人間型ロボットの実作業応用を目的とした足形状構成

○吉田 晴行[†] 吉村 昌也[†]

Analysis of Sole Configuration of Humanoid Robots for Applying Force Tasks

○Haruyuki YOSHIDA[†] and Masaya YOSHIMURA[†]

[†]Dept. of Mechanical Engineering, Osaka Electro-Communication Univ.

Abstract—The aim of this study is to develop a control method of mobile manipulation for humanoid robots, mobile manipulation means the integrated motion centered on arm's manipulation. The main objective of mobile manipulation is to obtain versatile and stable manipulation by arm. In this respect the legs are required to assist arm's manipulation. From viewpoint of the concept, we analyzed sole configuration and arrangement of humanoid robots based on the stability indexes. Relationship between sole configuration and stability indexes is clarified through the computer simulations.

Key Words: applied geometry

1. 序論

近年、人間型ロボットについてハードウェアの基盤技術が構築されたことで、その普及型プラットフォームを応用分野内作業に適用させる試みが見受けられる^{1, 2)}。例えば、建設現場内パネル協調搬送や、その組み付け作業等であり、これら分野内作業を人間型ロボットで実現させる制御技術が研究課題である。

ここで、人間型ロボットへの適用作業例として、建設パネルを支える状況を想定する(**Fig.1**)。両腕ハンド部に作用する作業反力、ならびに上肢の自重により生ずるモーメントを下肢の関節トルクで負担する必要がある。特に作業を中断させることなく、安定した作業を実現させるためには、作業反力に加えて突発的な外乱・外力がハンドに作用しても対応可能な、ロボット本体の転倒安定性を高める両脚の配置・足形状構成を検討する必要がある。一方、人間型ロボットに関する先行研究では、前後単一方向の歩行動作を前提とした両脚足配置に関する議論が中心であり、上記に挙げた視点による足配置・足形状構成に関する議論は、これまでにない。

このような観点より本研究では、人間型ロボットの作業応用を目的とした脚腕協調制御手法を最終課題に挙げ、その第一段階として、足配置・足形状構成がロボット本体の転倒安定性に与える影響を考察し、作業に適した足形状構成の選定基準を明らかにする。

2. 転倒安定性解析

2.1 従来研究との関わり

転倒安定性に関する議論は、脚式歩行ロボットの動作制御にはじまる^{4, 5)}。Vukobratovicらは、安定した歩行動作を実現させるための指標としてZMP (Zero

Fig.1 The Concept of Mobile Manipulation

Moment Point) を提案した⁴⁾。ZMPは平坦路面での歩行を評価する際、用いる指標であるのに対して、不整地での転倒安定性を評価する手法も提案されている⁷⁾。ただし、整備された作業環境への適用を前提とする人間型ロボットの転倒安定性を評価するに際し、本研究ではZMP規範に従うものとする。ここでZMPとは、ロボット本体の各リンク自重によるモーメント、慣性力によるモーメントの総和がゼロとなる床面上の点として定義される。このZMPが足接地状態にて形成される支持多角形(“安定領域”と呼ばれる)の領域内に位置すると、足接地状態は維持され、転倒安定性は確保される。ただし、上記の指標は作業対象との接触のない、歩行時の転倒安定性評価に用いられるものであり、事実上、ハンドに作業反力や未知外乱・外力が作用しても転倒安定性に与える影響は考慮されていない。そのため本研究では、力作業への適用を想定した人間型

Fig.2 Experimental model of a humanoid robot which has 27 degree of freedom in total.

ロボットの転倒安定性を評価するに際し、ZMPを以下のように再定義する（詳細は文献^{8, 10}を参照する）。すなわち、各リンクの自重・慣性力によるモーメント、加えてハンド作業反力・外力によるモーメントの総和がゼロとなる床面上の点とする。本定義により、ロボット本体が一定姿勢を維持した状況下でも、作業反力・外力の変動を考慮した転倒安定性評価が可能となる。

2.2 人間型ロボットの転倒安定性

人間型ロボットの作業応用を目的とした転倒安定性を評価するに際し、機構上、その移動部のみに着目した二足歩行ロボットに用いる指標が一般に用いられる。その主要項目⁶⁾を以下に挙げ、本研究との関わりを明らかにする。

1. **安定余裕**：ZMP位置から支持多角形境界辺までの最短距離。
2. **進行方向安定余裕**：ZMP位置から進行方向における支持多角形境界辺までの最短距離。
3. **歩容安定余裕**：定常歩行について、移動1周期における進行方向安定余裕の最小値。歩容とは、連続的に安定性を維持した歩行様式。

