

二脚ロボットの佇立安定性評価

A Measure of Stability of Stances for Biped Robot

○庄司 道彦, 王 志東, 高橋隆行, 中野栄二

○Michihiko Shoji, Zhi-Dong Wang, Takayuki Takahashi, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード: 二脚ロボット(biped robot), 安定性(stability), 安定余裕(stability margin), バイオメカニズム(biomechanism)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 情報科学研究科
知能ロボティクス論研究室 庄司 道彦, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023,
E-mail: shoji@robotics.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

本研究では, 人間を運動能力の高い二脚ロボットのモデルとして取り上げ, 力学的解析を行うことによってその構造の意義を検証し, 二脚ロボット設計のための一つの指針を与えることを目的とする。

人間の下肢の機能は, 水野により, 佇立, 歩行, 走行, 跳躍, よじ上りの5つとされている¹⁾。本研究で対象とする機能は, 佇立である。

佇立とは, 辞書的には, ただ立っていることであるが, ここでは, 環境に対応して, 全体の重心が支持基底面に収まるような安定な姿勢を選んで両足で立つことを指すものとする。環境には地面の凹凸, 傾斜だけではなく, 低い天井, 狭い通路等の, 全身の姿勢に対する制限が含まれる。また, 佇立には足の踏み換えも含むとする。歩行との違いは, 足の踏み換えが, ある歩容にしたがって行われるわけではない点である。佇立においては, 足の踏

み換えは姿勢変換のみで支持基底面内に系の重心を保つことが困難になったとき行われる。

従来, 脚型ロボットの佇立能力については, 多脚ロボットの転倒安定性の評価, という形で多くの研究が行われてきた^{2), 3)}。

一方, 二脚ロボットに関する研究の多くは動的定常歩行の実現を指向しており, 佇立時の安定性に関する議論は少ない。しかし, 足裏の面積を考えれば, 二脚ロボットでも静的安定を保って立つことが可能であり, 系全体の重心を支持基底面内に保ちながら多様な姿勢が実現できると考えられる。

また, 二脚ロボットの作業形態を考えた場合, 長距離の定常歩行よりも, むしろ, 姿勢変換を伴う立ち作業および姿勢変換で対応できない場合の足の踏み換え動作ができることが望ましい。このことから, 二脚ロボットの佇立能力を高めることは意義があると考えられる。

今回の報告では, 簡単化のため矢状面内に限定

したモデルについて、足の開き幅を変えることによる佇立可能な姿勢のバリエーションの増減を定量化するために自由佇立空間という概念を導入する。その体積を姿勢の多様性の尺度とする。さらに、ロボットの足の開き幅およびプロポーションを変化させてシミュレーションを行い、自由佇立空間の体積を尺度として各状態での姿勢の多様さを定量化する。

2. 脚ロボットにおける静的安定性評価

脚ロボットの静的安定性を高める方法には、2段階ある。最初の段階は、支持基底面の面積自体を大きくすることである。次の段階として、安定余裕が大きくなるように重心の位置を決める。

以下では、多脚と二脚での、支持基底面への重心投影点の扱いの意味の違いについて述べる。

2.1 多脚ロボットにおける静的安定性評価

一般に、多脚ロボットの安定性は、支持多角形の辺上の点と、ロボットの重心の支持面への垂直投影点との距離を安定余裕とすることで定量化される。このとき、重心の投影点の位置がロボットの姿勢を表す。

2.2 二脚ロボットにおける静的安定性評価

一方、二脚ロボットはFig.1に示すように、ある足の配置において支持基底面への重心の垂直投影点を動かさずに姿勢を大きく変化させることができる。このため、重心の投影点の位置だけでロボットの姿勢を表すことはできない。また、安定を保つことができる姿勢のバリエーションの多さを評価するには、支持基底面の大きさだけでなく、重心投影点を動かさずに実現できる姿勢の多様さまで含めて考えなければならない。このために、次章で自由佇立空間と呼ぶ概念を導入する。

