

新型 ASIMO の開発 — 自律機械の実現 —

Development of New ASIMO
— Realization of Autonomous Machine —

重 見 聡 史*
Satoshi SHIGEMI

川 邊 浩 司*
Koji KAWABE

中 村 孝 広*
Takahiro NAKAMURA

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、人の存在する実環境で状況変化がわかり行動を自ら実行し動き続けることを目的として開発された。新たに、マルチモーダルセンシング技術、状況推定予測技術、自律行動生成技術を開発し、状況適応能力を大幅に進化させた。身体能力については、5本の指を独立して制御できる多軸ハンドと、人混在環境の中で動き続けるために俊敏性を向上させた軽量かつ高応答なハードウェアを開発した。その結果、人対応機能では、状況に合わせて人に対し適切に働きかけることが可能となった。歩行機能としては、複数人の移動を予測し止まらずにすれ違いでき、凹凸など変化する路面でもバランスを保つことが可能となった。作業機能としては、対象物を安定に把持し、さらに指で物を操れるようになった。

ABSTRACT

The new ASIMO was developed as a step toward the goal of achieving “a robot that coexists and cooperates with people and performs useful functions in society.” The purpose was to give it the capability to sense changes in the circumstances of real-life environments where people are present, to take autonomous action, and to continue acting. New multi-modal sensing technology, situation estimation and prediction technology, and autonomous behavior generation technology were developed, greatly advancing the robot's ability to adapt to situations. The development of physical capabilities included a many-axis hand capable of independent control of five fingers and lightweight, highly responsive hardware with heightened agility to enable continuing operation in a mixed environment with people. In terms of human response functions, therefore, the robot became able to adapt to situations to work appropriately with people. In terms of walking functions, it became able to predict the movements of multiple people and cross their paths without stopping, as well as to maintain its balance even on irregularities or other changes in the road surface. In terms of work functions, it became able to hold an object with a stable grip and to manipulate things with its fingers.

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行ってきた。研究過程で得られた人の歩行の解析結果、二足歩行のアクチュエータ機構の設計、および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サイズの ASIMO を誕生させ⁽²⁾、2001年からレンタルの形態で国内市場に送り出した。2002年には世界30ヵ国以上で公開し、人とロボットの接点

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対応機能⁽³⁾を搭載した。2005年12月には、高精度かつ高応答なハードウェアと上半身の曲げやひねりを積極的に利用する新しい姿勢制御技術で身体機能を大幅に向上するとともに、自律連続移動や障害物回避、軌道生成技術を搭載した ASIMO を発表した⁽⁴⁾。2007年12月には共同作業機能、自律充電機能、すれ違いと回避行動能力を追加し、実環境での運用実験を開始した。このような活動を通じて人々とともにヒューマノイドロボットが活躍する夢を描き、ニーズの開拓とノウハウの蓄積を図ってきた。

ここでは2011年11月に発表した新型 ASIMO (Fig. 1) の概要を紹介する。

* 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 に 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」の実現に向けた開発ロードマップを示す。新型 ASIMO は第 2 ステップに位置付けられ，限定的ながらも人と共存した実環境で動き続けることをねらいとしている。

我々はこれまで，従来型 ASIMO を使ってオフィスロビーなどの実環境で受付案内やデリバリサービスの実証実験を行ってきた。この実験を通じ，実環境においてはロボットが人の存在を認識できない場面が多いこと，ロボットが対応する人は事前に想定した行動をしないことが多いことが分かった。こうした状況に遭遇すると，あらかじめ定められたシナリオに沿って自動的に動く従来型 ASIMO は適切に行動することができず，オペレータが介入する必要があった。

そこで新型 ASIMO の開発においては，変化する状況の中で「自ら判断し行動する」能力を有する「自律機械」を実現することをねらいとした。我々は自律機械としてのロボットに必要な要素を，

