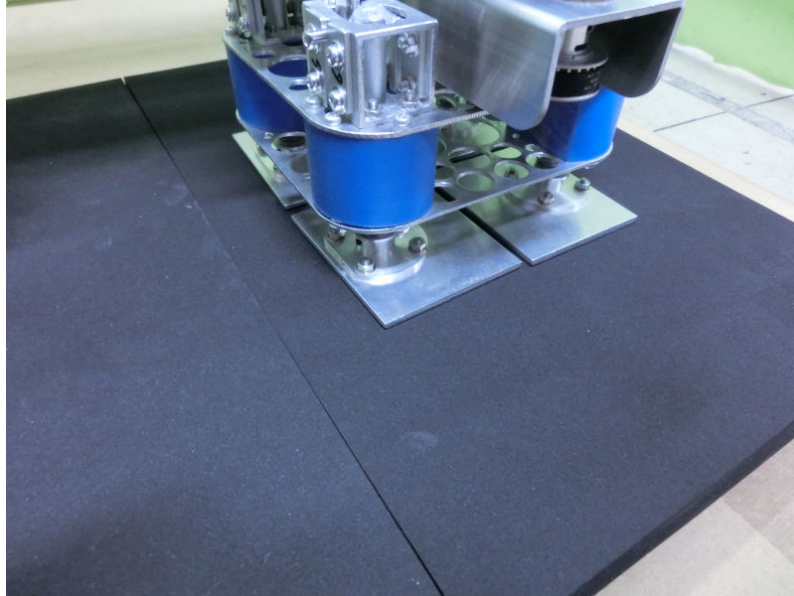
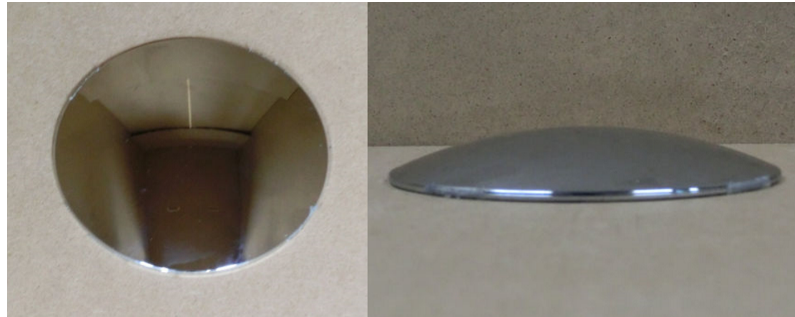


Fig. 3.14 EPDM sponge (Condition B)

Table 3.4 Ground surface conditions

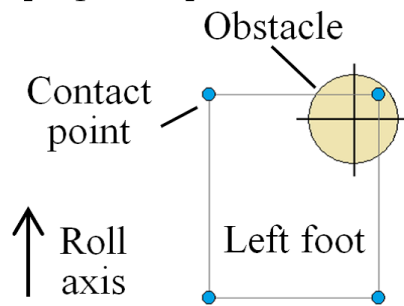
Condition	Material
A	MDF board (flat surface)
B	EPDM sponge (20mm thick, spring constant 13.1 N/mm)
C	Dome-shaped obstacle (80mm diameter, 13mm height)

振子モデルを用いて軌道を解析的に求め、それらの軌道を支持脚や状態に応じて切り替える方法が提案されている [53,54]. しかし、任意に与えることのできる境界条件が少ないため、この方法では歩行開始時や終了時、歩幅調節時に軌道の連続性になるべく保つような工夫が必要となる. 本研究では、動的に安定な目標重心軌道を生成する方法として、予見制御を用いて目標 ZMP 軌道を実現する重心軌道を生成する方法 [55–57] を採用した. この方法では、2 足ロボットの重心移動が Fig. 3.16 のようなテーブル・台車モデルで表されると仮定し、目標 ZMP 軌道を与えるだけで数値的に目標重心軌道を生成することができる. したがって、支持脚切替時や歩行開始時にも生成し

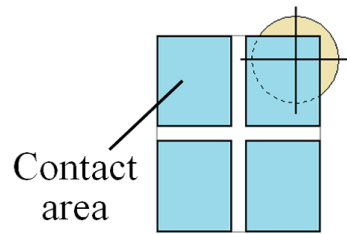


(a) Dome-shaped obstacle (Condition C)

[Top view]



(b) Point contact foot



(c) Proposed flat surface contact foot

Fig. 3.15 Relative position of foot to dome-shaped obstacle

ておいた別々の軌道を接続する必要はなく，容易に連続的な重心軌道を生  
成することができる．本手法を用いて生成した重心軌道を Fig. 3.17 に示す．  
本実験装置は支持脚足首の回転によって遊脚を前に振りだすため，Pitch 軸方  
向の重心軌道のみあれば良い．実験装置の歩行パターンを Fig. 3.18 に示す．

歩行動作および着地制御のサンプリング周期は 10 [ms] とした．コイルバ  
ネの変位を測定するポテンシオメータの基準値は，ロボットを地面から浮  
かせた状態の値とした．ポテンシオメータの電源電圧は 12 [V] とし，ポテン  
シオメータの抵抗値を電圧値に変換し，PC に取り付けた AD ボードを用い  
て変位を取得した．ここで，ポテンシオメータには個体差が確認されたた  
め，電圧から変位への変換係数は予備実験により個別に算出した．また，点  
接触型足においては，ポテンシオメータの回転角度およびねじりバネのバ  
ネ定数，ポテンシオメータ回転軸から接地部までのリンク長から各接地部  
が受ける反力  $f_1 \sim f_1$  を計算し，式 (3.1)～(3.3) のように足が地面から受ける  
床反力およびトルクを算出した．Fig. 3.17, Fig. 3.18 の歩行パターンを用い

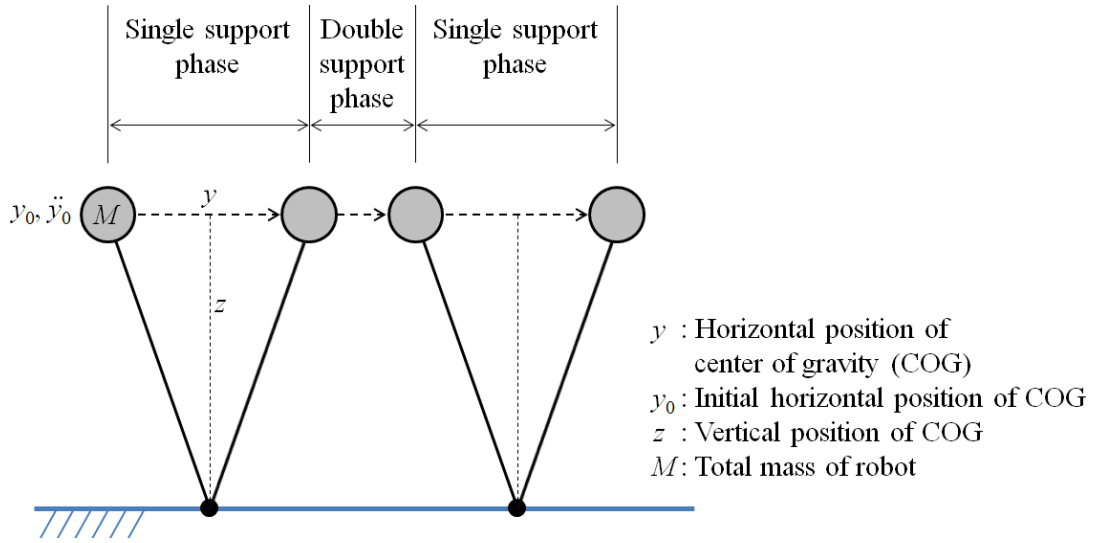


Fig. 3.16 Table-cart model

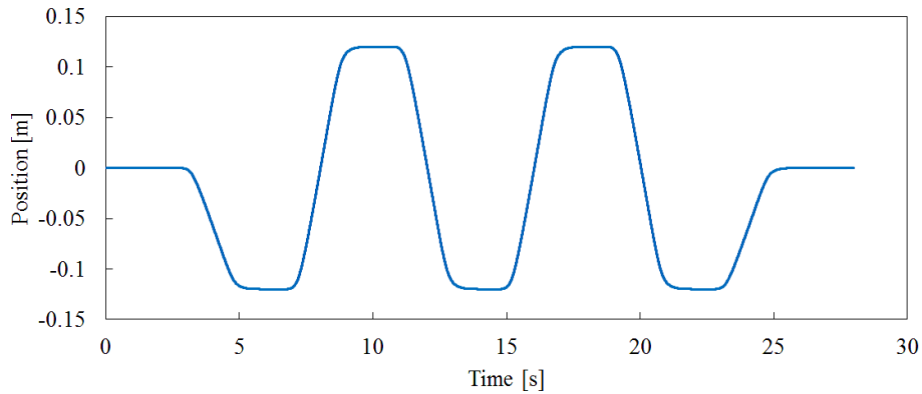


Fig. 3.17 COG trajectory

て右脚支持から1歩目を開始する．不整地での着地制御に用いる目標床反力およびトルクには，整地へ着地した時に足機構によって計測された床反力およびトルクを用いた．着地制御実験に用いた目標床反力およびRoll, Pitch軸周りのトルクの軌道をFigs. 3.19～3.21に示す．目標足高さ $x_{ref}$ は各足の遊脚期の中間点における80mmを最高点とし等速度で上下するよう設定し，足角度 $\phi_{ref}$ は常に $0^\circ$ と設定した．また，着地制御器の各ゲインはTable. 3.5のように設定した．

周囲の安全と転倒によるロボットの破損防止のため，ロボット上方からロープを接続している．ロープは十分な長さを持たせており，ロボットの動作への影響は十分に小さいと考えられる．

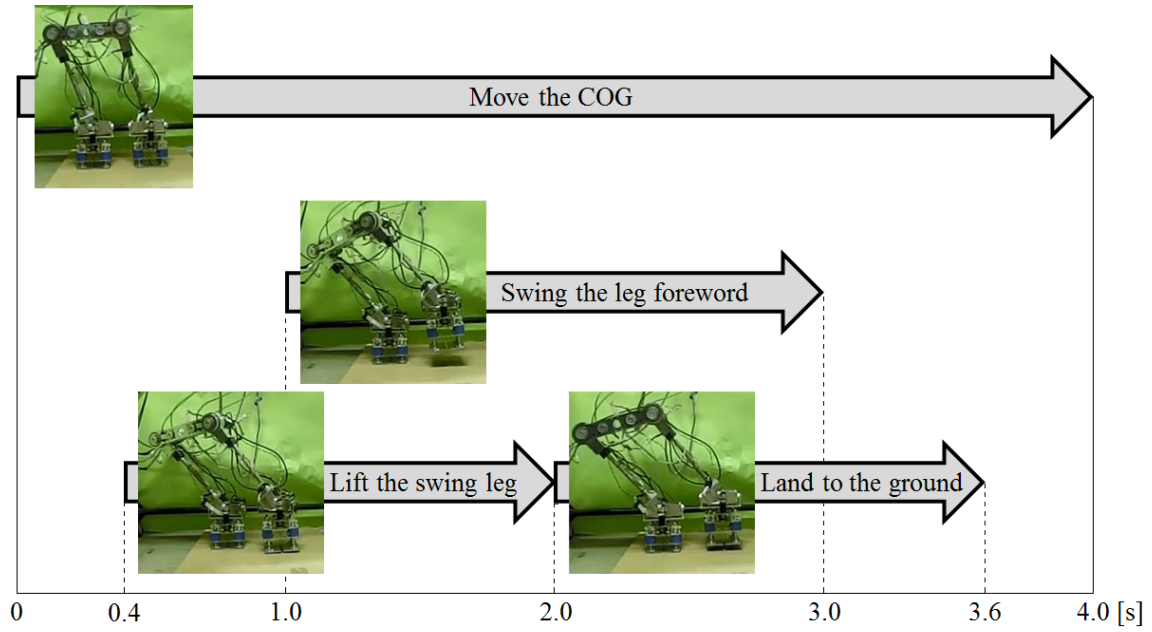


Fig. 3.18 Generated walking pattern

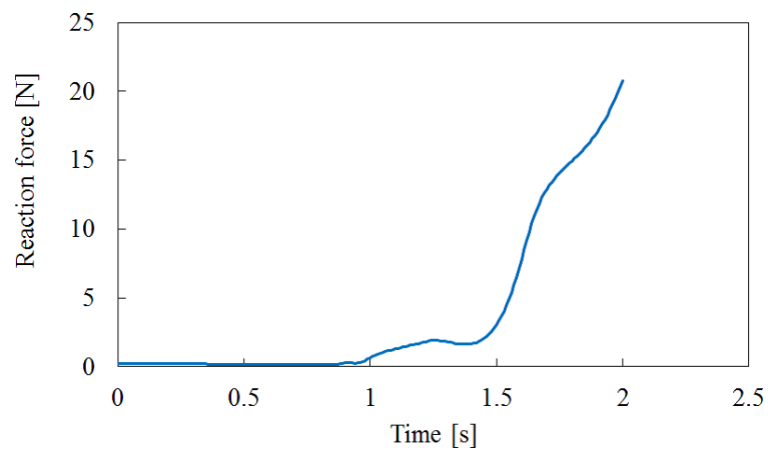


Fig. 3.19 Reference of reaction force

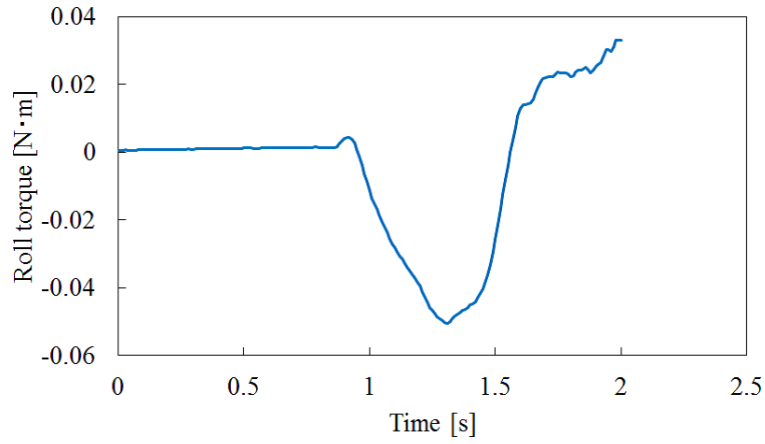


Fig. 3.20 Reference of roll torque

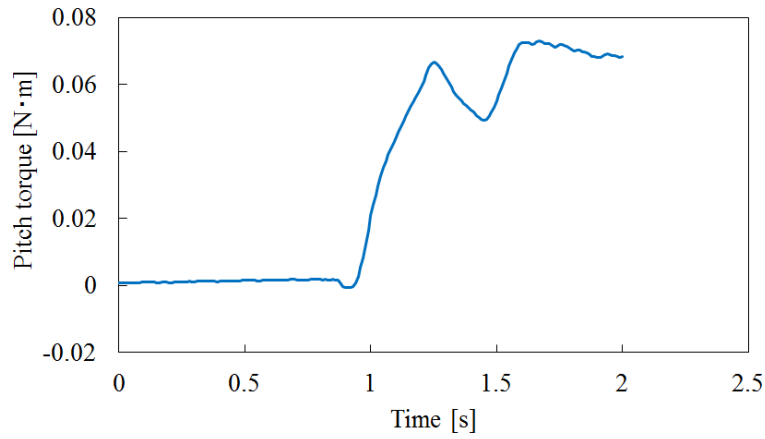


Fig. 3.21 Reference of pitch torque

Table 3.5 Experimental parameters

Controller gain	Value	Unit
$K_{Px}$	$2.0 \times 10^{-4}$	[m/N]
$K_{Ix}$	$1.0 \times 10^{-3}$	[m/Ns]
$K_{P\theta}$	$2.0 \times 10^{-2}$	[rad/Nm]
$K_{I\theta}$	3.0	[rad/Nms]

