

揺動面上での脚式ロボットの姿勢安定について

森元映治^{1†}, 平 雄一郎¹, 江上大祐², 中村 誠¹

Study on Attitude Control for Four-legged Robot on Swaying Ground

Eiji Morimoto^{1†}, Yuichiro Taira¹, Daisuke Egami² and Makoto Nakamura¹

Abstract : The stable movement for a robot that supports fishery works and ocean development on a ship board and floating platforms has been studied. Because there are many obstacles preventing the movement on the path in ship, the multi-legged system is advantageous for the purpose. In this paper, attitude control method of four-legged robot to maintain stable walk on the ground swayed by wave motion has been simulated. The algorithms for the walk, in which the control variables such as inclination of robot body, position of center of gravity, angular acceleration of body are taken into account, has been compared. The results showed that control by center of gravity gave effective movement, and more good control performance had been obtained by using multi variables control system.

Key words : Control, Fishery engineering, Robots, Simulation, Stability

緒 言

漁業、海洋調査・開発は周囲を海に囲まれた我が国にとって重要であるが、一般に洋上での労働は条件が過酷であるため人力に変わる自動機械あるいは補助機械の開発の必要性は高い。船舶や洋上浮揚体では移動空間が狭く、揺動しているため、機械の移動様式として多脚歩行機構は適した様式であるといえる。多脚歩行については、その高い自由度を生かすことにより高度な運動性能と対地適応性を発揮していくものと期待され、これまで多くの研究が進められている。足先の面積によらず静的安定歩行を行える最小限の脚数からなる4足歩行ロボットは工学的応用性が高く、静的歩行を行いうるメカニズムとしては最もシンプルで制御もしやすく実用性も高い。また自由度の高い脚機構を有効に利用すれば、従来の車輪歩行機械になかった高い適応性のある行動が実現でき、今後高速な動歩行を行うシステムにも拡張しやすいなど、多くの点で研究価値が高いと考えられる。とりわけ多脚歩行ロボットの潜在的に有す

る高い移動機能性は、劣悪な環境下で作業するロボットとして、現在ますます重要視されている¹⁾。

船舶や海洋浮遊物上で安定した姿勢を保つことは、歩行はもちろんのこと、船や海洋浮遊物上でのあらゆる作業を行う上で重要である。本研究では環境条件として船舶や海洋浮遊物上で任意の揺れに対して安全かつ安定して歩行できるロボットをとりあげ、その安定歩行制御開発の初期段階として、2次元平面における歩行ロボットの安定姿勢制御法を検討する。

一般にマルチボディダイナミクスに対して、そのモデリングは複雑な非線形性のために容易ではない。そのため歩行ロボットのような複雑なシステムでは運動方程式を厳密に導出することは極めて困難である。そこで歩行ロボットのモデルをコンピュータ上で仮想的に作成し、内部で運動方程式を計算できるソフトウェアを用い、シミュレーション解析を行う。制御系設計においては、実験装置の複雑さや制御則実装における制限等の面で、実機による実験に比べて、シミュレーションによる制御系の検証が、コス

2009年12月4日受付. Received December 4, 2009.

1 水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

2 (株)朝日工業社 (Asahi Kogyosha Co., Ltd.)

† 別刷り請求先 (corresponding author) : morimoto@fish-u.ac.jp

ト的にも有利であり, シミュレーションによる解析はますます重要視されていくと考えられる²⁾。

方 法

歩行ロボットモデル

歩行ロボットを正面から捉え, ロボットの動きを2次元平面に限定したモデルを作成した。このモデルに対し, 解析を簡単にするため, 以下に示す①~⑤を仮定した。

- ①ロボットの構成要素はそれぞれの重心位置にある質点とみなせる。
- ②各リンクの重心にかかる力は, 本体の重心にかかる力とみなせる。
- ③左右それぞれについて, 前後の足は同時に同じ動きをする。
- ④ロボットは地面に対して垂直な2次元平面内で運動する。すなわち, Z軸方向(地面に対して水平方向)の運動は行わない。
- ⑤ロボットの関節は回転駆動式である。

Fig.1に構造を示す。歩行ロボットはリンクの関節で構成され, 各関節には入力値として, それぞれ独立にトルクが与えられる。関節1, 2に与えられるトルクは, 主にロボット本体の姿勢を制御すると同時に, ロボットのY方向

の振動を抑えることを目的とする。関節3, 4に与えられるトルクもロボット本体の姿勢を制御するが, 主な目的は, ロボットの重心位置の制御と, X方向の振動を抑えるためである。ここで, Σ_A : 静止した絶対座標系, Σ_I : 揺動する地面に固定された慣性座標系, Σ_i : 関節*i*を原点としてリンク*i*に固定した座標系, j_i : 関節*i*, q_i : 関節*i*の相対回転角度, m_i : リンク*i*の質量とする。

安定条件

本論文では, ロボット本体の傾きと重心位置を安定な姿勢であると判断するための指標とした。

揺れを伴う地面の上では静止しているだけでも重力の他に遠心力やコリオリ力が働く。したがって, 静止している場合と違い, Zero Moment Point (ZMP)³⁾が常にロボットの重心の真下にあるとは限らない。ここではロボット本体にかかる外力を重力のみとし, 慣性力は考慮していない状況での解析を行うこととした。すなわち, ZMPは常に歩行ロボットの重心の座標を地面に投影した点にあると仮定して制御法を検討した。

