

新型 ASIMO の開発

Development of New ASIMO

重 見 聡 史*
Satoshi SHIGEMI
川 邊 浩 司*
Koji KAWABE

河 口 裕 一 郎* 吉 池 孝 英*
Yuichiro KAWAGUCHI Takahide YOSHIIKE
小 川 直 秀*
Naohide OGAWA

要 旨

新型 ASIMO は、「人と共存、協調して社会の中で役に立つロボット」の実現を目指したステップとして、オフィスなどの実環境で自律的に作業する能力の実現と運動能力の向上を目的として開発された。この目的を達成するために、関節軸を増やし周囲環境を認識するためのセンサを搭載した新規の制御システムと走り制御技術を開発した。その結果、歩行機能としては、障害物を検知しながら目的地まで経路を修正しつつ、実環境でも連続的に移動できるようになった。走りは、直線走行だけでなく旋回走行も実現した。また作業機能としては、トレイに載せた飲み物などの軽量物の運搬やワゴンを自由自在に押すことが可能となった。さらに人の識別の迅速化や手つなぎ歩行を実現するなど、人にリアルタイムに対応する機能も向上した。

以上の機能を総合的に実行する統合制御システムを開発し、受付案内やデリバリサービスが自動で可能となった。

ABSTRACT

A New ASIMO humanoid robot with advanced physical capabilities that can work autonomously in a real-life environment, such as in an office, was developed in an effort to realize a robot that can coexist with and assist people in society. To attain these goals, by integrating more joints and additional sensors that help ASIMO recognize its surrounding environment, a new control system was developed. The following enhancements were achieved: Obstacle detection was enhanced and route guidance was added for greater mobility; ASIMO was equipped with the ability to run in both circular and straight directions; manipulative ability was enhanced by adding new functions that allow the robot to hand-carry light objects and to push other objects using a cart; and it was provided with the ability to better interact with people.

1. まえがき

Hondaは、新しいモビリティの創造のひとつとして人と共存、協調して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おこなってきた。その研究過程において得られた人の歩行の解析結果、および二足歩行のアクチュエータ機構の設計や二足歩行の制御などの技術を活かし、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 を試作し公開した⁽¹⁾。2000年11月には、人の身近で実際に人の役に立つ存在を目指して人の生活環境に適合できるミニマ

ムなサイズの ASIMO を誕生させ⁽²⁾、2001 年から国内でレンタルの形態で市場に送り出した。また 2002 年には、世界 30 カ国以上で公開して、人とロボットとの接点を通じて実際に人の役に立つ姿を探求した。さらに人との関わりを円滑にするため、人の姿勢や行動および個人の顔を認識するなどの人応答機能⁽³⁾を搭載した。このような活動を通じて人々と共にヒューマノイドロボットが活躍する夢を描き、ニーズの開拓、ノウハウの蓄積を図ってきた。

ここでは 2005 年 12 月に発表した新型 ASIMO(Fig. 1) の概要を、進化させた機能を中心に紹介する。

*和光基礎技術研究センター

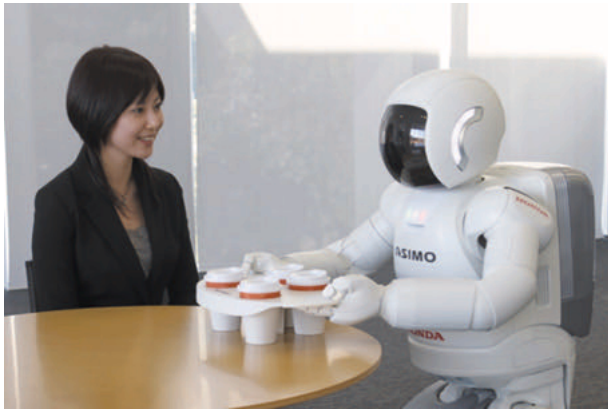


Fig. 1 Humanoid robot "New ASIMO"