Figs. 3.22～3.30 に実験結果を示す．結果のグラフは足を上げているときか

ら開始している．床反力およびトルクは，Yaw 軸方向方向成分を垂直力  $f_i (i = 1, 2, 3, 4)$  とし，3.2 節の手法によって算出した．Figs. 3.22～3.24 は条件 A（平板）において着地制御を適用せず歩行を行った結果である．Fig. 3.2 の Type 1 の場合の床反力（Fig. 3.22）が着地前に非零となっているが，これは機構の抵抗によりばねの変位がオフセットされているためである．十分小さな値であるため本実験における影響は小さく，無視できるものとした．本条件における実験によって，提案する足機構を用いた着地には十分な再現性があることを確認した．Figs. 3.23, 3.24 より，Fig. 3.6 の Type 2 を使用した場合，Type 1 を使用した場合に比べ床反力によるトルクが減少している．

Figs. 3.25～3.27 は軟らかい地面を想定した条件 B（スポンジ）において歩行を行った結果である．Table 3.1 に示すように，ロボットの質量は 7.9kg であるため，着地後の最終的な床反力は片足あたり 3.95kgf (38.7N) に収束する．しかし，Type 1 における結果では実験開始後 2 [s] の時点で整地の場合の 40% 程度の床反力しか計測できておらず，その後も上述の値に収束しなかった．これは，接地点が沈み込み，機構の動作が妨げられるため正確な床反力の値を計測できていないためと考えられる．そのため，本条件では Type 1 に対しては着地制御を適用しなかった．一方，Type 2 では条件 A（平板）の場合に近い結果が得られた．このことから，Type 2 が Type 1 に比べ歩行において軟らかい地面の影響を受けにくいと考えられる．

Figs. 3.28～3.30 は障害物が存在する地面を想定した条件 C（ドーム状障害物）において歩行を行った結果である．本条件においては Type 1, 2 それぞれを使用した場合の床反力およびトルクの値に大きな差異があった．Type 1 に着地制御を適用しなかった場合，床反力およびトルクに急峻な変化が見られる．これは足の接地点が障害物上から滑落したためと考える．これに対し，Type 2 を使用した場合には 3 回の実験でいずれも床反力およびトルクが緩やかに変化する結果となった．

上述のように，着地後の最終的な床反力は片足あたり 3.95kgf (38.7N) に収束する．これに対し，着地後の状態を安定させるため，足に備えられたすべてのばねが縮み切ったときの総ばね反力はロボットの質量より小さく設定した．そのため，Figs. 3.22, 3.25 における計測された床反力の最終値は実際の床反力より小さくなっている．Figs. 3.26, 3.27 に示すように，Type 2 を用いて着地制御を適用した場合，地面が軟らかい状態であっても床反力によるトルクは 0 に収束している．Figs. 3.29, 3.30 の障害物が存在する地面においては，障害物上への着地過程において，床反力，Roll 軸および Pitch 軸周りのトルクがそれぞれ 80%，71% および 80% 減少している．また，床反力によ

るトルクが非零値に収束しているのは、地面に乗り上げた状態を維持できている、足が傾いているためである。上述のように、足機構のばね反力はロボットの質量に対して小さく設定されているため、測定される値は実際よりも小さくなっている。

Figs. 3.31～3.33に実験中の写真を示す。Type 1を使用した場合、Fig. 3.31（条件A）においては良好な歩行が行えたが、Fig. 3.32（条件B）では機構が正常に動作しなかった結果転倒し、Fig. 3.33（条件C）では障害物からの滑落が発生している。

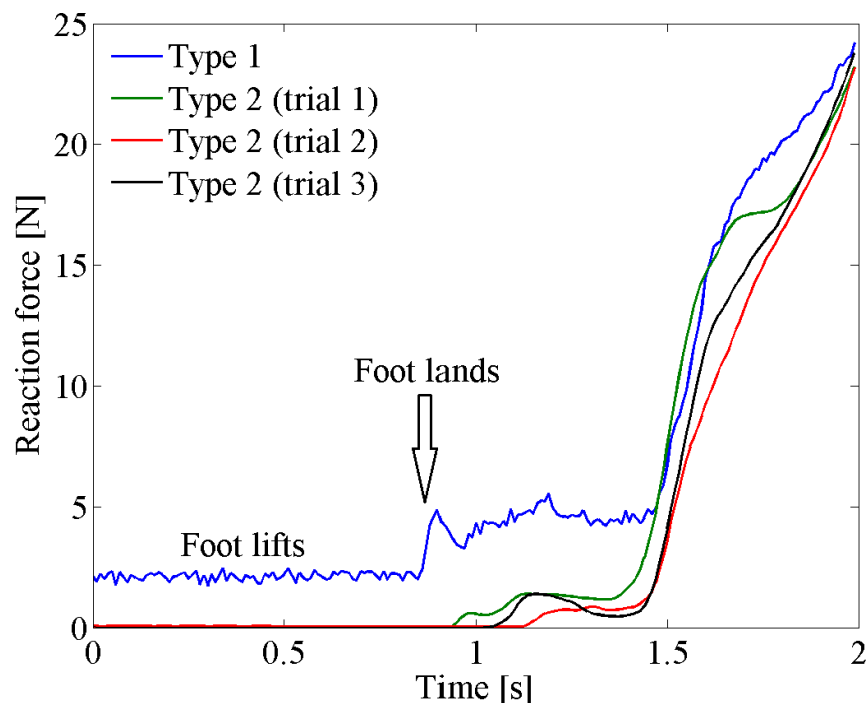


Fig. 3.22 Experimental results (Reaction force) under condition A

### 3.5 結論

2足ロボットの不整地への適応性を向上させ、安定な歩行を実現することを目的とし、以下の結論を得た。

1. 地面との接触状態の不安定性、未知地形への着地による床反力の過不足の問題に対応するためのバネを有する足機構について、実環境に近い条件で発生しうる問題を挙げ、分割された足裏面が面の法線方向に平行運動を行う構造を提案した。

