足底プレートに切欠きを有する人間型ロボットの 転倒安定性に着目した性能の可視化

吉田 晴行[†] 吉村 昌也[‡]

Visualization of The Relationship between Sole Configuration and Performance of Humanoid Robots Based on Stability

Haruyuki YOSHIDA[†] and Masaya YOSHIMURA[‡]

[†]Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

[‡]Div. of Mechanical and Control Engineering, Graduate School of Engineering,
Osaka Electro-Communication University

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. So the legs are required to assist arm's manipulation. 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 visualized their performances and have verified that utilizing the stroke between both legs and the orientation of the sole is effective for improving performance of the robot.

Key Words: applied geometry, visualization, shape of support polygon, sole configuration, 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力作業を想定する (**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^{14, 15)}を最終課題に挙げ、前報¹⁶⁾では転倒安定性の側面より足配置・足形状構成がロボット本体に与える影響を解析した。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). 人間型ロボット特有の機構構成に着目した足首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。しかしながら、評価対象とする足底モデルが限定されたことやストローク・足首開脚角設定値の組み合わせ範囲が狭い等、ロボット本体の性能に与える影響を総合的に考察する上で限定があった。

Fig.1 The Concept of Mobile Manipulation

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

以上より本報告では、足配置・足形状構成が人間型ロボット本体の性能に与える影響を可視化することにより体系的な特性の把握を試みる。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と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転倒安定性の評価を行い、得られた解析データに基づき性能の可視化を試みる。そして、可視化された性能提示多面体より足配置・足形状構成の性能特性を明らかにする。

2. 転倒安定性解析

2.1 モデル概要

本研究で用いる人間型ロボットのモデル概要を Fig.2 に示す。また、Figs.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] を持つ本モデルは人間型ロボット HRP-1S²⁾ を参考としたものであり、その足底モデルを転倒安定性解析に用いる。

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} の異なる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 評価指標の選定

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

(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

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は以下の通りである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)も参照)。
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} と表記する。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)について、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が異なる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。以下、足底モデルの基本形状値はFig.3(a)のそれに従うものとする。また、議論を一般化する目的より、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。記号表記はアクセント“-”を加えて表現する。

本論文では足形状構成とその配置がロボット本体の転倒安定性に与える影響を体系的に把握する目的より、性能の可視化を試みた。3種類の評価指標それぞれについて解析データに基づき可視化した結果をFigs.4,5に示す。Fig.4と5は対応関係にあり、視点のみが異なることに注意する。また、実験パラメータ値を直交座標系の各軸で表現し、これら設定値の組から得られた評価指標の値を色情報で示した4次元情報体を、以下では“性能提示多面体”と呼ぶ。

解析データを生成するに際して、足底モデル辺長さは上記に挙げた一定値とし、エッジ部切欠き設定値はそれぞれ、 $\bar{C}_{edg}=0.0\sim0.5$ の範囲で0.1刻みの計5種類から与える。これにより評価対象となる各足底モデルの形状は決定される。次に、足首開脚角ならびにストローク設定値はそれぞれ、 $\theta_{lr}=0.0\sim\pi/6$ [rad] (division $\pi/180$ [rad])、 $\bar{d}_{st}=0.0\sim2.0$ (division 0.05)とし、両設定値の組が与えられることにより、評価対象となる各足底モデルの両脚支持状態における支持多角形形状が決定される。ここで各評価値を算出するに際して本研究では、多角形形状そのものが有する性能を評価する目的より各支持多角形の重心点をZMP位置とした。

3.1 足首開脚角・ストローク設定値が転倒安定性にも与える影響

転倒安定性の評価指標それぞれについて得られた解析データに基づき、可視化した各性能多面体の概観をFigs.4,5(a)-(c)に示す。

はじめに、Figs.4,5(a)に示す安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ の性能提示多面体について、基本足底モデルの性能を示す底面($\theta_{lr}-\bar{d}_{st}$ plane when $\bar{C}_{edg}=0.0$)に着目する。 $\bar{S}_{mar}$ の優位性を示す凸領域は面上の2箇所を確認され、一方は $\bar{d}_{st}$ 軸沿い(thus $\theta_{lr}\approx0.0$)であり、他方は θ_{lr} 軸沿い(thus $\bar{d}_{st}\approx0.0$)であった。また安定余裕 S_{mar} は、両軸それぞれの軸近傍から距離間隔が広がるにつれ、その性能が低下する傾向も確認される。細部に着目すると、 $\bar{S}_{mar}$ の大域的最適値は $[\theta_{lr}, \bar{d}_{st}, \bar{C}_{edg}]=[0.0, 1.35, 0.0]$ の際に $\bar{S}_{mar}=0.901$ を示し、ストロークのみの利用により実現されることが確認された。一方、準最適値は $S_{mar}=0.88$ であり、パラメータの組は $[\theta_{lr}, \bar{d}_{st}, \bar{C}_{edg}]=[0.49, 0.0, 0.0]$ の際に得られることも確認された。すなわち、大域的最適値の97.14[%]に相当する準最適値は足首開脚角のみの利用により実現されることから、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実用上、最適両脚支持状態と同程度の性能を確保できるものと考えられる。以上より、作業条件に基づきストロークのみならず足首開脚角も選定することで、ロボット本体の性能を改善できる性質を定量的に示した。