また、安定余裕に関しては、ある姿勢と臨界姿勢との関係を関節角空間における2点を結ぶ測地

線に沿った長さで定量化することが考えられる。この点に関しては次回報告する予定である。

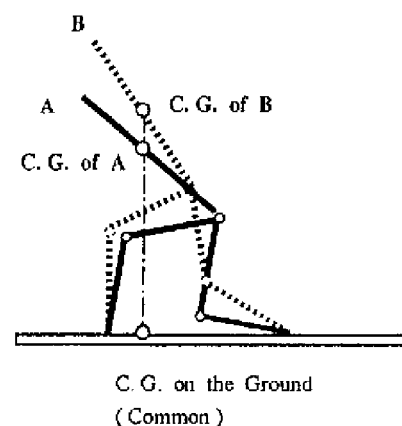


Fig. 1 重心投影点が一致する複数の姿勢

3. 自由佇立空間

簡単化のため、ロボットを矢状面内に限定する。Fig.2に示す二脚ロボットにおいて、重心の垂直投影点が後ろ足接地点と前足接地点との間にあるとき静的安定を保つことができる。このとき、Fig.3に示すような、独立な関節角の組 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を座標とする空間内で、静的安定姿勢が占める空間を自由佇立空間と呼ぶ。

多脚ロボットにおいて支持多角形の面積が静的安定を保てる姿勢の多少を反映しているように、自由佇立空間の体積は、二脚ロボットにおいて静的安定を保てる姿勢の多少を反映する。

本報告ではロボットの足開き幅を変化させて自由佇立空間の大きさの変化を調べ、その結果に基づき、ロボットのプロポーションに応じた安定性の高い足開き幅が存在することを指摘する。

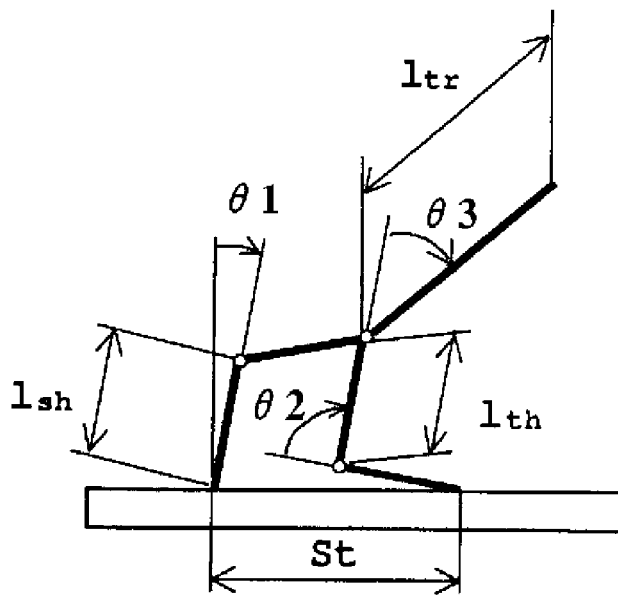


Fig. 2 矢状面内モデル

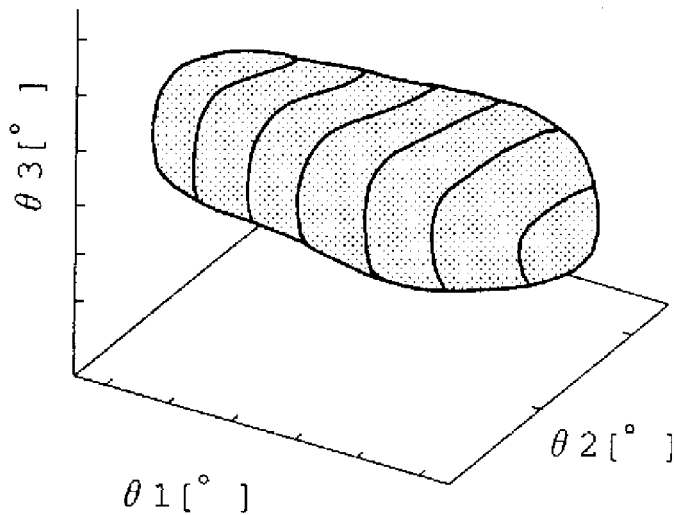


Fig. 3 自由佇立空間

4. 矢状面内でのシミュレーション

4.1 シミュレーションモデル

シミュレーションはFig.2のモデルで行った。質量に関しては、人体の各部の質量比を参考に、全体で1kgになるように設定した⁴⁾。

l_{sh} :脛リンク長さ(0.2m).

l_{th} :大腿リンク長さ(0.2m).

l_{tr} :胴体リンク長さ(0.39m).

