力作業応用を目的とした人間型ロボットの足形状構成

Analysis of Sole Configuration of Humanoid Robots for Applying Force Tasks

吉田 晴行 Haruyuki YOSHIDA

吉村 昌也 Masaya YOSHIMURA

概要

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により、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。一方、人間型ロボットに関する先行研究では、動歩行、走行、跳躍動作等、移動機能中心の動作制御に重点を置いた議論が数多くなされている。しかしながら、人間型ロボットは2腕2脚を有する作業移動型ロボットと見なすことができるものであり、様々な作業環境下での応用が期待できる。すなわち筆者らは、作業対象のマニピュレーションやハンドリングの中心は両腕であることに注目し、人間型ロボットが有する移動機能のみならず、むしろ作業機能を主体とした機能併用に主眼を置く。上述した観点に基づき本論文では、人間型ロボット特有の脚部機構構成に着目し、両腕先端部のハンドにて過大な発生力を得るための両脚足配置・足形状構成について考察した。具体的には、両脚足底プレートの形状とその配置（ストローク、足首開脚角設定値）が異なる両脚接地状態について、形成される支持多角形を用い、転倒安定性の側面より性能の差異を評価した。その結果、両腕を主体とした人間型ロボットの力作業応用を検討する上で、ストローク・両脚足首開脚角を利用することがロボット本体の性能を改善する一手段となり得ることを明らかにした。

キーワード：応用幾何学，支持多角形状，人間型ロボット

Abstract

A hardware platform of a humanoid robot has already been developed in the last few years; it encourages further studies in this field. Many studies have given weight to biped walking based on only stability of the robot: steady-state walking, high-speed dynamic walking, jumping and so on. A humanoid robot is, however, a kind of integrated machines: a two-arm and two-leg mechanism. Hence, we must focus not only locomotion function but also arm's function; especially, a major function of arms is manipulation and handling. In this paper, based on the viewpoint of our concept, we analyzed sole shapes and sole configuration of a humanoid robot for generating large force at its hands. We focused on the shape of the convex of supporting area which consists of the sole plates of the robot in double support state. According to the simulation results, we have verified that utilizing the stroke between both legs and the orientation of the sole is effective for improving performance of the robot.

Keywords : applied geometry / shape of support polygon / humanoid robots

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。特に作業を中断することなく、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足配置・足形状構成を検討することが望まれる。一方、人間型ロボットに関する先行研究⁹⁻¹³⁾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の開発に取り組んでいる^{14,15)}。ただし従来の取り組みでは、前後方向に移動を伴う作業を対象としていたことから、両脚の開脚角

Fig. 1 The Concept of Mobile Manipulation

Fig. 2 Experimental model of a humanoid robot which has 26 degree of freedom in total

利用に関する議論は明らかでない。一方で、人間の力作業における両脚足配置を想定すると、ハンド力発生方向に足底方向を一致させる足配置とともに、開脚角を用いた足配置利用も数多く見受けられる。よって、これら足配置利用の選定基準を解明してゆくことで、人間型ロボットでの応用技術に新たな広がりをもたらすものと考えられる。

以上より本論文では、人間型特有の機構構成に着目し、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する。以下、2章では転倒安定性評価に用いるモデル、ならびに性能評価手法の概要を述べる。3章では両脚足底プレート形状とその配置が異なる両脚接地状態について、形成される支持多角形より性能評価を行い、力作業に適した足配置・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. モデル概要

本論文に用いる人間型ロボットのモデル概要を Fig. 2 に示す。また、Fig. 3(a), (b)に足底モデルとその詳細を示す。全長1.2[m]、総重量88.0[kgf]を持つ本モデルは HRP-1を参考としたものであり、HRP(Humanoid Robotics Project) ²⁾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。Fig. 2において、各記号の定義は以下の通りである。

- $\mathbf{q}_{ai} \in \mathbb{R}^7$: i アームの関節変数
- $\mathbf{q}_{li} \in \mathbb{R}^6$: i 脚の関節変数
- $\mathbf{r}_{ei} \in \mathbb{R}^6$: i アームのハンド位置・姿勢
- $\mathbf{r}_{fi} \in \mathbb{R}^6$: i 脚の足首位置・姿勢
- $\mathbf{r}_s \in \mathbb{R}^6$: 肩中央の位置・姿勢