- (1) 周囲の人の動きなどの変化を複数のセンサで検出し，それらの情報を総合して状況を推定する「外界認識」

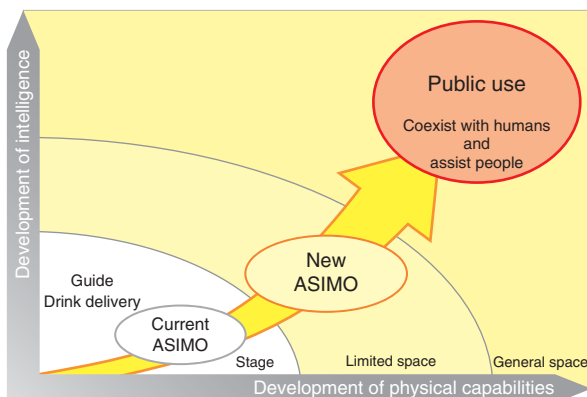


Fig. 2 ASIMO development roadmap

- (2) 集まった情報から次の状況を予測して人の操作の介入なしに自ら次の行動を判断する「自律行動生成」
- (3) とっさに足を出して身体の安定姿勢を保つ「高次元姿勢バランス」

の三つに定め，これらを実現する技術を開発することとした。

本稿では，3 章で新型 ASIMO の主要諸元を紹介し，4 章で上記の外界認識と自律行動生成を実現するための知能化の基盤技術となるシステムアーキテクチャについて述べる。このアーキテクチャは，外界の人や物の観察で得られた複数のセンサ情報を統合し，誰に対してどの行動をするかを決めて実行する仕組みである。次いで 5 章では上記の高次元姿勢バランスに関し，段差や凹凸など路面の状況変化に対応するための外乱適応技術について述べる。さらに，人と混在する環境で止まらずに移動するための局所経路生成技術について述べる。6 章では作業対象物の種類の増加や，位置と姿勢の多様化に対応するために開発した多軸ハンドを紹介する。

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 1300 mm で，重量は 48 kg である。2005 年 12 月に発表した従来型 ASIMO と全高を変えずに 6 kg の軽量化を達成した。歩行速度は人の歩行を妨げないように，人が普通に歩く速度と同じく時速 4.0 km とした。走行速度は時速 9.0 km と大幅に向上したほか後進することも可能となった。外観デザインは，先進性と親和性の調和を保ちつつ，やさしさ，わかりやすさ，見わけやすさの観点で，人と相手をし続けるための進化を具現化した。

3.2. 関節構成

従来に対し各関節には腰部に 1 軸，各ハンド部に 11 軸を追加し，合計で 57 自由度にした (Fig. 3)。腰の前後回転軸はお辞儀動作による作業範囲拡大のために追加した。ハンドについては，親指に 1 軸と他の 4 指で 1 軸という従来の軸数に対し自由度を大幅に増やしたことで，物体の位置と姿勢に合わせた最適な持ち方，様々な形状をした物体の把持と握み，ひねり動作による対象物の操作が可能となった。

また新型 ASIMO では，従来と比較し各軸とも可動範囲を拡大している。頭部の上下方向については，胸部との干渉を避けるために瞬間中心が変化する広角 6 リンク首構造を採用し，可動角は従来の上 22 度下 19 度から，上 26 度下 32 度と大幅 (1.7 倍) に拡大した。足の着地位置を拡大するための脚のクロスステップ動作に重要な足首の左右方向については，リンク揺動角を低減し，従来の上 24.5 度から ±32.5 度に拡大した。

Table 1 Specifications for ASIMO

Height	1300 mm	(self-standing)
Weight	48 kg	
Speed	0 – 4.0 km/h	(Walk)
	9.0 km/h	(Run straight)
	3.0 km/h	(Run backwards straight)
Sensors	Dual resolution stereo camera	(in head)
	8-ch microphone array	(in head)
	G/Gyro	(in body)
	Floor mark sensing camera	(in waist)
	Force sensors	(in legs, wrists, hands)
	Tactile sensors	(in hands)

3.3. 電装システム構成

新型 ASIMO では、認識、移動、作業機能の全てに対応した高応答システムを実現した。

従来からある頭部ステレオカメラの一方をプリズムを利

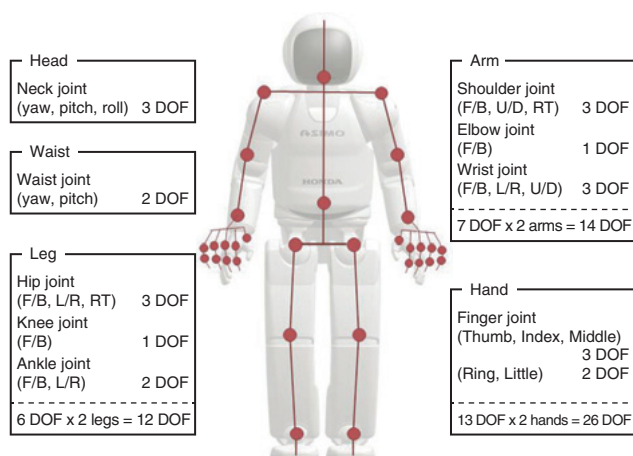


Fig. 3 Joint configuration and DOF (Degree of freedom)

