超多脚型受動的動歩行の実現

杉本 靖博^{*1} 吉岡 秀隆^{*2} 大須賀 公一^{*1}

The Realization of the Super Multilegged Passive Dynamic Walking

Yasuhiro Sugimoto^{*1}, Hidetaka Yoshioka^{*2} and Koichi Osuka^{*1}

A passive dynamic walking robot can walk down a gentle slope naturally without any actuator or controller, only by potential energy. Therefore, it is thought that the principle of walking exists in this phenomenon. By current researches, the passive dynamic walking has been confirmed for two and four. However, it seems that it is also important to study passive dynamic walking for more than 6 legs because there are many creatures that have more than 6 legs. In this research, a passive dynamic walking robot with more than six legs was analyzed by a simulator. As a result, it was confirmed that passive dynamic walking even for 20 legs could be achieved. Furthermore, its gait could be changed by changing the body structure. In addition, the differences of stability depend on the number of legs resulted, and this differences disappeared by changing the position of the pitch spin parts. Moreover, its stability was very high, so it could walk on the contoured ground.

Key Words: Passive Dynamic Walking, Super Multilegged Robot

1. 緒 言

地上にいる動物のほとんどは移動手段として歩行を行っているが、踏破性などの面から優れた移動手段の一つと言える。しかしそのメカニズムは複雑であり、明らかになっていない。この歩行の原理を解明するための一つのアプローチとして近年注目を集めているのが受動的動歩行である。

受動的動歩行とはアクチュエータや制御器を持たない単純な構造の機体が、適切な初期条件を与えることによって緩斜面を歩行するという現象である[1]。またその歩容は非常に自然で滑らかであり、動物のそれによく似ているように見える。また、純粹な受動的動歩行においては、アクチュエータを持たず外部からの制御が行われているわけではないため、ロボットの機構系ダイナミクスと環境との相互作用のみによってその運動が生成されていることになるが、それにもかかわらず、ある程度安定で自然な（滑らかな）歩行が実現可能となっている。そういった興味深い特性から、McGeerによって受動的動歩行に関して実験的にその実現可能性を示されて以来、様々な研究がなされ、そのなかでいくつかの興味深い現象が受動的動歩行に起こることが明らかになった[2]~[4]。一方で、受動的動歩行は、陽的な制御系を持たず非常に単純な機構のみで歩行が実現できること

から、重要な歩行の原理が内在している可能性があると考えられ、その運動原理そのものの解明に関する研究もなされてきている[5]~[7]。

ちょうど2足歩行ロボットの研究が盛んに行われるようになってきたという背景や、先に述べたように受動的動歩行はヒトの歩容に類似しヒトの歩行と関連が深いと考えられているため、その研究対象も2脚ものを中心であった。しかし、近年、4脚の受動的動歩行についての研究もいくつか行われてきている[8]~[10]。特に、先行研究[10]においては、4脚受動的動歩行が実機でも実現可能であり、またその機構を変化させることにより異なった歩容が発生することが明らかになっている。除脳ネコによる実験により、かなり低レベルの神経系しか持たない4脚生物であっても、歩行スピードに応じて歩容が変化することは古くから知られており[11]、また、非線形振動子を利用した4脚歩行ロボットにおいて、歩行スピードを変えることで歩容を自然に遷移させることができることも実機にて確認されている[12]。しかしながら、受動的動歩行ロボットのように、制御系をもたない骨格系だけのシステムにおいても同様の歩容の遷移が生じることが非常に興味深い。

そこで浮かび上がる疑問が、「6脚以上でも受動的動歩行が実現できるかどうか?」、また「存在するのであればどういった歩容が発生するか?」ということである。6脚以上の動物は哺乳類には存在せず、昆虫やクモ、ムカデといった節足動物などである。このような生物は、基本的に小型であり脚の質量も小さい。したがって、受動的動歩行のような慣性を十分活用した動的な歩行を行っているかどうかについては不明ではあるが、も

原稿受付 2009年12月20日

^{*1}大阪大学

^{*2}神戸大学

^{*1}Osaka University

^{*2}Kobe University

■ 本論文は提案性で評価されました。

し6脚以上の受動的動歩行が実現できるのであれば、その歩容と多脚をもつ生物の歩容との比較を行うことにより、歩行についての新たな知見を得ることが期待できる。

そこで本研究では、6脚以上の超多脚型受動的動歩行の実現を目指し、先行研究でも用いられた受動的動歩行ロボット Quartet-IV を対象に、まずはシミュレーションによってその実現可能性についての検証を行っていくことを目的とする。そして、ロボットの機構を変えていくことでその歩容がどのように変化していくかについての検証を行う。なお、本研究においては従来の「多脚」よりも多くの脚数も研究対象としているため、「超多脚」という呼称を用いている。