ここで、各記号の右下つき添え字 i は“左(l)”または

(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

“右(r)”を示す。なお、全関節変数を示す際、 $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{26}$ と表記する。

左右のアームと脚それぞれについて、運動学は以下のように表現できる。

$$\mathbf{r}_{ei} = \mathbf{F}_{ei}(\mathbf{q}_{ai}, \mathbf{r}_s) \quad (i = l, r)$$

$$\mathbf{r}_{fi} = \mathbf{F}_{fi}(\mathbf{q}_{li}, \mathbf{r}_s) \quad (i = l, r)$$

すなわち、全関節変数 $\mathbf{q}$ を一意に算出する上で、両腕のハンド位置・姿勢 $\mathbf{r}_{el}$, $\mathbf{r}_{er}$ が作業条件として与えられ、かつ両脚の足首位置・姿勢 $\mathbf{r}_{fl}$, $\mathbf{r}_{fr}$ が床面上に固定されても、肩中央の位置・姿勢 $\mathbf{r}_s$ を任意に決定できる性質を持つ。

次に、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。次章では、エッジ部切欠き設定値 C_{edg} の有無による頂点数4ならびに頂点数8の足底モデルについて、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の、両脚足底面が形成する支持多角形の形状に着目し、転倒安定性に与える影響を議論する。

2.2. 人間型ロボットの転倒安定性

転倒安定性解析に関する議論は、歩行ロボットの動作制御にはじまる^{3,4)}。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 Moment Point)を提案した³⁾。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た⁶⁾。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とはロボット本体を構成する各リンクの、自重・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^{3,5)}。このZMPが両脚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、両脚接地状態は維持され、転倒安定性は確保される(e.g. right in Fig. 1)。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ロボットの転倒安定性を評価するに際して、ZMPを以下のように再定義する。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(詳細は文献^{14,15)}を参照)。本研究では上記の定義に基づき、ハンドと作業対象との接触を考慮した転倒安定性評価を行う。

次に、本論文で用いる各用語の定義を以下に示す⁵⁾。

1. 支持多角形：支持脚の接地点を凸状に張った辺で構成される凸多角形。Fig. 3(b)より、頂点数4の足底面を有する人間型ロボットでは、両脚接地状態に形成される支持多角形の一例として(a(l) - b(l) - c(l) - d(r) - a(r))となる。また、両脚接地状態によって、支持多角形の形状・頂点数は異なる。本モデルでは、最小頂点数4ならびに最大頂点数7の支持多角形が形成される。
2. 安定余裕：ZMP位置から支持多角形境界辺までの最短距離。以下 S_{mar} と表記する(Fig. 3(b)参照)。

3. 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。以下 L_{mar} と表記し、Fig. 3(b)との対応は次式で表現される。

$$L_{mar} = \min(Z_{mf}, Z_{mr})$$

4. ZMP 余裕：ZMP位置からその変動方向における支持多角形境界辺までの距離。以下 Z_{mar} と表記する。Fig. 3(b)では、単一前方向より作業反力がハンドに作用する場合、 $Z_{mar} = Z_{mr}$ と表現される¹²⁾。

人間型ロボットでは一般に、上記項目(1)に挙げた支持多角形の形状を用い、転倒安定性の議論がなされる。以下では力作業応用の観点より、上記項目(2) - (4)に示す各評価指標の位置付けを明確化する¹²⁾。上記項目(2)では、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・外力が両腕ハンドに作用する状況を想定した評価にも利用可能な指標と考えられる。一方、上記項目(3)、(4)は、両腕ハンドの作業方向に特化した評価指標として位置付けられる。上記項目(3)では、作業対象と両腕ハンドの接触力が0.0[N]へと変化した際の、力の抜ける作業状況を考慮した作業姿勢の評価に有効であり、力の抜ける状況が生じても自律的に転倒安定性を保持する作業姿勢を評価するに際して用いる指標として挙げられる。上記項目(4)では、両腕ハンド発生力をより高める作業姿勢を評価する際に有効であり、力変動よりもハンド最大発生力が支配的な力作業を想定した姿勢評価に用いることが方策として挙げられる。

