

2足歩行ロボットの省自由度構成

米田 完^{*1} 玉木 達也^{*1} 太田 祐介^{*1} 倉爪 亮^{*2}

Design of Bipedal Robot with Reduced Degrees of Freedom

Kan Yoneda^{*1}, Tatsuya Tamaki^{*1}, Yusuke Ota^{*1} and Ryo Kurazume^{*2}

Typical human-based biped robot has 12-DOF for its legs, but there may be another approach not to take a model on human, but to design function oriented. To design a practical light-weight biped, reducing a number of DOF is one of the most efficient method. This paper discusses minimum number of DOF for various cases, where 4, 7, 5 is the resultant minimum number of DOF for horizontally composed terrain, uneven terrain with normal leg exchange sequence, uneven terrain with partial leg exchange sequence, respectively. This paper also shows practical designs of bipeds with 5, 8, and 6-DOF. Trial manufactured machines based on these discussions could show good performances on stairs and uneven terrain.

Key Words: Biped, Degrees of Freedom, Energy Efficiency, Partial Leg Exchange

1. はじめに

2足歩行ロボットは通常、人間の脚の形を手本として構成している。これは、人間用に作られた都市空間内での移動は人間型のロボットが有利であるとの観点から考えれば、妥当なことである。しかし、ロボットを構成するアクチュエータや関節部材は、人間の骨や筋肉とは形態が異なり、その特性も異なるものである。そのため、既存のアクチュエータや減速器を使用することを前提とすると、人間を模倣した脚構成のロボットを作ることには必ずしも最適であるとはいえない。例えば、ロボットには人間にはないスライド関節を使用することができ、文献[1]~[3]のように伸縮する脚の俊敏な動きを利用した動歩行を実現することも可能である。また、文献[4]では、リンク機構によってアクチュエータを胴体に集中させ、さらに膝関節の屈曲方向が人間とは逆になっている。本論文では、2足歩行ロボットの機能面、すなわち歩行速度、歩幅、荒れ地や段差の踏破能力、バランス保持機能などから関節やアクチュエータの構成を考え、人間型に固執しない機械としての機能と性能だけを重視した設計法を論じていく。その一手法として、本論文では省自由度化による機能と性能の実現を論じる。

歩行ロボットの設計において重要な課題は、軽量化である。文献[5]では、軽量化のために搭載アクチュエータのパワー合計を

最小限にする干渉駆動が提案されている。2足歩行ロボットでは、文献[6]では軽量化のために新たなアクチュエータを開発したことが述べられている。文献[7]では軽量なギアードモータを開発するとともに、樹脂材料の使用によって金属に比較して15%の軽量化を実現したと述べている。文献[8]では胴体の軽量化のためにCFRPを用いたと述べている。文献[9]においても、開発したロボットの特徴の一つに軽量であることをあげている。これらの軽量化には主に軽量なアクチュエータや減速器の使用、構造部材の軽量化などの技術が用いられている。本論文では、これらの技術と並んで軽量化のための一手法となり得るものとしてアクチュエータの数を減らすことを検討する。まず、歩行のために必要な最低限の自由度数を検討する。そして、その最低自由度数のアクチュエータだけを使用することを目標とした実際の構成方法について論じる。これらについて、実験の実験によって妥当性を検証する。

2. 歩行機能と必要自由度

2.1 必要自由度数のカウント方法

本章では、2足歩行の機能を発揮するために必要な自由度数について論じる。ここでは2足歩行ロボットのうち、静歩行ができるものを考える。2足静歩行とは、二つの足底を交互に遊脚化して進む動作とする。足底は3点以上の接地点を持ち、一つの足底のみの立脚で静的安定性を保てるものとする。

人間を規範とする2足歩行ロボットは、Fig.1のように腰関節3自由度、膝関節1自由度、足首関節2自由度で、2脚合計12自由度を持つものが一般的である。この1脚6自由度の構成は、胴体を基準としてそれぞれの足底が6自由度を持つことと