2. 4脚動物の歩容

この章では実際の4脚動物の歩容について紹介を行う。4脚動物にはその移動速度などによって様々な歩容が存在していることが知られている。

●ウォーク

人間の歩行に相当し低速度において現れる。Fig. 1 は gait chart と呼ばれ、歩容を表すものである。横軸に時間経過を表し、縦軸は左脚の前から順に L1, L2, 続いて、右脚の前から順に R1, R2 の歩容を示しており、黒地なら支持脚、白地なら遊脚の状態であることを表している。四つの足が別々に着地、離地する四節の歩容となっている。

●トロット

中速度において現れる歩容である。Fig. 2 のように二つの足が同時に着地、離地する二節の歩容である。L1 と R2, R1 と L2 がそれぞれペアになっている。

●ペース

トロットと同じく二節の歩容であり中速度において現れる。Fig. 3 のように L1 と L2, R1 と R2 がそれぞれペアになってほぼ同時に着地、離地する。

3. Quartet-IV

本章では本論文の考察を行う際に用いる受動的動歩行ロボット Quartet-IV について紹介を行う。

3.1 4脚型 Quartet-IV

Quartet-IV とは受動的動歩行の実験機である Quartet シリー

Fig. 1 Gait chart of walk

Fig. 2 Gait chart of trot

Fig. 3 Gait chart of pace

ズの四代目である [9] [13]~[15]. その概観を Fig. 4 に示す。基本要素は2脚の受動的動歩行ロボットであるが、2脚の要素を連結させることで4脚の歩行ロボットとなっている。その2脚要素を連結する部材を「胴体」と呼ぶこととする。前後の要素をリンクする要素はこの胴体のみであり、各脚の動きを直接的に同期させるような要素は存在していない。

この Quartet-IV を用いた実機実験において、4脚における受動的動歩行が実際に可能であり、また、胴体の自由度を変えることにより、異なった歩容が発生することが確認されている [10]. その実験の概要を以下に示す。

●堅い胴体のとき

ペース歩容で歩行する。また2脚では斜面を真っ直ぐ歩行できないのに対し、4脚では直進することができる。

●ロール回転可能な胴体のとき

傾斜角が小さいときは安定した歩行が観測されている。しかし、斜面の傾斜角を大きくしていくとトロット歩容が観測された。ただし長くその歩行を継続させることはできていない。

●前後で脚長が異なるとき

前脚のほうが短い場合、歩行はまったく不可能である。しかし前脚のほうが長い場合、堅い胴体のときにペース歩容が観測された。また、ロール回転可能な胴体のときも歩行可能であり、後脚が大きく左右に揺れながらの歩行となる。

また、シミュレーション上ではあるが、この Quartet-IV をシミュレータ上で再現し、その歩行の検証を行ったところ、傾斜角を徐々にかえていくことで、ウォークからトロットへの連続的な歩容の遷移が起こることも確認されている。

3.2 超多脚型 Quartet-IV

Fig. 4 では4脚の受動的動歩行ロボットとなっているが、そもそもの Quartet-IV のコンセプトは、脚数を自由に変更することが可能な受動的動歩行ロボットである。つまり、Fig. 5 のように2脚の要素を、胴体を用いてさらに連結させていくことにより、4脚だけでなく、6脚、8脚…と脚数を増加させた超多脚の歩行ロボットが実現可能な構成となっている。

本研究では、この6脚以上の Quartet-IV を対象にその歩容

Fig. 4 Overview of Quartet-IV (4-leg type)