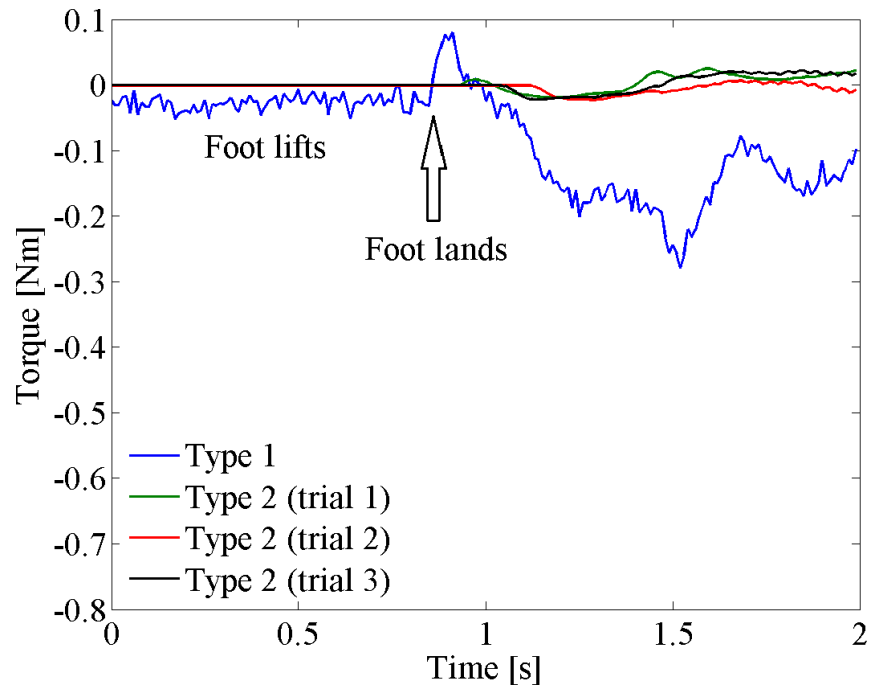


Fig. 3.23 Experimental results (Roll torque) under condition A

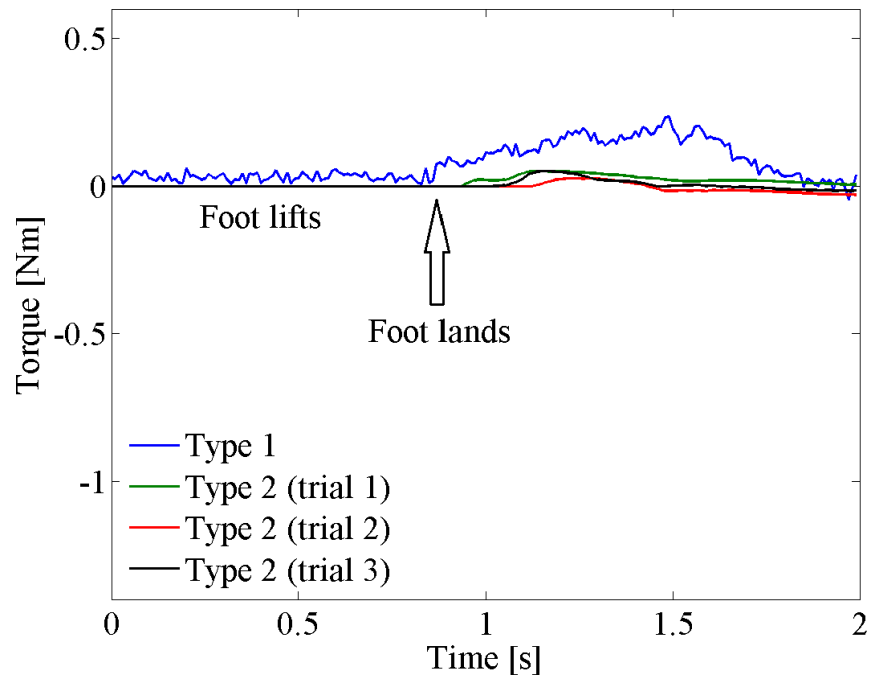


Fig. 3.24 Experimental results (Pitch torque) under condition A



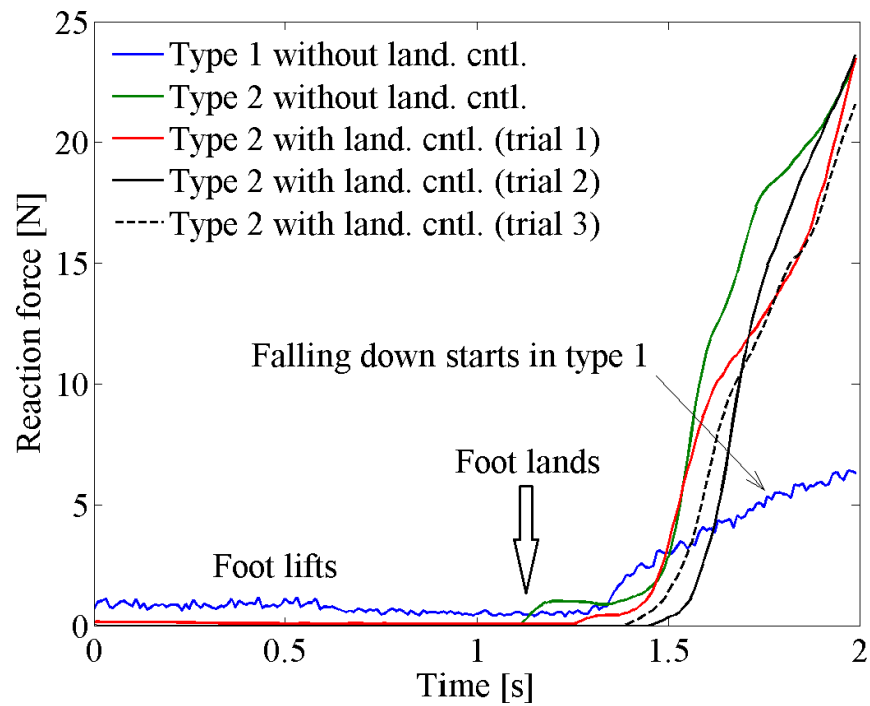


Fig. 3.25 Experimental results (Reaction force) under condition B

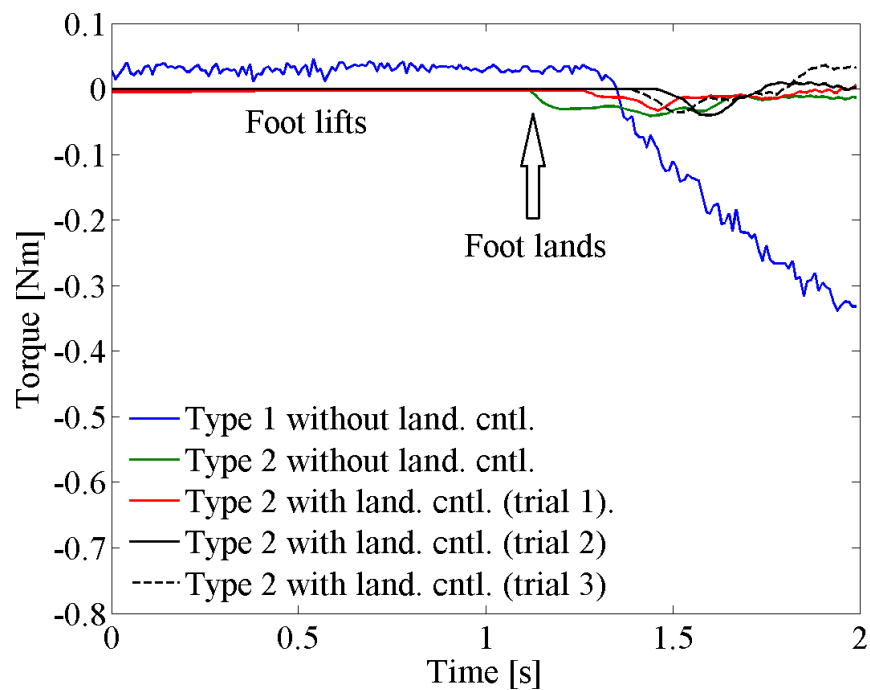


Fig. 3.26 Experimental results (Roll torque) under condition B

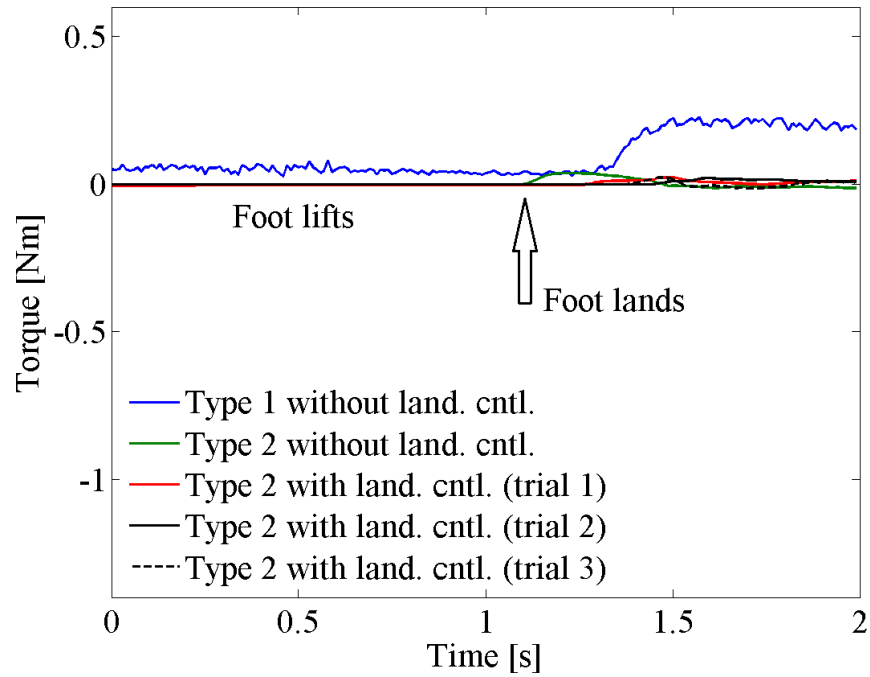


Fig. 3.27 Experimental results (Pitch torque) under condition B

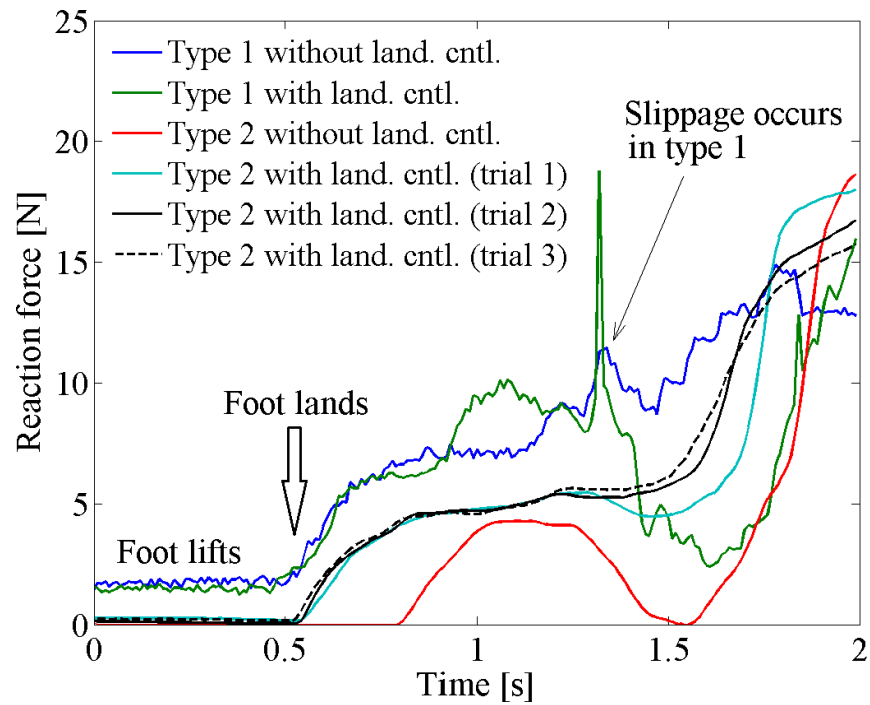


Fig. 3.28 Experimental results (Reaction force) under condition C

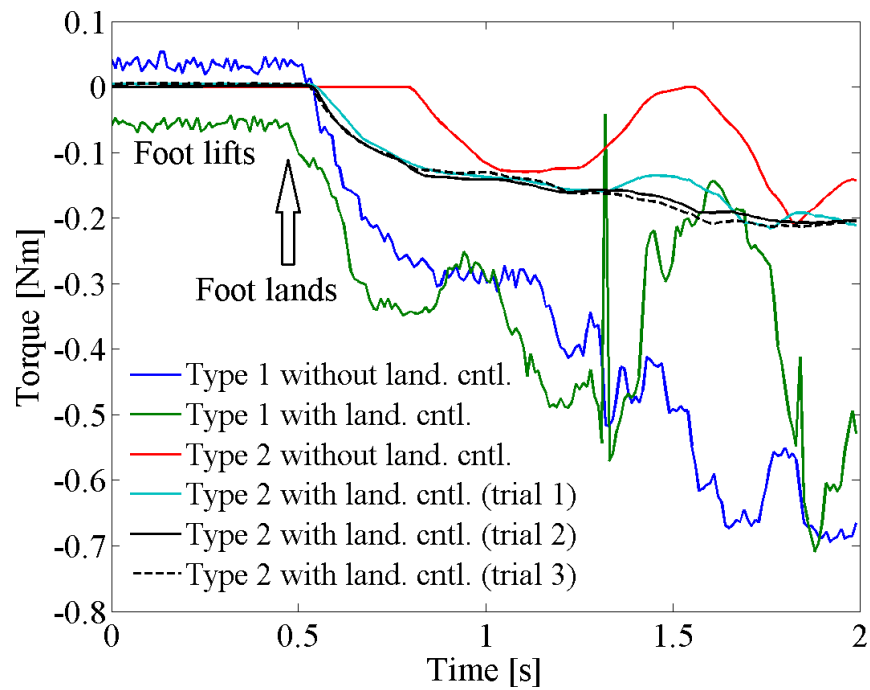


Fig. 3.29 Experimental results (Roll torque) under condition C

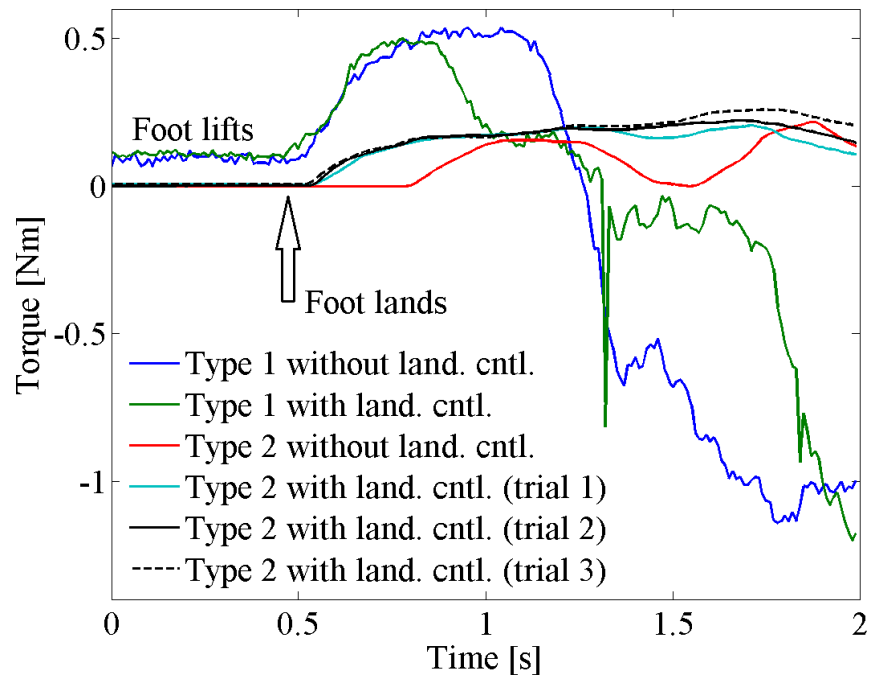
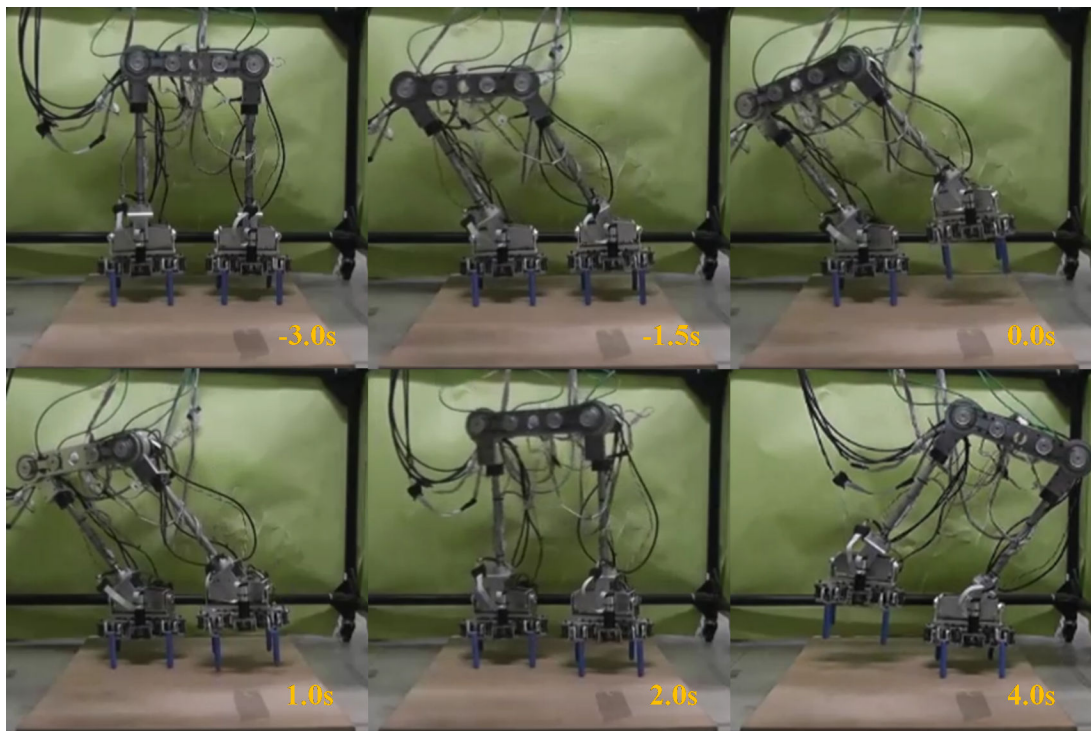
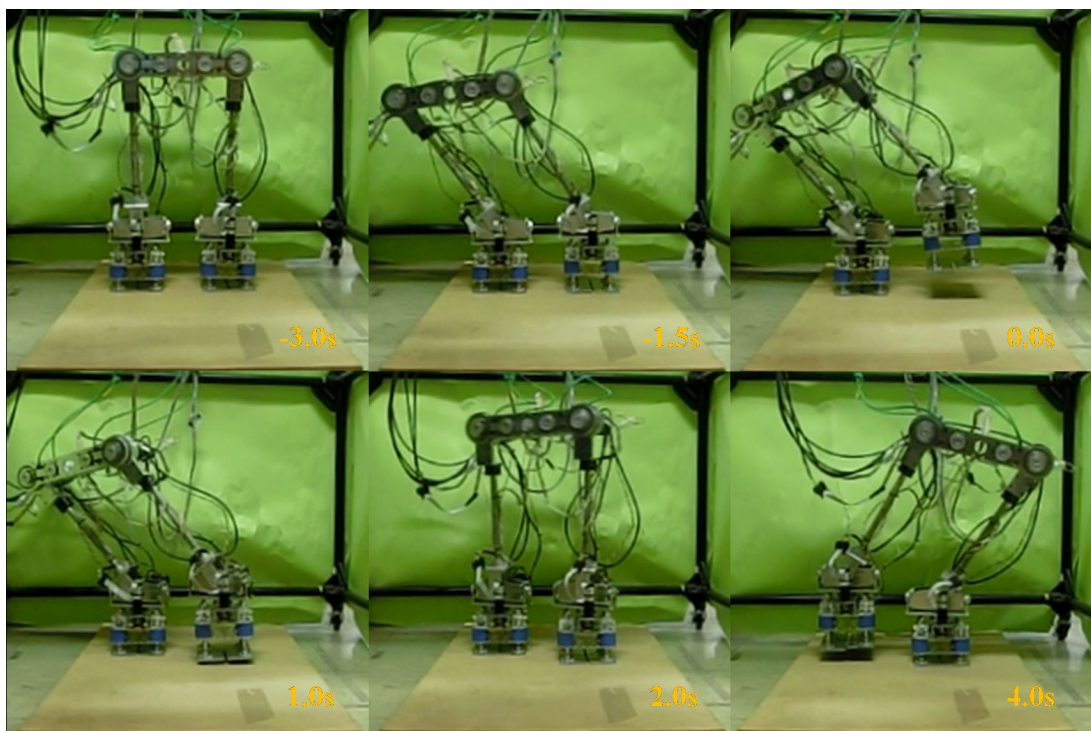


