

ヒューマノイドロボット ASIMO の開発

Development of Humanoid Robot ASIMO

広瀬 真人* 竹中 透*
Masato HIROSE Toru TAKENAKA

要 旨

Hondaは新しいモビリティへのチャレンジとして、二足歩行ヒューマノイドロボットの開発に取り組んできた。そのなかで、新しい時代を切り開く革新的モビリティ：Advanced Step in Innovative MObilityである「ASIMO」を開発した。これは、人の身近なところで、実際に人の役に立つ存在であることを目標に、生活環境に適合できるミニマムなサイズ(身長1200mm、重量43kg)で実現させたものである。また、従来の研究で培ってきた技術をさらに発展させることにより、その機能を進化させた。特に歩行に関しては、従来の歩行安定化制御に加え予測制御技術を取り入れた新しい「自在歩行技術」により、スムーズで連続的な移動が可能となった。

ABSTRACT

Honda has been doing research on biped walking humanoid robot as the challenge to a new field of mobility. This time, we developed the “ASIMO” named after Advanced Step in Innovative MObility. We materialized it with overall height of 1200mm and weight of 43kg, aiming for a useful robot which is friendly to and compatible with the actual human living environment. As for walking, we developed the free walking technology including behavior prediction such that a robot can change its walking motion freely and smoothly without intermission.

1. はじめに

Honda は 1986 年から、新しいモビリティの創造のひとつとして、人々の生活空間の中で活躍できることを目指し、「人と共存・協調し、社会の中で役に立つことにより、新しい価値をもたらすヒューマノイドロボット」の研究を行ってきた。その研究過程において得られた、人間歩行の解析による歩行データや、2足歩行のアクチュエータ・機構の設計、2足歩行の制御等の技術を活かし、1996年に世界初の自律二足歩行ヒューマノイドロボット P2⁽¹⁾を試作し公開した。また、人間の生活環境や社会におけるヒューマノイドロボットのあり方を検討し、1997年に、より人間に近いサイズのプロトタイプモデル P3 を完成した。

これらの技術をさらに発展させるとともに、人の身近なところで、実際に人の役に立つ存在を目指して、人間の生活環境に適合できるミニマムなサイズ(身長1200mm、重量43kg)のヒューマノイドロボット「ASIMO」(Fig.1)を2000年10月末に誕生させた。「ASIMO」とは、Honda ヒューマノイドロボットの総称として、「新しい時代を切り開く革新的モビリティ：Advanced Step in Innovative MObility」を意

＊和光基礎技術研究センター

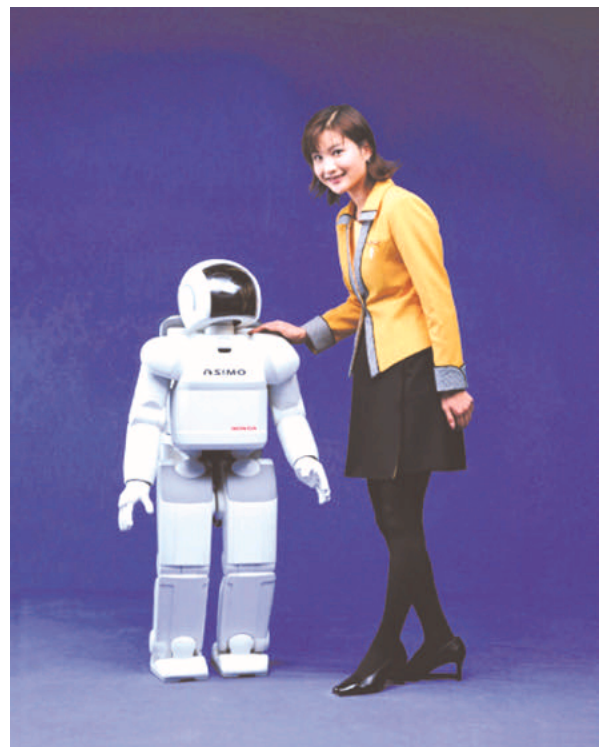


Fig.1 Humanoid Robot “ASIMO”

味した名称である。ここでは、ASIMOの仕様諸元、及びそのよりスムーズで連続的な移動を可能にした歩行技術について紹介する。

2. 開発コンセプト

ASIMOでは実用化に向けた新しい技術の研究開発、特に下記3項目の技術課題の解決に取り組んできた。

- 1) 小型・軽量化
- 2) 腕・手の機能進化
- 3) 歩行の知能化

大きさ、重量は、ロボットが人間の身近な生活環境の中で活動するために、最も重要なファクターである。人間の生活環境で実用性を発揮するためには従来の P3 に対して小型・軽量化を図る必要がある。