Fig. 5 Extension of Quartet-IV

の検証を行い、超多脚の受動的動歩行についての考察を行う。

4. シミュレーション

本章では、超多脚型 Quartet-IV について、シミュレーションを行った結果を示す。

4.1 シミュレーション環境

本研究では、受動的動歩行ロボット Quartet-IV を対象として、歩行シミュレーションを行った。シミュレータとして LMS 社の Virtual Lab Motion を用い、シミュレーション上に 6 脚～20 脚の脚を持つ Quartet-IV と同一パラメータを持つモデルを作成し、シミュレーションを行った。Fig. 6 に作成したモデルの寸法を示す。また、2 脚要素、胴体の質量はそれぞれ 1.045 [kg]、0.025 [kg] である。素材に関して、球体の足はアクリル材、そのほかのパーツはアルミ材となっている。初期姿勢は Fig. 7 のように左側の足のみ地面に接触した状態を設定した。シミュレーション時間は 40 秒である。前章で述べたように、4 脚型 Quartet-IV において胴体の自由度の変化により歩容が変化したことから、本研究においても、まったく自由度のない堅い（剛体の）胴体のほかに、ロール、ヨー、ピッチ回転の自由度を胴体中央部にそれぞれ与えた胴体を用いた場合に対して検証を行った。そして、それぞれの条件において床の傾斜角を変化させ、安定な歩行が生成されるか否かの検証を行った。

4.2 シミュレーション結果

ヨー回転可能な胴体の場合においては、歩行を実現することが不可能であった。堅い胴体のとき、およびロール回転可能な胴体のときは、歩行を行うことは可能であったものの、まったく接地しない脚が発生し、限られた脚のみで歩行を行っていた。これは超多脚で歩行していないとみなし、歩行不能であると判断した。ピッチ回転可能な胴体のとき、および、ピッチとロール回転可能な胴体のときにおいて、超多脚の受動的動歩行が可能であった。

Fig. 6 Size of simulation model

Fig. 7 Initial condition

以下、歩行が可能であった二つの場合についての詳細を述べる。

4.2.1 ピッチ回転可能な胴体のとき

他の自由度を与えたときとは違い、20 脚まで脚数を増加させても歩行が可能であった。Fig. 8, 9 に 18 脚の Quartet-IV を用いた際のシミュレーション結果を示す。Fig. 8 は、胴体の進行方向に対する左右の振れを表している。X 軸が進行方向、Y 軸が左右の変位である。その左右の振れの振幅は歩行開始から少しずつ大きくなりながら、一定値に収束していることが確認できる。また、他の自由度のときにみられた、左または右にそれて歩行することではなく、直進していることが分かる。以下、特に記述をしなければ、胴体の左右の振幅は一定値に収束しており、直進して歩行するものとする。Fig. 9 はその際の gait chart を示している。図より明らかなように、左右のそれぞれの全脚が交互に接地していく歩容が発生している。これは、4 脚動物におけるペースに相当する歩容であると考えられる。なお、6 脚から 20 脚のすべてで同様の歩容が発生した。

このように、ピッチ回転を与えたときには超多脚でも歩行が可能であり、さらに全脚を用いての歩行となった。これは堅い胴体のときにまったく接地していなかった脚が、ピッチ回転の自由度が加わることで、その自重により接地するようになったことがその一因と考えられる。

4.2.2 ピッチとロール回転可能な胴体のとき

先に述べたように、ロール回転のみ可能な胴体のときは、堅い胴体のときと同様にまったく接地しない脚が発生した。しかしながら前節の結果より、ピッチ回転を加えることにより全脚接地の歩行が可能になると予想し、Fig. 10 のように、ピッチとロールの二つの自由度を組み合わせた胴体を持つモデルを用

Fig. 8 Track of 18 legs (pitch)

Fig. 9 Gait of 18 legs (pitch)

Fig. 10 Image of pitch & roll

Fig. 11 Gait of 20 legs (pitch & roll)

Fig. 12 Walk image

いてシミュレーションを行った。

その結果、この条件においても20脚まで脚数を増加させても歩行可能であった。この際の歩容(20脚)をFig. 11に示す。Fig. 9と比較して分かるように、ピッチ回転のみ可能な胴体のときは明らかに異なる歩容が発生していることが分かる。これは胴体を左右に振りつつ前脚から順次接地していくものとなっており、4脚動物におけるウォークに相当するものであると考えられる。歩行時の概観をFig. 12に示す。この場合においても、6脚から20脚のすべてで同様の歩容が発生した。

5. 考察

前章の結果より、超多脚において受動的動歩行がシミュレータ上で確認できたが、脚数によりその安定性の違いがみられた。そのため本章では脚数と安定性の関係についての検証結果を示す。

Fig. 13 Bend of body

Table 1 Walk time (6 legs, pitch)

angle of slope [deg]	3.7	4.2	4.7	5.2
walk time [s]	94	53	64	68

Table 2 Walk time (8 legs, pitch)

angle of slope [deg]	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4
walk time [s]	42	54	100	94	100	100