2. 開発のねらい

Fig. 2 は ASIMO の究極の目標である「人と共存、協調して社会の中で役に立つロボット」の実現に向けての活用ロードマップを示す。開発のステップを3段階に分け、それぞれの用途をエンターテインメント、パブリックユース、パーソナルユースに設定した。

新型 ASIMO は第2ステップに位置付けられ、オフィスなどの実環境でより自律的に作業する能力と運動能力の向上を目的として開発された。実用的な作業として、受付案内やデリバリーサービスなどを想定し、移動、作業、人対応の三つの機能を下記のように目標設定して技術開発をおこなった。

(1) 移動機能

- ・人や壁にぶつからず、スムーズに移動できる。
- ・機敏に動くことができる。

(2) 運搬機能

- ・トレイなど軽量物の運搬および受け渡しができる。
- ・ワゴンを使った運搬ができる。

(3) 人対応機能

- ・個人識別が素早くでき、相手に合わせた応対ができる。
- ・手をつないで歩くことができる。

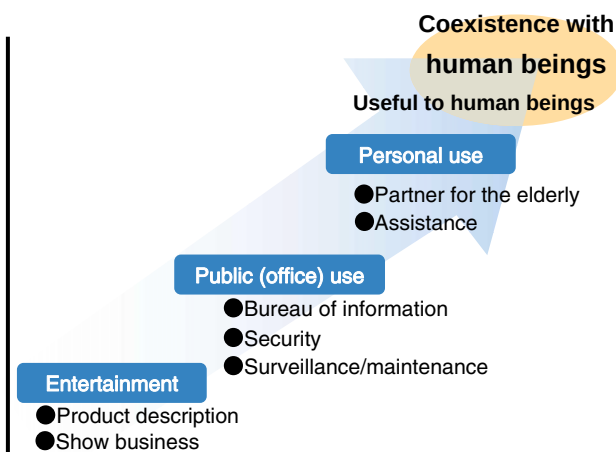


Fig. 2 Development of ASIMO

Table 1 Specifications for ASIMO

Height	1300mm	(in self-standing)
Weight	54kg	
Speed	0 - 2.7km/h (Walking) 6.0km/h (Running in straight line) 5.0km/h (Running in circular pattern)	
Sensors	· Stereo camera (for human) · Slit laser sensor (for floor shape) · Ultra-sonic sensor (for obstacles) · IC tag with optical communication unit	
Power section	51.8 V (typ) / 10Ah	(Li-ion 14 cells)

3. 主要諸元

3.1. 基本仕様

新型 ASIMO の主要諸元を Table 1 に示す。全高は1300mm、重量は54kgであり、歩行速度は人を案内する際に同じ速さで歩けるよう時速2.7 kmとした。外観デザインは、さまざまなデバイスを搭載しつつ従来の ASIMO の先進親和イメージを継承発展させたものとした。電源供給システムは、バッテリーをリチウムイオン2次電池に変更して小型化を図るとともに、オンボード充電を新たに採用して、使い勝手を向上させた。

3.2. 関節の構成

従来に対し各関節には、腰部に1軸、各腕部に2軸、各ハンド部に1軸、頭部に1軸を追加し、合計で34自由度にした。腰の回転軸は、移動のスピードアップにともなう胴体のスピンをキャンセルするために設けた。腕部については、手首に2軸を追加し7自由度とすることで、作業時の手の位置と姿勢を決める自由度が増し、作業性を大幅に向上させることができた。またハンドは、親指に自由度を追加し、軽量物などを挟むことが可能となった。頭部には、首をかしげて人に対応するときの表現力を向上できるよう1軸を追加した。脚部は、従来と同様6自由度である。関節の構成と自由度について Fig. 3 に示す。