用した複解像度カメラとし、広範囲の物体認識と遠方の顔検出を両立した。また、従来は前頭部の3カ所に搭載していたマイクを、新型 ASIMO では頭部周囲の8カ所とし、全周囲からの音を検出可能としている。加速度、角速度センサは外部からの衝撃と震動の影響を受けにくいリング型振動ジャイロを採用し、従来に比べ95%の容積減少とシステムの小型化に貢献した。

ロボットの機能向上で増加する処理量に対応するため主CPU (Central Processing Unit) の並列度を上げ、脚制御用に専用CPUを追加した。また主CPUではシリアル入出力を使った階層メモリ構造を採用し、競合のないメモリアクセスを実現した。さらに主CPUとセンサおよびモータドライバを結ぶ体内通信系を高速化(従来比4倍)し、周期250 μ sec で全57軸の同期が可能となった。

4. 自律行動制御

新型 ASIMO において状況適応能力の向上をねらい、新たに自律行動制御のためのシステムアーキテクチャを構築した。まずはロボットがオフィス受付に置かれることを想定し、人対応機能(出会い応対, きっかけ応対, 案内), インタラクティブ説明機能(プレゼン QA (Question and Answer)), 作業機能(ドリンクデリバリ)に対し、このアーキテクチャを適用したシステムを実現した (Fig. 4)。