次に、Figs.4,5(b)に示す進行方向安定余裕 $\bar{L}_{mar}$ の性能提示多面体について、基本モデルの性能を示す底面($\theta_{lr}-\bar{d}_{st}$ plane when $\bar{C}_{edg}=0.0$)に着目する。 $\bar{L}_{mar}$ の大域的最適値は $\bar{d}_{st}$ 軸の先端部に認められ、ストローク利用の優位性が顕著であることが挙げられる。併せて $\bar{d}_{st}=0.0$ の $\theta_{lr}-\bar{C}_{edge}$ 面に着目すると、局所的な凸領域は θ_{lr} 軸上の中央付近に確認されることから、開脚角

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

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

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

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

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

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

Fig.4 Visualization of evaluation indices (viewed from upper side).

Fig.5 Visualization of evaluation indices (viewed from lower side)

θ_{lr} 利用が $\bar{L}_{mar}$ の性能を改善する一助となり得るものと考えられる。

次に、Figs.4,5(c)に示すZMP余裕 $\bar{Z}_{mar}$ の性能提示多面体について、基本モデルの性能を示す底面 (θ_{lr} - $\bar{d}_{st}$ plane when $\bar{C}_{edg}=0.0$)に着目する。大域的最適値は

$[\theta_{lr}, \bar{d}_{st}, \bar{C}_{edg}]=[0.175, 3.0, 0.0]$ の際に $\bar{Z}_{mar}=1.52$ を示し、 $\bar{L}_{mar}$ での傾向と同様にストローク利用の優位性が顕著に認められた。なお足首開脚角 θ_{lr} については、 $\bar{d}_{st}$ と比較して $\bar{Z}_{mar}$ に与える影響は小さいことが挙げられるが、 $\bar{d}_{st}=0.0, 3.0$ の θ_{lr} - $\bar{C}_{edg}$ 面それぞれに着目

すると、凸領域の頂点は $\bar{d}_{st}$ 軸上でなく、むしろ $\bar{\theta}_{lr}$ 軸上に確認されたことから、開脚角 θ_{lr} 利用が $\bar{Z}_{mar}$ を改善する一助となり得ることも明らかである。

以上より、人間型ロボット特有の脚部関節構成に着目し、ストロークのみならず両脚足首開脚角も利用することが、作業条件下でロボット本体の性能を改善する一手段として有効である点を明らかにした。なお、進行方向安定余裕 $\bar{L}_{mar}$ とZMP余裕 $\bar{Z}_{mar}$ が有する性質について、現時点では厳密な傾向把握に至っていないことが挙げられるが、今後の課題とする。

3.2 足底モデルのプレートエッジ部切欠きが転倒安定性に与える影響

切欠き設定値 $\bar{C}_{edge}$ の異なる足底モデルについて、モデルのプレート形状そのものが有する性能差異を転倒安定性の側面から考察する。

はじめに、Figs.4.5(a)に示す安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ の性能提示多面体について、ストローク設定値 $\bar{d}_{st}$ が異なる2種類の $\bar{\theta}_{lr}-\bar{C}_{edge}$ 面($\bar{d}_{st}=0.0, 3.0$)に着目する。 $\bar{d}_{st}=0.0$ の $\bar{\theta}_{lr}-\bar{C}_{edge}$ 面より、 $\bar{C}_{edge}$ を大きく設定するに従い $\bar{S}_{mar}$ が低下する傾向が確認される。また、 $\bar{C}_{edge}$ の大きな足底モデルである程、足首開脚角 $\bar{\theta}_{lr}$ の利用が $\bar{S}_{mar}$ を低下させる要因となり、 $[\bar{d}_{st}, \bar{\theta}_{lr}, \bar{C}_{edge}]=[0.0, 1.05, 0.5]$ で $\bar{S}_{mar}$ の最小値が確認された。一方、 $\bar{d}_{st}=3.0$ の $\bar{\theta}_{lr}-\bar{C}_{edge}$ 面に着目すると $\bar{C}_{edge}$ が安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ を低下させる傾向が $\bar{d}_{st}=0.0$ の場合と同様に確認された。但し、 $\bar{d}_{st}=3.0$ では $\bar{C}_{edge}$ の設定値が大きな足底モデルである程、 $\bar{\theta}_{lr}$ を広げることで $\bar{S}_{mar}$ は改善される傾向を示し、 $\bar{d}_{st}=0.0$ でのそれと比較して相反する性質も認められた。