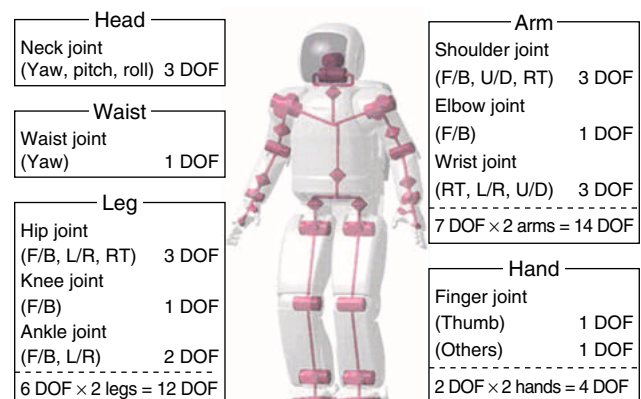


Fig. 3 Joint structure and DOF (Degree of Freedom)

3.3. 基本制御システム

新型 ASIMO では、周囲環境を素早く認識し機敏に動くためにシステムを全面的に変更した。周囲環境を認識するため、従来からある頭部ステレオカメラに加えて床面形状センサ、超音波センサ、光センサ併用IC通信カードを搭載した。さらに多数のセンサ情報に対して総合的に行動を計画する統合制御システムを開発した。また機敏に動くために、高速 Main-CPU の適用(従来比 10 倍)、Main-CPU とセンサおよびモータドライバを結ぶ体内通信系的高速化(従来比5倍)とモータドライバの高応答化(従来比4倍)をおこなった。これらにより、状況変化に対するシステム全体の応答性を大幅に向上させた。

4. 移動機能

実環境では、壁や机などの構造物あるいは人に衝突しないことや、人をとっさに避けるなど機敏に動けることが必要である。新型 ASIMO では、従来に対し経路誘導と障害物検知の能力を大幅に向上させるとともに、機敏な動きの基本となる走り制御技術を新たに開発した。

4.1. 経路誘導

ASIMOをあらかじめ設定されたルートマップに沿って誘導するために、ジャイロセンサにより計算された自己位置を床面に張られたランドマークを基に得られた実環境での自己位置で、リアルタイムに補正しながら歩容を生成する (Fig. 4)。

4.1.1. ランドマーク検出

オフィスなどの実環境では光の条件が多様に変化することから、それに対するロバスト性を高める必要がある。そのためランドマークとして再帰性反射マーカを利用し、腰部には赤外光照射用のLEDを搭載した。また検出処理には赤外光透過フィルタを通して撮影した画像 (Fig. 5) を用い、さらに撮影時のシャッタースピードを自動的に調整することにより、太陽光の直射を受けるような場所においても、ランドマーク検出の信頼性を向上させることができた。

4.1.2. 自己位置補正

新型 ASIMO では、歩行中にリアルタイムで自己位置を補正するために、ランドマークの検出位置を算出する際

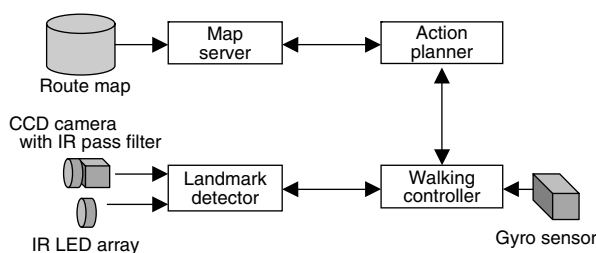


Fig. 4 Block diagram of navigation

の歩行中のゆれ成分を補償することで、計測上の自己位置の高精度化を図った。これにより歩行中に着地位置の補正が可能になり、途中で止まることなく移動できるようになった。

4.2. 障害物検出

新型 ASIMO では、Fig. 6 に示すように、検出範囲の異なる3種類のセンサ、(1)床面形状センサ、(2)超音波センサ、(3)頭部ステレオカメラを用いて障害物検出をおこなっている。各センサが出力した障害物情報をもとに行動計画部で ASIMO との位置関係を計算し、その距離や光などの周りの環境の変化に応じて減速や停止の動作を開始できるようになった。