4.1. センシング

状況変化に対しロボットが適切に行動するには、ロボットは周囲の状況を的確に把握する必要がある。新型 ASIMO では、従来のロボット本体に搭載されたセンサに

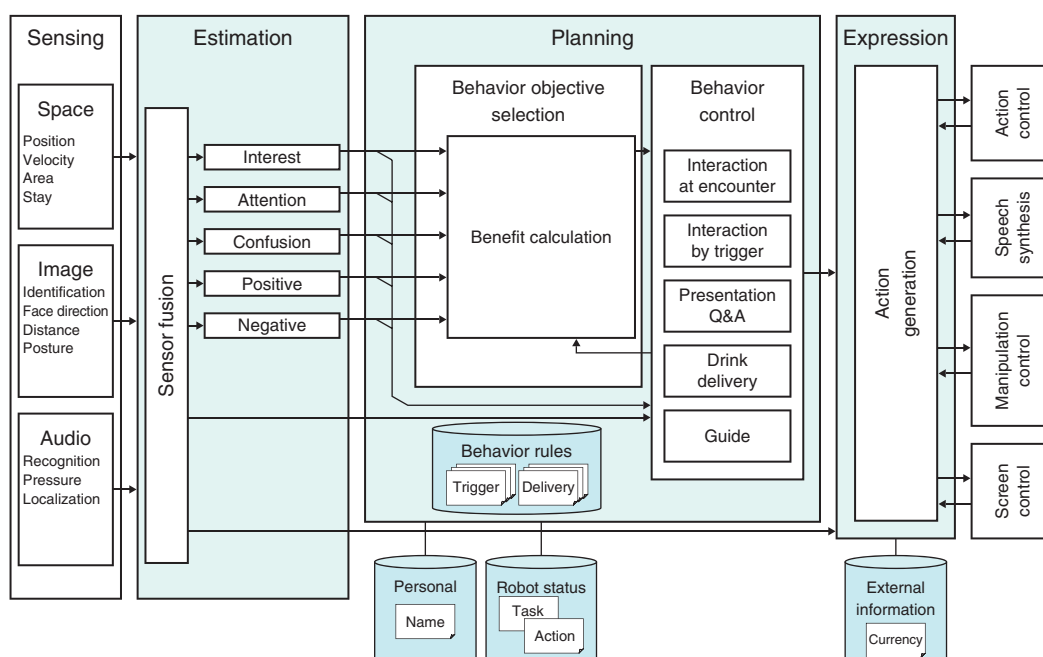


Fig. 4 Interaction system architecture

加えて空間にセンサを配置し、ロボット近傍だけでなく稼働する空間全体の状況をセンシングすることとした。

4.1.1. 空間センシング

主に壁面に配置し 1 次元のスキャンを行う側方 Laser Range Finder (LRF) と、天井に配置し 2 次元のスキャンを行う上方 LRF という 2 種類のセンサを使って、センサから対象物までの距離を計測する。測定された距離と、事前に移動体が存在しない状態で測定した背景距離との差分を取り、上方 LRF ではさらに人の身長に合致しないデータを除去する。残ったデータを側方 LRF はデータの隣接関係に基づいて、上方 LRF はデータ間の距離に基づいてクラスタリングする。側方 LRF のデータから作られたクラスタについては、クラスタ両端のデータ間距離により人以外と判別したクラスタを除去する。これらの処理の結果、残ったクラスタの中心を人位置として出力する。

4.1.2. 画像認識

ステージのような照明が統制された場所と違い、一般にオフィス受付では天候や時間により照明環境が大きく変化するため、照明変化に頑健な画像センシングが求められる。新型 ASIMO では、画像取得の際に顔認識と連携してシャッター速度を自動的に調整する技術を開発した。

また、ロボットが複数人の相手をする場合、対応すべき人の顔が常にロボットの正面にあるとは限らない。そこで、人がカメラ視野のどこにいても顔検出、顔向き推定、顔識別が可能となるよう、画像中心を全画面歪補正の中心とする従来手法の代わりに、疑似的にカメラを顔位置に向けて顔を中心としたバーチャルパンチルトという歪補正を用いた顔画像認識技術を開発した (Fig. 5)。

4.1.3. 音声認識

新型 ASIMO では、プロクセミックスを参考に対話距離を 1 m から 2 m と設定し、ロボットからこの距離だけ離れている人が話す言葉を認識することを目標とした。距離に幅があること、またステージデモと違いロボットの相手となる人の話し声の大きさは一定でないことから、ロボットに入力される音声強度は大きく変動する。従来の音声認識では、想定される複数の信号対ノイズ (S/N) 比の音声を個別のモデルに学習させ、距離や声の大きさから最適と思われるモデルを選択して音声認識する手法が一般的であっ

た。しかし、距離や声の大きさは動的に変化するため、常に最適なモデルを選択できるとは限らず、その結果、認識率が低下するリスクがあった。

こうした状況変化に対応するため新型 ASIMO では、広範囲の S/N 比の音声を単一のモデルで学習させる技術を開発した。各距離ごとの個別モデルによる音声認識と比較し、単一のモデルで各距離の音声に対し良好な認識率を達成している。

また、音声認識特徴量、音量、および基本周波数を用いて音声中の引き伸ばしを検出することで、話し言葉中に頻出する言い淀みによる誤認識の排除を実現した。

4.2. 状況推定

状況推定は、ロボットが人に応対するために必要となる人の属性を、空間センシングの情報に基づいて推定する。ここで人属性とは、留まっている、ロボットへ近づいている、ロボットから遠ざかっている、ロボットの方を向いている、来所した、帰る、待っている、などの人の状態のことで、ロボットが行動を決定するために必要となる情報である。従来の ASIMO は近づいてきた人にしか対応できなかったが、この情報を用いることで、新型 ASIMO は自ら人に近づいていくことができるようになった。

また音声、画像、空間の各センシング情報を入力とし、人の状況を確率として出力するベイジアンネットワークを用いて、ASIMO 周辺の人々がどこに注目しているか、ASIMO に対してどの程度の興味を示しているかを推定し、後段の行動生成部に出力する。

4.3. 行動生成

行動生成の動作例を Fig. 6 を用いて説明する。ここでロボットが対応する候補者は A から E の 5 名とし、行動目的は、出会い応対、きっかけ応対、案内、プレゼン QA、ドリンクデリバリの 5 種類である。