以上より、力作業応用を目的とした人間型ロボットの足配置・足形状構成を議論するに際して本論文では、上記の評価指標を適用し、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

本章ではエッジ部切欠き設定値の有無による2種類の足底モデルについて、転倒安定性の側面より性能の差異を評価した。足底モデル形状値はFig. 3(a)のそれに従い、切欠き設定値はそれぞれ $C_{edg} = 0.0, 0.02[\text{m}]$ とした。以下、議論を一般化する上で、モデル形状値、実験パラメータ値ならびに転倒安定性評価値の表記を足底モデル辺横長さ(=0.2[m])で正規化した値とする。なお、記号表記はアクセント“ $\sim$ ”を加えて表現する。上記2種類の足底モデルについて、7種類の両脚足首開脚角 θ_{lr} を与える。そしてLateral方向足首間距離は $\bar{d}_{ut} = 2.0$ の一定値とし、ストローク設定値 $\bar{d}_{st}$ を0.0 - 2.0まで0.05刻みで変化させた際に形成される各支持多角形を評価し

Fig. 4 Overview of supporting polygon which determined by dual sole states when : $\theta_{tr}=0.0, 30.0[\text{deg}]$ (the same of $\bar{C}_{edg}=0.0, \bar{d}_{wt}=2.0$)

た。なお、両脚足底面より形成される支持多角形の形状そのものが有する性能を評価する目的より、ZMP 位置は各支持多角形の重心点とした。

3.1. 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

足底モデル $\bar{C}_{edg}=0.0$ での両脚足首開脚角 $\theta_{tr}=0.0, 30.0[\text{deg}]$ について、ストローク設定値 $\bar{d}_{st}$ 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 $\theta_{tr}=0.0[\text{deg}]$ では、 $\bar{d}_{st}$ を大きく確保するに従い、進行方向安定余裕 $\bar{L}_{mar}$ ならびに ZMP 余裕 $\bar{Z}_{mar}$ の増加する傾向が確認される。一方、両脚支持状態 $\theta_{tr}=30.0[\text{deg}]$ については、 $\bar{d}_{st}$ を確保することで、これら評価指標に変化は生ずるものの、増減の詳細を把握することは困難である。ただし、形成される支持多角形の形状に注目すると、 $\bar{d}_{st}$ の変化により大きく異なる。すなわち、足底モ

Fig. 5 An example of simulation results : $\theta_{tr}=0.0, 30.0[\text{deg}]$ (the same of $\bar{C}_{edg}=0.0, \bar{d}_{wt}=2.0$)

デル形状値が決定した際、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することが可能であると考えられる。

次に、ストローク設定値がもたらす性能の差異について考察する。Fig. 5(a)より、足首開脚角 $\theta_{tr}=0.0[\text{deg}]$ の両脚支持状態では、初期値 $\bar{d}_{st}=0.0$ の際に $\bar{S}_{mar}=0.75$ を確保するが、その設定値を広げることで $\bar{S}_{mar}$ は2次曲線上に増加し、 $\bar{d}_{st}=1.35$ で最大値0.901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、事実上、 $\bar{d}_{st}=3.0$ 近傍で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 $\bar{S}_{mar}=0.901$ でのストローク

設定値 $\bar{d}_{st}=1.35$ 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、初期値 $\bar{d}_{st}=0.0$ で得られる $\bar{S}_{mar}=0.75$ と最大値 0.901 との比は 1.202 であることから、ストロークを選定することにより約 20.0% の余裕を改善できることが確認された。