また、小型ロボットにおける作業範囲の制限を極力抑えるため、腕の可動範囲を拡大する必要がある。また対象物を柔らかく、均一に掴める手をシンプルな機構で実現しなければならない。

さらに、人間と協調して作業をするためには、歩行の安定性に加え、滑らかに移動が出来る歩行機能やその制御がロボットの実用化において必要不可欠である。

3. 主要諸元

3.1. 大きさ

従来の P3 は人間の大人のサイズを目標に試作したが、ASIMOでは人間の生活空間で実際に役に立つロボットにはどのくらいのサイズが適切か、という観点で検討した。単に移動し物を運搬するだけではなく、環境に適合したサイズとするため、Fig.2に示すように、扉のノブや、照明スイッチ、コンセントなどの生活環境へのアクセス性から、腕上げ高さ、しゃがみ位置を検討した。また、普段私達が使用している机や立ち作業台での作業姿勢などから、肘や肩位置を求めた。

直立時の肩位置高さの寸法を 910mm とし、その位置を基準にした作業範囲は、上側は、腕を伸ばして作業ができる 1290mm の高さ、下側は、しゃがみ込んで作業ができる高さとした。また、Fig.3に示すように、階段の昇降を可能とするためには、脚の寸法は股関節まで 610mm にする必要がある。これらの検討結果から、身長は 1200mm と設定した。また、狭い通路やドアの幅を考慮し、ロボットの横幅は 450mm、奥行きは 440mm とした。そのサイズを P3 との比較で Table 1 に示す。このサイズとしたことで、私達が椅子に座った状態からのロボットとのコミュニケーションのしやすさ、そして親しみやすさも同時に得られた。

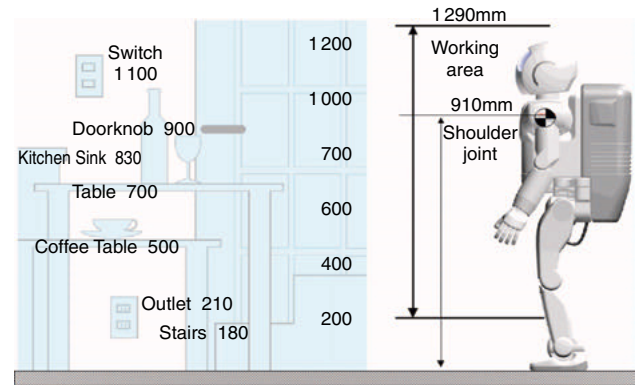


Fig.2 Life environment and working space

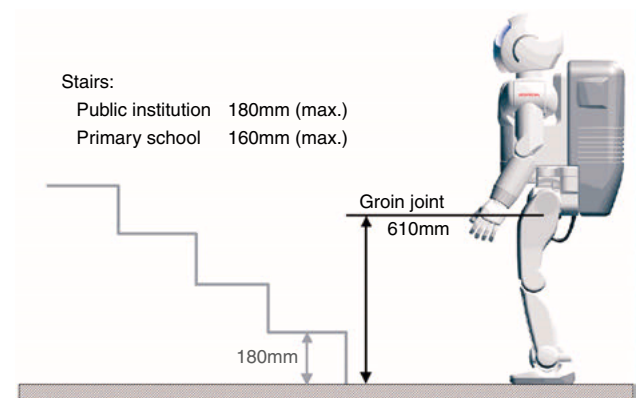


Fig.3 Stairs

Table 1 Size of ASIMO/P3

	ASIMO	P3
Height (mm)	1200	1600
Width (mm)	450	600
Extend (mm)	440	555
Weight (kg)	43	130

3.2. 重量

Fig.4 に示すように、身長 1600mm、重量 130kg の P3 に対し、ASIMOの重量は体積比分のダウンサイジングに相当する重量(54kg)のさらに20%の軽量化を推し進め、43kgの重量を実現できた。フレームにマグネシウム合金材料を使用し、3面で構成が成立するH型断面構造、さらに薄肉鋳造方式による肉厚1.5mmを基本構造とした。また電装機器も制御ユニット部などを最適設計し、小型・軽量化を実現させた。このロボットの重量は同一身長の人間重量 22kg ~ 23kgに対し約2倍であるが、大人二人で運搬することが可能である。