まず、行動目的生成部において、状況推定から出力された人の状況とロボットの行動履歴に基づいて行動目的ごとの行動効果を計算する。複数の人と複数の行動目的からなる組み合わせの中から、もっとも高い行動価値が得られた対象者と行動目的を選択する。Fig. 6 では、人 C に出会い応対をすることを選ぶ。行動価値が高い行動を選択することにより、ロボットが何度も話しかけても反応がない人には話しかけを続けずに、別の人に働きかけるよう行動を変更することが可能となっている。

次に行動制御部で、その行動目的の中で具体的にどの行動をするかを決定する。ここで行動は、同じことを二度言わない、同じ部位を使った行動を同時にしない、といった制約条件のもとで、予め記述された行動ルールに基づいて選択される。

なお、複数の行動制御で並列処理と割り込み処理を可能

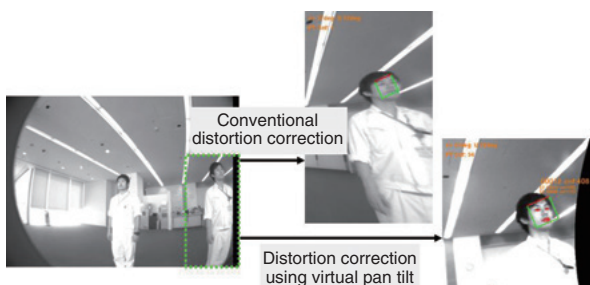


Fig. 5 Correction of image distortion

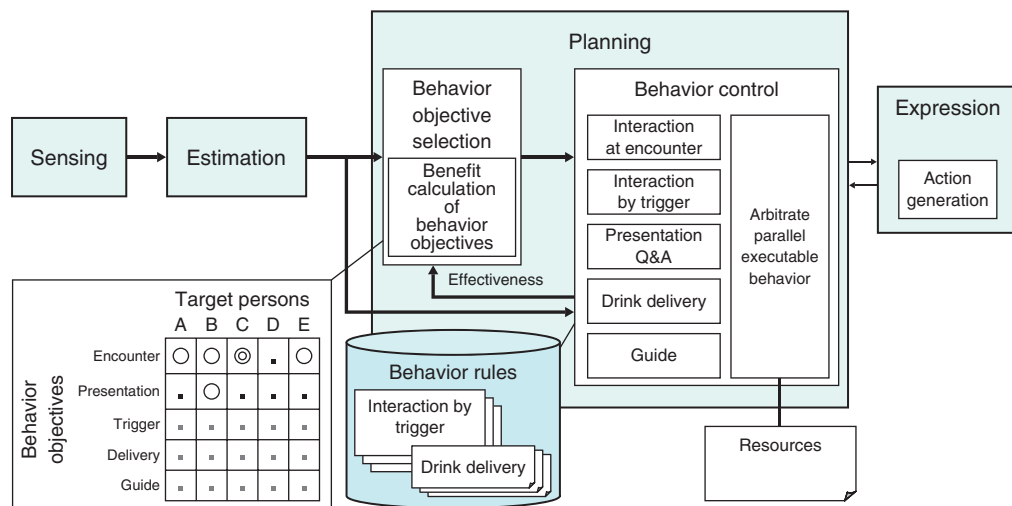


Fig. 6 Behavior control

としており、ある行動を実行している時に、ロボット部位の使用状況に応じてその行動を継続、もしくは一時中断して別の行動を実行することができる。具体的にはドリンクデリバリーでトレイをテーブルに置いている最中に「ありがとう」と言われたときに「どういたしまして」と答えたり、プレゼンの説明途中に人から発せられた質問に答えることができるようになった。

5. 移動機能

実環境では、人や障害物の位置は動的に変化する。またロボットの動きが人にとって予想にくいものである場合、人とロボットの動きが交錯するような状況も発生する。新型 ASIMO では、従来に対し人を含む障害物検知の能力を大幅に向上させるとともに、人を戸惑わせないスムーズな動きの基本となる脚制御技術を新たに開発した。

5.1. 動的経路誘導

複数体のロボットと複数の人が存在しても、ロボットが止まらないように加速、減速、進路変更等の経路を生成できるように、新型 ASIMO では人を含む障害物検出機能を強化するとともに新しい局所経路生成技術を搭載した。