上記項目(1)について、安定余裕はZMPを中心点とした支持多角形の内接円半径に相当する。すなわち、特定の作業方向におけるZMP位置の変動を考慮した安定性評価に加えて、未知外乱・外力がハンドに作用する状況を想定した評価にも利用可能と考えられる。また上記項目(2)は、ハンド作業方向における安定性を測る指標として用いる。上記項目(3)は、踏み換え動作を含めた運動中の安定性を測る指標として利用されるため、作業に適した足形状構成を静的な側面から考察する本論文では用いない。なお、人間型ロボットが持つ機構構成の特徴は、冗長自由度を有する点にある。例えば、単腕6自由度、単脚6自由度の全24自由度を有する人間型ロボットでは、ハンド位置姿勢、両脚位置姿勢、ならびに肩位置姿勢を与えると、全身24の関節角度が一意に決定する。すなわち、目的とする作業位

(a) Parameters of sole model used in simulation

(b) Symbols and definition of stability indices

Fig.3 Experimental sole model of a humanoid robot and their variables

置にハンド位置姿勢が拘束され、両脚位置姿勢が与えられても肩の位置姿勢6成分を任意に指定することができる。この冗長自由度を用いて (I). 転倒安定性を改善する手法、ならびに (II). 障害物回避を実現させる手法などが議論された。本研究においても肩の冗長自由度を用いてZMP位置を制御し、より安定した作業の実現を目的とする。しかしながら、上記二足歩行ロボットに用いられる指標では、主に運動方向（作業方向）に対する性能のみ扱うことが前提とされる。そのため、本論文では支持多角形面積を新たに評価指標として加える。支持多角形面積が大きく確保できるほど、転倒安定性を高める肩位置姿勢の選択幅が広がるものと考えられる。

以上より、人間型ロボットの作業応用を目的とした動作計画を検討する上で、(A). ZMP位置を支持多角形安定領域内に維持するための姿勢制御、(B). 作業反力ならびに未知外乱・外力の作用により変動するZMP位置を安定領域内にとどめるための安定余裕の確保、が方策として挙げられる。本論文では上記項目(B)の視点より、人間型特有の機構構成に着目し、異なる足底配置とロボット本体の転倒安定性との関係を考察する。

3. 足形状構成の評価

本章では、両腕を主体とした人間型ロボットの力作業において、両脚の足配置・足形状構成を利用しロボット本体の作業性能を向上させる目的より、それらの選定基準を明らかにする。具体的には、足首位置・開脚角度設定値の異なる両脚支持状態を比較し、ロボット本体の転倒安定性に与える影響を評価する。

3.1 足底モデル

本論文に用いる人間型ロボットの足形状モデル（以下、足底モデルと呼ぶ）、ならびに形状パラメータをFigs.3(a),(b)に挙げる。本モデルはHRP-1を参考としたものであり、HRP(Humanoid Robotics Project)³⁾の一環として開発された検証用モデルとして広く利用されている。両脚支持状態において、各脚の足底は段差のない同一床平面上(X-Y plane in Fig.3)に面接地しており、左脚足首座標系 Σ_{sl} と基準座標系 Σ_w の原点は一致しているものとする。ここで、 Σ_w よりLateral方向足首間距離 d_{wt} とストローク d_{st} を与えると右脚足首座標系 Σ_{sr} の原点が決まり、両脚足首開脚角 θ_{lr} を与えることで両脚足首位置・姿勢は一意に決定する。以下では、これら3つのパラメータ設定値から決定される両脚支持状態について、両脚足底が形成する支持多角形の形状に注目し、転倒安定性に与える影響を議論する。

本論文では、2種類の d_{wt} と7種類の θ_{lr} から決まる計14種類の両脚支持状態初期姿勢について、 d_{st} を0.0–0.3[m]まで0.01[m]刻みで変化させた際、両脚足底で形成される支持多角形の形状より転倒安定性を評価した。評価指標には安定余裕 S_{mar} 、進行方向安定余裕 Z_{mar} ならびに支持多角形面積を用いた。また、両脚足底が形成する支持多角形の形状構成そのものが有する性能を評価する目的より、ZMP位置は支持多角形の重心点とし、肩の位置姿勢はZMP位置が重心点と一致するように制御されているものとする。

3.2 足首開脚角・ストローク設定値が転倒安定性に与える影響

両脚足首開脚角 $\theta_{lr}=0.0, 30.0$ [deg]について、ストロークを変化させた際に形成される支持多角形の概観をFigs.4(a)-(c)に示し、転倒安定性評価として得られた結果をFigs.5(a)-(c)に示す。はじめにFigs.4(a)と(c)より、両脚支持状態 $\theta_{lr}=0.0$ [deg]について、ストロークを大きく確保する程、進行方向安定余裕ならびに安定余裕面積の増加する傾向が確認される。一方、両脚支持状態 $\theta_{lr}=30.0$ [deg]については、ストローク設定値を大きくとることで、これら評価指標は変化するものの、増減の詳細を把握することは困難である。ただし、これら2種類の両脚足首開脚角設定値についてストロークの変化による支持多角形に注目すると、その形状は大きく異なる。すなわち、足底モデルの形状が決定した際、その形状構成から転倒安定性を向上させるための足配置基準を事前に提示可能であることは明らかである。

次に、ストローク設定値における性能の差異につ

Fig.4 Overview of supporting polygon which determined by dual sole states when : $\theta_{lr}=0.0, 30.0$ [deg] (the same of $d_w=0.27$ [m]).