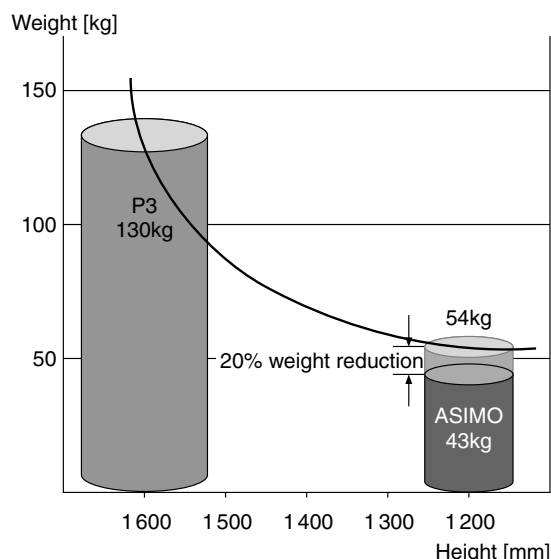


Fig.4 Weight reduction

3.3. 関節の構成

関節は人間の骨格を参考にしながら、シンプルかつその基本動作機能を損なわない構成とした。関節の構成と自由度について、Fig.5 に示す。脚部は、従来の P3 と同様に、足関節・膝関節・股関節の構成で6自由度とし、歩行はもちろん階段昇降やまたぎ動作も可能である。5本指を開閉できる手は1自由度であり、腕部については手先を任意の位置に決定できる肩関節・肘関節と手首関節の構成で5自由度とした。また頭部は、うなずき動作ができる2自由度の構成とした。

3.4. 腕・手の機能

身長1200mmのロボットの作業姿勢を検討すると、Fig.6 に示すように肘関節が肩関節の真横にくる姿勢が、高い作業台における動作の際に生じる。このような動作姿勢において、肩関節の軸回転方向と肘関節の軸回転方向が直線状に並んで、動く方向が重なる特異点が生じ、動きの自由度が制約される。その制約を避けるために、肩関節の軸を上方に20度傾けた構成にして、腕の可動範囲を大きくとれるようにした。この結果、肘を105度まで上げて作業することができ、身長1600mmのP3と同様の作業領域を確保することが可能となった。

手は、一本のワイヤーで5本指を引っ張る機構であり、握る動作と開く動作が可能である。対象物を握ろうとした場合に、ひとつの指がその対象物に触れるとその位置で停止し、別の指が順番に触れていく、包み込み動作ができる。つまり柔らかく、均一に物体を掴める手である。また、機構がシンプルなことから狭いところへのアクセス性も向上している。

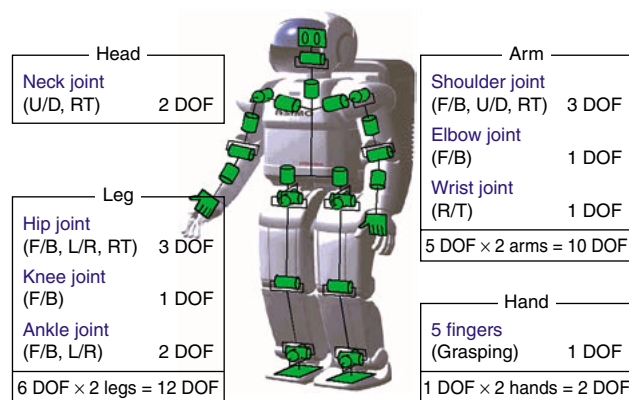


Fig.5 Joint structure and DOF (Degree of Freedom)

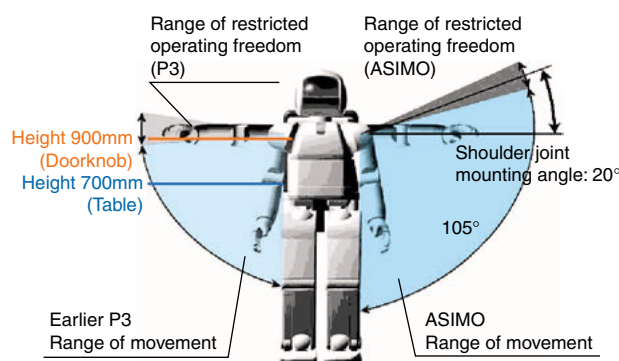


Fig.6 Arm's range

3.5. 操作方法

従来の P3 は、ワークステーションを使ってすべての操作を行っていた。Fig.7 に示すように、ASIMO ではそれに加え、携帯コントローラによる方法を新たに採用し、より直感的でダイレクトな操作を実現した。