5.1.1. 空間センサによる人と障害物の検出

従来はロボット本体のセンサによる検出であったため、前方近距離の人や障害物しか検出することができなかった。こうした非常に狭い範囲の情報に基づいて経路を生成していたため、ロボットの動きがぎくしゃくしたり、後ろにいる人を検出できず、そちらに向かって移動するなどしていた。そこで新型 ASIMO では、新たに空間センシングを導入し、ロボット進行方向のみならず、後方からの人の接近や死角の人の動きを検出することとした。ロボットは早い段階で人を検出できるため、スムーズな歩行経路を生

成することが可能となった。

5.1.2. 局所経路生成

従来は、人の予測位置とロボットの経路が2次元平面上で重ならないように経路を決定していたため、Fig. 7 左のようにロボットの経路上を横切るように人が歩いていると、ロボットは人を避ける経路を生成できなかった。また、前節に述べたように新型 ASIMO では空間全体の人の動きを検出しているため、ロボットの近傍に複数の人が存在する場合には、経路生成に失敗する可能性がさらに高くなることが予想された。そこで新型 ASIMO では、Fig. 7 右に示す、時間を含めた3次元空間において人の予測位置とロボットの位置が重ならない経路を探索する技術を開発した。この技術により、ロボットが人の前を先に通り過ぎたり、速度を緩めて人を先にやり過ぎすといった移動経路を生成することが可能となり、状況が変化しても無駄に停止することなく歩行し続けることができるようになった。

5.2. 脚システム

従来型 ASIMO では一度に1種類の歩容しか生成できないこと、走行中に着地位置を修正できないこと、外乱による傾斜エラーに対し足平の範囲でしか復元力を発生できないことなど、状況の変化に対する対応能力に限界があった。

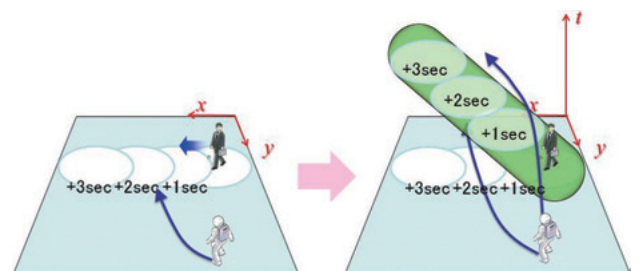


Fig. 7 Local path planning

新型 ASIMO では、これらの課題を克服するため、Fig. 8 に示す新しい脚システム構成を採用した。このシステムは、歩行、走行、ケンケン動作から最適な歩容パターンをいつでも選択できるように歩容生成を並列化、リアルタイム化している。また、傾斜エラーに対して足平の踏ん張りだけでなく、上体の並進加速により着地位置をリアルタイムに変更することやお辞儀動作によって復元力の発生能力を大幅に向上させている。

5.2.1. 着地位置拡大

外乱への適応能力を上げるためには、いつでも脚を出す着地位置やタイミングを変えられることが重要である。Fig. 9 は左脚が支持脚であるときに、次の一步を置ける範囲を示している。従来型 ASIMO の着地可能範囲は図中の赤い部分であり、支持脚方向 (Y 軸の正方向) には脚を出すことができないため、支持脚方向へ外乱を受けた時に転倒のおそれがあった。新型 ASIMO ではクロスステップ動作とケンケン動作により支持脚方向への横移動を可能とした。青の部分が新型 ASIMO のクロスステップ動作により拡大できた遊脚の着地範囲を、緑の部分はケンケン動作による支持脚の着地範囲を示す。クロスステップ動作とケンケン動作により、支持脚方向への外乱を受けた時の安定性が格段に向上した。

5.2.2. リアルタイム歩容生成

従来型 ASIMO でも傾斜エラーに対して、お辞儀や上体の加速によって安定化を図る大局安定の考え方はあった

が、横方向の移動やリアルタイム歩容生成がなかったために、安定化の能力が低く利用できる状況が限定されていた。

Fig. 10 に傾斜エラーに対して復元力を発生させようとした時の着地位置決定法を示す。図中の目標着地位置に着地させようとした時に必要な復元力モーメントから計算される Zero Moment Point (ZMP) が足平を越えてしまう場合には、着地位置と ZMP 修正量の感度を計算し、ZMP 着地位置を解析的に決定する。

新型 ASIMO は、このリアルタイム歩容生成技術と、前節で説明したクロスステップ動作とケンケン動作による着地可能範囲の拡大により、路面に凹凸があるような実環境で使える大局安定を実現した。