原稿受付 2002年5月18日

^{*1}東京工業大学

^{*2}九州大学

^{*1}Tokyo Institute of Technology

^{*2}Kyushu University

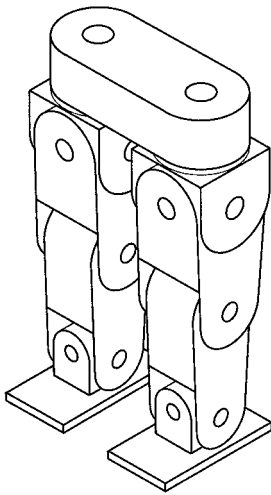


Fig. 1 Human based biped with 12-DOF

なり、足底は空間内で並進3自由度と回転3自由度の運動ができる。それ以下の自由度数では足先運動に制限が生じると考えられる。

しかし、ここで足底や胴体が6自由度で自在に運動できなくても歩行が可能なのではないかということについて考察してみる。ここでは、実際の歩行運動において必要不可欠な機能は、次のようなものであると考えることとする。(1) 支持脚足底を地面に置いたまま遊脚足底位置を任意に設定すること、(2) 歩行ロボット全体の静的安定性を保つことの二つである。これは、歩行ロボットの内部状態は考えず、外界と作用する「足底」および重力を受けることで外界との作用がある「重心」の運動のみが歩行運動の結果をもたらすと考えられるからである。なお、(1)の機能には遊脚を地面に下ろして次の支持脚とすることを含み、(2)の機能には支持脚の切り換えに必要な重心移動を含むものとする。すなわち、支持脚を切り換えることができるものとする。これらの機能を実現するために必要な自由度を考察していく。そのために、ロボットの各部位間の運動によって自由度をカウントするのではなく、地面に視点をおいて遊脚、支持脚、胴体等の運動を観測することで、その運動に使われている自由度数をカウントする。もう少し正確に言えば、地面を基準として各脚の「足底」およびロボット全体の「重心」の運動を考える。

ここで、地面を基準に考えると、歩行中の支持脚の足底はまったく運動していない。すなわち運動の自由度はゼロである。そこで、次節以降では遊脚足底および重心の運動について考察する。

なお、本論文で論じる必要最小限の自由度数のカウント法については、下記のようにいくつかの例外的ケースがあり、これらの場合を除く議論であることをお断りしておく。

- (1) 動歩行を前提とする2足歩行ロボットは、文献[10]およびFig. 2のように足底のない形態とすることができ、最低3自由度で構成できる。
- (2) 2脚の足底範囲がオーバーラップし、重心の投影点が常にその共通足底範囲にあるFig. 3のような構造のロボットは、重心移動のための自由度を持たなくてもよい。すなわ

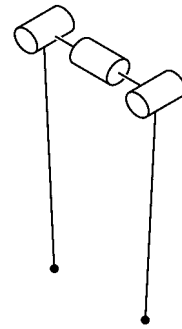


Fig. 2 3-DOF biped with tip-toes for dynamic walk

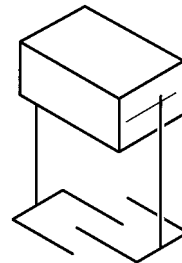
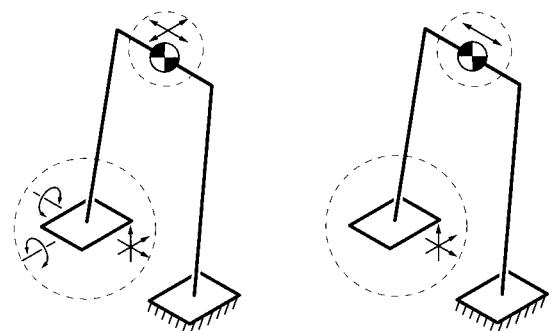


Fig. 3 Bipod with overlapped foot areas



(a) Rough terrain (b) Horizontally composed terrain

Fig. 4 DOF count from on the ground

ち、本論文で論じる必要最小自由度の算出過程のうち、重心の移動に関するカウントが不要である。

2.2 遊脚位置選択の自由度

2.2.1 一般不整地歩行

2足歩行ロボットの遊脚足底は地面に対して空間内で任意の位置姿勢をとれるように6自由度持つことが必要である。ただし、一般的足底が平板状の2足歩行ロボットでは、その足底面の向きが変わらない運動、すなわち足底平面の法線まわりの回転運動はほとんど不要である。すなわち遊脚の自由度はFig. 4(a)のような5自由度でよいと考えられる。例外としては、つま先が障害物に当たるので横に向けて避けた場合などがあげられる。このような例外をのぞけば、遊脚足底の運動自由度は5とすることができ。なおここでは、この脚が支持脚となっているときのことはまったく考えない。

2.2.2 平地と階段歩行

平地上の歩行や、階段のように水平面のみで構成される地形

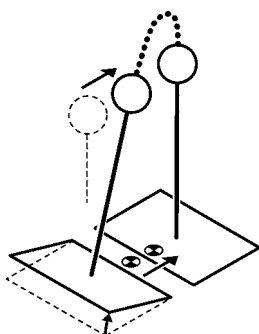


Fig. 5 Partial leg exchange where CG position and foot orientation are coupled

上の歩行においては、遊脚の足底面は常に水平を維持すればよく、前節で述べた必要5自由度のうち、回転の2自由度、すなわちローリングとピッチングの自由度は不要である。すると遊脚足底に必要とされる自由度は並進のみの3自由度である。これをFig. 4(b)に示す。

2.3 重心位置選択の自由度

一般的な2足歩行においては、重心位置の移動は、静的安定性を維持するため、すなわち、重心の地面への投影点が支持脚の足底範囲内に入るようにするために行う。この目的のためには重心の運動は前後と左右の2自由度運動だけが必要である。これをFig. 4(a)に示す。なお、正確な議論のためには傾斜や凹凸のある地形上での静的安定性について考慮しなければならない。不整地歩行の安定性の詳しい記述は文献[11]など他にゆずるとして、重心を通る鉛直線が二つの足底面で張られる多面体の内部を通過すれば静的に安定である。このため、重心の運動はこの鉛直線を移動させる方向、すなわち鉛直方向以外の独立した2方向の運動自由度を持っていればよい。