従来からのワークステーションにより、スタートアップや定型な動作を自動で実行することができるとともに、携帯コントローラを用いて、ロボットを簡単に自在歩行(前進・後退/かに歩き/斜め歩き/旋回)させることができる。また、登録された動作(握手/両手を振る/バイバイ/おじぎ等)は、この携帯コントローラのボタン操作により選択し実行できる。

3.6. 歩行方法

ASIMOでは次章に詳細に示すとおり、従来の研究で培ってきた歩行安定化制御に加え、予測運動制御を取り入れた新しい「自在歩行技術」を実現した。これにより、いかなる瞬間からでも連続的にかつ自由自在に歩行パターンを変更できるようになった。

以上、今回開発した ASIMO の主要諸元を Table 2 にまとめ示す。

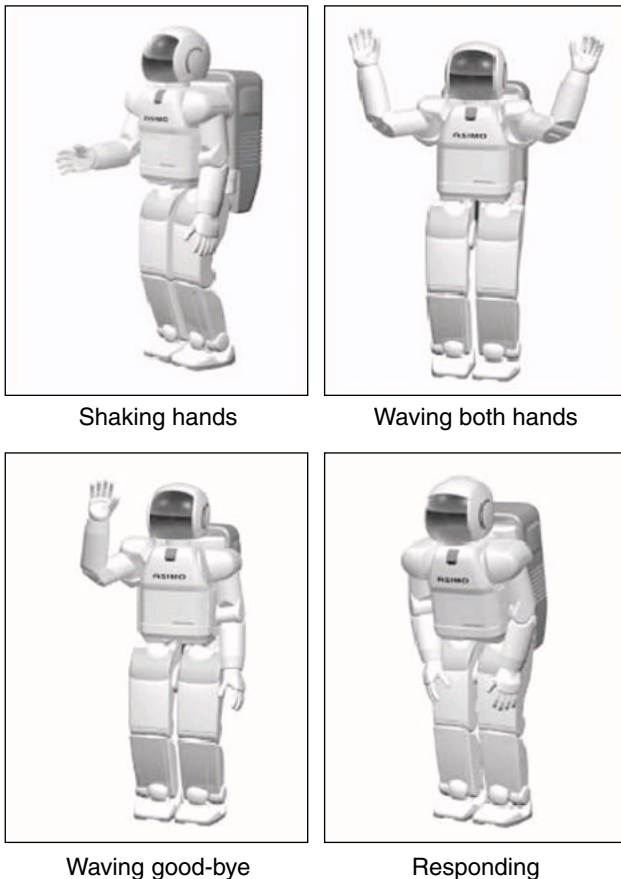
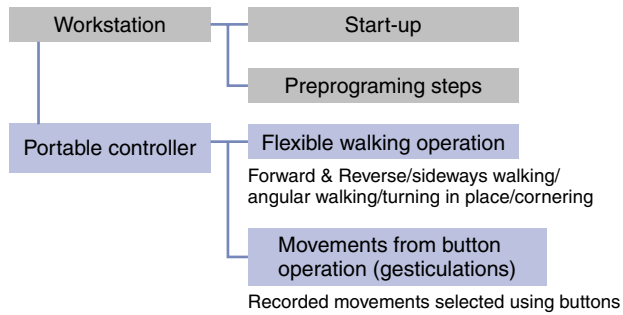


Fig.7 Operation system

Table 2 Specifications of ASIMO

Height	1200mm
Weight	43kg
Walking speed	0 ~ 1.6km/h
Walking cycle	Cycle adjustable, Stride adjustable
Grasping force	0.5kg/hand (5-finger hand)
Actuator	Servomotor + Harmonic speed reducer + Drive unit
Control unit	Walk/Operating control unit, Wireless transmission unit
Sensors	Foot: 6-Axis foot area sensor Torso: Gyroscope & acceleration sensor
Power section	38.4V/10AH (Ni-NH)
Operating section	Workstation or handy controller

4. 歩行技術

4.1. 歩行の安定化

人間は、歩行中あるいは直立中に倒れそうになると、a) 足裏の一部を床に強く押し付けて踏ん張り、それでもこらえきれなくなると、b) 足腰の運びを変えたり足を踏み出したりして姿勢の回復を試みる。この人間の動作を力学的に解析すると、以下ようになる。