Table 3 Walk time (10 legs, pitch)

angle of slope [deg]	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7
walk time [s]	600	600	600	600	75

5.1 脚数と胴体の折れ曲がり角との関係

前章で述べたように超多脚で歩行可能といえたのは、胴体にピッチ回転を与えたとき、およびピッチとロール回転を与えたときの二つでありであった。この二つの条件下では、胴体の自由度や脚数によって、Fig. 13のように胴体がピッチ方向に極端に折れ曲がり、転倒や足同士が接触する状況がしばしば発生した。そこで、胴体のピッチ方向の折れ曲がり角と歩行の継続性に関係があると考え、それぞれの脚数において時間経過に対して胴体がどの程度折れ曲がるかの検証を行った。

5.1.1 ピッチ回転可能な胴体のとき

ピッチ回転可能な胴体とした場合に対し、6脚から20脚のQuartet-IVを用いて検証を行ったところ、胴体数(脚数)に応じて、次の三種類の異なった傾向を示すことが確認できた。

- 10脚～14脚
- 6脚, 18脚 (胴体数が偶数)
- 8脚, 16脚, 20脚 (胴体数が奇数)

そこで、この安定性の違いを詳細に検証を行うために、これまでの40～600秒にシミュレーション時間を増加した。その結果を以下に示す。床の傾斜に応じて、歩行開始から停止するまでの時間をTable 1～3に、胴体の折れ曲がり角の時間変位をFig. 14～16に示す。なお、脚数により検証を行った床傾斜角の範囲が異なるのは、40秒間のシミュレーションで歩行可能な床傾斜角の範囲が脚数により異なっていたためである。また、表中の600は600秒間最後まで歩行したことを表している。

6脚(胴体数2個)としたときの結果をTable 1, Fig. 14に示す。いずれの床傾斜角においても最後まで歩行を継続したとみなすことができなかった。胴体の折れ曲がり角は、時間経過に伴い急激にその変化が増加した。その後90秒付近でその増大が停止しているが、これは、脚同士が接触してしまっている

Fig. 14 Angle of bending bodies (6 legs, pitch, 3.7 [deg])

Fig. 15 Angle of bending bodies (8 legs, pitch, 4.1 [deg])

Fig. 16 Angle of bending bodies (10 legs, pitch, 4.1 [deg])

ためである。足接触後も歩行を継続する場合もあったが、この状態はすべての脚を有効に活用して歩行しているとはみなせないため歩行不能となったとみなすこととする。

Table 2, Fig. 15 は 8 脚（胴体数 3 個）とした際の結果である。この場合も、いずれの床傾斜においても最後まで歩行を継続することができなかった。歩き始めは、時間経過に伴い角度変化は緩やかになっておりその値が収束すると見られたが、最後には足同士が接触を起こしてしまっている。

Table 3, Fig. 16 は 10 脚（胴体数 4 個）とした際の結果である。このときは脚同士が接触することなく最後まで歩行が可能であった。なお、床傾斜角が 4.7 [deg] のときに最後まで歩行できなかったのは、胴体の折れ曲がり原因ではなく、角度が急であるため脚の振れが発散したためであると考えられる。また、図より明らかなように、終始胴体がほとんど折れ曲がらず歩行を継続している。

Table 4 Walk time (8 legs, pitch & roll)

angle of slope [deg]	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	5.1
walk time [s]	220	141	158	265	<u>600</u>	61

Table 5 Walk time (10 legs, pitch & roll)

angle of slope [deg]	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1
walk time [s]	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>	57

Fig. 17 Angle of bending bodies (8 legs, pitch & roll, 4.5 [deg])

Fig. 18 Angle of bending bodies (10 legs, pitch & roll, 4.2 [deg])

5.1.2 ピッチとロール回転可能な胴体のとき

ピッチとロール回転可能な胴体を用いた場合においては、胴体数に応じて、次の二種類の異なった傾向を示すことが確認できた。

- 胴体数が奇数
- 胴体数が偶数

この場合も 600 秒にシミュレーション時間を増加し、脚数の代表として、8 脚、10 脚を選び検証を行った。その際の結果を、Table 4, 5 および Fig. 17, 18 に示す。