4.2.1. 床面形状センサによる障害物検出

新型 ASIMO では、経路上の床面に存在する物体を検出するため、床面形状センサを搭載した。腰部から床面に対して複数のスリット状の赤外光を照射し、腰部に搭載された二つの CCD カメラで撮影する。それぞれのカメラで撮影した画像から光切断法により計測した点ごとに想定した床面からの高さを算出し、一定以上の高さのある測定点については想定した床面上に物体が存在するものとする。この結果から測定範囲内の物体位置と形状を計算し、障害物情

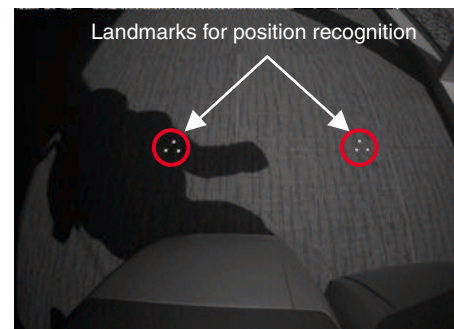


Fig. 5 Image of Landmark detection processing

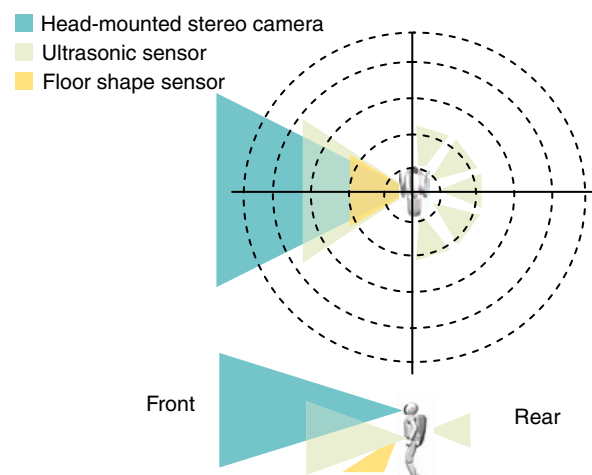


Fig. 6 Obstacle detection area

報として出力する。また、太陽光の直射を受け床面形状センサが利用できない場合には、自動的に歩行速度を落とし、他のセンサで停止判断ができるようにした。

4.2.2. 超音波センサによる障害物検出

新型 ASIMO では、床面形状センサや頭部ステレオカメラで検出できない透明なガラス窓やカメラの視野から外れる壁などを検出するために、前方1方向、後方5方向の計6個の超音波センサユニットを腰部に搭載した。

4.3. 走り制御技術

新型 ASIMO では、機敏な動きの基本としてスムーズで安定した走行を目指した。そのためには着地衝撃の低減や胴体のスピンや足のスリップの低減が課題であったが、それらを解決した結果、時速6 kmの直線走行および時速5 kmの旋回走行(回転半径 2.5m)を実現することができた。Fig. 7(a)(b) に走行時の姿を示す。

