研究

二脚ロボットの佇立能力向上のための足構造

庄 司 道 彦* 王 志 東* 高 橋 隆 行* 中 野 栄 二*

要旨

不整地環境で二脚ロボットに継続的な作業を行わせるためには佇立能力の向上が不可欠である。本研究では、非平坦面でも静定接地できる足底3点支持構造と、開脚時に支持多角形面積を大きく保つ効果のある、足関節の斜行ロール軸を提案する。

1. はじめに

本研究では、人間型の二脚ロボットの設計において、足裏の3点支持構造、および水平面に対し傾斜した足首ロール関節を採用することの利点について述べる。人間をモデルとした二脚のロボットの研究では、下肢の機能のうち、主に歩行に焦点が当てられてきた。中でも、平地での定常歩行の実現が中心的課題として研究され、平地での実現後は、階段歩行および段差のある面上での歩行の研究等が行われてきた^{1,2)}。それらの研究においても、各足が平坦な接地面を確保できることを前提としている。しかし、移動ロボットとしての二脚のロボットの活動場所として想定されているのは、以下のような環境である。

- (1) 脚より高速移動が可能でエネルギー効率に優れる車輪式のロボットでは進入できない、凹凸の激しい環境。
- (2) 二脚より安定性に優れた多脚のロボットでは進入できないこみいった林内など、多脚ロボットに必要な、広い支持基底面を確保できない環境。
- (3) 家具のある室内など、人間が活動しやすくできている環境。

本論文では(1)および(2)を対象として議論を進める。これらの環境では、地面形状の複雑さにより、現在の二脚ロボットのようにより前もって軌道を生成しておくことが難しい。軌道が生成できたとしても、足場の滑り、変形によって、計画した軌道から外れやすい。また、形状から接地できると判断された面も、脆弱である可能性があり、そのような環境で動歩行を試みればロボットは容易に転倒すると思われる。このような悪環境下では、重心の投影点を常に支持脚足底内にキープする静歩行は、現在

のロボットに使用できるアクチュエータや計算機的能力を考えたと現実的な解の一つであると思われる。以降、本研究ではロボットの運動は静的なものとする。

ところで、ここまで述べてきたような環境でのロボットの作業形態は、作業現場まで車両等で輸送され、そこで局所的な立ち作業を行った後で輸送車両に回収されるようになると本研究では想定している。つまり、定常歩行している時間は少なく、立ち作業や踏み替えを行っている時間が多い。従って、ロボットが継続的な活動を行うには、歩行機能の実現だけではなく、地形に適応して立ち続ける能力、すなわち、佇立機能の向上が不可欠と考えられる。佇立とは、辞書的には、ただ立っていることを意味するが、ここでは、環境に対応して静的安定な姿勢を選んで立ち姿勢を維持することとする。環境には地面の凹凸や傾斜だけではなく、低い天井や狭い通路等の、全身の姿勢に対する制限が含まれる。また、佇立には足の踏み替えも含まれるとする。この足の踏み替え動作は、一定の歩容によらない点で歩行とは異なる。

このように、佇立能力は不整地環境での二脚のロボットの活動のために重要であると考えられるが、これまで独立した課題として取り上げられることはなかった。その理由は、従来の二脚ロボットの研究が、定常歩行を当面の目標としていたため、平坦面での直立、および足踏み動作が実現できた段階で佇立はクリアされた課題と見なされたためである。しかし、ロボットが平坦面から不整地面へと活動の場所を広げるにしたがって佇立能力が重要となると考えられる。

そこで、本研究では、不整地面上での佇立能力を向上させるために、ロボットの足裏の3点支持構造および水平面に対し傾斜した足首ロール関節を提案する。まず、この構造により、段差接地時に接地点の滑りを抑制する効果があること、および許容できる段差高さが向上することを述べる。次に、平坦面でロボットが開脚して佇立した場合には開脚幅に応じて支持基底面面積を最大化する最適な足先角度があることを示し、提案した構造が低自由度でありながら近似的にその最適な足先角度を実現できることについて議論する。

2000年10月25日受付

* 東北大学大学院・情報科学研究科

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉01

E-mail: shoji@robotics.is.tohoku.ac.jp

キーワード: 二脚ロボット, 佇立, 不整地, 足構造

2. 足底接地形態の検討

人間の足裏は、3つのアーチ構造で支えられている。これらのアーチの支持点は、第1中足骨頭、第5中足骨頭、踵骨隆起の内側および外側突起である³⁾。本論文では、この3点支持構造をロボットの足底のデザインとして採用する。以下、面接地の足底と4点接地の足底に対する3点接地の利点について述べる。