St :前後方向の足の開き幅.

θ_1 :鉛直線からの前足脛リンクの角度.

θ_2 :脛リンクから見た後ろ足大腿リンクの相対角度.

θ_3 :後足大腿リンクから見た胴体リンクの相対角度.

なお、今回は矢状面内に限定したが、3次元での動力学シミュレーションまで拡張することを視野に入れて、Fig.4に示すようにDADS(Dynamical Analysis and Design System,CADSI社)でもモデリングを行っている。

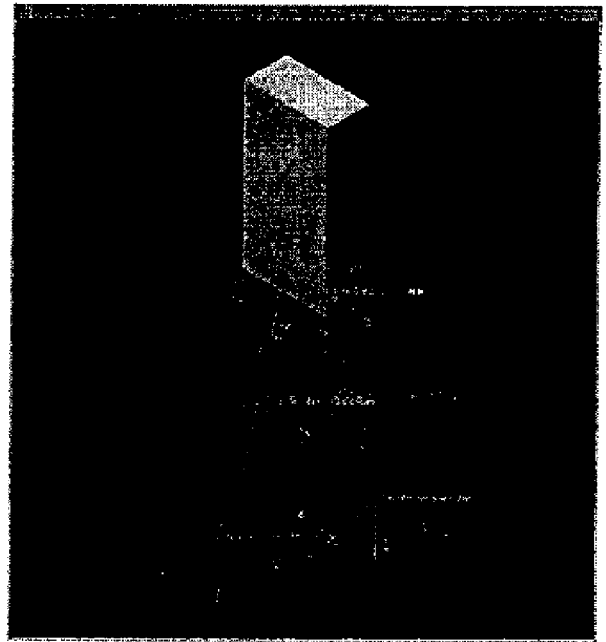


Fig. 4 DADSモデル

4.2 脛部リンク長さとお股部リンク長さが等しい場合

4.2.1 足開き幅を変えた場合の自由佇立空間

Fig.2のモデルで脛部リンク長さ l_{sh} =お股部リンク長さ l_{th} として、足開き幅 $St = 0.0$ から $0.55(m)$ でシミュレーションを行い、 $St = 0.15, 0.4, 0.55$ における自由佇立空間を視覚化したのがFig.5, Fig.6およびFig.7である。