4.3.1. 着地衝撃の低減

走行時には歩行時と比較して強い着地衝撃が発生する。これを低減するためには、コンプライアンス制御の応答

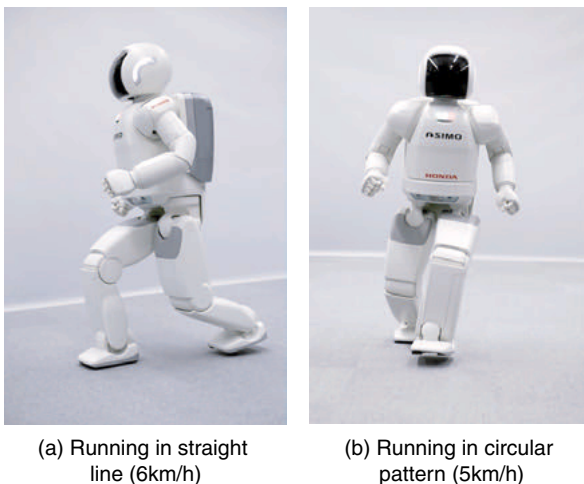


Fig. 7 Running posture

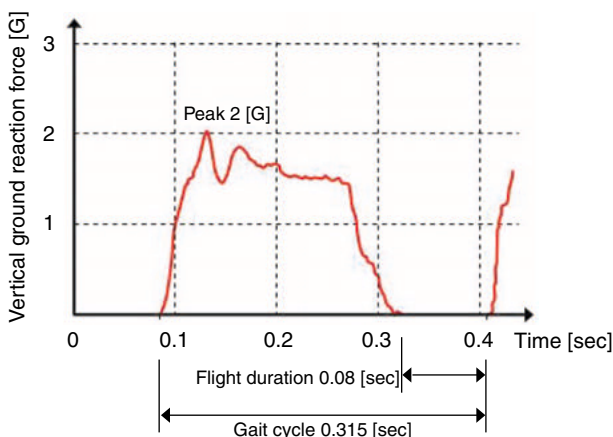


Fig. 8 Vertical ground reaction force at 6 km/h

性を向上させることが有効である。ここでのコンプライアンス制御とは、足部に設置された力覚センサ(荷重センサ)が検出した着地衝撃に応じて、脚全体を引っ込めるように脚のすべてのモータの目標角度を修正する制御である。これにより Fig. 8 に示すように時速6 kmの走行(滞空時間 0.08sec, 歩幅 525mm)(Fig. 9)にて、着地衝撃のピークを2.0Gに抑えることができた。この値は人と同等のレベルと言えるが、床に凹凸がある場合の吸収能力の向上などは、今後の課題である。

4.3.2. スピンやスリップが生じにくい目標運動の生成

ロボットが運動している時には、各部位の加減速によって慣性力が発生する。また、ロボットには重力が作用し、これらの合力を総慣性力と呼ぶ。一方、床から足部に対する反力を床反力と呼ぶ。総慣性力と床反力は、それぞれの大きさ、作用線が一致する。

従来は、Fig. 10に示すように、上半身を垂直に維持したまま床を蹴って上半身を水平に加減速することにより、総慣性力と床反力の釣り合いを取っていた。この方式をそのまま走りに適用すると、滞空時およびその前後では、接地荷重が小さくなり、蹴り力が静止摩擦力の限界を超えスリップしてしまう。

人は、例えばスケートリンクで立っているときや歩いているときに倒れそうになると、Fig. 11に示すように倒れる



Fig. 9 Flight duration while running (High speed camera)

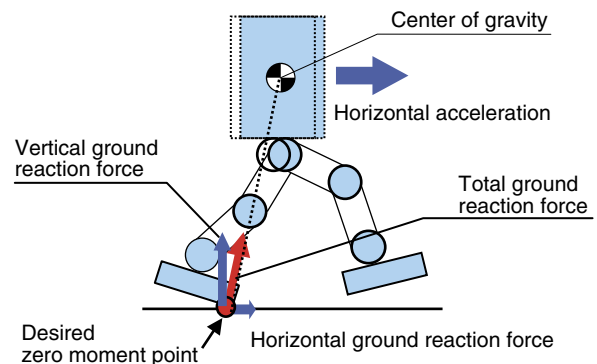


Fig. 10 Balancing motion via upper body horizontal acceleration

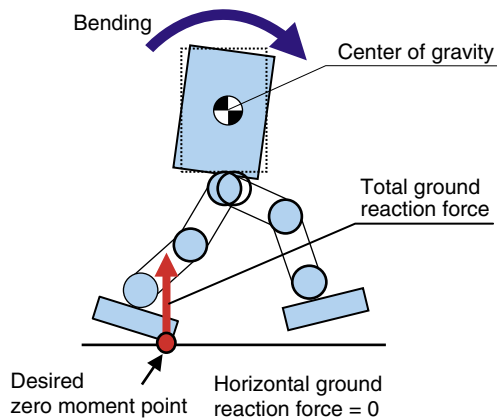


Fig. 11 Balancing motion via upper body rotation

方向に上体を積極的に傾けて、その反動を利用してバランスをとろうとする。この動作は水平摩擦力を必要としない動作である。この二つのバランス動作を静止摩擦力の限界に応じて適切に合成することにより、スリップを防止する目標運動の生成を可能にした。