また、水平面で構成される地形のみを歩行する2足歩行ロボットにおいては、重心の運動は二つの足底面の法線（鉛直方向）を含む平面内を鉛直以外の方向に移動できれば十分である。一般的な左右に2脚が配置されたロボットでは、左右方向に移動できればよい。すなわち必要な自由度は1である。これをFig. 4(b)に示す。

2.4 部分支持脚交換歩行

先の議論では、遊脚足底の運動と重心の運動を独立して考えた。このため、例えば重心を移動させずに遊脚の足底を移動させたり、両脚支持期においても重心を移動させることが可能である。しかし、ここで歩行のシーケンスを限定することによって、さらに自由度を減らすこともできる。つまり、重心移動と遊脚足底運動の自由度を共有化させるのである。これを実現するためには、遊脚の足底平板を一気に地面に着地させたり、支持脚の足底平板を一気に空中に上げたりする瞬時的な脚交換ではなく、部分的な支持脚交換を行う。人間で言えば、着地の際にカトから先に地面についたり、遊脚化の際にカトを先にかけてつま先立ちする動作である。Fig. 5のように重心が中央にある両脚接地状態から、まず遊脚となる足底を傾けて重心を支持脚となる脚の方によせる。重心投影点が支持脚の内部に入るだけ傾けたら、次に脚全体の引き上げを行う。つまり、遊脚

Table 1 Minimum DOF of biped for a static walk

CG + Swing foot = Total	Without swing foot revolution	With swing foot revolution
Rough terrain	$2 + 5 = 7$	$2 + 6 = 8$
Horizontally composed terrain	$1 + 3 = 4$	$1 + 4 = 5$
Partial leg exchange on rough terrain	$0 + 5 = 5$	$0 + 6 = 6$

となる足底を支持脚から遠い部分から段階的に引き上げていく。また、着地の際にはこれを逆再生した動作となる。

この部分支持脚交換においては、重心の運動自由度は遊脚足底の運動に従属させることができる。すなわち独立した重心運動自由度はゼロとすることができる。一方、この場合の遊脚足底の運動自由度は5でもよいが、6であることが望ましい場合が多いと考えられる。なぜなら、部分的に遊脚を接地させる際に、点ではなく線で接地させたい場合には、その線を地面に平行にするために足底面法線まわりの運動が必要になるからである。なお、平地や階段専用に設計した足底を傾ける自由度のないロボットでは、部分支持脚交換はできない。

2.5 必要合計自由度

ここでは、歩行に必要な自由度数の合計について考察する。上記の考察では、遊脚の自由度および重心の自由度を考慮したが、支持脚の自由度を考慮していないように感じられるかもしれない。しかし、これまで考慮した遊脚の自由度とは、地面に対する遊脚の運動自由度であり、すなわち、地面に置かれている支持脚に対する遊脚の相対運動の自由度である。2足歩行ロボットの場合には足底が二つのみであるから、その二つの足底間の相対運動自由度になる。すると、この遊脚の運動を作り出すための自由度は、支持脚を切り換えてこれまで支持脚だった脚が遊脚になった際には、新たな支持脚を固定点として新しい遊脚の運動を作り出す自由度でもある。このことから、支持脚の自由度を陽に考慮していなくても遊脚の自由度だけで、二つの脚の運動自由度を考慮していることになる。

なお、より足数の多い4足歩行ロボットの場合にも、文献[12]のように複数の脚間の相対運動を生成する機構によって遊脚の運動を生成すれば、一つの遊脚の運動を作り出すための駆動自由度は、他のどの脚が遊脚になった際にも同様な運動を生成することができる。

以上のように、遊脚の自由度と重心の自由度の2者を合計したものが2足歩行ロボットに必要な自由度となり、その数はTable 1のようになる。一般的な不整地歩行であれば遊脚足底運動6自由度+重心運動2自由度の合計8自由度である。遊脚足底面の回転を不要とすれば7自由度となる。さらに、水平面構成の地形に限定すれば、遊脚足底自由度は3でよく、重心運動自由度は1でよいから、合計4自由度である。また、不整地においても部分支持脚交換を採用する場合には遊脚足底運動6自由度のみで重心運動自由度はそれに従属したものでよい。すなわち合計6自由度となる。さらに遊脚の部分的接地を点接地に限れば5自由度に減らすことも可能である。

3. 省自由度2足歩行ロボットの構成方法

本章では、前述した必要最低限度の自由度数を目標として、現実的なメカニズムで構成できる2足歩行ロボットについて論じる。初めに、移動する地形を水平面のみで構成されるものに限定的場合について述べ、続いて一般の不整地を移動するものについて述べる。

3.1 水平面構成地用2足歩行ロボット

水平面構成地用の2足歩行ロボットの実際的な構成法を考える。この場合には、遊脚足底の回転運動の自由度は必要ではないが、足底面を常に床面と平行に、すなわち水平に維持する必要がある。駆動の自由度無しに足底姿勢を定めるためには、リンク機構などによって遊脚の足底面が支持脚の足底面と平行に保たれるようにするのがよい。