$St = 0.15$ の場合も、 $St = 0.55$ の場合も、 $St = 0.4$ と比較すると、自由佇立空間は明らかに小さい。

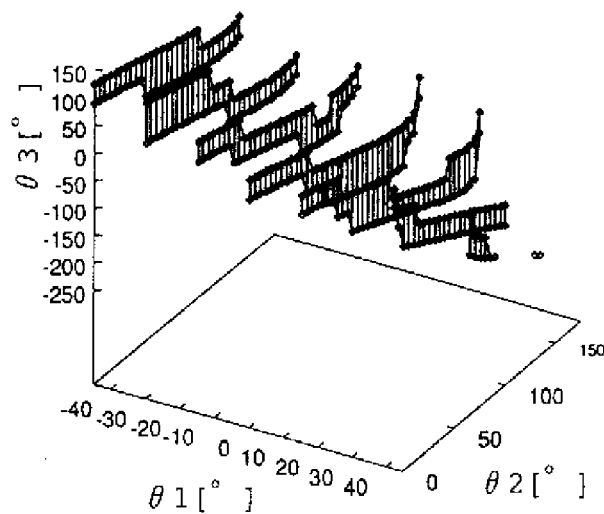


Fig. 5 St=0.15における自由佇立空間

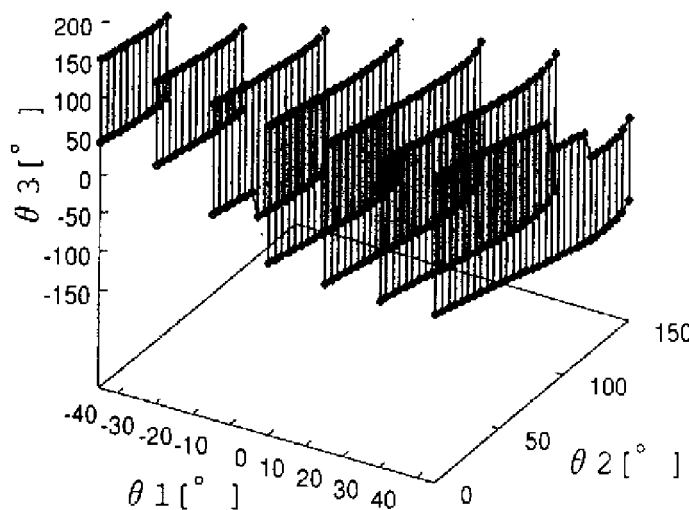


Fig. 6 St=0.4における自由佇立空間

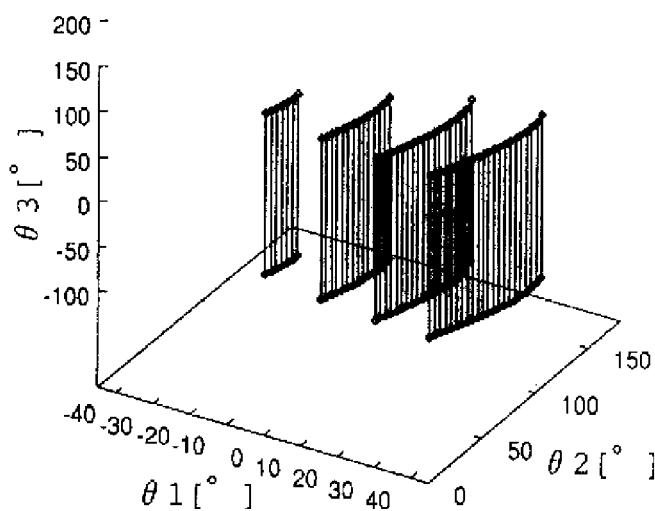


Fig. 7 St=0.55における自由佇立空間

4.2.2 足開き幅を変えた場合の自由佇立空間の体積変化

$St = 0.0 \sim 0.55$ (m) において自由佇立空間の体積をグラフのプロット数で表したのがFig.8である。横軸は脚長で正規化した足開き幅、縦軸はシミュレーションで自由佇立空間に含まれると判定された角度の組 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ の数で、無次元化された体積である。