Fig. 3.30 Experimental results (Pitch torque) under condition C



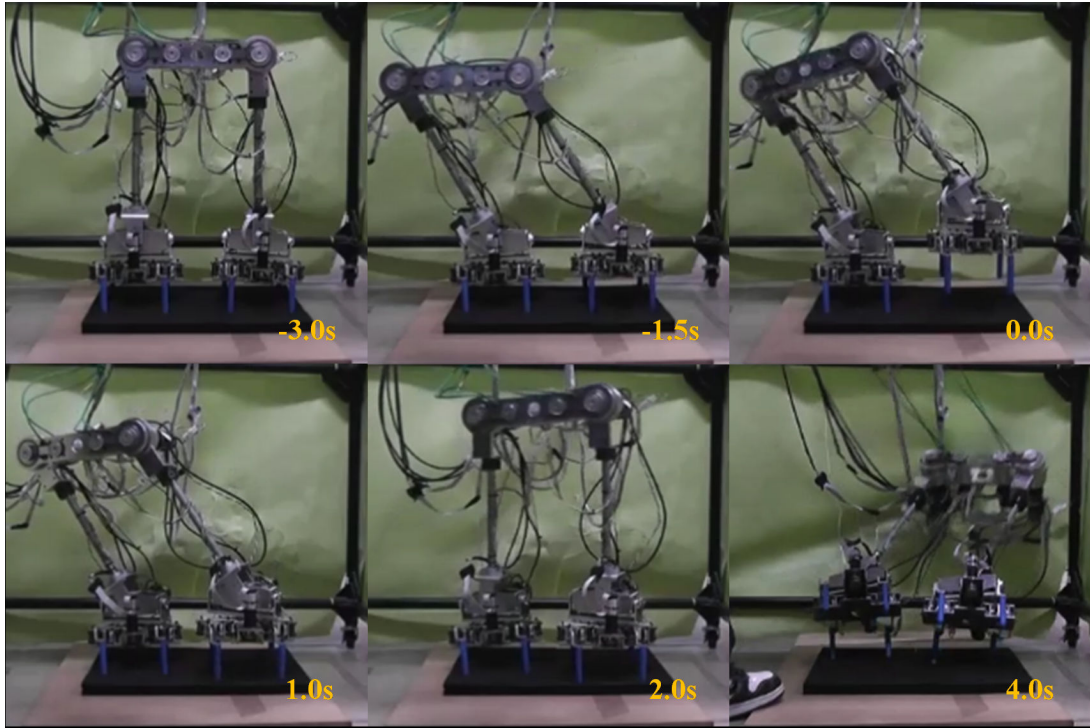
(a) Type 1



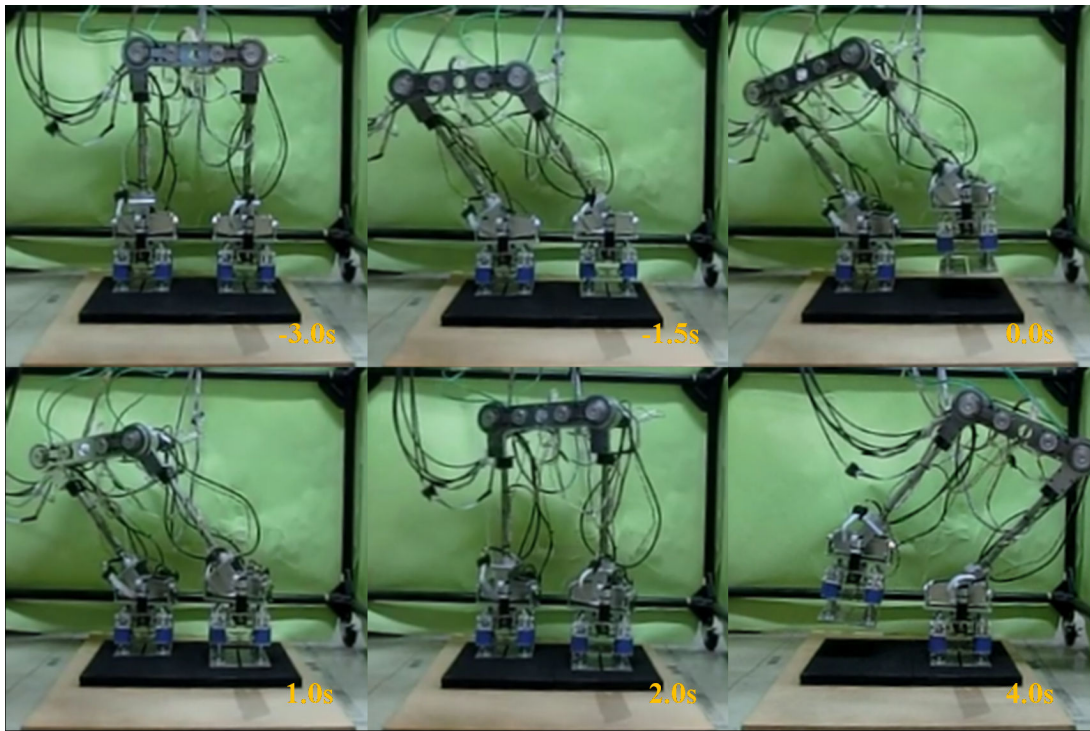
(b) Type 2

Fig. 3.31 Landing control experiments under condition A



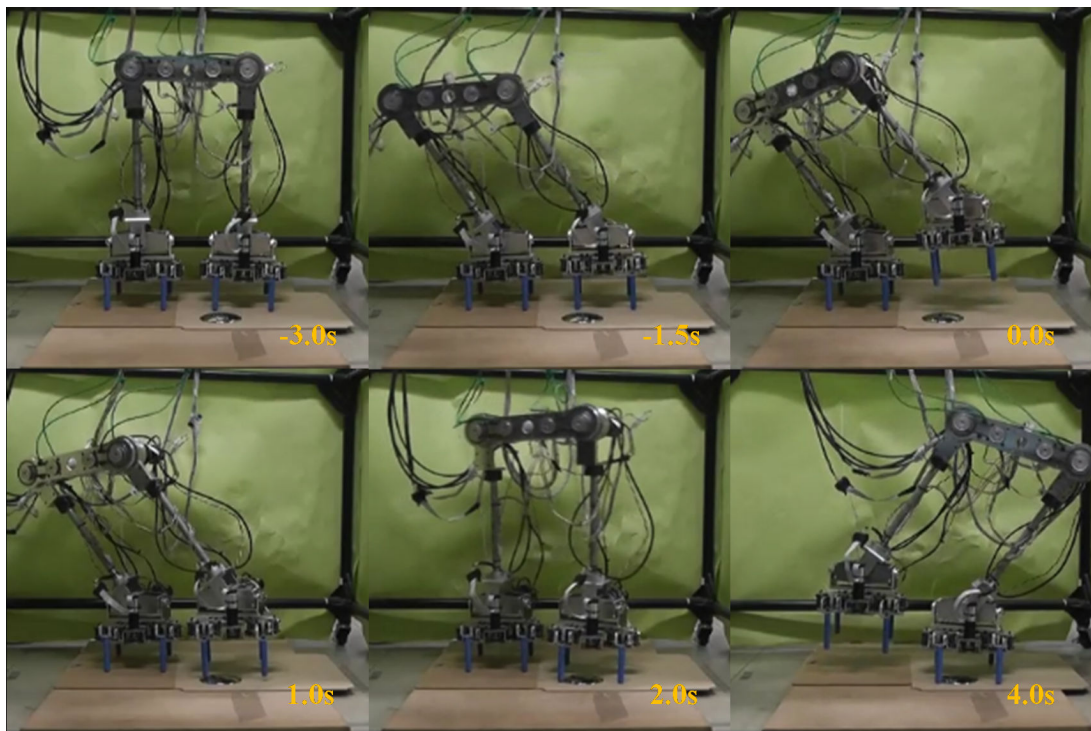


(a) Type 1

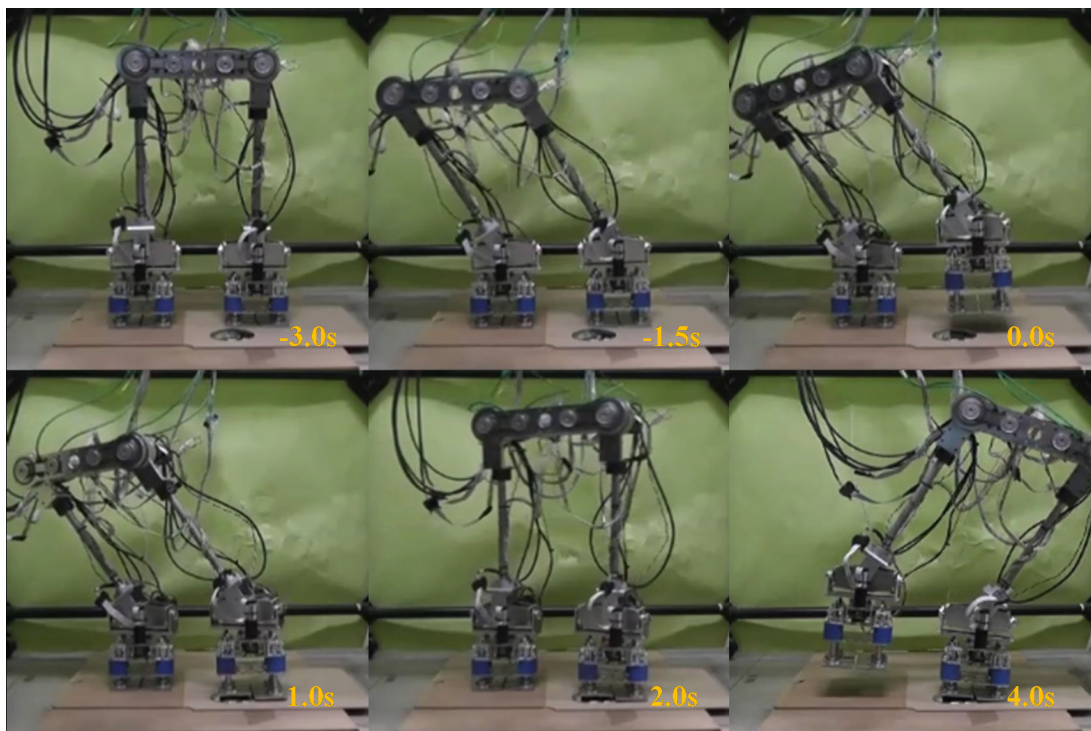


(b) Type 2

Fig. 3.32 Landing control experiments under condition B



(a) Type 1



(b) Type 2

Fig. 3.33 Landing control experiments under condition C

2. 製作した足機構を2足ロボットに実装し、種々の地面に対して着地実験を行い、着地時の衝撃吸収、接地の安定化、床反力およびトルクの推定が可能であることを確認した。また、2足ロボットに着地制御法を適用し、障害物上への着地過程において、床反力が80%、トルクの変動が71%~80%減少したことから、その有効性を確認した。
3. バネを有する点接触型足機構を用いて同様の実験を行い、特性の検証および提案する足機構と比較を行い、従来の足機構が正常に動作しなかった柔らかい地面においても動作可能であった。また、障害物上に着地した際に滑落が起こらなかった、というように性能向上を確認した。

以上から、提案する足機構およびそれを用いた着地制御法は柔らかい地面や障害物が存在する地面への着地において、従来の点接触型足に比べロボットの姿勢安定性向上に寄与しうることが分かった。ただし、障害物の形状や個数など地面の状態によっては異なる結果が得られることが考えられ、不整地適応性の検証にはより広範な条件の検討、実験が必要である。

## 第 4 章

# 垂直・水平動作の分離による省自由度な下肢動作支援装置

### 4.1 緒論

本研究の目的は2足ロボットの産業応用のための機構を提案することであるが、このために重要な項目として不整地安定歩行と低自由度化に着目している。本章では低自由度化のための手法と、その下肢動作支援装置への応用について述べる。

超高齢化社会の到来に伴い労働人口が低下し今後深刻な看護、介護力不足が懸念されている。この問題の解決策の1つとして、下肢機能の低下した高齢者の自立歩行支援や介護者の肉体的負担低減を目的としたパワーアシストスーツ (PAS: Power Assist Suit) が注目されている。本章では、つぎのような方針に基づくPASの設計法を提案する。足を用いた運動において、装着者の自重を支えることが重要であるため、鉛直方向と水平方向の動作を分離し、鉛直方向の動作のみ支持する方式を提案する。これにより、鉛直方向に駆動する直動アクチュエータのみを用いての補償が可能となり、構造を簡単化できる。また、支持脚時においてのみ自重を補償し、遊脚時にはアクチュエータを駆動しない効率的で簡易な制御方式の応用が可能になる。鉛直方向と水平方向の動作を分離するために、本研究ではパンタグラフ機構の応用を提案する。装置を試作し、実験検証を行なった結果について述べる。

### 4.2 機構設計

本研究で提案する、パンタグラフ機構 [63] を用いた脚姿勢に補償力が依存しない自重補償機構の構成を示し、重力補償の原理を説明する。Fig. 4.1 に示すパンタグラフ機構は入出力変位関係が線形の2自由度平面機構である。利用者は本機構を片足ずつ装着する。パンタグラフ機構の条件は、



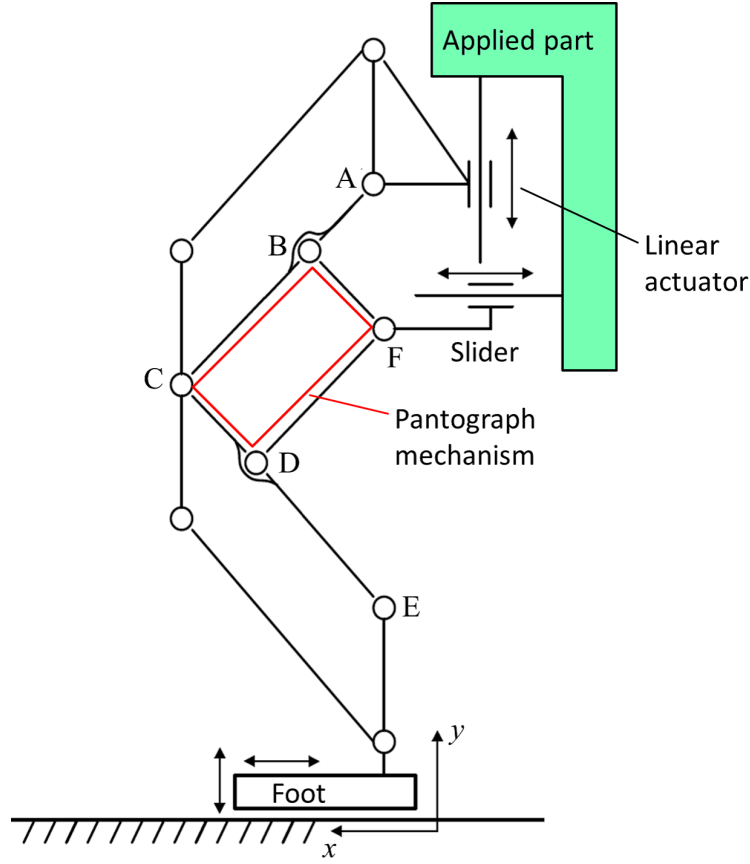


Fig. 4.1 Vertical weight compensation mechanism

$$\triangle ABF \sim \triangle FDE \sim \triangle ACE \quad (4.1)$$

である．機構形状は  $\overline{AB}$ ,  $k_1(= \overline{BC}/\overline{AB})$ ,  $k_2(= \overline{AC}/\overline{CE})$  および  $\angle ABC(= 180^\circ)$  によって定まる． $\angle ABC = 180^\circ$  とし，点 F を固定して点 A を動かした場合，点 A の変位が  $k_1$  倍に拡大(または縮小)されて点 E の変位となる．逆に点 A を固定し点 F を動かした場合，点 E の変位は点 F の変位の

$$R_F = 1 + k_1 \quad (4.2)$$

倍となる．点 E の運動方向は点 A の運動方向に対して  $\angle BAC(= 0^\circ)$  傾いた方向となる．式 (4.1), (4.2) より点 A, F の速度に対する点 E の速度の関係は