いて考察する。Fig.5(a)より、足首開脚角 $\theta_{lr}=0.0$ [deg]の両脚支持状態では、初期状態 $d_{st}=0.0$ [m]の際に $S_{mar}=0.1$ [m]を確保するが、その設定値を広げることによって S_{mar} は2次曲線上に増加し、 $d_{st}=0.19$ [m]で最大値0.122[m]をとり、その後、減少する傾向が確認される。人間型ロボットの脚部関節余裕を考慮すると、 $d_{st}=0.35$ [m]近傍で特異姿勢をとり、事実上、運動を生成することが困難となる。そのため、脚部関節余裕の上限値に至る範囲内で得られる $S_{mar}=0.122$ [m]のストローク値 $d_{st}=0.19$ [m]は、転倒安定性を高める最適値として有効であることもわかる。なお、足底モデルの進行方向辺長さが0.2[m]であるのに対し、安定余裕の最大値と最小値の差は0.02[m]であることから、ストロークを選定することにより最大10.0[%]の余裕を改善できることが確認された。

次に、足首開脚角度の有無による性能の差異について考察する。Figs.5(a)-(c)より従来の歩行動作を想定した両脚利用については、 $\theta_{lr}=0.0$ [deg]の両脚支持状態が、安定余裕、進行方向安定余裕、ならびに安定余裕面積について高い性能を持つことが確認された。一方、ストローク0.07[m]未満の場合は、 $\theta_{lr}=30.0$ [deg]の両

Fig.5 An example of simulation results when : $\theta_{lr}=0.0, 30.0[\text{deg}]$ (the same of $d_w=0.27[\text{m}]$)

脚支持状態利用が、転倒安定性の指標それぞれを高く保つ上で有効であることも確認される。 $\theta_{lr}=0.0[\text{deg}]$ の両脚支持状態では、前後単一方向の作業時に有効利用されることに対し、作業方向を変更する際、脚による旋回動作が不可欠となる。旋回動作では、特にストロークを必要としないことから、作業方向を変更する上で、 $\theta_{lr}=30.0[\text{deg}]$ の両脚支持状態を利用することが有効と考えられる。なお、本論文では7種類の足首開脚状態において、各評価指標の絶対量より性能の差異を論じた。ただし、具体的な作業を人間型ロボットに適用した際、必ずしもその絶対量を満たす両脚状態が望ましいとは言えない。例えば $\theta_{lr}=10.0, 15.0[\text{deg}]$ の両脚支持状態は、ストロークによらず、ほぼ一定した安定余裕を確保できる特徴を持つ。そのため、ZMPの位置変動が微小と考えられる静的な状態での作業を遂行させる際、一つの選択候補として適用することも考えられる。

Fig.6 Overview of supporting polygon which determined by dual sole states when : $\theta_{lr}=0.0, 30.0[\text{deg}]$ (the same of $C_{Edge}=0.02[\text{m}]$, $d_w=0.27[\text{m}]$).

3.3 足底モデル形状が転倒安定性に与える影響

足底モデルの形状自体が有する性能を転倒安定性の側面から考察する目的より、足底プレートの各エッジ部に切り欠きを有するモデルとの性能比較を行なった。モデルのエッジ部切り欠き設定値は $C_{Edge}=0.02[\text{m}]$ とし、各辺長さはFig.3(a)に示す足底モデル（以下“従来モデル”と呼ぶ）と同一の値を用いた。評価例の概観をFigs.6(a)-(c)に挙げ、転倒安定性評価として得られた結果をFigs.7(a)-(c)に示す。足首開脚角の異なる評価値の変化について、相対関係は従来モデルのそれと同じ傾向が確認される。但し、これら3種類の評価指標全てについて、絶対値は低下していることが挙げられる。また、各評価指標の変動量も従来モデルと比較して差異が微小であることが確認される。例えばFig.7(a)より安定余裕の変化に着目すると、初期状態 $d_{st}=0.0[\text{m}]$ では従来モデルと同様に $S_{mar}=0.1[\text{m}]$ の余裕が確保されることに対して、 $d_{st}=0.14[\text{m}]$ で最大値 $0.112[\text{m}]$ をとり、安定余裕の改善可能な量は約50.0[%]低下することがわかる。