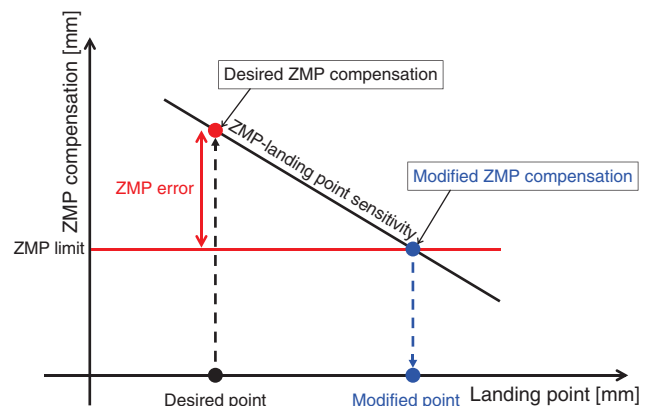


Fig. 10 ZMP landing point compensation

6. 小型油圧多軸ハンド

従来型 ASIMO のハンドは、2 自由度のグリップでありセンサも付いていないことから、限定された対象物を定型的に握ることしかできなかった。人と共存して役に立つための作業の実現に向けては、対象物の種類を増やすことが必要となる。そこで新型 ASIMO では、デザインを崩すことなくハンドの自由度を大幅に増やすとともに、センサ情報と自由度を利用した安定把持のための制御を開発した。

6.1. ハードウェア

新型 ASIMO では、各機能部品の小型化により、ASIMO サイズのハンドで多自由度を実現した。各軸に 1 対 1 に対応するモータの駆動力を油圧によって伝送する機構を採用した⁽⁵⁾。新たに開発したボールねじ一体型モータと 13 軸モータドライバ、および複数軸の一体化により全 26 軸の油圧マスタシリンダーを小型化し、Fig. 11 に示す胴体内部に搭載している。各指では、クランクを小型化したことに伴う圧力上昇に対し応答性を満たす低膨張で小径柔軟なメッシュ補強配管を採用している。

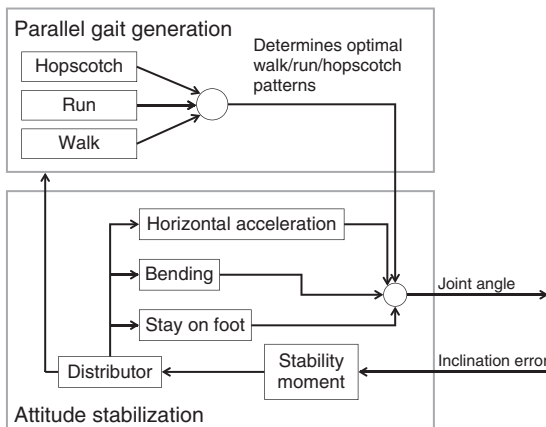


Fig. 8 Leg control system

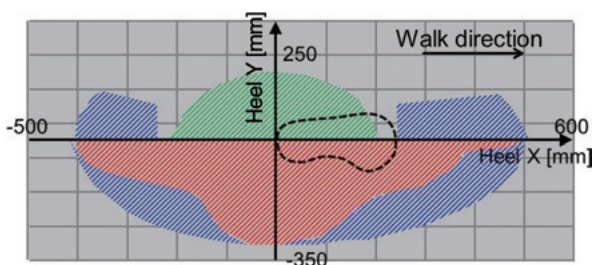


Fig. 9 Extended foot landing position

指先には新たに開発した小型6軸力センサを5指すべてに搭載した。また手のひらの表皮裏に触覚センサを配置した。これらと、手首の6軸力センサを合わせた計96chの信号を250 μ secの周期で取り込むことができ、かつハンド内に搭載可能な小型Electronic Control Unitを開発した。

また、作業対象物の多様な操作を可能とするよう、手首の可動角も従来に比べ上下方向で90%、ひねり方向で60%と拡大し、ハンドの姿勢の自由度を大幅に向上させた。

これらの技術により、従来比+360%となる1.8kgを把持できる重量0.38kgの小型ハンドを実現した。

6.2. 安定把持と持ち替え

対象物を安定に把持するためには、対象物が滑らないように各指先力を適切に配分する必要がある。新型ASIMOでは、内力を決定するために、指側の接触点と対象物側の接触点の相対速度が0になるような力の分配を把持条件として定式化する手法を開発した。この方法は接触点数が増えても有効な手法である。