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ 0 & 1 + k_1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

となる．このとき，点Eに作用する力  $\begin{bmatrix} F_x & F_y \end{bmatrix}^T$  に対する機構出力（点A, Fに加わる力）は

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_A \\ F_F \end{bmatrix} &= -\mathbf{J}^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ 0 & 1+k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} k_1 F_x \\ -(1+k_1)F_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.4)$$

となる．点Aと点Fを固定して点Eに一定の大きさの荷重を加えた場合，点Aと点Fにはそれぞれその荷重の  $k_1$ ,  $R_F$  倍された一定の荷重が加わる．

自重補償脚機構は，直動部，リンク機構部，足先部の3つから構成される．直動部は直交した2つの直動対偶（Fig. 4.1中のLinear actuatorとSlider）を有する．2つの直動対偶はリンク機構の入力（点A, F）に接続されており，これらの運動差分がパンタグラフ機構を通して足先へ等倍されて出力される．パンタグラフ機構は，入力変位の分離・合成が可能な特性を持つため，この特性を利用し足先で受けた荷重をパンタグラフ機構で水平および鉛直成分に分離することができる．このうち鉛直成分に対してアクチュエータにより補償力を発生させることで脚姿勢に依存しない自重補償を実現する．

リンク機構部はパンタグラフ機構と2つの平行リンクによって構成されているが，使用中に補償力と足先荷重がつり合い，Fig. 4.2のような機構のロックが想定される．ロック時のリンク機構の力のつり合いを考えると，Fig. 4.3に示すように補償力  $f$  が自重  $mg$  とつり合うときにパンタグラフ機構はロックされ， $\overline{AF}$ ,  $\overline{FE}$  は固定状態となり仮想的な節が入っているとみなせる．ここで， $m$  は装着者および装置質量のうち補償力  $f$  とつり合う重量に相当する量である．機構がロックし仮想節が固定された状態になると，2つのスライダ間が固定された節でつながれた両スライダ機構と見なせるようになり，A点を中心にモーメント  $M$  が発生する．モーメント  $M$  は次式のよう求められる．

$$M = f \overline{AF} \cos \theta \quad (4.5)$$

例として，補償力  $f$  を  $10[\text{kgf}]$ ， $\overline{AF}$  の長さを  $0.2[\text{m}]$ ， $\theta$  を  $60[^\circ]$  とすると発生するモーメント  $M = 1\text{kgf} \cdot \text{m}$  となり，装着者には耐え難い大きさである．このモーメントを抑制するために足先部と直動部を平行リンクで接続し，地面

と胴体を水平に保つことを提案する．足先部は，人体の足に装着できる部品を有する．

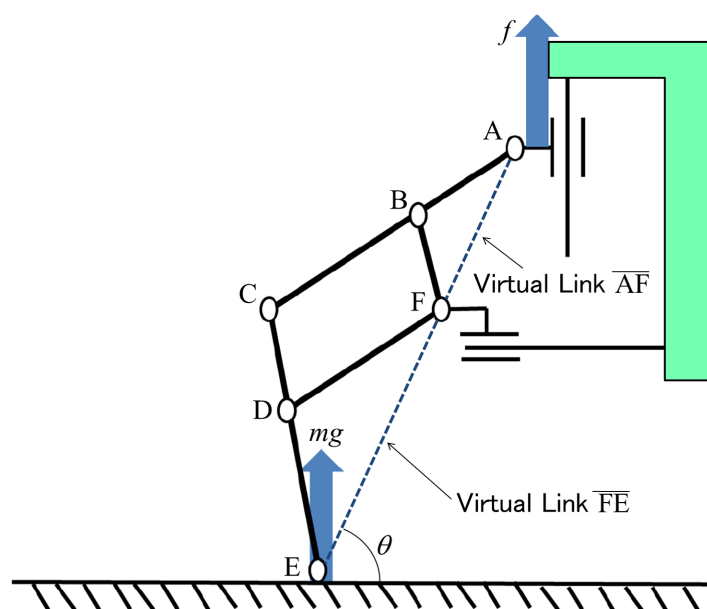


Fig. 4.2 Locked pantograph mechanism when load and compensation force are balanced

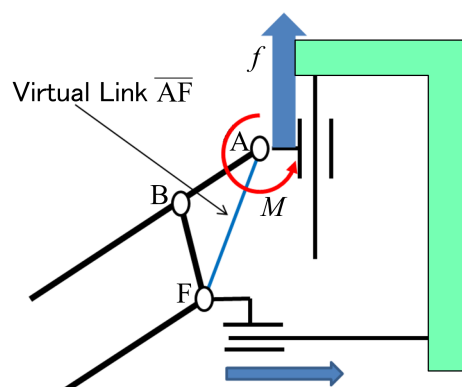


Fig. 4.3 Moment generated in locked mechanism

### 4.3 実験

提案機構の負荷軽減効果を確認するため，装着または非装着状態での活動における人体の筋電位の変化を測定し比較を行った．20～30歳代の健常男性4人を被験者とし，股関節および膝関節の動作に用いられる右脚の大腿直筋直上の皮膚に筋電位センサを取り付け，所定の動作を行ったときの筋電位を測定した．筋電位センサには東京デバイセズ社のIWS940を使用した．センサ出力にはハムフィルタ（60Hz）およびハイパスフィルタ（遮断周波数40Hz）が適用されており，筋電位のスペクトル，帯域密度などを複合し筋電強度として出力される [51]．本実験では各条件における筋電位の大小関係比較を目的とし，筋電位自体の時系列波形などは必要でないため本センサを使用した．さらに，測定される筋電強度は被験者のセンサ装着部の状態に大きく影響されるため，測定データから静止時の値を減じた値を比較に用いた．被験者の身体情報および筋電位センサの仕様を Table 4.1, Table 4.2 に示す．

Table 4.1 Subject profiles

Subject	Height [m]	Weight [kg]
A	1.78	79
B	1.75	70
C	1.59	52
D	1.65	52

Table 4.2 Myoelectric sensor specifications [51]

Specification	Value	Unit
Band	20-250	[Hz]
Resolution	about 20	[ $\mu$ V]
Range	5.375	[mVp-p]

実験装置およびその諸元を Fig. 4.5, Fig. 4.4 および Table 4.4 に示す．Fig. 4.1 のように荷重を水平・鉛直方向へ分離する機能を持つ機構を各脚に備え，

装着者は装置装着部 (Fig. 4.1 中の Arrlied part) 下部の梁に浅く腰掛けた状態で肩, 腰および足を装置に固定する。

PASの実用においては, 装着者の活動の妨げとならないよう, 外形寸法は小さいことが望ましいと考えられる。Fig. 4.1は本機構の機能を簡潔に表したものであるが, 実機で再現した場合に外形寸法が大きくなる。そのため実験装置においてはFig. 4.1と機能的に同等であるが, 部品配置を最適化し外形寸法を小さくした機構を用いた。アクチュエータには人体に対するコンプライアンス特性と軽量, 安価であることを考慮しエアシリンダを用いた。アシスト作動時, パンタグラフ機構の特性により装着者の姿勢によらず鉛直上方向へ一定のアシスト力が働き装着者の重力補償を行う。また, 本機構では装着者の水平方向への足の動作を妨げず自由に動かすことができる。これらの特性により, 単純なON/OFF制御を用いて負荷の大きな割合を占める自重の下肢への影響を軽減することができる。装着者が手に持ったスイッチを屈伸, 段差昇降などの動作に合わせて適宜操作することで左右脚それぞれのアシスト力の有無を任意に切り替えることができる。以下4.3.1小節の起立・着席動作実験では操作を行わずアシスト力が常時加えられている状態とし, 4.3.2小節の階段昇降実験では, 実験の進行に伴う指示に従い手動で操作を行った。

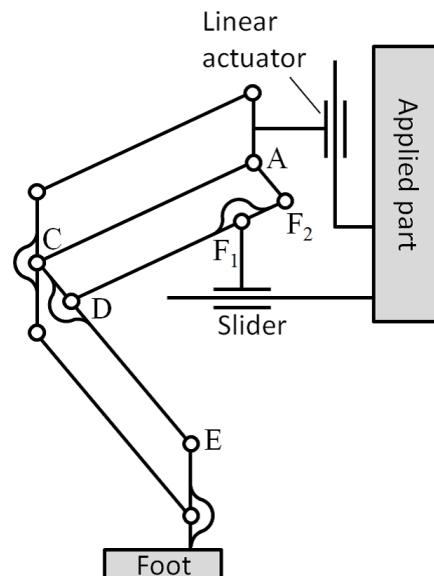


Fig. 4.4 Mechanism of experimental equipment

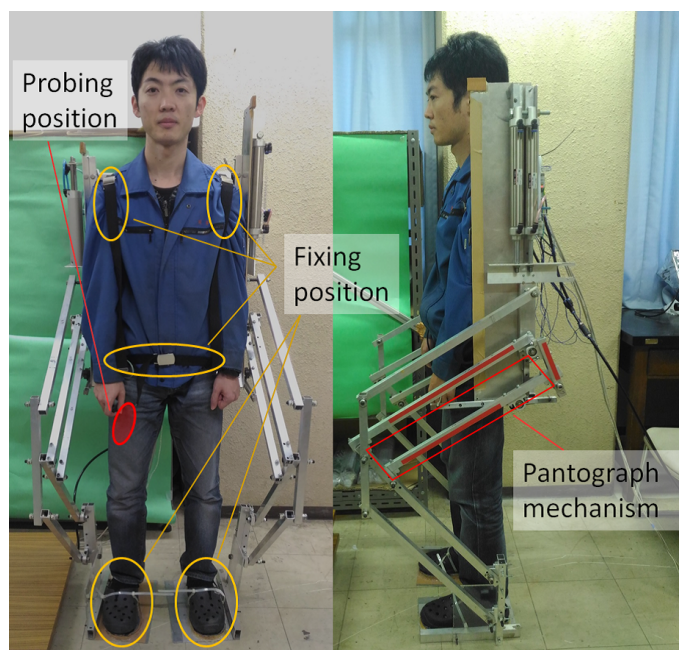


Fig. 4.5 Experimental equipment

#### 4.3.1 椅子からの起立・着席動作実験

人が日常的に行う動作の一つである椅子からの起立・着席動作での評価を行った。被験者は装着または非装着状態において、6秒間隔で発生するビーブ音を動作開始の合図として椅子からの起立・着席動作を各4回行った。なお、各回の間隔も6秒であり、これらは動作後の体の揺れが次の動作に影響を与えないために十分な時間として経験的に決定した。動作は被験者それぞれの自然な速度で行った。PASのアシスト力は仕様上の最大である片足あたり20kgfに設定し、実験中はアシスト力の操作を行わず、起立、着席およびそれらの中間姿勢のすべての状態において常にアシスト力を与えた。このとき装置の総アシスト力は40kgfであり、装置の重量により装着者へ加わる荷重と装着者の体重の和より小さい。さらに、アシスト力とアシスト効果の関係を確認するため、被験者Dについてアシスト力を片足あたり10kgfに変化させ同様の実験を行った。実験装置の構成をFig. 4.6, 実験の様子をFig. 4.7に示す。

Table 4.3 Mechanical Components

Solenoid bulb		
Vender	SMC Corporation	
Model Number	SY5220-C6-F2	
Working temperature range	-10 to 50	[°C]
Working pressure range	0.1 to 0.7	[MPa]
Maximum flow rate	500.5	[l/min (normal)]
Air cylinder (Left)		
Vender	SMC Corporation	
Model Number	CM2E32-200	
Tube inner diameter	32	[mm]
Rod diameter	10	[mm]
Stroke	200	[mm]
Maximum working pressure	1.0	[MPa]
Air cylinder (Right)		
Vender	SMC Corporation	
Model Number	CG1BN32-200Z	
Tube inner diameter	32	[mm]
Rod diameter	10	[mm]
Stroke	200	[mm]
Maximum working pressure	1.0	[MPa]

Table 4.4 Mechanical parameters

Parameter	Value	Unit
Overall height	1.78 (Max)	[m]
Sagital length	0.64 (Max)	[m]
Frontal width	0.64	[m]
Weight	12.5	[kg]
Seat height	0.4-0.98	[m]
Step size	0.7 (Max)	[m]