一方、支持脚をベースにして遊脚の3自由度並進運動を行うためには、3自由度マニピュレータのようにxyz直動型、スカラ型、肩2自由度+ひじ1自由度の多関節型などの構造が考えられるが、2足歩行ロボットであるので、支持脚側と遊脚側が対称形であることが望ましい。

また、重心移動の1自由度は、おもりを移動させるなどの独立した構造も考えられるが、支持脚—遊脚間の関節数一つ冗長、すなわち4関節にして、その冗長分で重心の左右移動を行えるようにする方法も考えられる。

以上のような条件から、本研究ではFig. 6のような両脚の足底面間を三つの平行リンクでつなぎ、さらに両足底が鉛直軸まわりに回転運動する構造を提案する。この構造は、合計5自由度であり、前章で論じた最小数の4自由度より多い。これはアクチュエータをつけやすい構造とするために本来は必要のない遊脚足底の鉛直軸まわりの回転を独立に駆動しているためである。すなわち、Table 1の遊脚足底面回転ありの構造となる。もし、何らかの方法、例えばフレキシブルシャフトで二つの足底の回転をつなぐ、あるいはFig. 6(b)のようにかき歯車とワイヤを使うなどの方法で、二つの足底面回転が連動する（Fig. 6(b)では反対回転で同一角度になる）ように拘束すれば、遊脚足底面回転なしの最小数である4自由度となる。

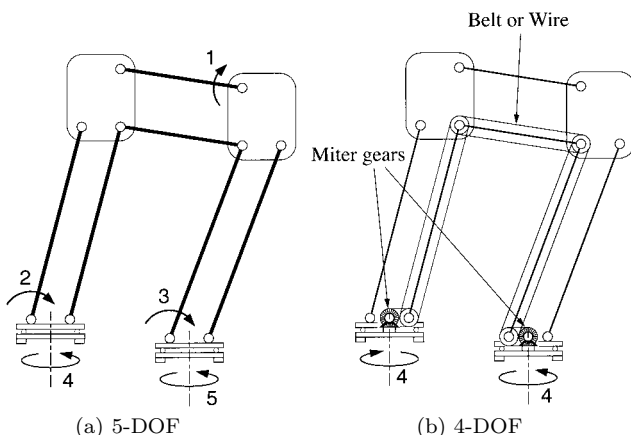


Fig. 6 Practical design for horizontally composed terrain

3.2 不整地用2足歩行ロボット

遊脚駆動5自由度+重心移動2自由度を要する不整地用2足歩行ロボットの構成を考える。ここでは遊脚の足底面を法線まわりに回転させる自由度は本来ならば不必要であるが、両脚の対称性を考え、実際に製作しやすい構造であることを考慮して、両足底ともに法線まわりの自由度を有する合計8自由度の構成とする。すなわちTable 1の遊脚足底面回転ありの構造となる。その8自由度の配置のしかたは両脚足底間を8関節のシリアルリンクでつないだものでよく、2自由度冗長のマニピュレータと同様である。ただし、両脚足底を固定した状態での重心移動が水平2方向に効率よく行えなければならない。つまり、マニピュレータで言えば、冗長分の2自由度の運動が重心の上下運動をあまり起こさずに、主に水平2方向の運動となることが望ましい。これらの考察から、本研究ではFig. 7のような8自由度構成を採用する。

なお、この8自由度のうち、二つの足底の法線まわりの回転を何らかの機構で接続し、同角度だけ回転するように拘束すれば合計7自由度となり、前章の必要最小自由度数の構成となる。何らかの機構というのは原理的には、例えばフレキシブルシャフトのようなものである。

3.3 部分支持脚交換をする不整地歩行ロボット

2.4節に示したように、部分支持脚交換をしながら歩行することを前提とすれば、足底回転のある場合で6自由度の2足歩行ロボットが実現可能である。その6自由度構造はシリアル関節構造でもパラレル関節構造でもよい。すなわち、6自由度の産業用マニピュレータのような構造でもよいし、6自由度パラレルリンクマニピュレータのような構造でもよい。本研究での実験機には次章に示すシリアル/パラレルハイブリッド型の6自由度歩行ロボットを使用する。また、足底回転なしの5自由度機構を具体的に実現するには、シリアルリンクマニピュレータにおいてベース回転と手首回転とが連動したような機構が必要となる。これはフレキシブルシャフトなどで実現することも可能であるが、実用的とは考えにくい。

なお、現在ほとんどの2足歩行ロボットは足底が平板状あるいは平板にスパイク状のものがついた形状であるため、足底の範囲内で大きな凹凸があるような地形、例えば岩場などには対応できない。このような地形に対応するためには、カメラ用3脚のような足底面のない3点接地の脚構造とするか、あるいは平板状の足底の一部のみの接地状態を許容できる歩行制御法を