次に、足首開脚角設定値がもたらす性能の差異について考察する。Figs. 5(a)–(c) に示す各評価指標それぞれについて、ストローク設定値 $\bar{d}_{st}=0.0$ では、開脚角設定値の大きな両脚支持状態が優位性を示す傾向が確認された。一例として安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ に着目すると $\theta_{lr}=0.0, 30.0[\text{deg}]$ の両脚支持状態ではそれぞれ $\bar{S}_{mar}=0.75, 0.875$ であり、各評価値は $\theta_{lr}=0.0[\text{deg}]$ で得られる最小値と $30.0[\text{deg}]$ の最大値に相当することもわかる。一方、 $\bar{d}_{st}$ を広げることにより開脚角設定値が有する各評価値の相対関係は切り換わる傾向も確認された。各図中の矢印記号は分散値を最小とする $\bar{d}_{st}$ での $\bar{S}_{mar}$ を示しており、このストローク値の前後でロボット本体の転倒安定性を高めるパラメータ値の組が異なることを意味している。以上の傾向から、ストロークを確保することが困難な作業環境についても開脚角設定値を選定することにより性能を改善できる性質を定量的に示した。

3.2. 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。エッジ部切欠き設定値は $\bar{C}_{edg}=0.1$ とし、各形状値は Fig. 3(a) に示す $\bar{C}_{edg}=0.0$ の足底モデル（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、ならびに転倒安定性評価として得られた結果を Figs. 6, 7 に示す。Figs. 7(a)–(c) より、開脚角設定値の異なる各評価指標の変化について、相対関係は従来モデルのそれと同様の傾向が確認された。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、各評価指標の変化量も従来モデルと比較して小さいことが確認された。

例えば Fig. 7(a) より開脚角設定値 $\theta_{lr}=0.0[\text{deg}]$ の安定余裕の変化に着目すると、ストローク設定値 $\bar{d}_{st}=0.0$ では従来モデルと同様に $\bar{S}_{mar}=0.75$ の余裕が得られることに対して、最大値は $\bar{d}_{st}=1.05$ で 0.850 をとる。初期値 $\bar{d}_{st}=0.0$ で得られる $\bar{S}_{mar}=0.75$ と最大値 0.850 との比は 1.133 であり、従来モデルでの最大値 0.901 と比 1.202 と比較して各値は低下していることが挙げられる。

以上より、足底モデル形状値が同一であるにも関わらず、むしろエッジ部を欠くことが、転倒安定性を低下させる要因となることを明らかにした。

Fig. 6 Overview of supporting polygon which determined by dual sole states when: $\theta_{lr}=0.0, 30.0[\text{deg}]$ (the same of $\bar{C}_{edg}=0.1, \bar{d}_{wt}=2.0$)

3.3. ハンド最大発生力による作業性評価

足配置・足形状構成について転倒安定性の側面より得られた性質が、人間型ロボット本体の作業性能に与える影響を考察する。エッジ部切欠き値 $\bar{C}_{edg}$ 、開脚角設定値 θ_{lr} の組み合わせが異なる計 4 種類の両脚支持状態を適用したロボットについて、力作業における性能比較を行う。両脚足首間距離は $d_{wt}=0.4[\text{m}]$ 、 $d_{st}=0.1[\text{m}]$ とし、正規値ではそれぞれ $\bar{d}_{wt}=2.0$ 、 $\bar{d}_{st}=0.5$ に相当する。足底モデルのパラメータ値とそのモデルが有する性能値の一覧を Table 1 に示す。

以下、 $\bar{C}_{edg}=0.0[\text{m}]$ の足底モデルからなる両脚支持状態を StateA*, $\bar{C}_{edg}=0.02[\text{m}]$ の状態を StateB* と呼ぶ。また、右下つき添え字*は開脚角設定値を意味し、* = “1, 2” はそれぞれ、 $\theta_{lr}=0.0, 30.0[\text{deg}]$ に対応するものとする。上記 4 種類の両脚支持状態を適用したロボットの初期姿勢を決定するに際して、肩中央の位置・姿勢 r_s は基準座標系 Σ_w の原点から鉛直 Z 軸上 $0.995[\text{m}]$ の直立姿勢として与える。また、両腕は伸展状態 q_{ar} ,