板状の足底が凹凸面上に接地した場合は、3点が接地するまでに先に接地した2点を結ぶ直線を回転軸として足底面が拘束運動する。このとき、足首の関節角より接地面の傾斜角が求められるが、足裏の支持点の個数が分からないため、安全に片足支持状態に移行できない。これに対し、点で接地する足底は床面の凹凸が極端に大きくない限り支持点が決まっているため、片脚支持状態に移行できるかの判定が容易である。

また、二脚ロボットの足の機能的要件を考えると、足首のロール軸回り、ピッチ軸回りにモーメントを発生できることが必要である⁴⁾。このため、最低でも足底には支持点が3点、足首関節には2自由度が必要となる。一般に4点支持の足は、踵側の2点と足先側の2点で構成される。この4点が凹凸面に接地するためには足首のロール軸とピッチ軸の他に、一つの支持点を上下させる自由度が必要で、足の最低限の機能的要件を上回る自由度が必要になる。これに対し、3点支持の足は、足首のロール軸とピッチ軸、または足首のピッチ軸と一つの支持点を上下させる自由度があれば良い。3点支持は4点支持と比較して支持基底面の面積が小さくなる欠点があるが、少ない自由度で凹凸面に静定接地できる利点を本研究では優先する。

3. 傾斜したロール軸の効果

3.1 人間の足のモデル化

人間の足首の2自由度の運動は、主として、一軸関節である距腿関節(Talocrural Joint)と距骨下関節(Subtalar Joint)によって実現されている。また、図1(a)に示すように、距骨下関節軸は水平面に対して 0.73 ± 0.16 [rad] 傾斜している⁵⁾。尚、引用文献中では角度は degree で表記されているが、論文では radian に換算してある。この傾斜ロール軸の存在が本研究の動機であり、その意義を考察することによって二脚ロボット設計のための新たな知見を得ることが本研究の目的である。ここで、人間の足を図1(b)のようにモデル化しておく。

3.2 段差における傾斜したロール軸の効果

図2のTYPE1のように足首を二軸関節で構成した場合、足底3点はそろってロール回転する。しかし、踵が一点接地の場合は、接地面形状に対応するために踵自体がロール回転する必要はない。そこで、図2のTYPE2のような前足部のみがロール回転するモデルについて考える。TYPE2の問題点は、段差のある面に3点が順に接地していく際に、既接地点が滑ることである。例として、図3に示す状況で考える。踵と前足部の一点が段差の上に接地しており、前足部のもう一点が段差の下に接地するところである。今、足長 L_f 、足幅 W_f とする。図4に示すように、ロール軸まわりに ϕ 回転が生じると、

$$OA = \sqrt{L_f^2 + \left(\frac{W_f}{2}\right)^2} \quad (1)$$

から

$$OA' = \sqrt{L_f^2 + \left(\frac{W_f}{2 \cos \phi}\right)^2} \quad (2)$$

となって、接地点間距離が延びる。このため、仮に踵の既接地点が滑らないとすれば、前足部既接地点が必ず滑る。

このような既接地点の滑りは、不整地面上での佇立を不安定にする要因となるため、避けるべきである。したがって、TYPE2は不整地にはふさわしくないと考えられるので、これ以降はTYPE1と次に述べるTYPE3を比較検討することにする。図2に示すTYPE3(図1(b)と同一)では、図5に示すように踵が円錐の頂点に位置し、前足部の2点は円錐の底円周上にある。これにより、ロール軸が回転しても、3つの支持点間の距離は不変

図1. (a)人間の足関節の軸位. (b)モデル化.
Fig.1 (a)Main two joints of human ankle joint. (b)Human foot model.

図2. 足のデザインの3案.
Fig.2 Three plans for foot design.

図3. 段差接地時の既接地点の滑り.
Fig.3 Contact points must slip on a step.

図4. TYPE2の足先の点の軌道.
Fig.4 Trajectory of toe points of TYPE2.

図5. TYPE3の足先の点の軌道.
Fig.5 Trajectory of toe points of TYPE3.

図6. 片足支持期における段差面での安定余裕.
Fig.6 Stability margin of a single foot on a step.

表1. 足部の仕様.
Table 1 Specifications of foot.