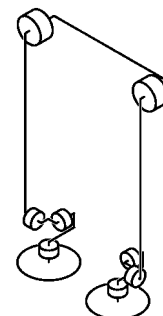


Fig. 7 8-DOF practical design for uneven terrain

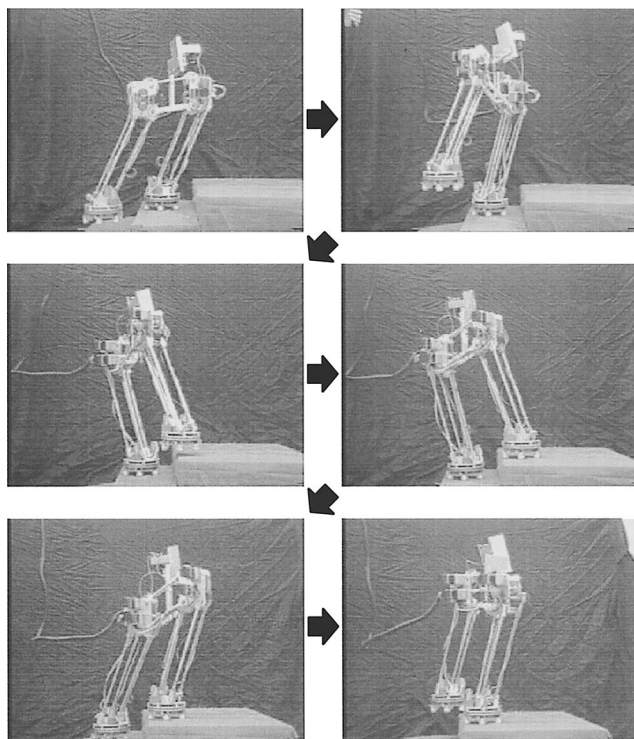


Fig. 8 5-DOF biped YANBO

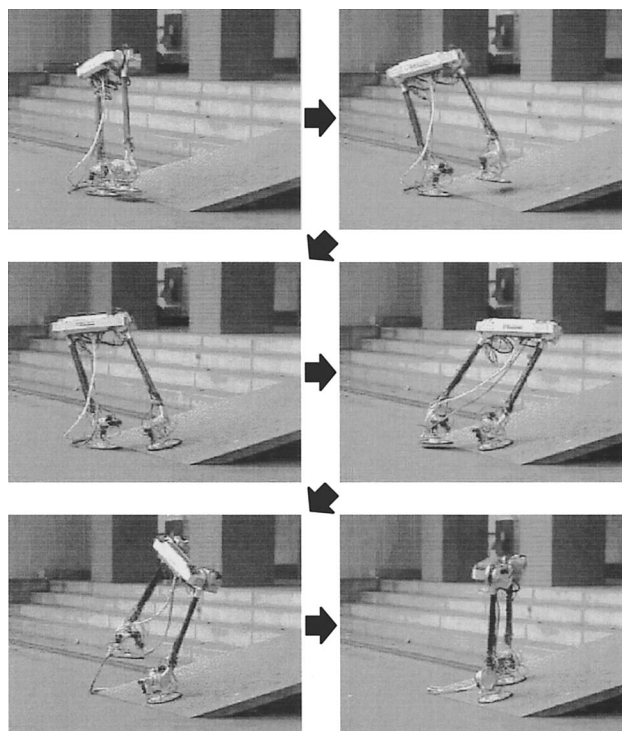


Fig. 9 8-DOF biped YANBO III

導入するなどの工夫が必要である。4.3節にはこのような岩場状不整地にも対応できる3点接地の歩行ロボットの実例を示す。

4. 実機と実証実験

4.1 5自由度水平面構成地歩行

水平面構成地用の2足歩行ロボットとしてFig. 8の5自由度の実機を開発した[13]。構造は前章のFig. 6(a)のように三つの平行リンクによって二つの足底面が常に平行に保たれるようになっている。平行リンクはそれぞれアクチュエータによって角度を変えられるように駆動される。また、それぞれの足底面は鉛直軸まわりに回転するようにアクチュエータで駆動される。これらの合計5自由度により遊脚足底の3自由度並進と鉛直軸回転、および重心の横方向運動を行うことができ、平坦な床面および階段での歩行を実現した。

4.2 8自由度不整地歩行

重心移動2自由度と遊脚移動6自由度の合計8自由度を持つ歩行ロボットの実機としてFig. 9のロボットを開発した。二つの足底間を八つのシリアル関節でつないだ構造となっており、左右の足首が各3関節、腰部が左右合わせて2関節である。足首関節の3自由度は3軸が一点で交わり、かつ広範な可動範囲を持つようにFig. 10のような片持ち構造としている。ロールおよびピッチ軸は $\pm 90^\circ$ の回転、ヨー軸は無限回転が可能である。また、腰部関節はほぼ全周の回転が可能である。実験では傾斜した路面と段差のある地形の歩行を行った。

この試作機は軽量化設計を行った結果、脚長600[mm]のサイズでありながら、質量約13[kg]となった。この値には、質量バランスを適切にするために腰部に搭載しているバッテリー約