さらに, ZMPを各足の接地点を結んでできる多角形の中心に維持することで強い安定性が得られるというFirm Standing⁴⁾の考え方に基づいた検討を行った。

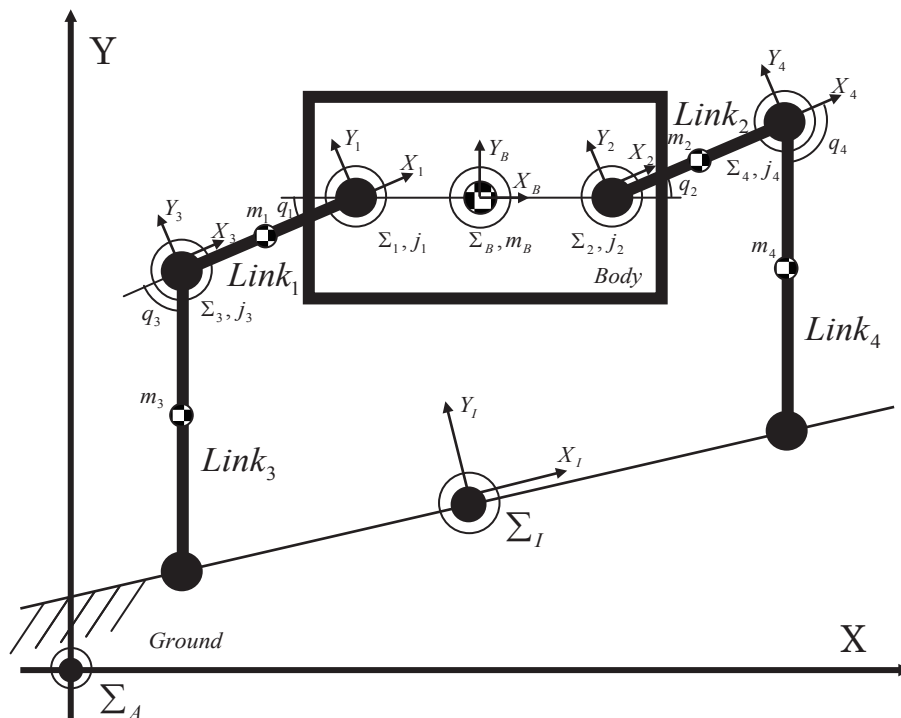


Fig. 1. A model of legged mobile manipulators

制御量の選定

ロボット本体の傾きは、水平でかつ完全に静止した地面（すなわち、慣性座標系と絶対座標系が一致している場合）で、他からの外力が全く作用しない場合、左右の脚の環境が全く同じであれば、左右の脚において対称となる関節に逆向きで同じ大きさのトルクを加えることでロボットの本体にかかるモーメントは打ち消し合い、ロボット本体は常に水平に保たれる。しかしながらこれは理想的な状態であり、船舶や海洋浮遊物上では常にそのような状態が続くことはない。したがって、左右の脚にはそれぞれ異なったトルクがかかり、それによりモーメントが生じ、その結果、ロボット本体には回転運動が発生する。これに加えて、揺動する地面に固定された慣性座標系が回転運動を行っているため、歩行ロボットの本体の傾きは、各関節にかかるトルクにより生じるモーメントのほかに、慣性座標系からも直接影響を受ける。すなわち、慣性座標系が任意の角度で傾いている状態においても、ロボット本体の傾きを常に静止している絶対座標系に対して0に近づける制御法を検討することが必要となる。今回は歩行ロボット本体の傾きを制御する上で、本体の傾きのほかに、回転運動の発生を表す角速度を制御量に加え、傾きのみよりも安定する姿勢制御法を検討した。

重心位置制御は、歩行ロボットの各リンクの重心にかかる力が、本体の重心にかかると仮定して解析する。さらに、本体の重心には重力のみが作用し、その他の外力はかからないものとする。つまり、ロボット本体の重心の座標を地面に投影した点がZMPであり、その慣性系座標に関するX座標が、左右の足の接地点を結んだ線分の中点（各足のX座標の中点）に維持するように、ロボット本体の重心位置制御を行うことが目的である。これは各足の接地点を結んでできる多角形の中心にZMPがあることが最も安定であるとしたFirm Standingの考え方をもとにしたものである。また、重心の位置制御を行うことで、歩行ロボットのX方向の揺れを小さくすることも目的の一つである。

制御方法として次のパターン1~4を用いた。パターン1はロボット本体の傾き、角速度、重心の位置を全く考慮しない姿勢制御法で、静止した地面で安定するための必要最小限の条件を用いて、揺れを伴った面上での歩行を解析する。これにより、完全に静止した地面に対する従来の方法では、揺れを伴う地面で安定することができないことを確認する。パターン2はロボット本体の傾きと、角速度を制御量とした制御方法であり、パターン3は歩行ロボット

の重心の位置を制御量としている。パターン4はパターン2とパターン3での制御を同時に行うもので、ロボット本体の傾き、角速度と重心位置の全てを制御量とする。なお、適切な制御量を選定することを目的としてパターン1~4で異なる制御量を用いているが、その選定を公正にするために、関節トルクを与えるコントローラーは同じ形式のものを用いている。