多指で対象物を握るときの力の関係をFig. 12に示す。図中、青色が目標指先力、赤がその力の合力、黒色が重力である。対象物を握る指の本数が変化しても安定するように内力を分配する。水平方向には指同士の力で打ち消しあっており、鉛直方向の合力は重力と釣り合っている。実際に対象物を把持すると、目標とした把持点と実際の把持点のずれが生じるため、想定した重心位置と実際の重心位

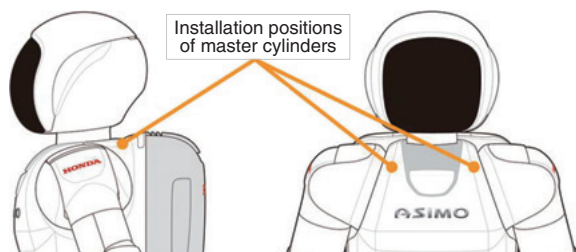


Fig. 11 Installation positions of hydraulic pressure master cylinders

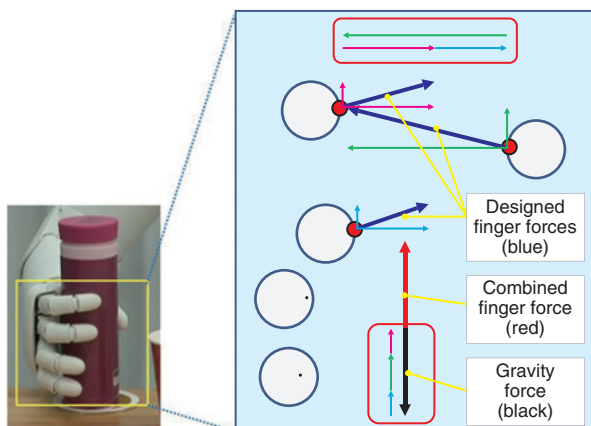


Fig. 12 Multi-finger grasping

置がずれる。このずれを推定し補償するために、指先力目標値と実際値の差を重心誤差とし対象物のモデルを修正する。また、把持の拘束条件を連続的に遷移させて把持力を決定する把持力遷移制御を取り入れた。

前節で述べたハードウェアとこれらの制御技術により、片方の手で机から水筒を取り上げ蓋を回して外し、別の手で取り上げたコップに水筒から飲み物を移すという作業を実現した。

6.3. 手話

ASIMOはヒト型の特徴を活かし、身体を使った人に伝わりやすい高い表現力の実現を目指している。新型ASIMOでは、表現の題材として手話を選び、挨拶、自己紹介、天気という日常的に良く使う文章をロボットの動作として実装した (Fig. 13)。手話は身体的な表現力によるコミュニケーション手段であり、ロボットの身体表現技術に応用できる効果的なしくみや工夫、約束事などが数多く含まれている。

作り上げた手話単語と手話文章を手話ネイティブな被験者に読み取っていただき、十分な表現ができていることを確認した。



Fig. 13 Sign language "family"

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、人と共存した実環境で動き続けることができる新型ASIMOを開発した。新型ASIMOは、定型の動作を行う「自動機械」から、周囲の状況変化に合わせて動く「自律機械」へと進化した。知能化の基盤技術となるアーキテクチャに基づいたシステムを構築し、変化する状況で人に適切な行動を行うための基本技術を確認した。身体能力では、軽量で広可動範囲の機構と高応答電装システム、および新しい制御技術の開発により、

状況変化に対応できる俊敏な動きを実現した。

今後は、実環境での実証実験を通じ人共存環境におけるロボットの適応能力をさらに進化させていき、ロボットが活躍できる場所の拡大を図っていきたい。

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, 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) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型 ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.38-44
- (5) 高橋和幸, 和井田寛則, 國生政義, 早川正人: 器用さと力強さを両立させたヒューマノイドロボットのための多指ハンド開発, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 1A1-01, (2009)

■ 著 者 ■



重見 聡史



川邊 浩司



中村 孝広