Foot length L_f [m]	0.14
Stride width W_f [m]	0.07
Foot height H_f [m]	0.016
Hindfoot length / Foot length h	0.2
Angle of the inclined roll axis 足先ロール軸の傾き γ [rad]	0.52

である。これにより、既接地点に滑りを生じさせずに3点目を接地させることが可能となる。

次に、TYPE1とTYPE3を許容できる段差高さの観点から比較する。図6は、片脚支持期の支持多角形と安定余裕を示したものである。支持多角形とは、足底の支持点を結んだ凸多角形である。ロボットの運動の加速度が無視できるほど小さい場合、体の重心の垂直投影点が支持多角形の内部にあればロボットは静的安定である。一般に、静的安定性の指標としては、安定余裕が使われる。安定余裕とは、重心の垂直投影点Gから支持多角形の各辺に垂線を降ろしたときの、最短の垂線EGの長さで

図7. TYPE1およびTYPE3のパラメータ.
Fig.7 Parameters of TYPE1 and TYPE3.

図8. TYPE1とTYPE3の段差への適応.
Fig.8 Adaptation of TYPE1 and TYPE3 to an uneven surface.

図9. TYPE1とTYPE3の限界斜面角度.
Fig.9 Limitation of slope angles for TYPE1 and TYPE3.

ある。限界段差高さとは、安定余裕GEが0となる高さである。なお、両足支持の場合、安定余裕が0以下となっても内力によって接地を維持することが可能である。しかし、その状態から静的に片足支持に移行することができない。本論文では不整地面上での静的な移動を想定しているため、片足支持基底面の安定余裕は常に正である必要がある。

図7に示す寸法 L_f , W_f , h , H_f が共通の場合、TYPE1とTYPE3が許容できる段差の高さは同一である。なぜなら、図8に示すように、同一の座標の点(足先未接地点および足首点)が同一の回転軸 ω まわりに回転するため、両者の足先未接地点および足首点の挙動は同じになる。表1に示す仕様を満たす場合、限界段差高さは0.029[m]、回転軸 ω まわりの回転角にすると0.454[rad]である。なお、 h は足首ピッチ関節の位置を決定するための比例定数である。

ここまでの議論により、TYPE3はTYPE1と同等の対段差適応性を持っていると言える。

3.3 斜面上における傾斜したロール軸の効果

次に、斜面上でのTYPE3とTYPE1の性能を比較する。指標となるのは、許容できる斜面の傾斜角である。段差上での比較と同様、寸法 L_f , W_f , h , H_f は共通とする。図9に示すように、斜面の傾斜角 ψ_1 , ψ_3 を大きくしていき、安定余裕が0となっ

図 10. TYPE1: 足の間隔を広げても足の向きは変わらない.
Fig.10 TYPE1: The long lines of both feet keep parallel as the stance becomes wide.

図 11. TYPE3: 足の間隔を広げると足が内旋する.
Fig.11 TYPE3: Both feet rotate internally as the stance becomes wide.

たところで限界とする. 表 1 に示す仕様を満たす場合, TYPE1 の限界斜度 ϕ_1 は, 下腿がヨー回転しない場合は $0.419[\text{rad}]$, 下腿に $\pm 0.21[\text{rad}]$ のヨー回転を許した場合は $0.454[\text{rad}]$ であった. 一方, TYPE3 の限界斜度 ϕ_3 は $0.52[\text{rad}]$ であった. すなわち, TYPE3 は斜面への適応性の点で TYPE1 より優れていると言える.

3.4 平地における傾斜したロール軸の効果

人間は, 足の間隔を狭くして立っている場合には両足の足長軸のなす角を $1[\text{rad}]$ から $1.5[\text{rad}]$ 程度にしているのが普通である. これに対し, 足の間隔を広くして立っている場合は両足の足長軸は平行に近い. この現象は, いわゆる“気をつけ”と“休め”の姿勢に典型的に現れる. このことが支持多角形の面積を大きくするのに役立っていることを計算によって確かめることができる.

支持多角形の面積は, 許容できる重心位置の多様さを反映している点で, 安定余裕とは別の観点からの一つの安定性指標とみなせる.

以下, 前節の各タイプが開脚して立った場合の支持多角形の面積を, まず定性的に, 次に定量的に比較する.

図 10 に示す TYPE1 は, 足のロール関節軸が水平であるため, 足の間隔を広げても足の向きは変化しない. なお, 簡単のため, 股関節はロール軸のみとしている. 一方, 図 11 に示す TYPE3 は, 足のロール関節軸が水平面に対し斜行しているため, その軸まわりの運動は, 内・外転と内・外旋の複合的な内返し・外返しと呼ばれる運動になる. 平坦な面上で開脚して立つ場合には, 足底の接地を維持するための幾何的拘束条件により前足部が内返しを起こす. この運動は, YZ 平面では見かけ上, 足の内転として, XY 平面では足の内旋として現れる. TYPE1 と比較すると, 足の間隔が狭い場合は支持多角形の面積は TYPE1 と等しく, 足の間隔を広げた場合は, 足の内返しに伴う踵の外旋が支持多角形の面積を大きくする方に作用し, 足先の内旋が支持多角形の面積を小さくする方に作用する.