足開き幅が脚長の0.8~1.0倍付近で最も自由佇立空間の体積が大きくなっている。

足開き幅が狭い場合は、わずかに上体が振れただけで重心が足先を乗り越えるため、自由佇立空間の体積は小さくなる。

足開き幅が広い場合には、足首および膝関節の可動範囲が非常に狭くなるため、自由佇立空間の体積は小さくなる。

このように、ロボットのプロポーションに応じた適切な足の開き幅から外れると、佇立可能姿勢のバリエーションは急激に減少することが分かる。

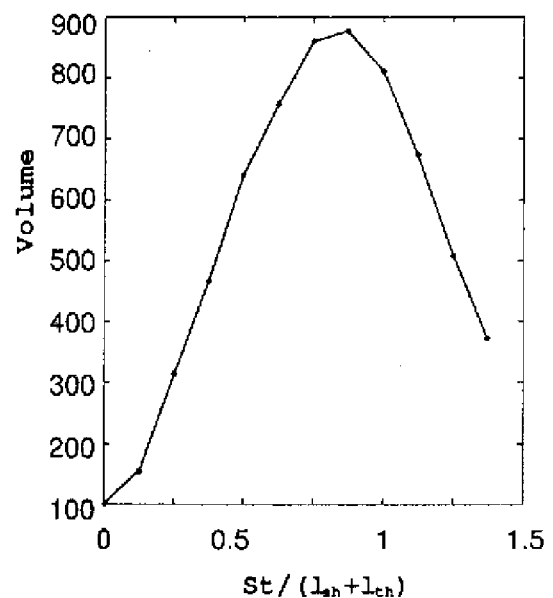


Fig. 8 足開き幅と自由佇立空間の体積

4.3 脛部リンク長さとお大腿部リンク長さの比率を変えた場合

Fig.9のモデルにおいて前後方向足幅 $St = 0.3$ として、脚長は変えずに大腿部長さ l_{th} を脛部長

長さ l_{sh} の0.2倍から2.0倍まで変化させてシミュレーションを行った結果を, Fig.9に示す. 横軸は大腿部と脛部のリンク長さの比 l_{th}/l_{sh} , 縦軸は自由佇立空間の無次元化された体積である.

比率1:1で最も自由佇立空間の体積が大きくなるのが分かる. このような結果になるのは, 脛を短くした場合も, 大腿を短くした場合も, 腰関節の動作が妨げられるからである.

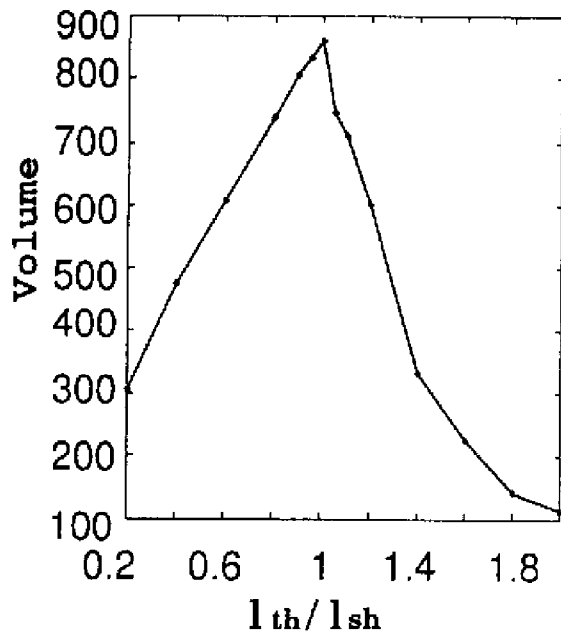


Fig. 9 脛部リンク長さ和大腿部リンク長さの比率を変えた場合

Fig.10, Fig.11およびFig.12は, それぞれ, l_{th}/l_{sh} が0.8, 1.0, 1.2の場合の自由佇立空間を表したものである. Fig.9において, l_{th}/l_{sh} が1を超えると急激に減少するのは, θ_2 , すなわち後脚膝の角度が制限されるためであることが分かる.