また、脚を振ることによって発生するスピン力(鉛直軸まわりに回転しようとする力のモーメント)を打ち消すために、上半身を捻るようにした。

これらの動作をフィードフォワード制御とフィードバック制御の両方に用いることによって、スピンやスリップを防止しつつ、安定性の高い歩行(時速 2.7 km)と走行運動を実現した。

5. 作業機能

新型 ASIMO では、書類やトレイに載せた飲み物などの軽量物を運搬できること(軽量物運搬機能)、ワゴンを経路に沿って自在に誘導できること(ワゴン誘導機能)などのサービスが自律的におこなえるようになった。

5.1. 軽量物運搬機能

新型 ASIMO では、軽量物を把持する際に手にかかる荷重を力覚センサで検出することにより、手の開閉タイミングをロボット自ら判断することが可能となった。さらに、力覚センサによる外力検知に加え、ハンドの関節角誤差情報を用いることで運搬する物体の把持状態を検出している。また、頭部ステレオカメラによる距離情報から書類やトレイの有無を検出しており、受け渡し後の腕を下ろすタイミングを判断することが可能になった。これら視覚と力覚の情報など複数の情報を統合することで、相手の動きに合わせた自然な受け渡しを実現した。

またトレイを運搬する際には、脚の着地衝撃が手先に与える振動をどう抑えるかが課題であった。これを解決するため、物を把持した場合には歩行中に腰の振りを抑えると

ともに、手先に加わる加速度成分を速度制御ループでフィードバックさせる制振制御を導入した。その結果、トレイ位置での着地衝撃を 20%、ピッチ周りの角速度ピーク値を 40% 低減させることが可能となり、安定した軽量物運搬を実現することができた。

5.2. ワゴン誘導機能

従来から、ワゴンのような車輪を持つものをロボットが押して移動する研究⁽⁴⁾がなされているが、それらは直線的な動きに限定されていた。新型 ASIMO は、オフィスなどの実環境での通路で、ロボットがワゴンを押しながら誘導することを想定した。すなわち経路に沿って誘導する機能、直角コーナなどを曲がりながら誘導する機能、経路や路面の変化、運搬重量の変化などに素早く対応し、速度を調整する機能の実現を目指した。そのために次の三つの技術を開発した。

- (1) ワゴンの将来の動きを予測する技術
- (2) 予測されたワゴンの動きに対して、着地できない範囲や腕の伸びきりなどを考慮して全身の動きを決定する技術
- (3) 床面の変化や重量の変化に応じて、上記範囲を回避するための誘導速度の制御技術

これら一連の技術を基に行動計画の修正をリアルタイムに繰り返すことにより、外部環境の変化に即応しつつ、運動限界を超えることなくワゴンを自由自在に誘導していくことが可能となった。

6. 人対応機能

新型 ASIMO では、個人を素早く識別するとともに相手に合わせてリアルタイムに対応すること(人検出)、人と手をつないだ行動をすること(握手、手つなぎ歩行)が可能となった。

6.1. 人検出

従来は、頭部に搭載した二つの CCD カメラで撮影した画像から人の形状に近いオブジェクトを選別し、人オブジェクト情報(位置、ID、速度)として出力する方法を取っていた。新型 ASIMO では、さらに IC 通信カードを組み合わせることで、全方位の人の位置を検出するとともに人の情報を取得できるシステムを開発した。IC 通信カードシステムは、既存の無線通信に加え、光の指向性を利用して全方位を 8 方向に分割した光通信を組み合わせたものであり、Fig. 12 のようにロボットを中心として 4 m 以内に存在する人の方向を検出することが可能になった。

また、これらの機能を応用して、案内行動時には相手との距離やその方向に応じて、その人の方を向くなどの行動修正をしたり、正対して視線を合わせた発話をするなど、

ASIMO が受付などで相手に合わせた行動ができるようになった(Fig. 13).