Table 4, Fig. 17 は、8 脚（胴体数 3 個）としたときの結果である。歩行開始後、しばらくは折れ曲がり角は一定値に収束していたが、徐々に進行方向に対して斜めに歩行し、最終的に横を向く形となり歩行が停止した。図中の 150 秒付近の角度の急激な増加は歩行を停止したことによるものである。この原因として、胴体がピッチ方向に折れ曲がったことにより、本来ロール回転のみを与えるはずの機構がヨー回転の要素も与えることとなったためと考えられる。床傾斜が 4.9 [deg] のとき最後まで歩行を継続したが、同様の急激な角度上昇がシミュレーション終了直前に見られたため、他の角度と同様に歩行を停止するものと考えられる。

Fig. 19 Pitch (edge)

Fig. 20 Pitch (edge) & roll

Table 5, Fig. 18 は, 10 脚 (胴体数 4 個) とした場合の結果である. このときは最後まで歩行可能であった. また図より分かるように, 終始胴体がほぼ折れ曲がらずに最後まで歩行を継続している. なお, 床傾斜角が $5.1 [deg]$ のときに最後まで歩行できなかったのは, 胴体の折れ曲がりがない原因ではなく, 角度が急であるため脚の振れが発散したためであると考えられる.

以上のことをまとめると, 長時間歩行可能であったのは次の二とおりであった.

- ピッチ回転可能な胴体: 10 脚~14 脚
- ピッチとロール回転可能な胴体: 胴体の数が偶数

この二つの場合は胴体がほとんど折れ曲がらないで歩行を行っているという点で一致している. このことから, この構造の機体において安定して歩行するためには, 胴体がほとんど折れ曲がらないことが必要であるということが推察される.

ここで, 前述の脚数による胴体の折れ曲がり方の違いについて, 次のことが推察される. これまでの機体ではピッチ回転の自由度は胴体中央部のみに与えていたため, 個所の胴体が下に折れ曲がると, その前後の胴体はその構造上, 上に折れ曲がることになる. つまり Fig. 13 のように山と谷が交互に発生することとなる. 胴体の数が奇数の場合, 山と谷の数が異なり, この割合の違いにより折れ曲がり方が進行しやすくなっていると考えられる. 一方, 胴体の数が偶数の場合, 山と谷の数が同じであるため, まっすぐ伸びた状態で安定であることから, ほとんど胴体が折れ曲がらずに安定した歩行が実現するものと考えられる.

5.2 ピッチ位置の変更

前節の結果より, 胴体がほとんど折れ曲がらないことが歩行継続に必要な条件であると推測できた. そこで, Fig. 19, 20 のようにピッチ回転の自由度を胴体の端に与えるよう変更した. このことにより, 構造的にピッチ方向に大きく胴体が折れ曲がることなく歩行するようになると考えられる.

以下, ピッチ位置を変更した胴体を用いたシミュレーション結果について述べる.

5.2.1 ピッチ回転可能な胴体のとき

シミュレーション結果を, Fig. 21~23 に示す. それぞれ, Fig. 21 が 6 脚 (胴体数 2 個), Fig. 22 が 8 脚 (胴体数 3 個), Fig. 23 が 10 脚 (胴体数 4 個) の場合の gait chart である. これらより, 胴体の数が奇数偶数にかかわらず歩行が継続していること, また, その歩容は胴体中央部にピッチ回転のみの自由度を与えたときと同様にペース歩容であることが分かる.

5.3 ピッチとロール回転可能な胴体のとき

シミュレーション結果を Fig. 24, 25 に示す. それぞれ,

Fig. 21 Gait of 6 legs (4.0 [deg])

Fig. 22 Gait of 8 legs (4.0 [deg])

Fig. 23 Gait of 10 legs (4.0 [deg])

Fig. 24 Gait of 8 legs (4.3 [deg])

Fig. 25 Gait of 10 legs (4.3 [deg])

Fig. 24 が 8 脚 (胴体数 3 個), Fig. 25 が 10 脚 (胴体数 4 個) の場合の gait chart である. この場合も胴体の数が奇数偶数に関係なく歩行が継続した. また, その歩容は, 中央部にピッチ回転の自由度を与えたときと同様に, 4 脚でのウォーク歩容に相当する歩容となっていることが分かる.

これらのことより, ピッチ回転の自由度を, 胴体中央 (center) から胴体の端 (edge) に変更することで, 胴体の折れ曲がりが生じなくなり, 脚数に関係なく安定した歩行が実現できることが分かる.