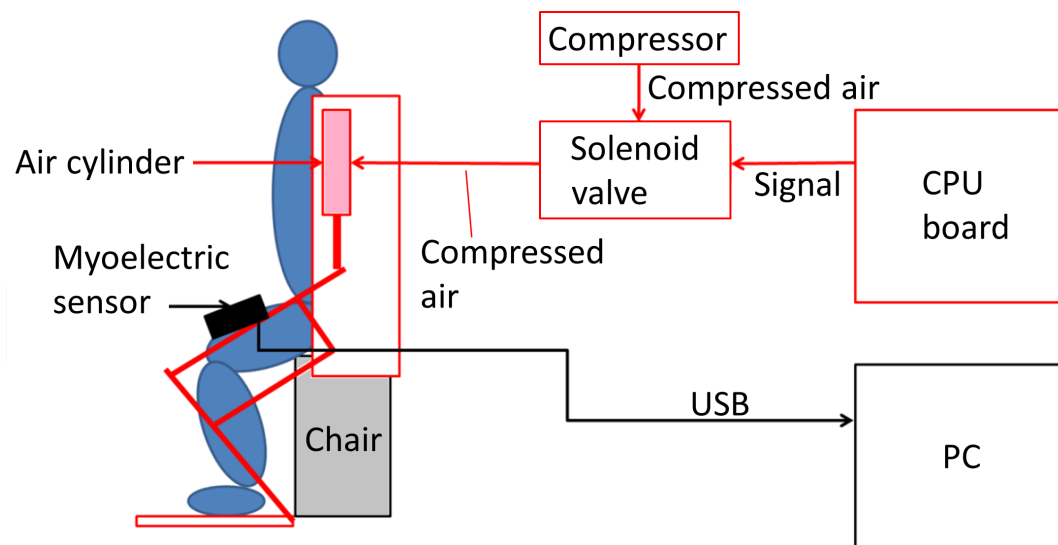


Fig. 4.6 Equipment configuration for rising and sitting down experiment



Fig. 4.7 Photo of rising and sitting down experiment

被験者Bの筋電図を Fig. 4.8 に示す．また，各被験者の各回の立ち上がり



動作における筋電位の最大値の平均（以下ピーク値），実験中の筋電位の平均値および分散を Figs. 4.9a-4.9c に示す． 本装置は自重による負荷の軽

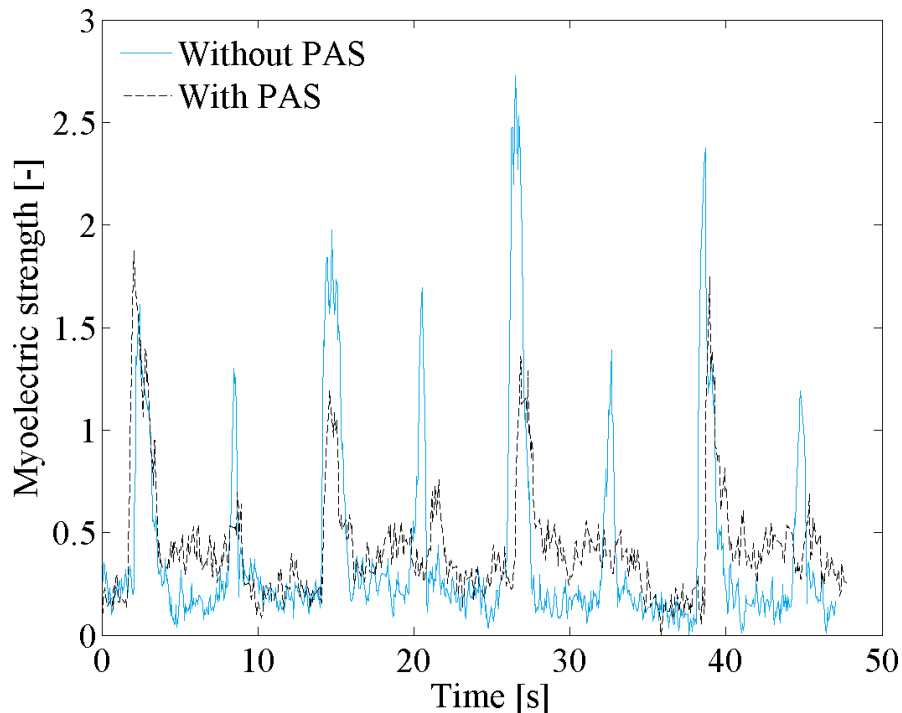
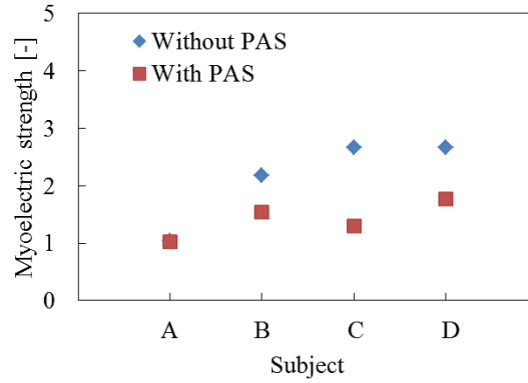
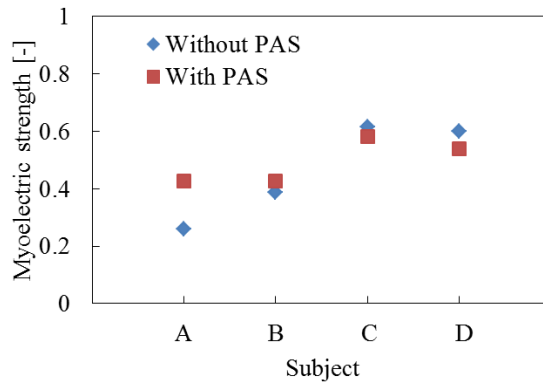


Fig. 4.8 Example of results in rising and sitting down experiment

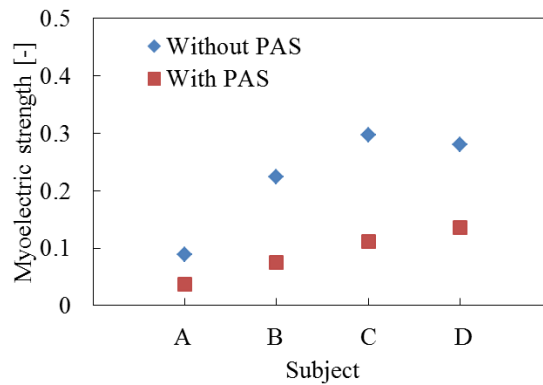
減を目的としている．パンタグラフ機構により水平方向の脚動作に干渉することなく，装着者の鉛直方向動作にもアクチュエータのコンプライアンス特性により制御を行わず追従可能である．エアシリンダはアシスト力を加える際にエネルギーを消費し，その後は継続してアシストを行ってもエネルギーを消費しない．このことから，指示脚期と遊脚期の入れ替わりの際にのみアクチュエータの操作を行う使用方法を想定している．本実験において特にアシスト力が必要となるのは，負荷が大きい起立開始直後および着席直前であるが，想定する使用方法に則した評価を行うため，動作の全区間に対して傾向を確認した．一例としてある被験者の筋電図を Fig. 4.8 に示す．装着時におけるピーク値 (Fig. 4.9a) について，被験者 A を除くと非装着時から 29%~51% 減少していることから，PAS により立ち上がりに必要な筋力が軽減されたと考えられる．なお，被験者 A の場合は 1.5% 減であり，ほぼ変化が見られない．平均値 (Fig. 4.9b) においては各被験者とも装着・非装着時で 10% 減~65% 増となっており，また，Fig. 4.8 の筋電図のように，PAS 装着時において非装着時に比べ筋電位が増加した区間があり，起立・着



(a) Peak values of results



(b) Averages of results



(c) Variances of results

Fig. 4.9 Experimental results in rising and sitting down experiment

席動作において負荷が小さい区間でのPAS装着による負担軽減効果は確認できない。分散 (Fig. 4.9c) が67%~51%減少していることは、筋力の変動が

少なくなり，身体的負担軽減されたことを示していると考えられる．ピーク値が減少した被験者について，平均値には大きな変化がなかったことは，装置が人体の可動域に完全に対応したものではなく，被験者が装着時に動作を制限される（以下，動作制限と呼ぶ）ためと考えられる．これに関連して，被験者Aにおいては他と傾向の異なる結果が得られたことについて，Table 4.1 に示すように身長体重ともに最も大きく，体格が装置に適合していないと考えられる．

被験者Dについて，アシスト力を変化させた実験の結果を Fig. 4.10 および Fig. 4.11 に示す．アシスト力が20kgfの場合，10kgfの場合に比べピーク値，平均値および分散のいずれの値も42, 29, 65%減少しているが，うち平均値は比較的变化が小さい．Figs. 4.9a~4.9cのPAS装着の有無での筋電位変化に類似する結果であることから，より強いアシスト力を加えることで，一層の負担軽減が期待できる．

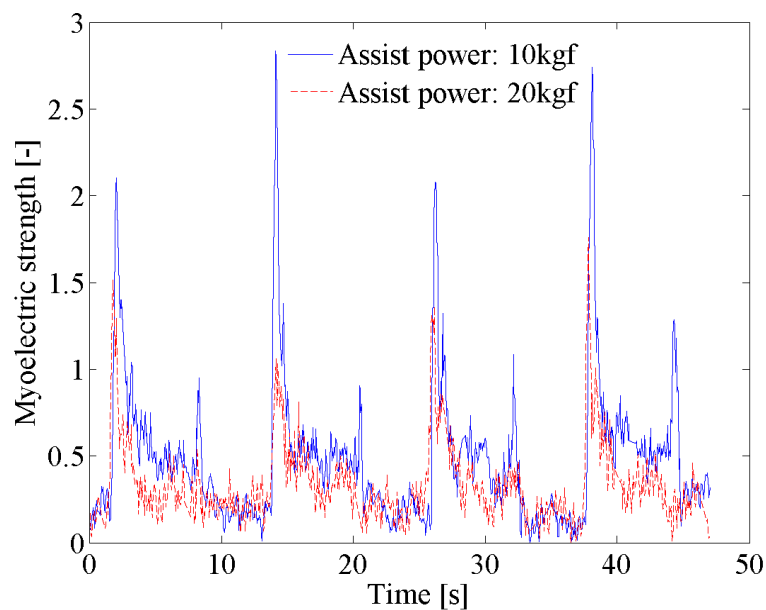


Fig. 4.10 Effect of assist power on myoelectric strength in rising and sitting down experiment

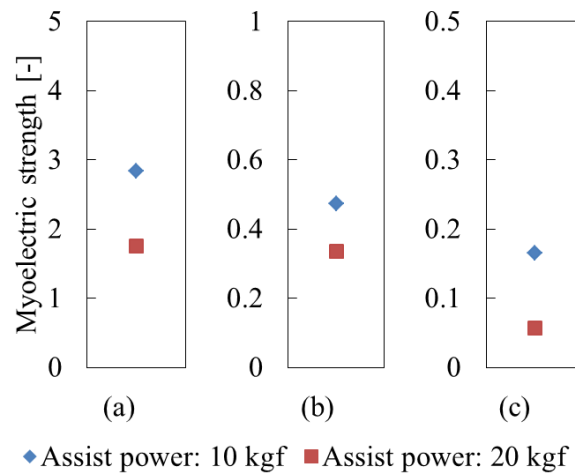


Fig. 4.11 Comparison of the effect of assist force in rising and sitting down experiment ((a): Maximum values, (b): Averages, (c): Variances)

#### 4.3.2 階段昇降実験

人が日常的に行う動作の一つである階段の昇降動作での評価を行った．実験には安全のため一般の施設に設置される階段と同程度 [64] の高さ 180mm の踏み台を用いて階段を模擬し，それに合わせた勾配の手すりを設置した．

被験者は装着または非装着状態において 8 秒間隔で発生するビープ音に合わせて下記動作を順に各 4 回行った．括弧内は装着時に行うアシスト力の操作である．

- |                |                |
|----------------|----------------|
| 1. 右アシスト力を Off | 3. 右アシスト力を Off |
| 右足を踏み台にかける     | 右足を踏み台から降ろす    |
| 右アシスト力を On     | 右アシスト力を On     |
| 2. 左アシスト力を Off | 4. 左アシスト力を Off |
| 右足を使い踏み台を上がる   | 踏み台から降りる       |
| 左アシスト力を On     | 左アシスト力を On     |

なお，踏み台を上がる動作は，運搬作業で負荷を受ける状態を想定し 4 秒の時間をかけて行った．各動作の間隔は，動作後の体の揺れが次の動作に影響を与えないために十分な時間として経験的に決定した．また，手すりは安全のため設置したものであり，昇降動作における脚力の補助には使用しないようにした．装置のアシスト力は片足あたり 10kgf に設定した．被験者は

足を地面から離すとき各脚のアシスト力を無し (Off) とし、それ以外の時は与えるもの (On) とした。アシスト力の有無の切り替えは装着者が手に持ったスイッチを用いて行った。なお、本システムではスイッチ操作から反応まで 2ms, 電磁弁の遅延は約 22ms であり、踏み台昇降動作周期に比較して十分に短いと考えられる。さらに、アシスト力とアシスト効果の関係を確認するため、被験者 D についてアシスト力を片足あたり 20kgf に変化させ同様の実験を行った。実験装置の構成を Fig. 4.12, 実験の様子を Fig. 4.13 に示す。なお、Fig. 4.13 中の各番号は上述の実験動作に対応している。

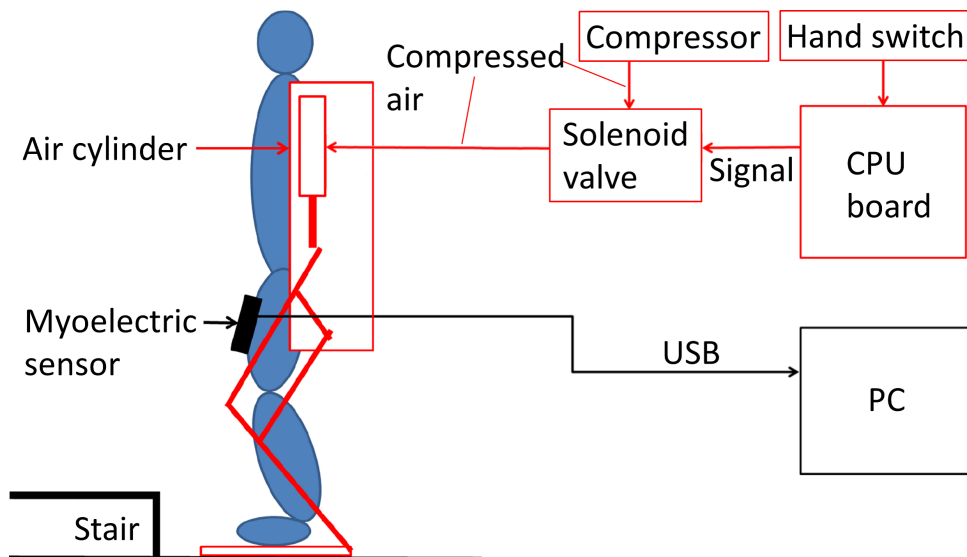


Fig. 4.12 Equipment configuration for stair stepping experiment



(a) Step 1



(b) Step 2



(c) Step 3



(d) Step 4

Fig. 4.13 Photo of stair stepping experiment

被験者Bの筋電図およびブザー，アシスト状態のタイミングチャートをFig. 4.14に示す．また，各被験者の各回の昇段動作における筋電位のピー

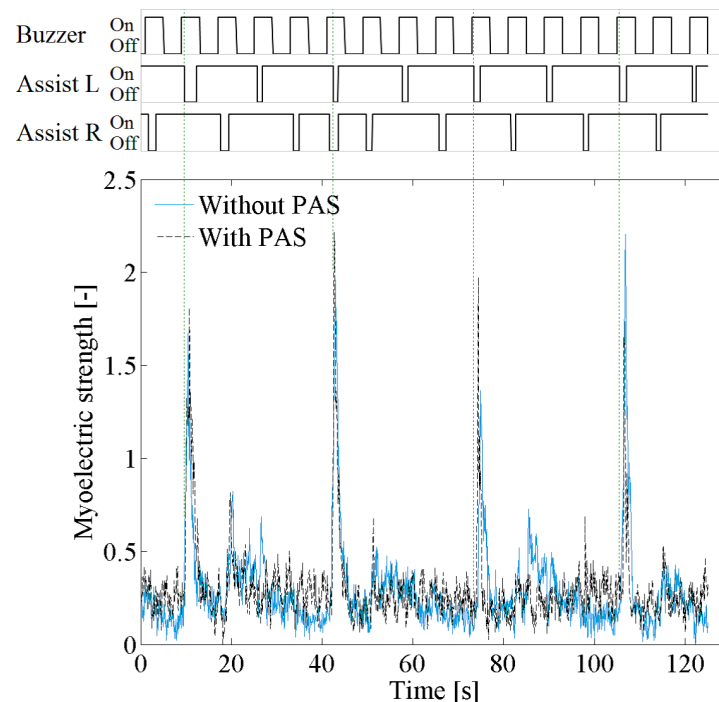
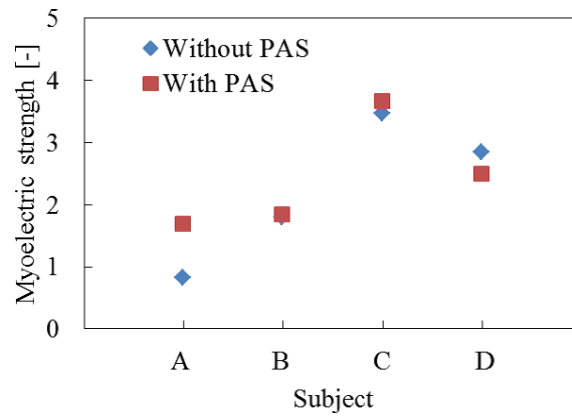