6.2. 握手・手つなぎ歩行

手首に力覚センサを搭載し、コンプライアンス制御を採用することで、相手の動きたい方向や速度を推定して、それに対応した柔軟な行動がとれるようになった。これによって握手や手つなぎ歩行が相手に合わせてできるようになった(Fig. 14).

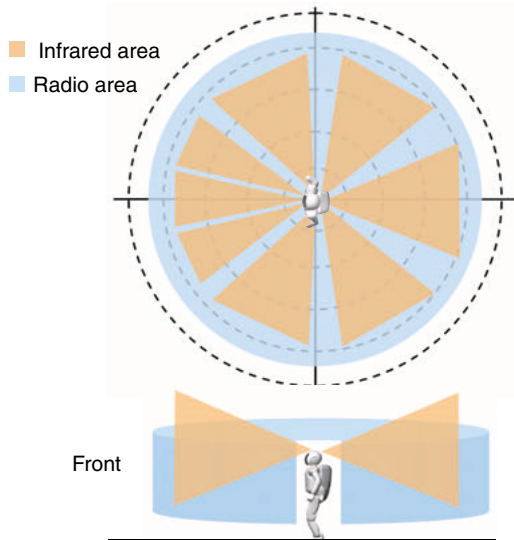
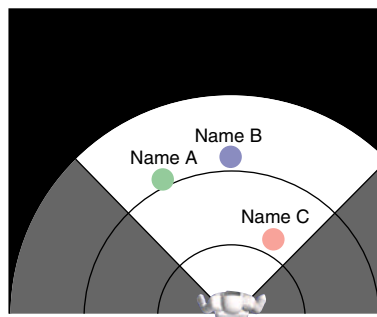


Fig. 12 Detection area of IC communication card



(a) Image processing



(b) Integration of IC communication card & Image processing

Fig. 13 Result of human detection



Fig. 14 Walking hand-in-hand

7. まとめ

「人と共存、協調して社会の中で役に立つロボット」の実現を目指したステップとして、オフィスなどの実環境で自律的に作業する能力の実現と運動能力の向上を目的とした新型 ASIMO を開発した。関節軸を増やし周囲環境を認識するためのセンサを搭載した新規の制御システムと走り制御技術を適用し、より機敏な動きと人へのリアルタイムの応対を可能とすることで、オフィスでの受付案内の自動化や運搬道具を使った実用的な作業ができるようになった。

今後は、今回開発した技術をさらに進化させることにより応用範囲の拡大を図っていきたい。

本研究を進めるにあたり、御協力を頂きました社内外の関係者の方々に紙面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T.: The Development of Honda Humanoid Robot, IEEE International Conference on Robotics and Automation (1998)
- (2) 広瀬真人, 竹中透: ヒューマノイドロボット ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.1-6
- (3) 檜垣信男, 横山太郎, 藤村希久雄: 人行動理解のためのジェスチャ認識アルゴリズムと新型「ASIMO」への適用, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.95-102
- (4) Takubo, T., Inoue, K., Arai, T. : Pushing an Object Considering the Hand Reflect Forces by Humanoid Robot

in Dynamic Walking, Proceedings of the 2005 IEEE
International Conference on Robotics and Automation,
(2005)

■ 著 者 ■



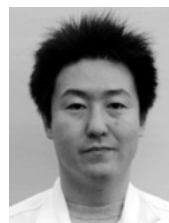
重見 聡 史



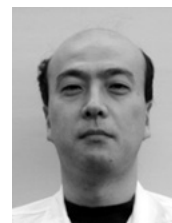
河口裕一郎



吉池 孝 英



川 邊 浩 司



小 川 直 秀