結果と考察

地面の傾きが6 [deg]ずつ変化するときのロボットの挙動をFig.2~Fig.3に示した。Fig.2とFig.3は、それぞれパターン1とパターン2でのシミュレーション結果をアニメーションで表している。なおFig.3で11.85[sec]以後の結果が表示されていないのは、それ以降シミュレーション実行不能となったためである。これらの制御方法では、両者とも設定したシミュレーション終了時間内に制御不能となった。Fig.4とFig.5はそれぞれ、パターン3、パターン4に対する結果である。歩行ロボットは終了時間内には制御不能にはならず、比較的安定した状態を維持している。ただし、パターン3の解析方法では、ロボット本体の傾きを考慮していないため、本体は、地面の傾きとともに常に傾いている。

Fig.6~Fig.9はそれぞれ、ロボット本体の傾き、角速度、重心と制御位置との誤差及びロボット本体の縦方向の速度を時間の経緯とともに表した図である。Fig.6は、絶対座標系から見たロボット本体の傾きを表している。パターン1の制御法による解析結果では、地面の揺れがロボット本体に直接影響を与え、本体は常に傾いている。加えて、ロボット本体には回転による振動が生じている。パターン3も同様に、ロボット本体は地面からの影響を受けて常に傾いている。しかしながら、ロボットの本体には、回転による振動は生じていない。パターン2、パターン4の制御法では、ロボット本体の傾きは、絶対座標系に対してほぼ水平に保たれている。ただし、パターン2では、ロボット本体に回転による振動が生じている。Fig.7は絶対座標系から見たロボット本体の角速度を表している。パターン1、パターン2では、ロボット本体には常に回転による振動が生じている。それに比べてパターン3、パターン4では、地面の揺れによる影響で、ロボット本体に多少の角速度が発生しているが、回転による振動は発生していない。Fig.8は、ロボット本体の重心X座標の位置誤差を

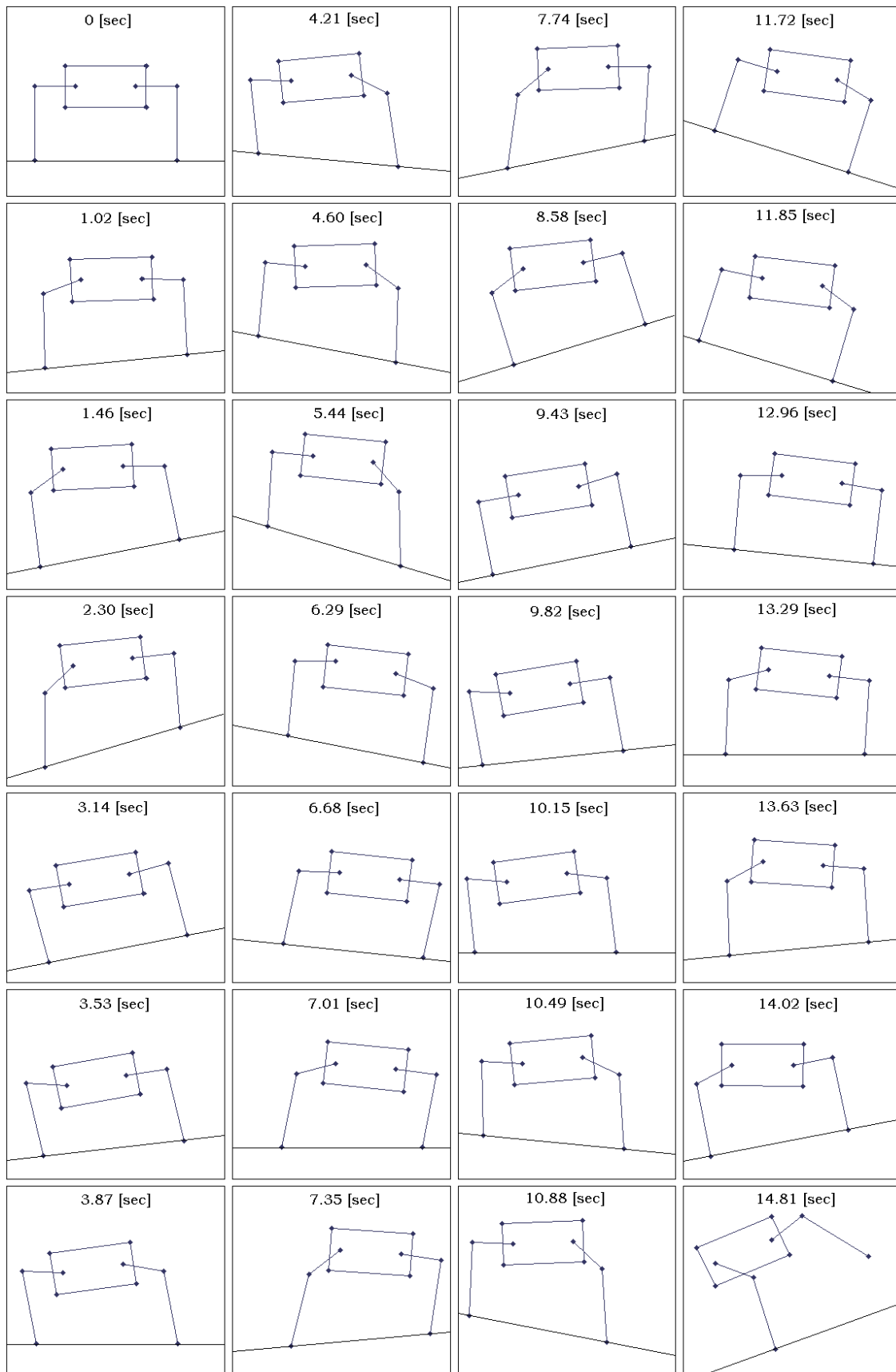


Fig. 2. Animation of the walking robot for Pattern 1.