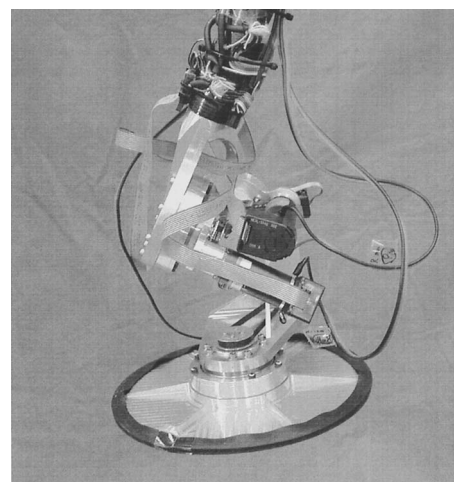


Fig. 10 Cantilever structure of 3-DOF ankle joints

4[kg]も含んでいる。

4.3 6自由度部分支持脚交換歩行

遊脚足底動作と独立した重心移動機能を持たない歩行ロボットの実機としてFig. 11のロボットによる部分支持脚交換型の2足歩行実験を行った。このロボットの詳細は文献[14]に示すが、3点の接地部を持つ二つのフレーム間を6自由度機構でつないだものである。6自由度機構は、三つのアームにそれぞれ二つのアクチュエータを付けたシリアル/パラレルハイブリッド構造となっている。

このロボットの通常の歩行動作は6足のトライポッド歩容であり、2足歩行ロボットとしては2.1節の例外(2)に該当する

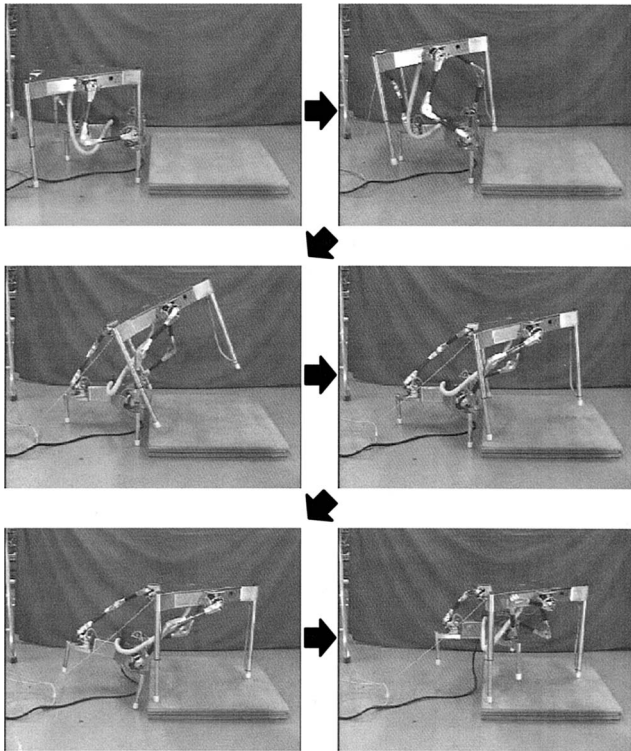


Fig. 11 Partial leg exchange using 6-DOF

足底範囲がオーバーラップした構造である。しかし、ここでは二つのフレームを足底範囲がオーバーラップしないところまで離し、重心を片方の足底範囲から出して歩行させる。これは2足の部分支持脚交換歩行であると見なすことができる。実験ではFig. 11のように足底を傾けて重心位置を調整しながら遊脚を踏み出すことができた。

5. 省自由度歩行ロボットの特徴

5.1 関節可動角の増大

省自由度の歩行ロボットは、アクチュエータ数が少ないために軽量化ができるが、そのほかにもメリットがある。その一つは関節部分の可動範囲を大きくとりやすいことである。例えば、人間型の2足歩行ロボットの腰関節部分は三つの回転関節が重なっているため、関節可動角は機構部の干渉によって制限される。一方、本研究の8自由度試作機では腰関節は1自由度だけで独立しているため、干渉を避けて非常に大きな可動角をとることもできる。試作機では腰部関節はほぼ全周の回転が可能である。人間型ロボットの可動角でも通常の歩行動作であれば必要十分程度と思われる。しかし、本研究の省自由度型の大可動角腰関節は、足を移動のためだけでなく作業用のアームのように使用することも可能にする。Fig. 12のように足を高く上げた姿勢を取り、足先に何らかの効果器を装備すれば軽作業が可能になるものと思われる。このように、関節数の減少によって可動角を大きくとる構造が実現しやすくなることも省自由度化の効果であると考えられる。