6. 超多脚型受動的動歩行の安定性について

本章では、超多脚型受動的動歩行の安定性について、「歩行可能な床傾斜角の範囲」、および「起伏のある地面での歩行」の二つの側面から検証を行った。

6.1 歩行可能な床傾斜角の範囲

ここでは、超多脚型受動的動歩行の歩容の安定性を調べるために、20脚における歩行可能な床傾斜角の範囲を調べた。胴体中央にピッチがある場合 (center) および胴体端にピッチがある場合 (edge) それぞれに対し、ピッチのみ回転可能な胴体 (pitch), およびピッチとロール回転可能な胴体 (pitch & roll) を用いて検証を行った。Fig. 26 にその結果を示す。横軸が床傾斜角 [deg] であり、縦軸が各条件を表しており、黒地の部分が歩行可能であった範囲を表している。図より、胴体中央にピッチがある場合 (center) に比べ、胴体端にピッチがある場合 (edge) のほうが歩行可能範囲が広がっていることが分かるよう。前章の結果より、ピッチ回転の位置を変更することにより、脚数による歩容の差異がなくなることが確認できたが、それとともに、歩容の安定性も向上していることが確認される。

6.2 起伏のある地面での歩行

続いて、超多脚型受動的動歩行が、環境の変化に対してどれほど適応性があるのかの検証を行う。Fig. 27 に示すような起伏のある床を設置し、20脚の Quartet-IV がその起伏を通過するように歩行させることで、環境の変化に対する安定性の検証を行った。起伏の寸法を Fig. 28 に示す。起伏面の形状は円弧状となっており、起伏の幅を 340 [mm] に固定し、高さ H [mm] を 5 [mm] ごとに変化させた。起伏の高さと、起伏面の曲率半径の関係を Table 6 に示す。起伏面通過後も歩行が継続可能であったときの最大高さ H_{max} [mm] をそれぞれの場合に求めた。

6.2.1 ピッチ回転可能な胴体のとき

まず、ピッチ回転が胴体中央 (center) にある場合だが、凹凸のない床での歩行継続可能な床の傾斜角の範囲は、4.5 [deg]～

		4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6
pitch	center																	
	edge																	
pitch & roll	center																	
	edge																	

Fig. 26 Walkable slope angle range

Fig. 27 Contoured ground

Table 6 Relationship between height and radius of contoured ground

Height [mm]	15	20	25	30	35	40	45
Radius [mm]	971	733	591	497	430	381	344

4.6 [deg] であったことから、この範囲内において起伏がある床での検証を行った。この場合は、いずれの角度においても歩行を継続できなかった。しかし、歩容に乱れが生じることにより転倒を起こしたのではなく、起伏を乗り越えることができずに歩行を停止した。このことから、歩行可能な傾斜角の範囲と、床を乗り越えるのに最低限必要な傾斜との間にずれが生じたため、歩行継続が不能であったと考えられる。

次に、ピッチ回転の位置を胴体端 (edge) に変更した場合の機体について、同様のシミュレーションを行った。この機体の場合、凹凸のない床での歩行可能な角度の範囲は 4.6 [deg]～6.0 [deg] となっている。この場合においては、4.8 [deg] のときのみ $H = 15$ [mm] の高さまで歩行継続可能であった。Fig. 29 にその際の胴体の軌跡を示す。X 軸が進行方向、Y 軸が左右の変位である。起伏面歩行時は、左右方向の振幅は減少しているが、通過後は回復していることが分かる。また歩容についても、通過時に乱れた歩容が通常の状態に回復した。これらのことから、環境の変化に対するある程度の適応性を持っていることが分かる。

6.2.2 ピッチとロール回転可能な胴体のとき

ピッチ回転が胴体中央 (center) にある場合、凹凸のない床での歩行継続可能な傾斜角の範囲が、4.7 [deg]～5.0 [deg] であったことから、この範囲内で起伏のある床での検証を行った。その結果を Table 7 に示す。

この場合、傾斜角が 4.7 [deg] のときは歩行継続ができなかったが、他の角度においては起伏面通過後も歩行が可能であった。また、傾斜角が大きくなるほど、歩行継続可能な起伏の高さが高くなっていることが分かる。これは一定の高さの起伏を乗り

Fig. 28 Measure of the contoured ground

Fig. 29 Track of body (4.8 [deg], $H = 15$ [mm])

Table 7 Max Height of contoured ground that Quartet-IV could walk on (with pitch & roll body)