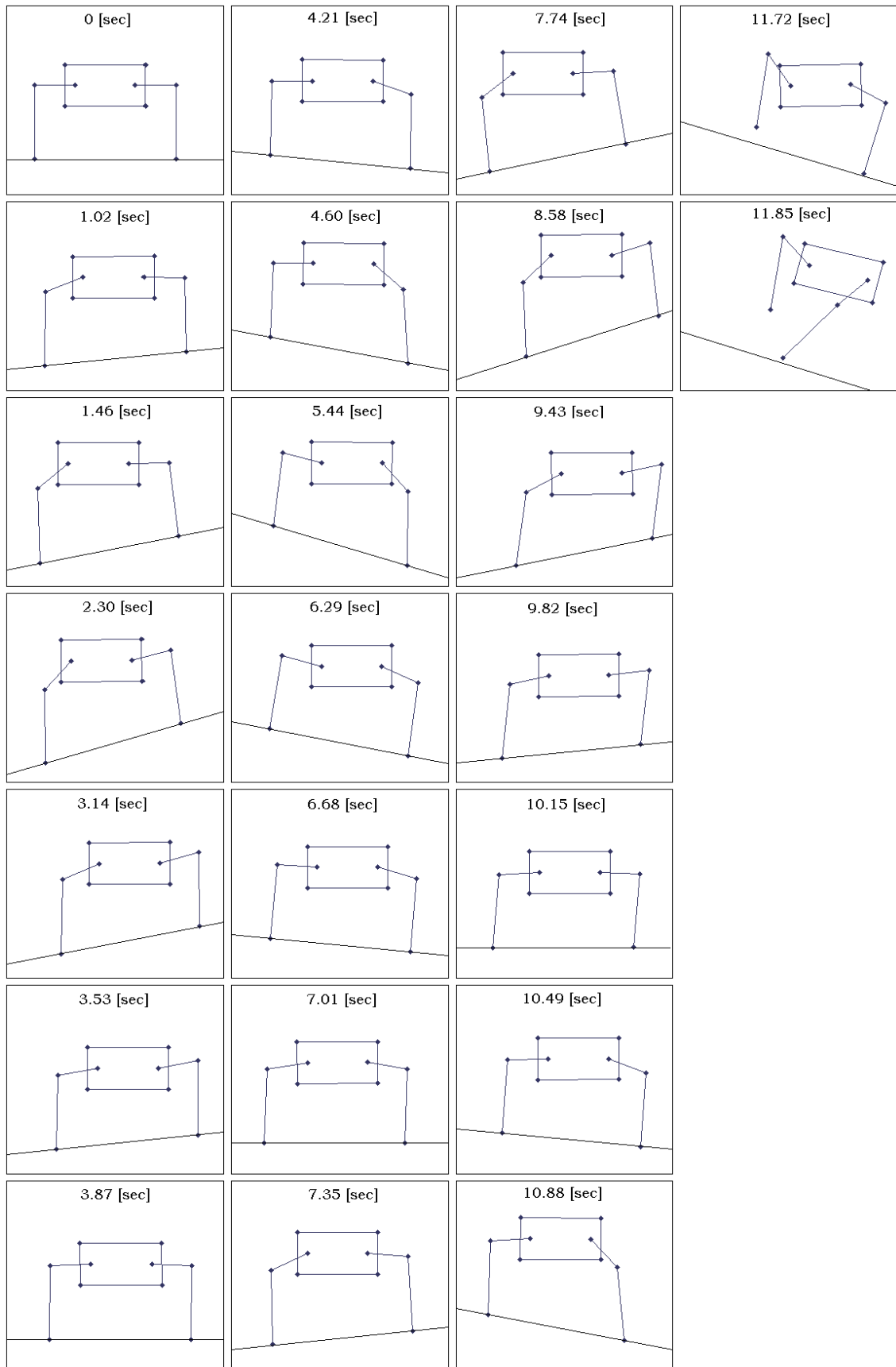


Fig. 3. Animation of the walking robot for Pattern 2.