重力と慣性力の合力の作用線と地面との交点は、ZMP (Zero Moment Point)^{(2), (3)} と呼ばれる。一方、床反力が作用する点を床反力中心点と呼ぶ。基本的には、ロボットは、その動力学モデルを基に目標歩行パターンを CPU で生成し、これに関節を追従させて歩行する。目標歩行パターンの ZMP を「目標 ZMP」と呼ぶ。

実際のロボットが理想通りの歩行をしているときには、重力と慣性力の目標合力と実床反力の作用線は一致するが、例えば、ロボットが地面の凹凸を踏んだ場合には、Fig.8に示すとおりの作用線のずれが生じてバランスを崩し、転倒力が発生する。この転倒力は目標 ZMP と実床反力中心点のずれにほぼ比例する。つまり、目標 ZMP と実床反力中心点のずれが、バランスを崩す最大の原因である。P2, P3に使われている歩行安定化制御では、ロボットがバランスを崩して倒れそうになると、逆に積極的にこのずれを制御することにより姿勢を復元する。以下に、この姿勢制御の核技術である「床反力制御」「目標 ZMP 制御」「着地位置制御」について述べる。

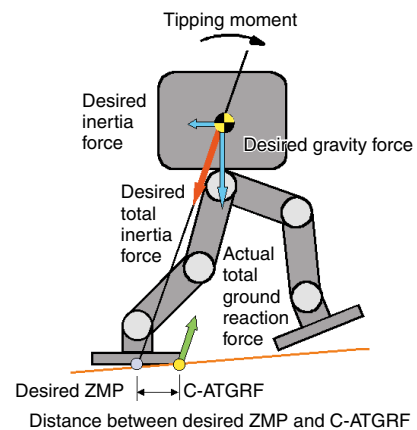


Fig.8 Unbalance of the legged robot

4.1.1. 床反力制御

床反力制御は、床の凹凸を吸収しながらも、倒れそうになった時に足の裏で踏ん張る制御であり、一種のアクティブサスペンションとも言えるものである。具体的には、両脚足首下に備えた6軸力センサにより実床反力中心点を検出しながら、目標 ZMP を中心に両足先端の位置と姿勢を回転移動させることによって、実床反力中心点を姿勢バランスのための適切な位置に制御する。例えば、Fig.9に示すよ

うな未知の登り斜面では、実床反力中心点はつま先側にずれるが、床反力制御は、つま先側を少し持ち上げて実床反力中心点を目標 ZMP まで戻す。また Fig.10 に示すように未知の登り斜面に両脚が接地している状況では、前脚床反力が増大し後脚床反力が減少して床反力中心点が前にずれてしまう。そこで、前足先端が持ち上がり、後足先端が下がるように目標 ZMP まわりに足先端を回転移動させることによりずれをゼロに戻す。このような床の凹凸の影響を吸収する動作に加え、何らかの原因でロボットが前傾したときには、実床反力中心点を目標 ZMP よりも前にずらし、姿勢復元力を発生させる。ただし、実床反力中心点は足裏接地面の範囲から越えることができないので、姿勢の復元力には限界があり、ロボットが大きく傾いた場合には転倒する。

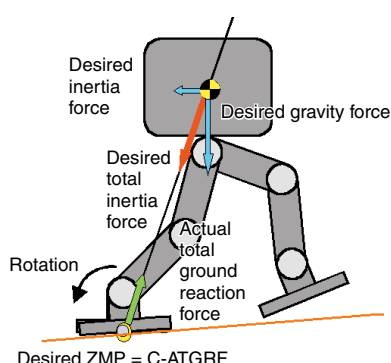


Fig.9 Compliant motion during single support phase

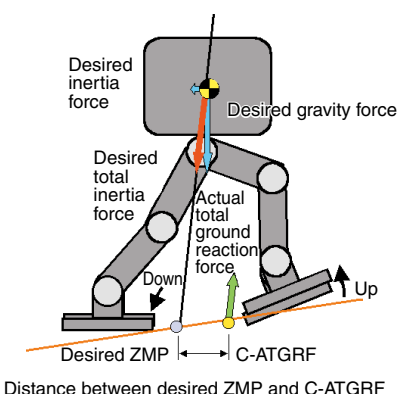


Fig.10 Compliant motion during double support phase

4.1.2. 目標 ZMP 制御

ロボットが大きく傾いた場合には、目標 ZMP 制御が働いて転倒を防ぐ。例えば前方に倒れそうな場合には、目標 ZMP 制御により、Fig.11 に示すように目標歩行パターンの上体軌道を理想軌道よりも一層強く前方に加速させる。この結果、目標 ZMP が実床反力中心点よりも後方に移動し、後ろに倒そうとする力が働き、姿勢の傾きが戻る。言い換えれば、目標歩行パターンのバランスを故意に崩すことによってロボットの姿勢を復元させる制御である。