	4.7 [deg]	4.8 [deg]	4.9 [deg]	5.0 [deg]
H_{max} [mm]	×	15	20	25

Table 8 Max Height of contoured ground that Quartet-IV could walk on (with edge pitch & roll body)

	4.4 [deg]	4.6 [deg]	4.8 [deg]	5.0 [deg]
H_{max} [mm]	5	40	10	×

Fig. 30 Track of body (4.6 [deg], $H = 40$ [mm]) **Fig. 31** Walking on contoured ground (4.6 [deg], $H = 40$ [mm])

越えるには、その分の運動エネルギーを得るために、ある程度の傾斜が必要であるためと考えられる。

次に、ピッチ回転の位置を胴体端 (edge) に変更した場合の機体について、同様のシミュレーションを行った。この機体の場合、変更前の機体に比べて歩行可能な傾斜角の範囲は、4.4 [deg]～5.0 [deg] となっている。このときの結果を **Table 8** に示す。

変更前の機体とは違い 4.6 [deg] 以降は、傾斜角が大きくなるほど歩行継続可能な起伏の高さが、低くなっていることが分かる。これは、変更後の機体においては歩行速度が速くなっており、起伏面接触時の衝撃が大きくなったためと考えられる。しかしながら、4.6 [deg] においては $H = 40$ [mm] と非常に高い起伏を乗り越えたあとにおいても歩行可能であった。このときの歩行の様子を **Fig. 30, 31** に示す。ロボットの高さが 260 [mm] であることを考えると、身長 15% ほどの高さの起伏を超えていることになる。歩行を安定化する陽的な制御系を持たない受動的動歩行ロボットが、このような大きな環境変化に対して適応機能を持つ場合が存在することは大きな驚きである。

7. 結 言

本論文では、「6 脚以上の超多脚型受動的動歩行が存在するか?」という問いに対し、シミュレータ上ではあるが、6～20 の脚を持つ超多脚型受動的動歩行が実現できることを確認した。そして、様々なシミュレーション検証を行うことで、実現のためには各要素を連結する胴体が非常に重要であり、単に胴体を連結させるだけ (自由度のない剛体の胴体) では歩行実現はかなり難しく、胴体のピッチ回転の自由度が重要な鍵となっていることを明らかにした。また、ピッチ回転だけではなく、ピッチ回転にロール方向の自由度を持った胴体を用いることで、胴体以外は同じ歩行ロボットにおいて異なった二つの歩容 (ベースおよびワークに相当する歩容) を発生させることができる

ことを確認した。このことは、6 脚以上の超多脚型受動的動歩行が単に実現可能ということだけではなく、4 脚動物が速度に応じて歩容の変化をみせることや、4 脚の受動的動歩行ロボットが斜面の傾斜角に依存してその歩容を自律的に遷移する現象をみせたことと同様に、超多脚型受動的動歩行においても、環境 (斜面の傾斜角) やロボットの機構やパラメータに応じて適切な歩容を自律的に発現する仕組みが内在されていることを示唆するものと考えられる。

一方で、超多脚型受動的動歩行の安定性について二つの検証を行った。一つは胴体の折れ曲がり方の違いについてである。その傾向は五つに分類することができ、脚数により安定性に違いが発生することを見出した。また、胴体のピッチ回転を胴体中央部から胴体端に移動させることにより、脚数による歩容の違いはなくなり、さらにより高い安定性を持つことを示した。二つ目の検証は、環境の変化による安定性への影響である。環境の変化として床に起伏を設置した結果、床傾斜角の制限は強いものの起伏部通過後も歩行可能であり、環境変化への適応性の高さを確認することができた。これらのことに関して、ピッチ位置の変更やロール回転の付加により、多重構造に内在する環境適応能力が引き出された結果、より高い安定性が発現したと考えられる。

今後の課題として、今回のモデルは一とおりの機体で検証を行っているため、一般性を持たせるために、質量比や重心位置などを変化させ、歩容生成可能な範囲を明らかにする必要がある。また、超多脚型受動的動歩行が実機においても実現できることを確認し、一方で、その運動の理論解析を行うことにより、多脚の受動的動歩行ロボットにおいて様々な歩容が現れるからくりを明らかにし、歩行の原理解明により近づくことがあげられる。

謝 辞 本研究の一部は、文部科学省研究費補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現」の助成によるものである。