5.2 ゼロトルク・スタンディング

本論文で示した省自由度歩行ロボットは両脚接地状態では重

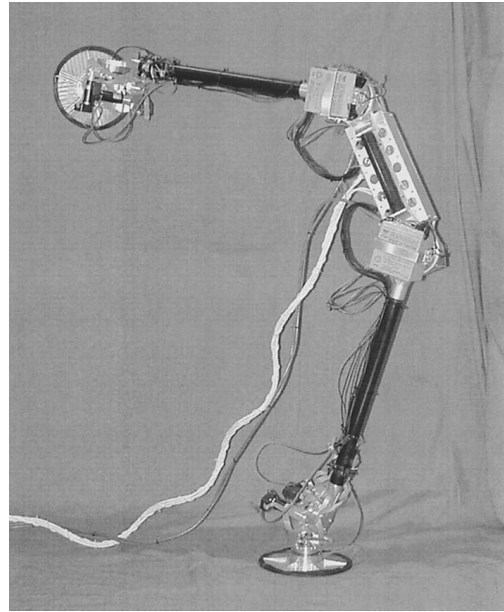


Fig. 12 Wide angle hip joint can perform manipulation

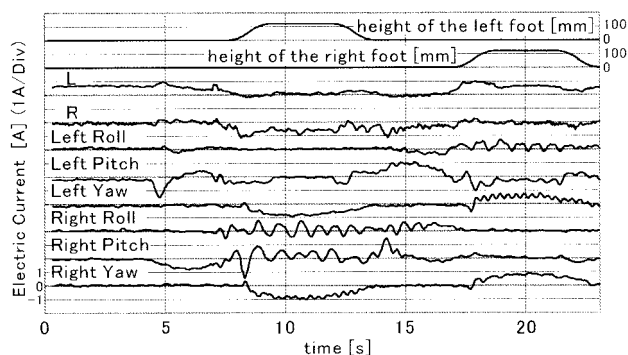
心の上下動を行うことができない。これは人間型2足歩行ロボットでは膝関節を伸ばしきっている状態に相当する。この姿勢の特徴は、重力を支えているアクチュエータがないこと、すなわち、直立状態を保つためのトルクが不要なことである。

例えば、Fig. 11のロボットは両方の脚が完全に接地した状態であれば、まったくトルクゼロ、すなわち電源が切れたような状態でも立っていることができる。これは、両脚が完全に接地している状態では重心の移動がまったくできないことの見返りである。もちろん、故意にトルクを発生させて両脚の支持力配分を変えることもできるが、通常は、いわゆるリラックスした状態でいられる。また、Fig. 11のような部分接地状態であっても、その接地状態を保ったまま可能な重心移動の方向がほぼ水平であるため、重力に抗するトルクはほとんど必要ない。Fig. 8やFig. 9のロボットでも、両脚接地で直立した姿勢では、重心移動可能な方向はほぼ水平であり、各関節のトルクはほとんどゼロである。重心を少し左右に寄せた姿勢では、若干の重心上下動があり、若干のトルクが必要である。

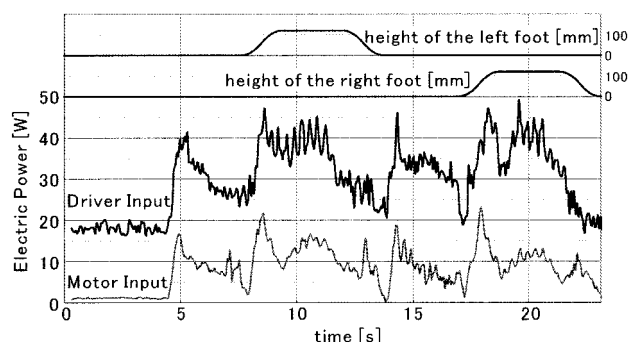
5.3 エネルギー消費

省自由度2足歩行ロボットは、軽量であること、前述のゼロトルクスタンディングが可能であることなどから、歩行のための消費エネルギーが少ないことが期待される。本論文ではその傾向を確かめるため、省自由度型2足歩行ロボットYANBO IIIの歩行中の電流計測実験を行った。その結果をFig. 13に示す。歩行速度は33[mm/sec]とした。Fig. 13(b)のモータ消費電力合計は定常歩行中の平均値で9.4[W]となり、人間の下半身サイズのロボットとしては小さいと思われる。またこの値から算出した移動仕事率=エネルギー/(重量・距離)は、2.26である。

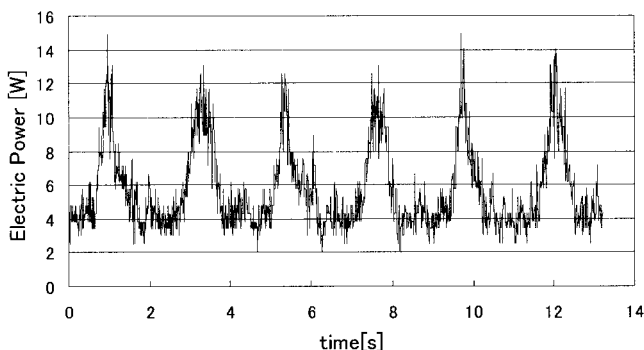
次に参考のため、市販のヒューマノイド(富士通オートメーション(株)製、HOAP-1、質量5.86[kg])の消費エネルギー計測を行った結果をFig. 13(c)に示す。歩行速度は上記実験と同



(a) Motor current of YANBO III



(b) Total energy of YANBO III



(c) Total energy of HOAP-1 (Driver input)

Fig. 13 Energy consumption

じとした。ハードウェアの都合上、モータドライバ入力消費電力を計測し、歩行中の値から各関節のトルクと角速度をゼロとしたときの値 (11.1 [W]) を差し引いた。この値の平均値 5.7 [W] より算出した移動仕事率は 3.04 となった。両ロボットの適正な比較のためには、YANBO III においてもモータドライバ入力の値を用いなければならない。本機のドライバは汎用外付けタイプ (サーボランド社製汎用モーションサーボ MOVO2SVEL448-A, 出力 526 [W]) であり内部消費電力が多く、すべてのモータのトルクと角速度がゼロの状態で 55.1 [W] を消費している。これを運動中のモータドライバ入力から差し引いた結果は Fig. 13 (b) のようになり、移動仕事率は 4.14 である。