このように, 足先のロール軸が斜行している場合は, 開脚に伴う支持多角形面積が, TYPE1 とは異なる増加率を示す.

図 12. 支持多角形の記号設定.
Fig.12 Parameters of support polygon.

図 13. θ と W_s の関数としての支持多角形の面積.
Fig.13 Sp : Size of the support polygon as the function of θ and W_s .

ところで, 足関節が 3 自由度であれば, 足は任意の向きをとることが可能である. この場合, 足の間隔の値ごとに, 支持多角形の面積を最大にする足先開き角が存在すると考えられる. そのような, 足の間隔と足先開き角の関係は計算により求めることができる. 今, 図 12 のように記号を設定する. 各足の支持点を二等辺三角形の頂点で表す. 各部の長さは表 1 の仕様を満たす. α は二等辺三角形の頂角の $1/2$ で, $0.24[\text{rad}]$, β は足の開き角の $1/2$, $\theta = 2(\beta - \alpha)$ は見かけの足開き角である. W_s は距腿関節にあたるピッチ関節を床面に投影した点間の距離である.

見かけの足開き角 θ と足裏の代表点の間隔 W_s を変化させて

図 14. W_s に対する最適な足開き角 θ Fig.14 θ : Optimal foot open angle for W_s .

図 15. TYPE4: 足を外旋させておくと, 足の間隔を広げたとき足の向きが平行に近づく。

Fig.15 TYPE4: Externally opened feet approach parallel lines as the stance becomes wide.

支持多角形の面積を計算し, 両足の面積で割って正規化すると, 図 13 が得られる. 実線は曲面の峰であり, 足の間隔 W_s に応じて, 支持多角形の面積 Sp を最大にする θ の値が存在することがわかる.

図 13 を W_s - θ 平面に投影したのが図 14 である. この曲線は, 支持多角形の面積 Sp の最大化の観点から見ると最適と言える. この最適な曲線に最も近い特性を 2 自由度の足で実現する, というのがここからの問題である. 2 自由度の足では, この曲線を完全にはなぞることができないが, 図 15 に示す, TYPE3 に人間の足と同様な初期外旋角を持たせた TYPE4 であれば, 図 16 に示すように, 水平面に対するロール軸の傾斜角 γ と, 足の初期外旋角, つまり, 矢状面に対するロール軸の傾斜角 β_0 を調整することで, 最適な曲線に近い特性を得ることが可能である. 尚, 人間の場合の初期外旋角は 0.40 ± 0.19 [rad]である⁵⁾.

図 17, 図 18 は, TYPE1, TYPE3($\gamma = 0.52$ [rad], $\beta_0 = 0.0$ [rad]), TYPE4($\gamma = 0.52$ [rad], $\beta_0 = 0.76$ [rad])のそれぞれについて得られた特性と, 最適な曲線との比較である. 最適な曲線に最も近い

図 16. TYPE4 において調整される角度 γ , β_0 .Fig.16 γ , β_0 : Adjusted angles of TYPE4. 図 17. TYPE1, TYPE3, TYPE4 について得られた W_s , θ の関係と最適な曲線。Fig.17 Relations between W_s and θ for TYPE1, TYPE3, TYPE4 and the optimal curve. 図 18. TYPE1, TYPE3, TYPE4 について得られた W_s , Sp の関係と最適な曲線。Fig.18 Relations of W_s , Sp for TYPE1, TYPE3, TYPE4 and the optimal curve.

のは TYPE4 である. TYPE1 も最適な曲線に近いが, 足間隔 $W_s = 0.1$ で支持多角形面積は最適値の 70% 程度になってしまう. ところで, 図 17 より, TYPE1 の足先開き角を Optimal Curve の θ の最大値と最小値の中間値である $\theta = 0.65$ [rad] とすれば, Optimal Curve に近づけることが可能であると思われる. この改良された TYPE1 について先ほどと同様に計算すると, 図 21 の Improved TYPE1 の直線が得られる. この場合は開脚するにした

図 19. TYPE1 の改良.
Fig. 19 Improved TYPE1.

図 20. 改良前後の TYPE1, TYPE4 について得られた W_s, θ の関係と最適な曲線.
Fig.20 Relations of W_s, θ for TYPE1, Improved TYPE1, TYPE4 and the optimal curve.