次に、Figs.4.5(c)に示すZMP余裕 $\bar{Z}_{mar}$ の性能提示多面体に着目すると、 $\bar{C}_{edge}$ を大きく設定するに従い、 $\bar{Z}_{mar}$ の絶対値そのものは低下するものの $\bar{d}_{st}$ 設定値を高めることで性能が改善される傾向は $\bar{S}_{mar}$ と同様に確認された。また、進行方向安定余裕 $\bar{L}_{mar}$ の性能提示多面体(Figs.4.5(b))の傾向についても同様に、 $\bar{S}_{mar}$ のそれと比較して性能に明確な差異が見受けられないものの、 $\bar{C}_{edge}$ の設定値に伴う性能低下は認められた。

以上より、1).足底モデルの基本プレート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、転倒安定性の評価指標それぞれを低下させる要因となること、2).切欠き設定値の大きな足底モデルでは、事実上、両脚足首開脚角利用の優位性が見受けられない特徴、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。特に本取り組みでは、力作業に適した両脚配置・両脚先端部の足底プレート形状問題を一般化する目的より性能の可視化を試みた。得られた結論は以下の通りである。

1. 安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ の性能提示多面体について、基本足底モデルの性能を示す底面($\bar{\theta}_{lr}-\bar{d}_{st}$ plane when $\bar{C}_{edge}=0.0$)に着目すると、 $\bar{S}_{mar}$ の優位性を示す凸領域は面上の2箇所を確認された。一方は $\bar{d}_{st}$ 軸沿い(thus $\bar{\theta}_{lr}\approx 0.0$)であり、他方は $\bar{\theta}_{lr}$ 軸沿い(thus $\bar{d}_{st}\approx 0.0$)であった。また安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ は、両軸それぞれの軸近傍から距離間隔が広がるにつれ、その性能が低下する傾向も明らかになった。
2. 基本足底モデルについて、 $\bar{S}_{mar}$ の大域的最適値はストロークのみの利用により実現されることが確認された。一方、準最適値を与えるパラメータの組に着目すると、足首開脚角のみの利用により実現されることも確認された。本結果より、大域的最適値の97.14[%]に相当する準最適値は足首開脚角のみの利用により実現されることから、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実用上、最適両脚支持状態と同程度の性能を確保できるものと考えられる。
3. 安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ の性能提示多面体についてストローク設定値 $\bar{d}_{st}$ が異なる2種類の $\bar{\theta}_{lr}-\bar{C}_{edge}$ 面に着目すると、切欠き設定値 $\bar{C}_{edge}$ を大きく設定するに従い $\bar{S}_{mar}$ が低下する傾向が確認された。また、 $\bar{C}_{edge}$ の大きな足底モデルである程、 $\bar{\theta}_{lr}$ 利用が $\bar{S}_{mar}$ を低下させる要因となる傾向も認められた。
4. ZMP余裕 $\bar{Z}_{mar}$ の性能提示多面体では、ストローク利用の優位性が顕著に認められた。併せて $\bar{C}_{edge}$ の設定値を大きく与えるに従い、 $\bar{Z}_{mar}$ の絶対値そのものは低下するものの $\bar{d}_{st}$ 設定値を高めることで性能が改善される傾向は安定余裕 $\bar{S}_{mar}$ と同様に確認された。なお足首開脚角 $\bar{\theta}_{lr}$ については、 $\bar{d}_{st}$ と比較して $\bar{Z}_{mar}$ に与える影響は小さいことも挙げられるが、凸領域の頂点は $\bar{d}_{st}$ 軸上でなく、 $\bar{\theta}_{lr}$ 軸上に確認されたことから、開脚角 θ_{lr} 利用が $\bar{Z}_{mar}$ を改善する一助となり得るものと判断される。

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試みた。その結果、1).人間型ロボット特有の脚部関節構成に着目し、ストロークのみならず両脚足首開脚角も利用することが、作業条件下でロボット本体の性能を改善する一手段として有効である点、2).足底プレートのエッジ部を切り欠くことが転倒安定性の評価指標それぞれを低下させる要因となることに加えて、切欠き設定値の大きな足底モデルでは、事実上、足首開脚角利用の優位性が見受けられない特徴、を明らかにした。今後は、左右の足首開脚角それぞれを独立したパラメータとして扱い、脚部の性能特性をより一般化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¹⁷⁾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) 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) "歩行ロボット 特集", 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, 1993.
- 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 Whole Body Cooperative 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, 吉村: "作業応用を目的とした人間型ロボットの足形状構成", 図学研究, Vol.39, No.2, pp.11-18, 2005.
- 17) 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.