

ヒューマノイドロボットの動的センシング行動とその無線 情報通信の確立

代表研究者 木 下 源一郎 中央大学理工学部教授
共同研究者 太 田 千 弘 東日本旅客鉄道（大学院博士課程前期課程学生）
〃 ジラベール ジュリアン HEVs（スイス）（留学生）

1 はじめに

ヒューマノイドロボットの開発が進み、多様な数多くのロボットが生まれている。しかし、開発すべき課題も多く、まだ、安心して利用できるロボットの実現にはもう一歩必要である。そこで、ロボットのプラットフォームを構築することにより、これを各研究者が研究利用して、各種の問題解決を行っていく効率的な方法もある。そこで、本研究では、ヒューマノイドロボットのプラットフォーム用として開発された HOAP-1^[1]を用い、ロボットの足回りのセンシングについて考える。

ヒューマノイドロボットの制御や各種の動作について、HOAP-1 によって容易に検証ができるので、ロボットの新たな作業応用について考えることができる。たとえば、人間とロボットが共同で作業を行ったり、また、ロボット自身の自律的な作業の実現を示すことができる。その例として、寝ている状態から立ち上がる動作など、従来、不可能と思われた動作が実現^[1]している。

一方、ヒューマノイドロボットの動作、作業の実現を考えて行くと、ヒューマノイドロボットが人間を含めた作業環境内の状況を識別する能力が必要で、この実現のために、ビジョンや力覚センサなどのセンサとその情報処理の研究が進められている。

さらに、ヒューマノイドロボットはロボットの二足歩行に注目して開発が行われており、歩行の際に、ロボットの左右の足底面が床面と接触するので、足底面に床反力が生じ、これが動的に変化する。この床反力はロボット作業や安定な歩行を行う際に、ロボット制御のための必要な情報を与えることができ、また、ZMP の計算、床面の形状等の識別などによって応用が可能になる。

ロボットの足の足底面は現在のところ平面に構成されており、この足底部に働く床反力分布の取得には、ロボットハンドに用いられる触覚センサ^{[2][3][4]}が利用可能である。同時に、センサは足底面に構成するために、その厚みは薄く、堅牢性が求められる。

この足底面に触覚センサの構成によって、つぎに示すいくつかの機能が実現できる。

- (a) 触覚センサの解像度に応じた床反力分布の取得。
- (b) 床反力分布より、ZMP 値などの計算が可能。
- (c) 床面のテクスチャーを足底面より取得。
- (d) 床面上にある障害物回避とその表面形状の取得

このように足底面に触覚センサの導入は筆者^{[5][6]}によって初めて行われ、この利用は各種の機能を生み、足回りに新たな機能を与えている。

さらに、足回りのセンシングには力覚センサが用いられ、足首に加わる 6 軸の力成分が精度よく計測可能である。足底面の触覚センサならびに力覚センサによる力情報の取得は、ロボットの二足走行によって生ずる ZMP (Zero Moment Point), ならびに床面の各種情報の取得が可能になる。ZMP はロボットの運動計画^{[9][10]}に利用され、また、FRI (Foot-Rotation Indicator) として、床反力の法線成分の回転成分に対する新しい考え方も導出されている^{[8][12]}。さらに、ZMP は歩行の入力情報として歩行計画への応用など、各種の手法^{[7][13]}が開発されている。

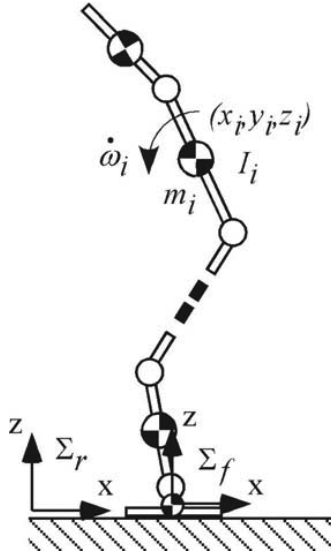


図1：ヒューマノイドロボットの動的モデル

2 動歩行時の ZMP と足底面の床反力分布

2.1 ZMP の導出

ヒューマノイドロボットのモデルとして、図1のモデルが考えられる。ヒューマノイドロボットの ZMP の位置座標，すなわち， x_{zmp} ， y_{zmp} は式(1)，式(2)によって与えられ，ロボットの各リンクの運動によって計算される。