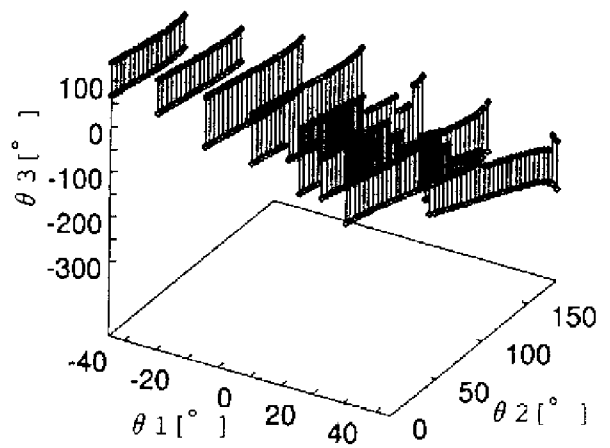


Fig. 10 l_{th}/l_{sh} が0.8の場合の自由佇立空間

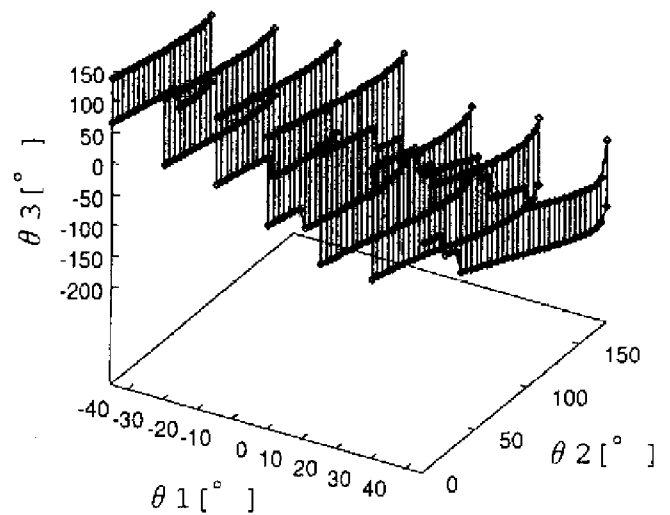


Fig. 11 l_{th}/l_{sh} が1.0の場合の自由佇立空間

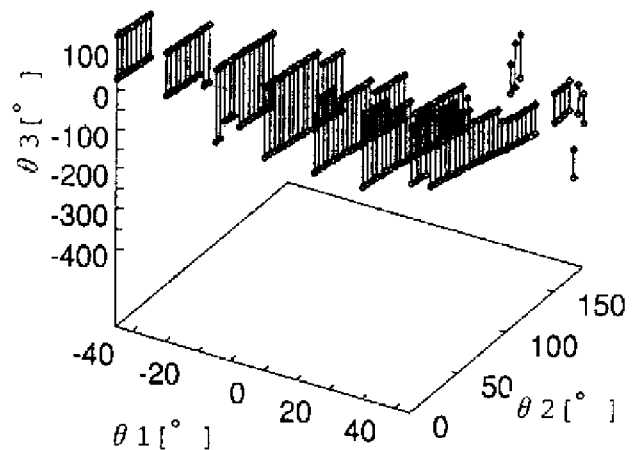


Fig. 12 l_{th}/l_{sh} が1.2の場合の自由佇立空間

5. おわりに

本報告では、二脚ロボットの佇立時の安定性を定量的に評価するための第一段階として、多脚ロボットと二脚ロボットでは安定性を評価する上で相違点があることを指摘した。

さらに、足の配置を固定した場合の独立な関節角 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) を座標とする空間を自由佇立空間と呼び、自由佇立空間の体積を、その足配置での安定性の指標として用いることを提案した。

前後方向の足の開き幅を変えてシミュレーションを行った結果、脚長の0.8~1.0倍付近で最も自由佇立空間の体積が大きく、この範囲を外れると体積が急激に減少した。このことから、ロボットを自由佇立空間を大きく取るには、ロボットのプロポーションに適した足開き幅を選んで立つことが重要であると言える。

さらに、脛と大腿の長さの比率を変化させたところ、比率1:1付近で最も自由佇立空間の体積が大きく、人体の構造と矛盾しない結果が得られた。

今後は、以下のことを行う予定である。

- 支持多角形における安定余裕にあたる概念を、自由佇立空間に対して構築する。
- モデルの自由度を更に増やして3次元的な運動での解析を行う。
- バイオメカニカルな見地から関節角度を決定したモデルについて検討する。

参考文献

- 1) 水野 祥太郎: 足の機能と、その訓練, リハビリテーション医学, 19-2 107/112(1982)
- 2) McGhee, Frank: On the stability properties of quadruped creeping gait, Mathematical Biosciences, 3-2 331/351, 1968.
- 3) Dwivedi, Mahalingam: Periodic Gaits for the CMU Ambler, J. Robotic Systems, 9-1 1/15, 1992.
- 4) 金子 公宥: スポーツ・バイオメカニクス入門, 杏林書院, 1994.