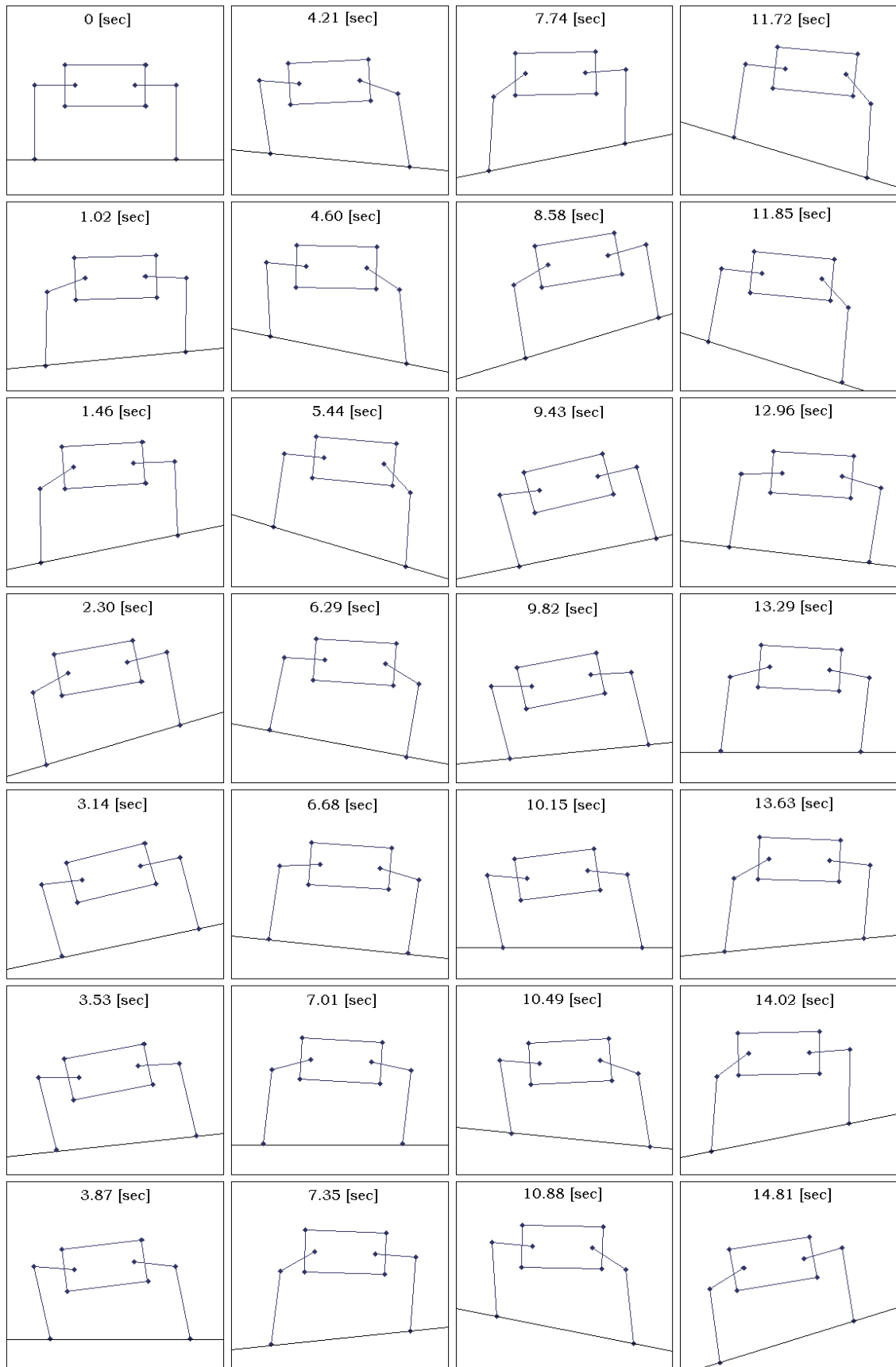


Fig. 4. Animation of the walking robot for Pattern 3.