これは単脚支持期において，ロボットが安定歩行となるためには ZMP が足底面内にあることを意味する。

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_i \dot{\omega}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (1)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_i \dot{\omega}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (2)$$

ただし，

(x_i, y_i, z_i) ：リンク i の重心の位置ベクトル

n ：ヒューマノイドロボットのリンクの数

m_i ：リンク i の質量

g ：重力加速度

I_i ：リンク i の慣性行列

ω_i ：リンク i の角加速度

2.2 両脚支持期の ZMP

単脚支持期の ZMP が求まったが，両脚支持期の場合，左右の足底面の ZMP の位置，作用力を $\mathbf{r}_{zmp}^{\ell} = (x_i, y_i, z_i)$ ， $\mathbf{f}_{zmp}^{\ell} = (f_x^{\ell}, f_y^{\ell}, f_z^{\ell})$ ， $\ell = 1, 2$ とする。この場合， $\ell = 1$ を右足， $\ell = 2$ を左足と考える。両脚支持期の ZMP を同様に $\mathbf{r}_{zmp} = (x_{zmp}, y_{zmp}, z_{zmp})$ ， $\mathbf{f}_{zmp} = (f_x, f_y, f_z)$ と定義する。

両脚の場合，ZMP は両脚を含む凸多角形の内部に ZMP が入れば安定である。両脚期の場合の ZMP は次式で与えられる。

$$\mathbf{r}_{zmp} \times \mathbf{f}_{zmp} = \mathbf{r}_{zmp}^1 \times \mathbf{f}_{zmp}^1 + \mathbf{r}_{zmp}^2 \times \mathbf{f}_{zmp}^2 \quad (3)$$

そこで、触覚センサによって求められる足底面の力成分は z 軸成分のみであるので、

$$\mathbf{r}_{zmp}^1 = (x_{zmp}^1, y_{zmp}^1, 0), \quad \mathbf{r}_{zmp}^2 = (y_{zmp}^2, y_{zmp}^2, 0) \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_{zmp}^1 = (0, 0, f_z^1), \quad \mathbf{f}_{zmp}^2 = (0, 0, f_z^2) \quad (5)$$

とおき、その結果、次式が得られる。

$$x_{zmp} = \frac{x_{zmp}^1 f_z^1 + x_{zmp}^2 f_z^2}{f_z} \quad (6)$$

$$y_{zmp} = \frac{y_{zmp}^1 f_z^1 + y_{zmp}^2 f_z^2}{f_z} \quad (7)$$

$$z_{zmp} = 0 \quad (8)$$

3 足底面のセンシングモデル

3.1 足のモデル

ロボットの足には足首関節に接続される足部があり、歩行時その足底面が床面と接触する。一般に、この足底面はこの面内の前後に突起部を付けて2点接地とするか、あるいは4隅に突起部を付けて床面と4点接地として用いられており、単なる接地点を設けている。

ここで、ロボットの足底面を平面と仮定し、床面（平面）との接触を考えると両者は分布接触となる。そこで、足底面に弾性体を用いたセンサによって構成することにより、歩行による接触時の衝撃力を緩和でき、かつ床面より作用する床反力分布の計測が可能になる。この床反力分布の識別によって、床面の凹凸や障害物の形状が取得される。

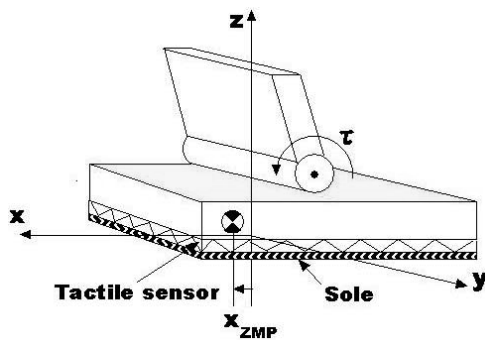
そこで、ロボットハンド用に用いられてきた触覚センサを足底面に装着して接触時の衝撃吸収を緩和すると同時に床面の状態の識別を行う。

ヒューマノイドロボットが設定された環境内を二足歩行するとき、足の足底面が床や物体などに接触する。床面を平面として仮定しているが、床面には表面の凹凸、障害物や階段などの構造物等が存在するので、その形状は様々である。また、ロボットの二足歩行時に足底面は床面と平行に接地すると仮定する。