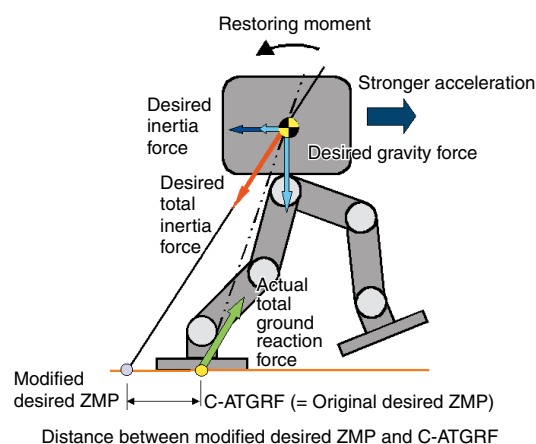


Fig.11 Model ZMP control

4.1.3. 着地位置制御

目標 ZMP 制御が働くと、目標としていた上体の位置が、より強く加速した方向にずれる。このとき、元の理想通りの歩幅で次の足を踏み出すと、上体に対して足が取り残されてしまう。そこで、着地位置制御により、上体と足の理想的な位置関係を取り戻すように歩幅を適切に修正する。

4.2. 歩行の知能化

従来の歩行パターン生成法は、オフラインで設計した数十種類の基準歩行パターンを時系列データにしてロボットに記憶させ、これらの合成(重み付き平均)によって自在な歩行パターンを生成する方式であった。しかし、この原理ゆえに、a)直進から旋回するためには、その間に一旦停止が必要で、b)旋回歩行はべた足、c)歩行周期は数種類に限定、などの欠点があった。これらの欠点を解消するために、ASIMOでは、新たに予測運動制御技術を開発し、歩行の知能化を図った。

直進から旋回に連続的に移行する場合を例にとると、Fig.12 に示すとおり旋回時には遠心力とバランスをとるために、重心位置を旋回中心側にずらす必要がある。ASIMOでは、直進から旋回に移行する際に、旋回前から予測演算によって、各瞬間における、最適な重心移動を求めながら、リアルタイムに歩行パターンを生成する。

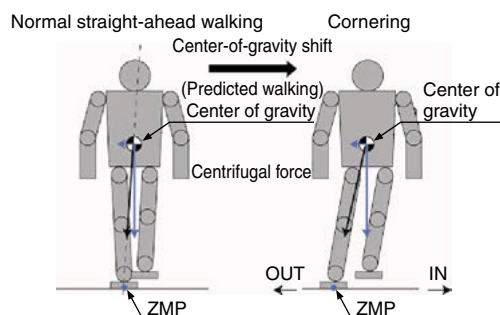


Fig.12 Center-of-gravity shift when cornering

このように従来の歩行安定化制御に加え、予測運動制御を取り入れた新しい「自在歩行技術」の実現によって、いかなる瞬間からでも一旦停止することなく滑らかかつ自由自在に歩行パターンを変更できるようになった。

5. まとめ

ASIMOの開発において、専用電装設計や構造の見直し等により大幅な小型化と軽量化を実現した。また、新たに開発した「自在歩行技術」により、滑らかで自在な歩行が可能となった。今後も、生活環境の中で役立つロボットを目指して、さらなる軽量化と運動機能向上を図ると共に、様々な作業ができる高知能ロボットの開発を推進する。

このロボットを完成するにあたり、内外にて多くの人達の多大なるご協力をいただき感謝の意を表する。

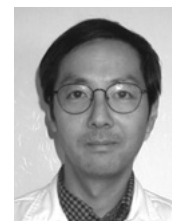
参考文献

- (1) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka: The Development of Honda Humanoid Robot, IEEE ICRA, (1998)
- (2) Vukobratović, M., Stepanenko, Y., “On the Stability of Anthropomorphic Systems”, *Mathematical Biosciences*, Vol.15, Oct., (1972)
- (3) M.Vukobratovic, 加藤, 山下 訳: 歩行のロボットと人工の足, 日刊工業新聞社, (1975)

■ 著 者 ■



広瀬 真人



竹中 透