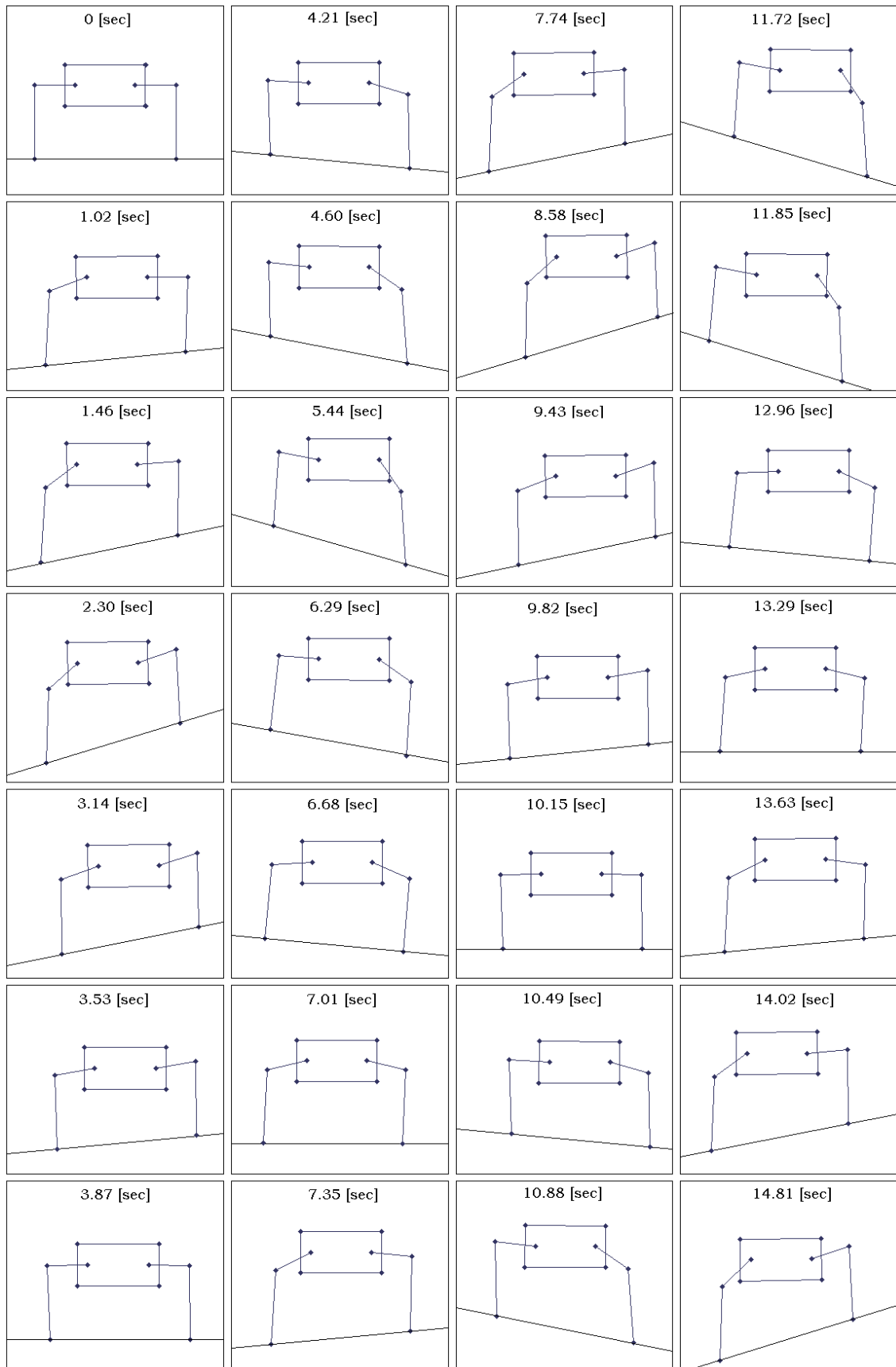


Fig. 5. Animation of the walking robot for Pattern 4.

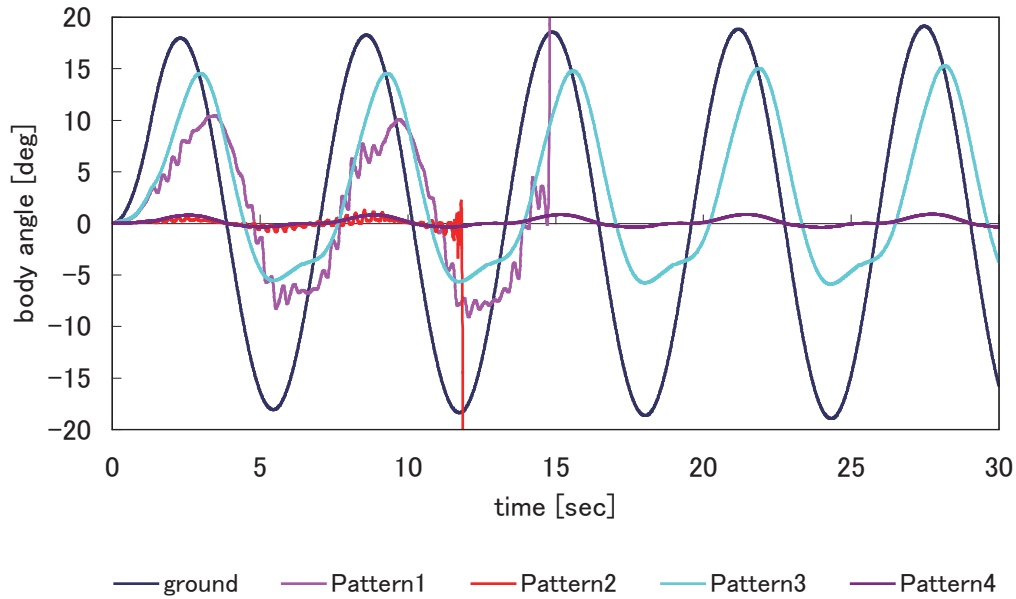


Fig. 6. Inclination of the robot body in the absolute coordinate system.

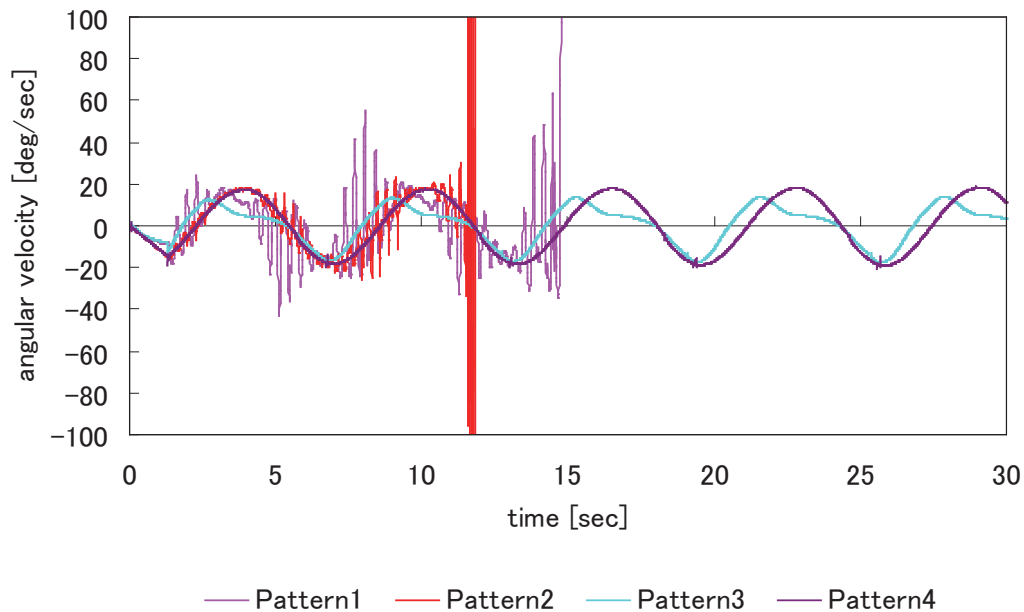


Fig. 7. Angular velocity of the robot body and vibration by rotation.