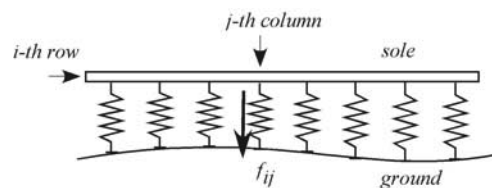
図2(a)のように、足底部のセンシングモデルを考える。足底面に触覚センサを装着し、 z 軸方向の床反力を取得する。また、センサの厚みをできるだけ薄く構成し、弾性体材料によるコンプライアンスによって、足底面内の床反力ならびに変位量を計測する。

3.2 バネ・ダンパーモデル

足底部は接地時に床面あるいは障害物から床反力を受け、この床反力が足底面に対する作用力となる。足底面



(a)足底部のセンシングモデル



(b)バネ・ダンパーモデル

図2：足のモデル

が平面と仮定しているの、この足底面に触覚センサを構成し、床反力を分布的に計測できれば、この床反力の処理によって形状識別が可能になり、障害物の形状等が取得できる。

ある時刻 t の z 軸方向の床反力成分を $f_z^\ell(t)$, $\ell=1, 2$ とする。接地時に足底部全体あるいは部分的に床反力分布が作用する。左右の足の床反力はアレイ構造のセンサから離散的に取得でき、センシング要素として、第 (i, j) ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$) 番目として取得が可能である。その要素を図 2(b)の線形バネ・ダンパーモデルで表すと、 $f_{ij}^\ell(t)$ は次式で与えられる。

$$f_{ij}^\ell(t) = a_{ij}^\ell \frac{df_{ij}^\ell(t)}{dt} + b_{ij}^\ell (f_{ij}^\ell(t) - f_{ij}^\ell(t_0)) \quad (9)$$

ただし、足底面内の第 (i, j) 番目の位置における a_{ij}^ℓ は粘性係数、 b_{ij}^ℓ はバネ係数である。初期変位 $f_{ij}^\ell(t_0)$ は、一般的に $f_{ij}^\ell(t_0) = 0$ とおける。

そこで、ZMP は次式で与えられる。

$$f_z^\ell(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n f_{ij}^\ell(t) \quad (10)$$

$$x_{ZMP}^\ell = \frac{\sum_{i=1}^p d_{xi}^\ell \sum_{j=1}^q f_{ij}^\ell(t)}{f_z^\ell(t)} \quad y_{ZMP}^\ell = \frac{\sum_{i=1}^q d_{yi}^\ell \sum_{j=1}^p f_{ij}^\ell(t)}{f_z^\ell(t)} \quad (11)$$

4 足底面の触覚センサ構成とその計測システム

本研究で用いたヒューマノイドロボットシステムは図 3 に示すように、HOAP-1 システム（富士通研究所）[1]を用いた。ロボットの身長は 480mm、重量 6.0Kg であり、関節自由度は 20 自由度（脚 6×2、腕 4×2 自由度）、また、付属センサは姿勢センサ、足底センサ、無線カメラが含まれており、体内バスは USB を使用している。

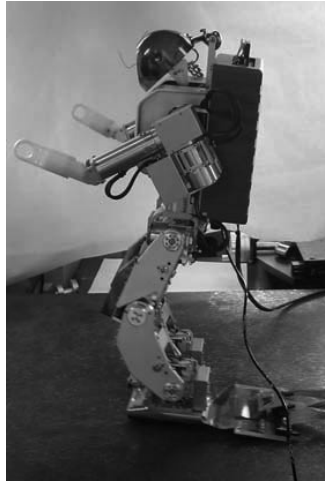


図 3：ヒューマノイドロボットによる実験

4.1 足底面に触覚センサの装着

ロボットの足底面に装着する触覚センサは、図 2 に示すように、弾性体材料でかつ非常に薄く構成することが求められる。そこで、この触覚センサは感圧導電性ゴムを用いて、ゴムの両側の電極間がアレイ状構造になるように構成してセンシング要素を作成した。すなわち、力がセンシング要素に働くとき、この力によって電極間が変位し、電極間の抵抗値の変化を計測する。そして、各センシング要素をあらかじめ校正して置くことにより、センシング要素に働く力と抵抗値の関係から力の大きさが計測される。