(a) Stability margin : $\bar{S}_{mar}$

(b) Longitudinal stability margin : $\bar{L}_{mar}$

(c) ZMP margin : $\bar{Z}_{mar}$

Fig. 7 An example of simulation results: $\theta_{lr}=0.0, 30.0$ [deg] (the same of $\bar{C}_{edg}=0.1, \bar{d}_{wt}=2.0$)

$q_{al}=0.0$ [deg]とする。両脚の足首位置・姿勢 r_{fl}, r_{fr} は、 θ_{lr} ならびに d_{wt}, d_{st} より両姿勢と相対位置関係が既知となることから、左右いずれか一方の r_{fl} 並進成分を決定することにより全関節角 q は一意に求まり、計4種類それぞれの初期姿勢とZMP位置は決定される。そこで本論文では、左脚 r_{fl} の並進成分を探索し、両脚接地状態にて形成される支持多角形重心点にロボット本体のZMPが一致する位置とした。上記4種類の初期姿勢に対し、両腕ハンド部には単一前方向より作業反力を与え、初期値 0.0 [kgf/hand] から 0.001 [kgf/hand] 刻みで増加させる。したがって、ロボット本体のZMPは作業反力が増加することに伴い、支持多角形重心位置から単一

(a) StateA1, A2 ($C_{edg}=0.0$ [m], $\theta_{lr}=0.0, 30.0$ [deg])

(b) StateB1, B2 ($C_{edg}=0.02$ [m], $\theta_{lr}=0.0, 30.0$ [deg])

Fig. 8 Comparison of their performance which determined by dual sole states when: $\theta_{lr}=0.0, 30.0$ [deg] (the same of $d_{wt}=0.4$ [m], $d_{st}=0.1$ [m])

Table 1 Sets of parameters for determinating double support states A*, B*. In each states, d_{wt} and d_{st} are the same values of 0.4 and 0.1 [m], respectively. And evaluation indices are calculated using above conditions.

	C_{edg}	θ_{lr}	$S_{mar}, L_{mar}, Z_{mar}$
StateA1	0.0	0.0	0.1698, 0.1750, 0.1750
StateA2	0.0	30.0	0.1704, 0.1750, 0.1849
StateB1	0.02	0.0	0.1649, 0.1700, 0.1700
StateB2	0.02	30.0	0.1607, 0.1645, 0.1754

unit : [m] (excluding θ_{lr} [deg])

後方向へ変位し、支持多角形後方の境界辺を越えた時点で転倒状態に陥ることがわかる。本実験では転倒限界での作業反力をロボット本体が実現可能な最大発生力とみなし、その値を比較することにより対応能力の差異を検証する。

得られた結果を Fig. 8に示す。はじめに、開脚角設定値の有無による作業性能の差異を検証する。Fig. 8(a)より、StateA1, A2の足底モデル形状は同一であり、開脚角設定値のみが異なる (Table1も参照)。両姿勢について得られた最大発生力はそれぞれ、 $7.741, 8.177$ [kgf/hand]であり、両腕ではその差 0.872 [kgf/hands]が開脚角利用 (StateA2)の優位性として確認された。なお、Fig. 8(b)より、エッジ部切欠き設定値を有する StateB1, B2についても開脚角利用の優位性は確認され、最大発生力の差は 0.474 [kgf/hands]であった。次に、エッジ部

切欠き設定値の有無による作業性能の差異を検証する。Fig. 8(a), (b)より、StateA2, B2の開脚角設定値は同一であり、エッジ部切欠き設定値のみが異なる。両姿勢について得られた最大発生力はそれぞれ、8.177, 7.757[kgf/hand]であり、両腕ではその差0.840[kgf/hands]が切欠き設定値を有する(StateB2)ことにより生ずる性能低下として確認された。なお、StateA1, B1についても切欠き設定値を有することにより生ずる性能低下は確認され、最大発生力の差は0.442[kgf/hands]であった。

以上より、人間型ロボットの力作業応用を目的とした足配置・足形状構成について、1)ハンド発生力を高める一手段として、その機構構成に着目した開脚角利用が有効である点、2)足底モデルに切欠きを有することが作業性能を低下させる要因となる点、を明らかにした。