表している。各パターンの結果を比較すると、重心の位置誤差の違いは、それほど大きく表れていない。しかしながら、重心の位置を制御量に加えている方法（パターン3、パターン4）でのロボット本体には、振幅の大きな低周波振動のみが発生しており、それに対して、重心の位置を制御量としていない方法（パターン1、パターン2）でのロボット本体には、シミュレーション開始時から振幅の小さ

な高周波振動も発生しており、常に不安定な状態が続いていることがわかる。Fig.9は慣性座標系から見た、歩行ロボット本体のY方向速度を表したグラフである。実行不能となる前には各パターンとも時間の経過とともに、Y方向の速度は収束しているが、パターン1とパターン2に関しては、ロボット本体に縦揺れが見られる。

以上の結果をもとに考察を行い、加えて、各パターンの

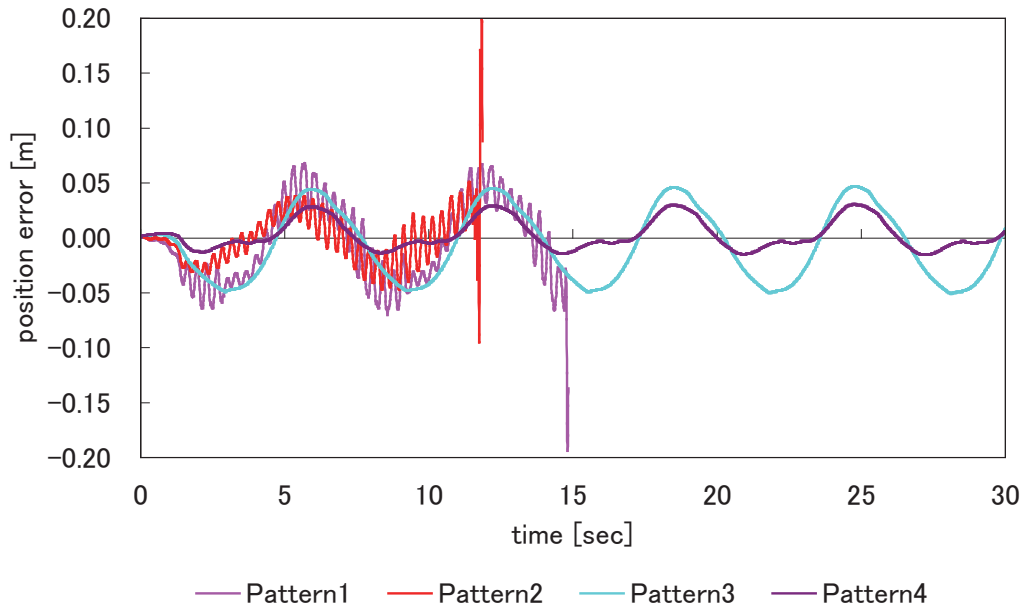


Fig. 8. Position error with respect to center of support polygon and gravity position of the robot body in the direction of X.

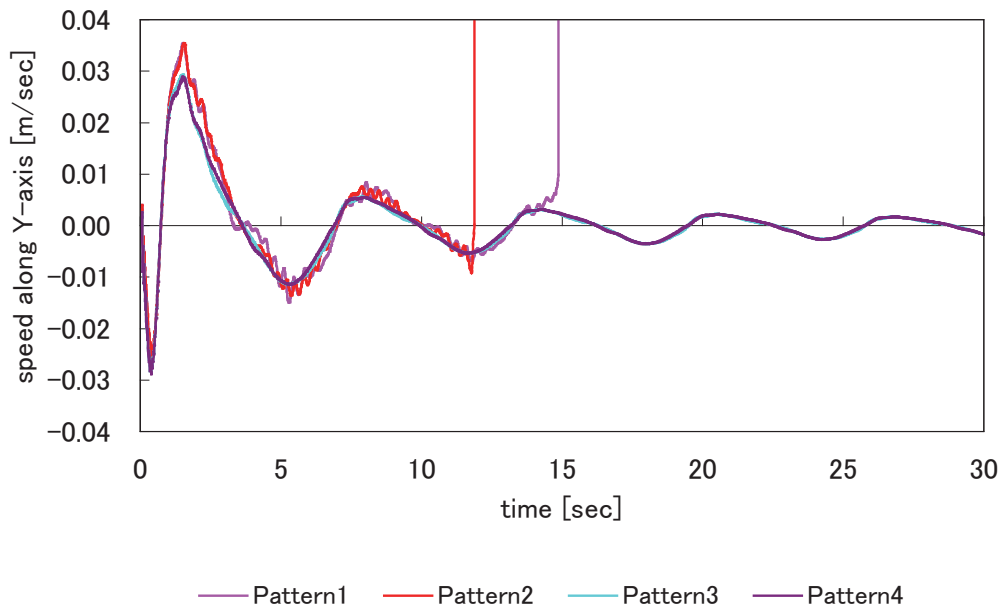


Fig. 9. Speed along Y-axis of the robot body in the inertial coordinate system.