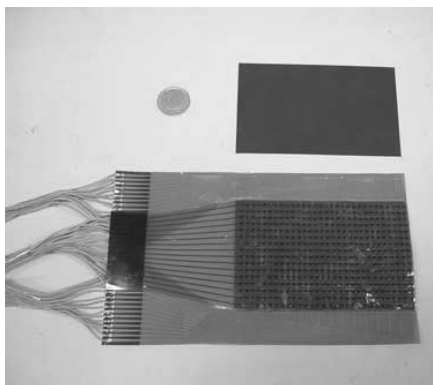
試作した触覚センサは図 4(a)に示すように、感圧導電性ゴム（厚み：0.5mm）ならびに電極なる 30 行のストライプ状電極を構成し、電極間の間隔が 3.2mm ピッチ、電極として正方電極 2mm×2mm となっている。また、

16列のストライプ状電極も同様で、間隔が 3.2mm ピッチ、電極となる正方電極 2mm×2mm からなる。

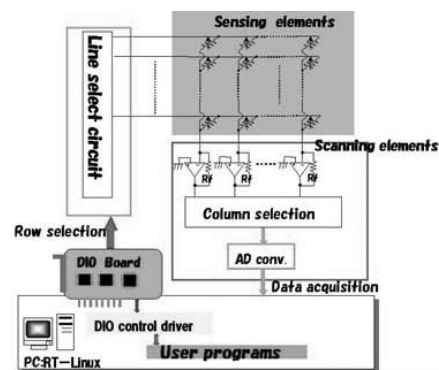
足底面の触覚センサは、足底面の大きさ（98mm×63mm）に対して、ストライプ状の30行の電極と16列の電極が感圧導電性ゴムを互いに直交するように挟み込み、（30行 x 16列）のセンシング要素からなるアレイ配列を構成した。

また、床面との接触を考えて、床面側にウェットスーツ用のゴム（厚み：2mm）を用いて、触覚センサを保護し、床面からの衝撃を吸収し、かつコンプライアンス機能を付与した。触覚センサの各センシング要素に作用する床反力分布によって抵抗値の変化を取得するとき、回路としてゼロ電位法^[4]を用いて構成し、回り込み電流の抑制を行った。

これは測定を行う行電極以外の行電極と列電極をゼロ電位として、目的とする抵抗素子を通る電流のみから抵抗値を計測する方式である。この全体の構成を図 4 (b)に示し、図でセンシング要素の部分が触覚センサであり、他の部分は計測のための周辺回路である。



(a)試作した触覚センサ



(b)触覚センサの構成法

図 4：触覚センサならびにその構成法

4.2 計測システムの構成

4.2.1 床反力の計測とその提示

足底面に触覚センサを装着し、その床反力分布のデータ取得には、図 5 に示すように、有線でデータを取得する方法と図 7 に示すように無線でデータ取得を取得する方法がある。ここでは試験的に行うために有線で行う方法について述べる。触覚センサによる床反力の計測は図 4 (b)に示すように、ハードウェアの構成に対して、図 6 のようなソフトウェアの構成を行った。ヒューマノイドロボットの歩行システムは RT-Linux が用いられており、触覚センサの計測も同様に、RT-Linux を用いて構成した。

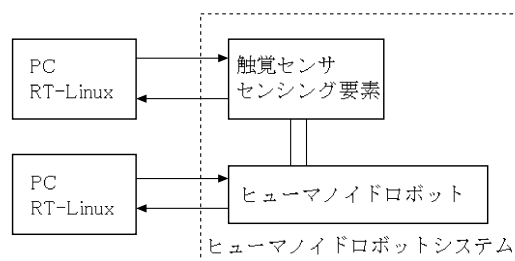


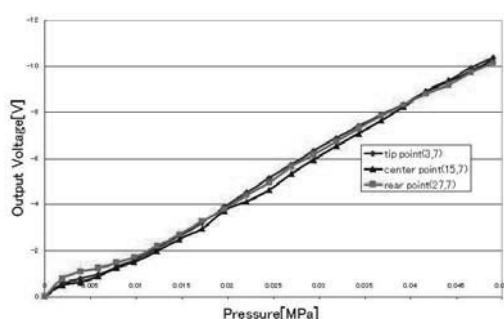
図 5：データ取得とその提示法

RT-Linux のパッチを適用したカーネルを実行するとリアルタイムカーネルが最下層で動作する。このリアルタイムカーネルが Linux カーネル本体や RT-Linux モジュールと内部で動作する RT-Linux スレッドをスケジューリングすることで、リアルタイム制御が可能となる。