参 考 文 献

- [1] T. McGeer: "Passive dynamic walking," The Int. J. of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62–82, 1990.
- [2] A. Goswami, B. Thuilot and B. Espiau: "A Study of the Passive Gait of a Compass-Like Biped Robot: Symmetry and Chaos," The Int. J. of Robotics Research, vol.17, no.12, pp.1282–1301, 1998.
- [3] A. Goswami, B. Thuilot and B. Espiau: "Compass-Like Biped Robot Part I: Stability and Bifurcation of Passive Gaits," Technical Report no.2996 INRIA, 1996.
- [4] M. Garcia, A. Chatterjee, A. Ruina and M. Coleman: "The Simplest Walking Model: Stability, Complexity and Scaling," ASME J. of Biomechanical Engineering, vol.120, no.2, pp.281–288, 1998.
- [5] 平田, 小亀: "状態にジャンプを有する線形システムの周期運動—Compass Walking のモデリング, 安定解析, フィードバック制御," システム制御情報学会論文誌, vol.17, no.12, pp.553–560, 2004.
- [6] 杉本, 大須賀: "受動的動歩行の安定性に関する一考察—ポアンカレマップの構造解析からのアプローチ—," システム制御情報学会論文誌, vol.18, no.7, pp.255–260, 2005.
- [7] Y. Sugimoto and K. Osuka: "Hierarchical Implicit Feedback Structure in Passive Dynamic Walking," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.20, no.4, pp.559–566, 2008.

- [8] M.D. Berkemeier and A.C. Smith: "Passive dynamic quadrupedal walking," Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp.34-39, 1997.
- [9] 大須賀, 赤澤, 中谷: "多脚受動的動歩行について", 第 51 回システム制御情報学会研究発表講演会予稿集, 4T4-5, 2007.
- [10] K. Nakatani, Y. Sugimoto and K. Osuka: "Demonstration and Analysis of Quadrupedal Passive Dynamic Walking," Advanced Robotics, vol.23, no.5, pp.483-501, 2009.
- [11] S. Grillner: "Control of locomotion in bipeds, tetrapods and fish in Handbook of Physiology, volume II," American Physiol. Society, pp.1179-1236, 1981.
- [12] K. Tsujita, H. Toui and K. Tsuchiya: "Dynamic turning control of a quadruped locomotion robot using oscillators," Advanced Robotics, vol.19, no.10, pp.1115-1133, 2005.
- [13] 大須賀, 藤谷, 小野: "8 脚受動的歩行機械 quartet—挙動解析と実験", 第 27 回制御理論シンポジウム資料, pp.73-78, 1998.
- [14] 大須賀, 桐原: "受動的歩行ロボット Quartet II の歩行解析と歩行実験", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.5, pp.737-742, 2000.
- [15] K. Osuka and Y. Saruta: "Development and Control of New Legged Robot Quartet III," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.991-995, 2000.

杉本靖博 (Yasuhiro Sugimoto)

2000 年京都大学工学部物理工学科卒業, 2002 年京都大学大学院情報学研究科修士課程システム科学専攻修了, 2005 年同博士課程修了。同年, 京都大学大学院工学研究科助手, 2008 年(株)シンクチュープ勤務を経て, 2009 年大阪大学大学院工学研究科助教となり現在に至る。2005 年第 11 回ロボティクスシンポジア特別奨励賞, 2006 年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECH 表彰, 2006 年日本ロボット学会研究奨励賞を受賞。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本機械学会の会員。博士(情報学)。(日本ロボット学会正会員)

吉岡秀隆 (Hidetaka Yoshioka)

2009 年神戸大学工学部機械工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程入学, 現在に至る。受動的動歩行に興味を持ち, 超多脚型受動的動歩行の研究を行う。

(日本ロボット学会学生会員)

大須賀公一 (Koichi Osuka)

1984 年大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程(制御工学)修了。同年(株)東芝入社, 総合研究所勤務。1986 年大阪府立大学工学部助手。その後, 講師, 助教授を経て, 1998 年京都大学大学院情報学研究科助教授, 2003 年神戸大学工学部教授, 2009 年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻教授となり現在に至る。ロボティクス, 制御工学, レスキュー工学などの研究に従事。1986 年度計測自動制御学会学術奨励賞, システム制御情報学会榎木記念賞奨励賞, 計測自動制御学会論文賞, 2002 年同学会教育貢献賞, 2005 年第 11 回ロボティクスシンポジア特別奨励賞, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECH 表彰, 2007 年同部門学術貢献賞などを受賞。2008 年日本機械学会フェロー。IEEE, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本機械学会などの会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)