4. 結論

本論文では、人間型ロボットの力作業応用を目的とした脚腕協調制御手法を検討する前段階として、人間型特有の機構構成に着目し、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、転倒安定性の側面より特徴比較をおこなった。足首開脚角 $\theta_{lr}=0.0[\text{deg}]$ の両脚支持状態では、ストローク設定値 $\bar{d}_{st}$ を広げることによって安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ を高めることが可能であり、 $\bar{d}_{st}=1.35$ で最大値 $\bar{S}_{mar}=0.901$ が確認された。特に、なお、初期値 $\bar{d}_{st}=0.0$ で得られる $\bar{S}_{mar}=0.75$ と最大値0.901との比は1.202であることから、ストロークを選定することにより約20.0[%]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。
2. 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、転倒安定性の側面より特徴比較を行った。ストローク設定値 $\bar{d}_{st}=0.0$ では、開脚角設定値の大きな両脚支持状態は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が確認された。一方、 $\bar{d}_{st}$ を広げることにより開脚角設定値が有する各評価値の相対関係は切り換わる傾向も確認され、 $\bar{d}_{st}=0.5$ の前後でロボット本体の転倒安定性を高めるパラメータ値の組が異なることを明ら

かにした。本結果より、ストロークを確保することが困難な狭隘な作業環境においても、開脚角設定値を選定することにより性能を改善できる性質を定量的に示した。

3. 足底モデルの形状自体が有する性質を考察する目的より、足底面の各エッジ部に切欠きを有するモデルとの比較を行った。その結果、足底モデル形状値が同一であるにも関わらず、むしろエッジ部を欠くことで、転倒安定性が低下する性質を明らかにした。

本論文の取り組みでは、人間型ロボットの両脚接地状態にて形成される支持多角形の形状構成に着目し、転倒安定性の側面よりその形状が有する性能提示を行った。また、得られた性質が人間型ロボット本体の作業性能に与える影響を考察する目的より、ハンド最大発生力の評価を行なった。その結果、ハンド発生力を高める一手段として、1)その機構構成に着目した開脚角利用が有効である点、2)足底モデルに切欠きを有することが作業性能を低下させる要因となる点、を定量的に明らかにした。今後は、本論文で用いたパラメータ値と各評価指標との関係を体系的に評価してゆくことが研究課題に挙げられる。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ZMP余裕を評価指標として取り上げた。しかし実際の作業環境へ適用することを想定すると、作業内容に応じて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¹⁶⁾を確立してゆくことも、今後の研究課題である。

なお、本論文は2004年度本部例会学術講演会での予稿論文について、実験内容の追加ならびに文面の加筆・修正を行ったものである。

参考文献

- 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) 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.
- 3) M. Vukobratovic and J. Stepanenko: "On the stability of anthropomorphic systems", Mathematical Biosciences, No. 15, pp. 1-17, 1972.
- 4) "歩行ロボット特集", 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, 1993.
- 5) 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.
- 6) 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.

- 7) 梶田: “ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 229-232, 2002.
- 8) 米田 完: “脚移動”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 897-901, 1998.
- 9) J. Yamaguchi, et al.: “Development of a Bipedal Humanoid Robot: Control Method of While Body Co-operative Dynamic Biped Walking”, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 368-374, 1999.
- 10) 横小路, 野本, 吉川: “手足が拘束された人間型ロボットの姿勢および動作パターンの評価”, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 471-472 (2A12), 2001.
- 11) 長崎, 梶田他: “ヒューマノイドのための走行パターンの生成”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 8, pp. 74-80, 2003.
- 12) 原田, 梶田他: “ヒューマノイドロボットの押し操作における歩行動作”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 3, pp. 392-399, 2004.
- 13) 金広, 金子他: “ヒューマノイドの転倒回復機能の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 37-45, 2003.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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, 2000.

●2005年2月10日受付

よしだ はるゆき

所属: 大阪電気通信大学 工学部 機械工学科 講師, 工学博士
研究領域: ロボティクス, 人間工学

よしむら まさや

所属: 大阪電気通信大学 大学院工学研究科 制御機械工学専攻
研究領域: ロボティクス