図 21. 改良前後の TYPE1, TYPE4 について得られた W_s, Sp の関係と最適な曲線.
Fig.21 Relations of W_s, Sp for TYPE1, Improved TYPE1, TYPE4 and the optimal curve.

がって支持多角形面積が最適値より低下して行く. このように, TYPE1 を改良しても, TYPE4 ほどは最適値に追随できない.

4. おわりに

本研究では, 車輪式および多脚のロボットには向かない環境での二脚ロボットの可能性に着目した. そのような悪環境下では静的な運動が現実的であること, および定常歩行より立ち作

業の比重が高いことを指摘し, 従来の研究のような歩行能力ではなく, 佇立能力を向上させる足構造について述べた.

具体的には凹凸のある面上に適した足構造として3点支持構造と足関節ロール軸を水平面に対して傾けることを提案し, その構造が

- ・段差面上では既接地点に滑りを生じさせずに3点接地可能であること,
- ・斜面上では許容できる傾斜角が大きいこと,

を示した.
さらに, 平坦面でロボットが開脚して佇立した場合について, 開脚幅に応じて支持基底面面積を最大化する最適な足先角度が存在することを示し,
人間の足のように足関節ロール軸を水平面, 矢状面に対して傾斜させ, 本来は足に3自由度必要なところを2自由度で近似的に最適な足先角度を実現した.

今後は, 他の地面形状, 他の姿勢における斜行ロール軸の効果を調べる予定である.

参考文献

- (1) 山口 仁一, 高西 淳夫, 加藤 一郎: 環境適応能力をもつ2足歩行ロボットの研究～斜面・階段における歩行の実現～, 第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 215-216, (1986).
- (2) 山口 仁一, 高西 淳夫, 加藤 一郎: 路面形状に偏差のある環境における2足歩行制御, 日本ロボット学会誌 13(7) 1030-1037 (1995).
- (3) I. A. Kapandji: 関節の生理学, II 下肢, 220-221, 医歯薬出版, 1988.
- (4) 佐野 明人, 古荘 純次: 最適レギュレータを用いた二足歩行ロボットの動的制御, 日本機械学会論文集(C 編) 54 (504), 1804-1811 (1988).
- (5) 島津 晃, 浅田 莞爾: バイオメカニクスよりみた整形外科 33, 金原出版, 1993.

庄司 道彦(しょうじ みちひこ)

1996 年東北大学情報科学研究科博士前期課程修了 1996 年同大学情報科学研究科博士後期課程入学. 現在に至る. 日本ロボット学会学生会員.

王 志東 (おう しとう) 1995 年東北大学大学院工学研究科機械工学第二専攻博士後期課程終了, 同年 4 月同大学情報科学研究科助手, 1998 年より同大学情報科学研究科講師, 現在に至る博士(工学). 複数移動ロボットの協調, 自律移動ロボットなどの研究に従事. 日本機械学会, 日本ロボット学会, IEEE の会員.

高橋 隆行 (たかはし たかゆき) 1987 年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了. 同年 4 月 同大学工学部助手, 1993 年より同大学情報科学研究科講師, 現在に至る. 博

士(工学). 非線形機械の制御, 移動ロボットの研究などに従事. 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会の会員.

中野 栄二 (なかの えいじ) 1970 年東京大学大学院工学研究科産業機械工学専門課程博士課程修了. 同年通産省工業技術院機械技術研究所入所. 1987 年東北大学工学部教授. 1993 年同大学大学院情報科学研究科教授. 現在に至る. 不整地移動ロボットなどの研究に従事. 工学博士. 日本ロボット学会, 日本機械学会等の会員. (バイオメカニズム学会正会員)

Foot Mechanisms of Biped Robot for Self-supporting on Irregular Terrain

Michihiko Shoji*, Zhi Dong Wang*, Takayuki Takahashi*, Eiji Nakano*

*Advanced Robotics Lab., Graduate School of Information Science, Tohoku University
Aramaki Aza Aoba 01, Aoba-ku, Sendai-city, Miyagi-pref., 980-8579, Japan.

Abstract

This paper describes the design of foot mechanisms of a biped robot to raise the ability to self-support on irregular terrain. The proposed mechanisms of biped robot's foot involve the following two points to stabilize the robot's posture. First, the design of the sole that contacts with the ground at three points. It can contact with the uneven ground determinately. Second, the design of the ankle joint whose roll axis is oblique. It models itself on the human subtalar joint. This makes the support polygon large when the robot changes its stance width.

Keywords : Biped robot, Self-supporting, Irregular terrain, Foot mechanisms.