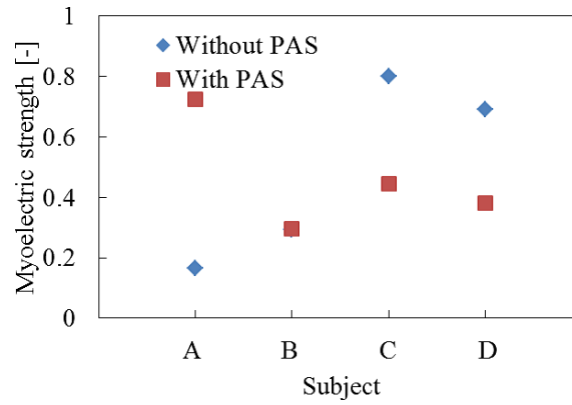
Fig. 4.14 Example of results in rising and sitting down experiment

ク値，実験中の筋電位の平均値および分散をFigs. 4.15a～4.15cに示す．Fig. 4.14において，45秒あたりで誤操作により右側のアシストが無くなっている．そのため，繰り返し動作のうち誤操作が発生した回の結果を除いて各指標の算出を行った．なお，実験結果は4.3.1小節と同様の処理を行い比較に用いた．被験者Aの結果は他の被験者と大きく異なる傾向を示しており，アシスト効果の評価には用いないこととした．これについては後述する．筋電位のピーク値（Fig. 4.15a）について，装着・非装着時の変化が被験者によって異なる結果となったが，装着時の被装着時に対する変化率はいずれも12%減～2.2%増と小さい．Fig. 4.14の筋電図のように，PASを装着したことで非装着時に比べ筋電位が増加した区間があるが，被験者のうち2名は平均値は装着時に約45%減少している（Fig. 4.15bのSubject C, D）．この2名について，ピーク値（Fig. 4.15a）の減少は見られなかったが，平均値が大きく減少しており，負荷が軽減されていた可能性がある．また，分散（Fig. 4.15c）は28%減～18%増と3.1節の起立・着席動作実験に比べ変化が小さい．これらのことから階段昇降動作において大きな負荷がかかる過程のPAS装

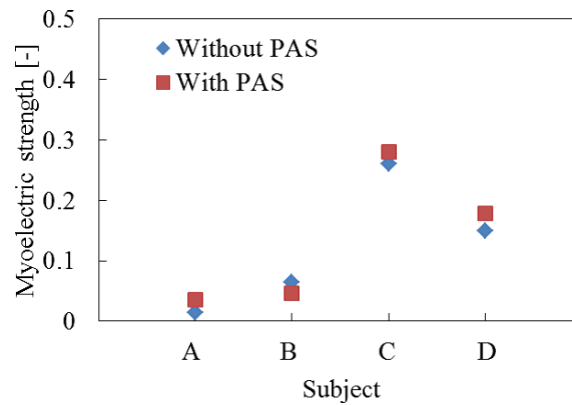




(a) Peak values of results



(b) Averages of results



(c) Variances of results

Fig. 4.15 Experimental results in stair stepping experiment

着による負担軽減効果は確認できないが、当該動作の過程全部を見た場合、身体的負担軽減に寄与すると考えられる。4人の被験者における最大値の変



化に一樣の傾向が見られず、平均値においては被験者 A が他被験者と大きく異なる傾向を示している。これらは、4.3.1 小節の結果と同様に PAS の装着者への動作制限によるが、より複雑な動作のため PAS への適合の差が顕著になったと考えられる。

さらに、間欠的に作動するブザーに対してアシスト力の操作および身体の動作を行うため、それぞれが最適なタイミングで行われていない可能性がある。本実験においては、ブザー音を聞いてからアシスト力を操作し動作するよう段階を踏んでいるため、上記の影響は小さいと考えられる。ただし、例示した被験者の場合は Fig. 4.14 の PAS 装着時（赤点線）の踏み台を上げる動作（3.2.1 小節の動作 2）において、1, 2 度目に踏み台を上げる際（Fig. 4.14 の 9, 45 秒付近）、Buzzer が On になった後、Assist L が Off になるより早い時間から筋電位の上昇が見られる。このことからアシスト力を操作する以前から動作を開始していることがわかる。また、先述のように 2 度目の 45 秒付近では操作の誤りも含まれる。この結果、ピーク部分の幅が大きく大きな筋電位が長い期間発生している。これに対し、3, 4 度目では Assist L が Off になった後に筋電位が上昇しており、アシスト力の操作後に踏み台を上げる動作が行われたことでピーク部分の幅が小さく大きな筋電位の発生期間は短くなっている。このことから、アシスト力の有無を切り替えるタイミングにより装着者の負荷に影響があると考えられる。

被験者 D について、アシスト力を変化させた実験の結果を Fig. 4.16 および Fig. 4.17 に示す。アシスト力が 20kgf の場合、10kgf の場合に比べ平均値が 36% 減少しているが、ピーク値および分散の変化はそれぞれ 1.7% 減、10% 増と小さい。Figs. 4.15a~4.15c の PAS 装着の有無では最大値にも変化があったことから、階段昇降動作においては重力補償のアシスト力のある程度以上に増加させてもそれに応じた負担軽減効果が得られない可能性がある。

## 4.4 結論

パンタグラフを用いた脚姿勢に依存しない重力補償機構の提案および装着者の負担軽減効果の実験的検証を行い、以下の結論を得た。

1. 主な日常動作である椅子からの起立および着席動作の実験では装着者の筋電位の最大値および分散が減少し、平均値は同程度であった。最大値の減少は動作に必要な筋力が減少していることを示している。分散の減少については、起立・着席動作では動作範囲が大きいため

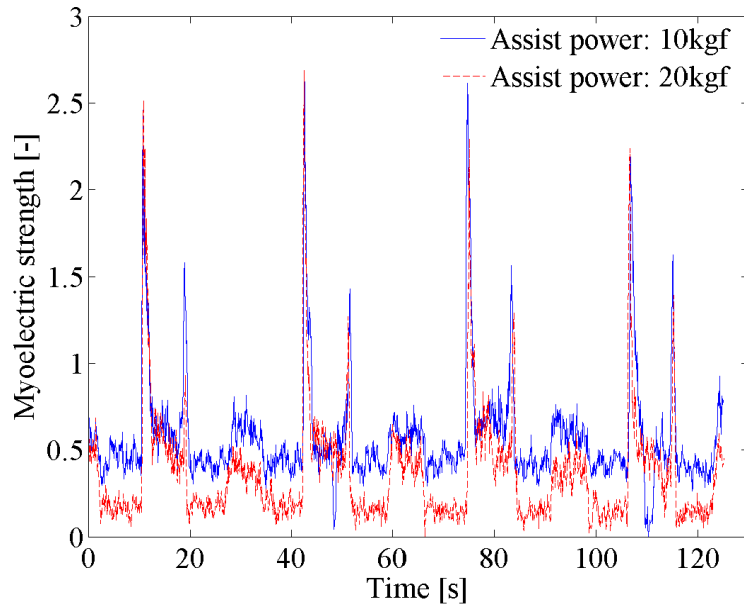


Fig. 4.16 Effect of assist power on myoelectric strength in stair stepping experiment

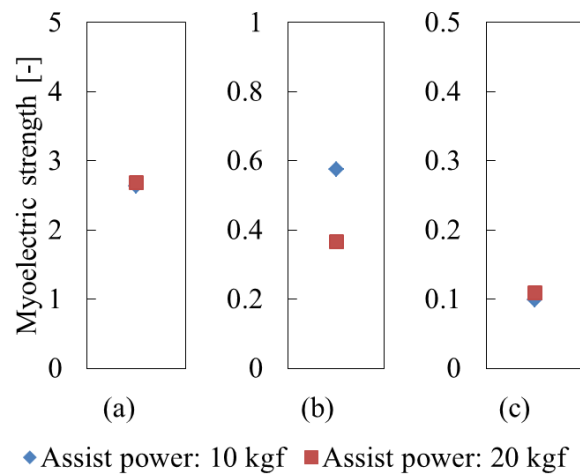


Fig. 4.17 Comparison of the effect of assist force in stair stepping experiment ((a): Maximum values, (b): Averages, (c): Variances)

筋力の変動も大きいですが、この変動が低減されていると考えられる。

2. 階段昇降動作の実験では筋電位の平均値が減少し、分散は同程度であった。また、最大値については被験者ごとに異なる傾向となった。最大値の傾向の違いは被験者体格の装置への適合の程度が大きく影響

しており、平均値の減少については、階段昇降動作では片足支持期の支持脚の負担が大きく、それが低減されていると考えられる。

3. 1, 2から、提案機構を用いたPASによる自重補償は装着者の下肢動作による負荷の軽減に有効であると考えられる。

また、装置寸法と被験者体格の関係について、パンタグラフ機構の入力と出力の関係は理論上は各リンクの相対角度によらないが、実験装置においては機構の剛性や摩擦による影響があると考えられる。上記関係の調査に当たっては、装置設計の再考を含めた検討が必要である。

## 第5章

# 結論と今後の展望

### 5.1 結論

現在主にエンターテインメント分野で利用されている2足ロボットの基本的な問題である不整地での安定歩行と低自由度化に関する提案を行い，応用範囲を拡大するため，2足ロボットの不整地適応性を向上させるための足構造と制御法を提案し，また，低自由度の自重補償機構を提案しPASへの応用を試みた．

前者(3章)については2足ロボットの不整地への適応性を向上させ，安定な歩行を実現することを目的とし，以下の結論を得た．

1. 地面との接触状態の不安定性，未知地形への着地による床反力の過不足の問題に対応するためのバネを有する足機構について，実環境に近い条件で発生しうる問題を挙げ，新しい構造を提案した．
2. 製作した足機構を2足ロボットに実装し，種々の地面に対して着地実験を行い，着地時の衝撃吸収，接地の安定化，床反力およびトルクの推定が可能であることを確認した．また，2足ロボットに着地制御法を適用し，有効性を確認した．
3. 従来の足機構を用いて同様の実験を行い，特性の検証および提案する足機構と比較を行い，従来の足機構が正常に動作しなかった柔らかい地面においても動作可能であった，障害物上に着地した際に滑落が起らなかった，というように性能向上を確認した．

多くの環境に適応しうる足構造の有効性を確認できたが，環境によっては従来の足機構がより優れた適応性を示すことも想定でき，足構造は接触部の形状や硬さ，機構の種類および個数といった要素についてはさらに検討を行う必要がある．

後者(4章)についてはパンタグラフを用いた脚姿勢に依存しない重力補償機構の提案および装着者の負担軽減効果の実験的検証を行い、以下の結論を得た。

1. 主な日常動作である椅子からの起立および着席動作の実験では装着者の筋電位の最大値および分散が減少し、平均値は同程度であった。最大値の減少は動作に必要な筋力が減少していることを示している。分散の減少については、起立・着席動作では動作範囲が大きいいため筋力の変動も大きい、この変動が低減されていると考えられる。
2. 階段昇降動作の実験では筋電位の平均値が減少し、分散は同程度であった。また、最大値については被験者ごとに異なる傾向となった。最大値の傾向の違いは被験者体格の装置への適合の程度が大きく影響しており、平均値の減少については、階段昇降動作では片足支持期の支持脚の負担が大きく、それが低減されていると考えられる。

パンタグラフを用いた自重補償機構の負担軽減効果の実験検証で明らかになった問題点として、装着者の動作に多くの制限を与えることから負担を増加させる場合もあることが懸念されるが、装着者の体形に応じて装置形状・装置固定点を調整することで対応できると考える。機構的な改善に加えて、装着者の動作と身体負担の関係を調査することも今後の課題である。

## 5.2 今後の展望

本研究で用いた2つの足機構に共通の問題点として、一般的な足と比較して大きく重いことが挙げられ、上述の構造の見直しと併せて可動域の最小化についても検討すべきである。これらの最適化をより高度に行うためにはロボット全体の構造、動特性やアクチュエータの性能を考慮することが重要である。ロボット全体の特性を考慮した制御は2足ロボットが安定に高速な歩行を行うためにも重要である。足機構は、高速動作における制御では対応できない衝撃の吸収や、カメラなどの非接触センサの情報の補完に用いることに重点を置き、機構設計を小型・軽量に最適化を行うことで、2足ロボットの歩行性能の向上に有効なものとなることが期待できる。

自重補償機構について、実験で明らかになった問題点として、装着者の動作に多くの制限を与えることがある装着者は肩、腰および足を装置に固定するが、装置の構造のため、装置側の固定部が人体の取りうる姿勢に十分に