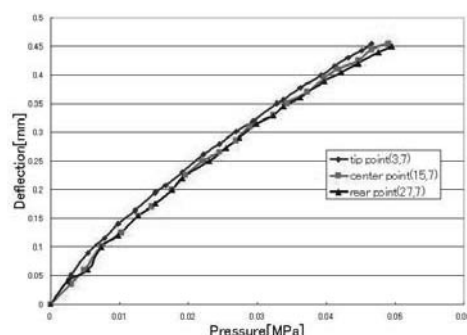
ト制御のコンピュータに接続する方法を考えている。ロボット制御のために、ロボットとコンピュータ間は無線で情報の授受が可能なので、センサデータの授受を無線化することで、ロボットは自由に歩くことが可能となる。

5 実験結果

触覚センサのセンシング要素の基本特性を取得するために、校正実験を行った。この校正実験は材質がジュラルミンで接触面が $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ の角柱体を構成して力覚センサ（3軸力覚センサ、F-5: (株) ビー・エル・オートテック）に取り付け、これをロボット（LR Mate100: (株) FANUC）ハンドに搭載して、触覚センサの表面に加圧し、このときの加圧力とセンサの出力電圧、また、加圧力とロボットハンドの変位量を計測した。加圧力は力覚センサ出力、変位量はロボットハンドにダイヤルゲージを搭載して計測した。ここでは足底面の触覚センサの基本特性として、足底面内の3点のセンシング要素を取り上げ、(3,7), (5,7), (27,7) について、この圧力対出力電圧特性を図8(a)に示す。図8(a)から分かるように、いずれもほぼ同一曲線に乗っていることが分かる。加圧力 0.05 MPa に対して -10 V の電圧を得ることができる。同様に、加圧力対変位特性も図8(b)のようになり、 0.05 MPa で、 0.45 mm の変位となることが分かる。



(a)要素の加圧力対出力電圧特性



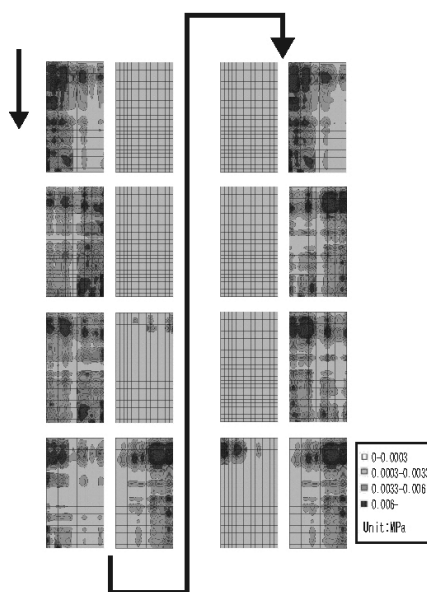
(b)要素の加圧力対変位特性

図8：触覚センサの校正

試作した触覚センサを図9(a)に示すようにヒューマノイドロボットの足底面に取り付け、また、ロボットの安定な歩行を行って、歩行中の床反力分布を計測した。ヒューマノイドロボットは HOAP-1^[1]を用い、この足底面に触覚センサを取り付けて実験を行った。



(a)ロボットの足と触覚センサの構成例



(b)260msec 毎の床反力分布

図9：触覚センサの構成例と床反分布

ロボットの歩行中における左右の足の足底面の床反力分布は、図 3 のシステムを用いて、図 9(a)に示すように、歩行動作をさせ、20ms 毎にデータを取得した。右足の足底面が平面の床面に接触してから離れ、また接触するまでの床反力分布を図 9(b)に示すように計測した。図では全体の床反力分布の変化を表現するために、途中の細かい分布を省略して、260ms 毎の様子を示す。また、左右の足の位置はこの図では同じ位置に示されているが、歩行状態では位置が異なる。この床反力分布に示すように、足底面の外側より接触し、内側に変化し、最後に踵部分に大きな力が掛かる様子が分かる。この様子はZMP でも分かる。