以上の結果だけでは、2足歩行ロボットの省自由度化による消

費エネルギーの大小についての断定はできない。しかし、モータ消費電力を見る限り、本研究の省自由度2足歩行ロボットの値は小さく、モータドライバや周辺機器次第で省エネルギーな2足歩行ロボットを実現できる可能性があると考えられる。

6. ま と め

本論文では、少ない駆動自由度で2足歩行を実現することを目標として、理論的に必要最小限の自由度数について論じ、足底回転のない場合には、4自由度の水平面構成地歩行、7自由度の不整地歩行、5自由度の不整地部分支持脚交換歩行が可能であることを論じた。また、足底回転のある場合には、それぞれ5自由度、8自由度、6自由度の構成が可能であることを示した。さらに、これらの機構の実際的な構成法について検討し、足底回転のある場合の最小自由度である、5自由度の水平面構成地歩行、8自由度の不整地歩行、6自由度の部分支持脚交換歩行について、実機による歩行を実現した。

謝 辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費 (COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステム) を使用して行われました。また、本研究のためにHOAP-1を使用させていただいたロボスクエア (福岡市) に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] M. H. Raibert: Legged Robots That Balance. MIT Press, 1986.
- [2] 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.
- [3] 水戸部和久, 矢島克知, 仲野隆司, 長沢洋司, 那須康雄: “直動関節を用いた2足歩行ロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.120-125, 2000.
- [4] 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.148-155, 1996.
- [5] 有川敬輔, 広瀬茂男: “3D 荒地用歩行ロボットの研究 (GDA と干渉駆動に基づく最適化歩行)”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.720-726, 1995.
- [6] 石田建造: “エンターテインメントロボットへの応用”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.3, pp.270-272, 2002.
- [7] 村瀬有一, 安川裕介, 境 克司, 植木美和: “研究用小型ヒューマノイドの設計”, 第19回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.789-790, 2001.
- [8] 古田貴之, 清水正晴, 田原哲雄, 奥村悠, 戸田健悟, 富山健, 北野宏明: “小型ヒューマノイド Mk.6 (全身行動生成アルゴリズム検証用プラットフォームの構築)”, 日本機械学会ロボメカ講演会01, 2A1-N3, 2001.
- [9] A. Konno, N. Kato, S. Shirata, T. Furuta and M. Uchiyama: “Development of a Light-Weight Biped Humanoid Robot,” Proc. of IROS 2000, pp.1565-1570, 2000.
- [10] 三浦宏文, 下山 勲: “竹馬型二足歩行ロボットの制御系”, 日本ロボット学会誌, vol.1, no.3, pp.176-181, 1983.
- [11] 米田完, 広瀬茂男: “歩行機械の転倒安定性”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.517-522, 1996.
- [12] K. Yoneda, Y. Ota, F. Ito and S. Hirose: “Quadruped Walking Robot with Reduced Degrees of Freedom,” J. of Robotics and Mechatronics, vol.13, no.2, pp.534-540, 2001.
- [13] 米田完: “HC 地形のための2足歩行ロボットの開発”, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.585-586, 1987.
- [14] 太田祐介, 稲垣淑彦, 米田完, 広瀬茂男: “出力均質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.

**米田 完 (Kan Yoneda)**

1961年10月16日生。1985年東京工業大学理学部物理学科卒業，1987年同大学大学院修士課程修了，1989年同大学大学院博士後期課程機械物理学専攻中退，同年同大学機械物理学専攻助手，1994年同大学機械宇宙学科助教授，現在に至る。歩行ロボット，不整地移動車両の研究を行う。博士（工学）。

（日本ロボット学会正会員）

**太田祐介 (Yusuke Ota)**

1972年8月11日生。1995年同志社大学電子工学科卒業。2000年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了。同年同大学大学院機械宇宙システム専攻講師（中核的研究機関研究員），現在に至る。移動ロボットの研究に従事。博士（工学）。

（日本ロボット学会正会員）

**玉木達也 (Tatsuya Tamaki)**

1979年3月4日生。2002年東京工業大学機械宇宙学科卒業，現在同大学大学院機械宇宙システム専攻修士課程在学中。2足歩行ロボットの研究に従事。

（日本ロボット学会学生会員）

**倉爪 亮 (Ryo Kurazume)**

1967年2月4日生。1991年東京工業大学機械物理学専攻修士課程修了。同年（株）富士通研究所入社，1995年東京工業大学機械宇宙学科助手，2000年スタンフォード大客員研究員，同年東京大学生産技術研究所博士研究員，2002年より九州大学システム情報科学研究所助教授，現在に至る。群ロボット，歩行機械，レーザ計測の研究に従事。博士（工学）。

（日本ロボット学会正会員）