対応できないことから人体にとって不自然な動作となり負担を増加させる場合もあることが懸念される．これに対しては，装着者の体形に応じて装置の固定位置を調節できるようにすることで影響を低減できると考えられる．他の機械的な問題点として，装着して活動をする場合に大きな空間を要することや，非アシスト時の重量が挙げられる．一方，一般的なPAS，自重補償機構に対する本機構の特徴として，自重により関節に発生するトルクではなく，自重を直接補償する点がある．これにより人体の関節摺動部に作用する荷重を軽減するため，関節の摩耗を軽減できる可能性があり，本機構の有意性を高める要素となりうる．

また，実用のためには，リンク長，部品形状の最適化や適切な材料を選定し，小型・軽量化を図る必要がある．機構的な改善に加えて，適切なタイミングでのアシスト力の操作を自動的に行う手法の考案や，装着者の動作と身体負担の関係を調査することも今後の課題である．適切な装置の設計を行うためには，装着者の各部筋電位やアシスト力の強弱を総合的に評価する [50] など，装置の効果を検証する手法についても検討を行う必要があると考えられる．



## 謝辞

本研究を行うにあたり，多大なご指導を賜りました，豊橋技術科学大学機械工学系 内山直樹教授に心よりお礼申し上げます．至らぬことばかりの私に手厚くご指導してくださり，誠にありがとうございます．

日々多くの相談に乗って下さり，多くのお知恵を賜りました豊橋技術科学大学機械工学系 佐野滋則准教授に感謝申し上げます．

入学時から博士後期課程まで部活動など多くの場面でご指導いただき，しるべとなって下さいました豊橋技術科学大学機械工学系 鈴木新一教授に感謝申し上げます．

講義の場や，本研究をまとめるに当たりまして多数のアドバイスを賜り，また，人間的に未熟な私にご指導くださいました，豊橋技術科学大学機械工学系 寺嶋一彦教授に厚くお礼申し上げます．

本論文の作成におきまして，ご指摘，アドバイスをくださいました，豊橋技術科学大学機械工学系 竹市嘉紀准教授に感謝申し上げます．

博士後期課程在学中におきましては，豊橋技術科学大学より博士後期課程大学特別支援制度によるご支援を賜りました．貴学のご支援により本研究の機会を得られましたことに感謝申し上げます．

博士後期課程退学後におきましては，新東工業株式会社 富貴原信様，鈴木薪雄様には本論文の作成にご理解をいただき，貴重な業務時間の中，本論文の執筆に当たらせていただきました．貴社ならびに御二方のご理解，ご協力に厚くお礼申し上げます．

システム工学研究室，ロボティクス・メカトロニクス研究室の皆と過ごすことは，学生生活の様々な面で励みとなりました．特に栗田大氏，高橋智也氏には研究に関する相談などお世話になりました．ありがとうございます．

最後に，これまで長きにわたり精神的，金銭的に支えてくれた両親にこの場を借りてお礼申し上げます．





## 参考文献

- [1] 総務省統計局編集, “世界の統計 2013,”  
<http://www.stat.go.jp/data/sekai/pdf/2013a1.pdf>.
- [2] 日本経済新聞 電子版 2010 年 7 月 25 日, 2010.
- [3] 日本貿易振興機構, “JETRO Japan Economic Monthly, March 2006,” 2006.
- [4] 技術戦略マップ 2010, 経済産業省, 2010.
- [5] 田所 諭, “レスキューロボットの現状と未来,” 電子情報通信学会誌, vol. 92, no. 3, pp. 203-208, 2009.
- [6] 加藤 一郎, “2 足歩行ロボット (WABOT-1) の開発 (2 部ロボット),” バイオメカニズム, vol. 2, pp. 173-174, 1973.
- [7] 高西 淳夫, “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.
- [8] 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. 101-106, 1993.
- [9] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka,, “The Development of Honda Humanoid Robot,” Proc. 1998 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1321-1326, 1998.
- [10] 本田技研工業株式会社, “ASIMO,”  
<http://www.honda.co.jp/ASIMO/>.
- [11] トヨタ自動車株式会社, “パートナーロボット,”  
[http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner\\_robot/](http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/).
- [12] 富士ソフト株式会社, “PALRO,”  
<http://www.fsi.co.jp/solution/robot/palro/index.html>.
- [13] 富士通株式会社, “HOAP,”  
[http://jp.fujitsu.com/group/labs/techinfo/techguide/list/robotics\\_p11.html](http://jp.fujitsu.com/group/labs/techinfo/techguide/list/robotics_p11.html).

- [14] 株式会社日立製作所, “EMIEW 2, ”  
[http://www.hitachi.co.jp/rd/research/robotics/emiew2\\_01.html](http://www.hitachi.co.jp/rd/research/robotics/emiew2_01.html).
- [15] 産業技術総合研究所, “HRP-4, ”  
[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2010/pr20100915/pr20100915.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2010/pr20100915/pr20100915.html).
- [16] 株式会社テムザック,  
<http://www.tmsuk.co.jp/lineup/>.
- [17] Aldebaran Robotics, “NAO, ”  
<http://www.aldebaran-robotics.com/en/Home/welcome.html>.
- [18] A. Goswami, “Postural Stability of Biped Robots and the Foot-Rotation Indicator (FRI) Point, ” *International Journal of Robotics Research*, vol. 18, no. 6, pp. 523-533, 1999.
- [19] M. Vukobratović and J. Stepanenko, “On The Stability of Anthropomorphic Systems, ” *Mathematical Biosciences*, vol. 15, pp. 1-37 1972.
- [20] J-Y. Kim, I-W. Park and J-H. Oh, “Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor, ” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 48, no. 4, pp. 457-484, April 2007.
- [21] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi, and T. Isozumi, “Humanoid Robot HRP-2, ” *Proc. 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and automation*, vol. 2, pp. 1083-1090, 2004.
- [22] K. Hashimoto, Y. Sugahara, A. Hayashi, M. Kawase, T. Sawato, N. Endo, A. Ohta, C. Tanaka, and A. Takanishi, “New Foot System Adaptable to Convex and Concave Surface”, *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1869-1874, 2007.
- [23] 橋本 健二, 菅原 雄介, 太田 章博, 砂塚 裕之, 川瀬 正幹, “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)”, 第23回日本ロボット学会学術講演予稿集, 1G23, 2005.
- [24] 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.
- [25] E.Garcia, J.C.Arevalo, G.Muoz, P.Gonzalez-de-Santos, “Combining series elastic actuation and magneto-rheological damping for the control of agile locomotion, ” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 10, pp. 827-839, 2011.

- 
- [26] 庄司 道彦, 王 志東, 高橋 隆行, 中野 栄二, “二脚ロボットの佇立能力向上のための足構造,” バイオメカニズム学会誌, vol. 25, no. 1, pp. 36-42, 2001.
  - [27] 橋本 健二, 菅原 雄介, 川瀬 正幹, 林 昭宏, 田中 智明, 太田 章博, 沢戸 瑛昌, 遠藤 信綱, 林 憲玉, 高西 淳夫, “着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御による人間搭乗型2足歩行ロボットの屋外歩行の実現,” 日本ロボット学会誌, vol. 25, no. 6, pp. 851-859, 2007.
  - [28] 橋本 健二, 菅原 雄介, 砂塚 裕之, 田中 智明, 太田 章博, 川瀬 正幹, 林 憲玉, 高西 淳夫, “脚部にパラレル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),” 第23回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1G26, 2005.
  - [29] 中野 栄二, 小森 谷清, 米田 完, 高橋 隆行, “高知能移動ロボティクス,” 講談社, pp. 153-170, 2004.
  - [30] 中嶋 秀朗, 中野 栄二, “脚車輪分離型ロボットの大不整地適応歩容(第2報, 段差上り歩容編),” 日本機械学会論文集(C編), vol. 72, no. 721, pp. 2932-2939, 2006.
  - [31] 嶋 孝倫, 藤本 浩志, 高西 淳夫, “歩行中のヒト足部におけるアーチ支持力:力学モデルを用いた逆動力学解析,” 日本機械学会論文集(C編), vol. 68, no. 672, pp. 2425-2430, 2002.
  - [32] 人間生活工学研究センター, “人体ダイナミクス特性計測機械システム及び動作自動生成モデルの開発に関するフィージビリティスタディ報告書,” 機械システム振興協会, システム開発 14-F-12, 2003.
  - [33] 石田 明允, 広川 俊二, 宮崎 信次, 阿江 通良, 林 豊彦, “身体運動のバイオメカニクス,” pp. 102-104, コロナ社, 2002.
  - [34] 清水 昌一, “歩くこと・足そして靴,” pp. 89-92, 風涛社, 1995.
  - [35] Morisawa, M., Harada, K., Kajita, S., Kaneko, K., Kanehiro, F., Fujiwara, K., Nakaoka, S. and Hirukawa, H., “A Biped Pattern Generation Allowing Immediate Modification of Foot Placement in Real-time,” Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, 2006.
  - [36] Hirukawa, H., Hattori, S., Kajita, S. et al., “A Pattern Generator of Humanoid Robots Walking on a Rough Terrain,” Proc. 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2181-2187, 2007.
  - [37] 山田 萌, “2足ロボットの不整地歩行のための足構造と着地制御法の提

- 案,” 豊橋術科学大学大学院, 博士論文, 2012.
- [38] T. Hayashi, “Control method of robot suit HAL working as operator’s muscle using biological and dynamical information,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System, pp. 3063-3068, 2005.
- [39] Y. Sankai, “HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernetics,” Robotics Research, The 13th International Symposium ISRR, pp. 25-34, 2010.
- [40] 村岡 慶裕, 才藤 栄一, “歩行補助ロボットの開発,” 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 8, pp. 878-880, 2008.
- [41] Activelink Co., Ltd.: POWERLOADER light “PLL”,  
<http://activelink.co.jp/doc/668.html>.
- [42] ReWalk Robotics: New ReWalk<sup>TM</sup> Personal 6.0,  
<http://rewalk.com/rewalk-personal-3/>.
- [43] 田中 英一郎, 池原 忠明, 佐藤 友亮, 遊佐 広和, 伊藤 和寿, 三枝 省三, 中川 慧, 青景 遵之, 弓削 類, “脚部非固定式歩行補助機の開発と筋電による補助効果の検討,” 日本機械学会論文集 (C編), vol. 77, no. 775, pp. 1119-1132, 2011.
- [44] 山本 圭治郎, 兵頭 和人, 石井 峰雄, 松尾 崇, “介護用パワーアシストスーツの開発,” 日本機械学会論文集 (C編), vol. 67, no. 657, pp. 1499-1506, 2001.
- [45] 土屋 元, 小山 紀, 吉満 俊拓, “空気圧歩行支援システムの開発,” 平成15年度秋季フルードパワーシステム講演会論文集, pp. 93-95, 2003.
- [46] 小林 宏, “人間動作支援技術-マッスルスーツの開発-,” 人工知能学会誌, Vol. 20, No. 5, pp. 564-571, 2005.
- [47] 白田 聡, “脚部に重力補償機構を組み込んだヒューマノイドロボットの設計開発評価,” 東北大学大学院博士論文, 2007.
- [48] 菅原 雄介, 川瀬 正幹, 御厨 裕, 細畠 拓也, 砂塚 裕之, 橋本 健二, H-O. Lim, 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),” 日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集, 1K32, 2004.
- [49] 山田 泰之, 森田 寿郎, “歩行に連動した脚関節トルク補償機構 (問題分析と機構の提案),” 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 79, No. 802, pp. 177-188, 2013.
- [50] Y. Taniai, T. Naniwa, Y. Takahashi, M. Kawai, “Evaluation of Power-Assist System by Computer Simulation,” Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, vol. 20, no. 3, pp. 477-483, 2016.

- 
- [51] 東京デバイスズ, “Tokyo Devices: IWS940-DEV, ”  
[https://tokyodevices.jp/system/attachments/files/000/000/272/  
original/IWS940-DEV\\_MANUAL.pdf](https://tokyodevices.jp/system/attachments/files/000/000/272/original/IWS940-DEV_MANUAL.pdf).
- [52] 米田 完, 玉木 達也, 太田 祐介, 倉爪 亮, “2 足ロボットの省自由度構成,” 日本ロボット学会誌, vol. 21, no. 5, pp. 546-553, 2003.
- [53] 梶田 秀司, 谷 和男, “線形倒立振子モードを規範とする凹凸路面上の動的2足歩行制御,” 計測自動制御学会論文集, vol. 31, no. 10, pp. 1705-1714, 1995.
- [54] 長崎 高巳, 梶田 秀司, 横井 一仁, 金子 健二, 比留川 博久, 谷江 和雄, “ヒューマノイドのための走行パターンの生成,” 日本ロボット学会誌, vol. 21, no. 8, pp. 902-908, 2003.
- [55] 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.
- [56] 原田 研介, 梶田 秀司, 森澤 光晴, 金広 文男, 藤原 清司, 金子 健二, 比留川 博久, “ヒューマノイドロボットの実時間歩容計画における解析的アプローチ,” 日本ロボット学会誌, vol. 23, no. 6, pp. 752-760, 2005.
- [57] 山田 萌, “両足支持期を考慮した軌道生成による2足歩行ロボットの歩行安定化,” 豊橋技術科学大学 特別研究論文, 2006
- [58] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa, “Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point, ” Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1620-1626, 2003.
- [59] J. Park and Y. Youm, “General ZMP Preview Control for Biped Walking, ” Proc. 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2682-2687, 2007.
- [60] 西脇 光一, 加賀 美聡, “ヒューマノイドのための短周期オンライン歩行軌道生成更新法,” 日本ロボット学会誌, vol. 25, no. 6, pp. 834-841, 2007.
- [61] 寺嶋 一彦, 兼重 明宏, 三好 孝典, 浜 克己, 山崎 敬則, 徳田 誠, 岡本 峰基, 山田 実, 上 泰, 中浦 茂樹, 酒井 史敏, 今村 孝 “制御工学技術者のための、理論・設計から実装まで,” 実教出版, pp. 102-108, 2012.
- [62] J. Park and Y. Youm, “General ZMP Preview Control for Biped Walking, ” Proc. 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2682-2687, 2007.
- [63] 日本機械学会, “機構学機械の仕組みと運動,” 日本機械学会, p. 155, 2007.

- [64] “建築基準法施行令 第二章 第三節 階段（第二十三条一第二十七条），”  
平成二十九年六月十四日公布（平成二十九年政令第百五十六号）改正，  
[http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws\\_search/  
lsg0500/detail?lawId=325C00000000338](http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=325C00000000338), 2017.