姿勢制御法について検討を行った。パターン1とパターン2の制御法を比較すると両者の違いは、ロボット本体の傾きと角速度を制御量とする点であり、パターン1に比べてパターン2は、ロボット本体の傾きは制御されている。なおパターン1に比べてパターン2の方が早い時間帯で制御不能になったのは、ロボット本体の傾きと角速度を制御量に加えたことで、歩行ロボットの重心の位置が高くな

り、回転による振動や横揺れによる影響を受けやすくなったためであると考えられる。パターン1とパターン3を比較すると両制御法ともロボットの傾きを考慮していないため、歩行ロボットの挙動は酷似している。しかしながら、パターン3では終了時間内では安定している。これは重心の位置を制御量として加えることで、ロボット本体に発生する各種の振動を抑えたためであると考えられる。パター

ン4ではロボット本体の傾きと重心の位置の両方を考慮しているため他のパターンと大きく異なり, 終始安定な挙動を示している。パターン2とパターン3の比較から, 本体の傾き, 角速度を制御するより, 本体重心位置を制御するほうが安定であるといえる。パターン2とパターン4を比較すると両制御法ともロボット本体の傾きを考慮しているため, 歩行ロボットの挙動は酷似している。しかしながら, パターン4に対して, パターン2が終了時間内に制御不能になっているのは, パターン1と同様に, ロボット本体に振動が発生しているためであると考えられる。パターン3とパターン4からはパターン3はパターン4に比べて, ロボットの本体は常に傾いており, また, 重心位置の誤差もパターン4に比べて大きく, 不安定な状態を示している。しかしながら, 両制御法ともシミュレーション終了時間内に制御不能にはならなかった。

制御不能となる場合に共通していることは, 重心の位置を制御量に加えていないことである。また, Fig.6~Fig.9からも読み取れるように, パターン1やパターン2のように制御不能になっている制御法では, ロボット本体に常に回転による振動や横揺れ, 縦揺れが発生している。このことから, 揺れを伴った地面においては, 重心位置の制御を行うことで, ロボット本体に発生する振動を抑え, 歩行ロボットの安定姿勢制御に大きな影響を及ぼすと考えられる。ただし, Fig.8のパターン3とパターン4の結果を比較すると, ロボット本体の傾きと角速度を制御量とする方法と, 重心の位置を制御量とする方法を同時に行うことにより, ロボット本体の傾きは常に水平に保たれ, 重心と制御位置との誤差も小さくなり, より安定した状態を維持する。このことから, ロボット本体の傾きも, 揺れを伴った地面での安定姿勢制御に影響を及ぼす要因であると考えられる。

これらの結果から, 揺れを伴った地面で安定して立つためには, 重心の位置を制御することが最も重要であると考えられる。しかしながら, 今回の目的である安定姿勢制御においては, ロボット本体の傾きも安定指標として考えているため, 本体の傾きを常に水平に維持する姿勢制御法の検討も一つの目的である。すなわち, 重心の位置を制御するだけでは不完全であり, ロボット本体の傾きを制御に加えることで, 揺れを伴った地面においても安定した状態を維持すると考えられる。ただし今回のシミュレーション終

了時間は全て30[sec]であるが, その後も解析を続けたところ, 地面の傾きが22[deg]を越えたあたりでパターン4は制御不能になっている。したがって, 今回最も安定した状態を保ったパターン4の制御法においても, 地面の傾きの限界傾斜角は22[deg]前後であると考えられる。

結 言

以上より得られた結果を要約する。

- (1) 静止した地面に対する従来の制御法では, 揺れを伴った状況では姿勢を維持できない。
- (2) 安定した状態を維持するためには, 本体の傾きや角速度を制御するよりも重心の位置を制御することが重要になってくる。
- (3) 重心の位置を制御量とするだけでも安定して立つことが可能であるが, 本体の傾きや角速度を制御量に加えることで, より安定した姿勢を維持できる。

今回は研究の初期段階として, 4足歩行ロボットを正面から捉え, 左右それぞれにおいて前後の足が同時に同じ動きをすると仮定し, 2次元平面の動きに限定し解析した。今後は, 歩行ロボットのモデルを3次元に拡張し, 各脚の脚機構を3自由度, 3リンクに拡張し, かつ, 遠心力やコリオリ力も考慮した正確なZMPでの安定歩行制御法の検討を行うことが課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 小田島正・羅志偉: 階層型分散制御構造を用いた多脚歩行系における行動規範型歩行制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 6, pp. 766-773 (2006)
- 2) 稲田博信・石井和男: DADSを用いた四足歩行ロボットのモデリング, 第20回SICE九州支部学術講演会予稿集, pp. 35-36 (2001)
- 3) 日本機械学会編: 生物型システムのダイナミクスと制御, 養賢堂, pp. 73-77 (2002)
- 4) T. Tagawa, Y. Aiyama, and H. Osumi: Firm Standing of Legged Mobile Manipulator, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2031-2036 (2003)