以上より、モデル辺長さが同一であるにも関わらず、

Fig.7 An example of simulation results when : $\theta_{lr}=0.0, 30.0$ [deg] (the same of $C_{Edge}=0.02$ [m], $d_w=0.27$ [m])

むしろエッジ部を有することが転倒安定性を高める上で効果を持つことが確認された。

4. 結論

本論文では、人間型ロボットの作業応用を目的とした脚腕協調制御手法を検討する第一段階として、人間型特有の機構構成に注目し、ロボット本体の転倒安定性と足配置・足形状構成との関係を考察した。得られた結論は以下の通りである。

1. 足首開脚角・ストローク設定値の組み合わせが異なる両脚接地状態について、ロボット本体の転倒安定性を評価指標とし、特徴比較をおこなった。得られた知見は以下の通りである。
 - A). 両脚支持状態足首開脚角 $\theta_{lr}=0.0$ [deg] の両脚

支持状態では、ストローク設定値 d_{st} を広げることによって安定余裕 S_{mar} を高めることが可能であり、 $d_{st}=0.19$ [m] で最大値 $S_{mar}=0.122$ [m] が確認された。特に、足底モデルの進行方向辺長さが 0.2 [m] であるのに対し、安定余裕の最大値と最小値の差は 0.02 [m] であることから、ストロークを選定することにより最大 10.0 [%] の余裕を改善できることが確認された。踏み換え動作を生成する上で要求される脚部関節余裕の上限値に至る範囲内で得られた本結果は、転倒安定性を高める最適値として有効であることもわかる。

B). ストローク設定値 d_{st} が 0.07 [m] 未満の場合は、 $\theta_{lr}=30.0$ [deg] の両脚支持状態利用が、転倒安定性の指標それぞれを高く保つ上で有効であることも確認された。ロボットの作業方向を変更する上で旋回動作を必要とするが、その際、ストロークを必要としない。そのため、旋回動作を生成する際、 $\theta_{lr}=30.0$ [deg] の両脚支持状態を利用することが有効と考えられる。

2. 足底モデルの形状自体が有する性能を考察する目的より、足底プレートの各エッジ部に切り欠きを有するモデルとの性能比較を行なった。その結果、モデル辺長さが同一であるにも関わらず、むしろエッジ部を有することが転倒安定性を高める上で効果的であることを示した。

本論文の取り組みでは、人間型特有の機構構成に注目し、機構が有する性能提示を転倒安定性の側面より行った。その結果、従来の歩行動作に利用される両脚配置が作業応用の観点からも有効であることが確認された。ただし、一般の作業者では足首開脚角を利用するケースが多く確認される。これらの事実関係を考察してゆくことも今後の課題に挙げられる。また現時点では、ロボット本体の安定余裕、進行方向安定余裕、ならびに支持多角形面積を評価指標として取り上げた。しかし実作業への適用を考えると、作業内容に応じ、要求される能力やその適性評価法が問われる。この問題も含め、作業分析とその評価方法¹¹⁾を確立してゆくことも、今後の研究課題である。

- 1) K.Hirai, et al: "The Development of Honda Humanoid Robot", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.2, pp.1321-1326, 1998.
- 2) "人間協調・共存型ロボットシステム研究開発成果発表会報告書", (財) 製造科学技術センター, pp.9-13, 1999.
- 3) 井上, 比留川: "人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト", 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp.2-7, 2001.
- 4) M.Vukobratovic and J.Stepanenko: "On the stability of anthropomorphic systems", Mathematical Biosciences, no. 15, pp. 1-17, 1972.
- 5) "[特集] 歩行ロボット", 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3, 1993.

- 6) 日本ロボット学会編：“ロボット工学ハンドブック”，コロナ社，1990.
- 7) 米田，広瀬：“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.
- 8) 井上，石井，大川：“腕で作業をしながら移動する人間型ロボットの実時間制御—Sagittal Plane内の運動の制御—”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.1，pp.75-86，2000.
- 9) K.Inoue, et al. : “Mobile Manipulation of Humanoids: Real-Time Control Based on Manipulability and Stability”, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2217-2222, 2000.
- 10) 吉田，井上，新井，前：“人間型ロボットの作業移動—作業移動に要求される脚機能の分析—”，日本ロボット学会誌，Vol.19，No.5，pp.660-666，2001.
- 11) 吉田，井上，新井，前：“作業移動型ロボットにおける作業移動性の評価手法：人間型ロボットを用いた評価実験”，日本機械学会 [No.00-2] ロボティクス・メカトロニクス講演会'00講演論文集，2A1-79-120(CD-ROM)，2000.