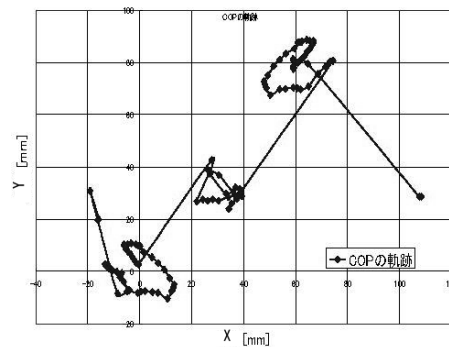


図10：ZMP の軌跡例（X 軸が歩行方向）

図 9(b)の実験に対する ZMP は図10のように得られ、横軸が歩行方向である。この結果、原点回りの左下の軌跡は右足の単脚支持期における ZMP を示し、ZMP が円を描いている様子が分かり、これから足の運動が分かる。さらに、中央部は足が両脚支持期にあるときの ZMP を示すものであり、右上が左足の単脚支持期にある場合の ZMP である。

これらの実験結果から足底面に構成された触覚センサが歩行中の床反力分布をリアルタイム計測でき、また足の床面との接触状態が明らかになる。

6 おわりに

ヒューマノイドロボットの歩行中における足底部に働く床反力分布の計測法として、ロボットハンドに用いられてきた触覚センサを使用して計測できることを示した。とくに、床反力分布の計測手法を確立し、ZMP の計測を示した。

この成果により、床面上の歩行において障害物の発見、障害物の形状等の把握が可能になり、ヒューマノイドロボットの歩行制御に用いる方法が今後の課題となる。

最後に、ヒューマノイドロボットの足部のセンシングに用いられる 6 軸の力成分の計測と足底面の床反力分布結果を融合して、ヒューマノイドロボットのより柔軟なかつ安定な歩行を実現させることが今後の課題となる。

参考文献

- [1] HOAP-1, 富士通研究所, 2000
- [2] 木下, 触覚センサの開発現状, 日本ロボット学会誌, 2, 5, pp.46-53,1984
- [3] H.Maekawa, K.Tanie, K.Komoria and M.Kaneko, Development of a finger-shaped tactile sensor and its environment by active touch, Proceedings. of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1327-1334, 1992.
- [4] 木下, 栗本, 大隅, 多田, 把持物体の動的触覚像取得とその処理, 日本ロボット学会誌, Vol.20, no.5, pp.550-556, 2002
- [5] G.Kinoshita, T.Kimura and M.Shimojo, Dynamic Sensing Experiments of Reaction Force Distributions on Sole at Walkings of a Humanoid Robot, Proceedings of 2003 IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1413-1418, 2003
- [6] G.Kinoshita, C.Oota, H.Osumi and M.Shimojo, Acquisition of Reaction Force Distributions for a Walking Humanoid Robot, Proceedings of 2004 IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3859-

3864, 2004

- [7] 木戸部, 益山, 柴田, 山野, 那須: 歩行ロボットの床圧・摩擦力に基づく ZMP 操作および角運動量制御への応用, 日本ロボット学会, 20, 5, pp.515-520, 2002.
- [8] 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, 20, 3, pp.229-232, 2002
- [9] J.Yamaguchi, A.Takanishi, and I. Kato, Experimental development of a foot mechanism with shock absorbing material for acquisition of landing surface position information and stabilization of dynamic biped walking, IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp.2892-2899, 1995
- [10] 山口, 木下, 高西, 加藤: 路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ 2 足歩行ロボットの開発, 日本ロボット学会, 14, 4, pp.546-559, 1996.
- [11] J.H.Park, Impedance Control for Biped Robot Locomotion, IEEE Transction on Robotics and Automation, 17, 6, pp.870-882, 2001
- [12] A.Goswami: Postural Stability of Biped Robots and the Foot-Rotation Indicator(FRI) Point, The International Journal of Robotics Research, 18, 6, pp.523-533, 1999
- [13] 川路, 小笠原, 飯盛: コンプライアンスを用いた二足歩行ロボットの運動制御, 電学論D, 116,1, pp.11-18, 1996
- [14] 下条, 感圧導電性ゴムを用いた触覚センサと能動的触覚センシングに関する研究, 学位論文, 1993.9

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
Acquisition of Reaction Force Distribution for a Walking Humanoid Robot	Proceding of 2004 IEEE/RST International Conference on Intelligent Robot and Systems	2004