

*professional report*

## 人間共生ロボット開発への取り組み

Approach to Development of a Human-symbiotic Robot

細田 祐司 Yuji Hosoda

1990年代末から、サービスロボットがメーカーから発表されるようになり、日本においては、ロボット技術先行の自負を背景に新ビジネス創生活動が官民で継続されている。

日立は、1970年代より原子力プラントメンテナンスの自動化、産業ロボット、極限作業ロボットなどの開発を継続しており、人と暮らし、作業を支援する人間共生ロボットの開発に着手し、2005年にはそのプロトタイプとして「EMIEW」を発表した。これは、安全かつ俊敏な移動と、人との自然な音声対話可能な人間共生ロボットであり、その後継機「EMIEW2」は、大幅な軽量コンパクト化により安全性を確保するとともに、新たに脚車輪機構を搭載している。

今後は、EMIEWシリーズを用いた実社会実験を通して、安全性・信頼性評価、ロボットによるサービス作業の有用性の実証確認に向けた取り組みを進めていく。

1979年日立製作所入社  
機械研究所 都市・ロボティクスプロジェクト 所属  
現在、人間共生ロボットの開発に従事  
日本機械学会会員、日本ロボット学会  
会員、計測自動制御学会会員  
日本機械学会フェロー



## 1 はじめに

少子高齢化の進行や、いわゆる2007年問題などから、労働人口の減少が社会的課題となっている。また、「安全」「安心」「快適」といった日常生活の質的向上に対する関心が高まっている。このような社会的背景から、製造業分野だけでなく、サービス業などの非製造分野での省力化、自動化への要求が強くなっている。周知のとおり、日本のロボットに対する受容性は、世界的に類を見ないものであり、産業ロボットの普及では世界をリードしてきた。さらに、技術的な側面としては、ロボットの構成要素である、CPU(Central Processing Unit)などの電子デバイス、モータ、センサー性能の飛躍的向上、およびモノづくり技術の向上により、これまで理論ベースのものであった制御技術を、統合されたロボットシステムとして構築できる土壌も整っている。このような状況下で、1990年代末、メーカーによるヒューマノイド、ペットロボット発表のインパクトにより、われわれの生活空間に共存するロボットの登場がより現実的なものになってきたという国民的期待が醸成され、メーカーによるエンタテインメント、ホームユース、オフィスサービス分野など<sup>1),2),3)</sup>

をめざしたロボットの開発が活発になっている。

上記の背景から、筆者らも、より人間の生活に近い環境で作業を行う人間共生ロボットの開発を進めている。

本稿では、これまでのロボット開発に対する取り組み、人間共生ロボットの開発状況および事業化の展望について述べる。

## 2 日立のロボット開発史

これまでの日立のロボット開発<sup>4)</sup>の流れを図1に示す。その歴史は1970年代にさかのぼり、産業ロボットなどの製造支援分野、原子力プラント対応システムなどの特殊環境作業用ロボットの開発に端を発する。産業支援分野に関しては、1970年代に発表した国産初のアーク溶接ロボット「Mr. Aros」を皮切りに、1980年代には垂直多関節型ロボット「Mシリーズ」などを世に出していた。一方では移動技術の先行開発を進め、「つくばEXPO'85(国際科学技術博覧会)向けに2脚歩行ロボット<sup>5)</sup>」を早稲田大学と共同開発し、通商産業省プロジェクト「極限作業ロボット(1983~1990年)においては4脚歩行ロボット<sup>6)</sup>」などの開発を行った。1990年代からは、それまでに蓄積した技

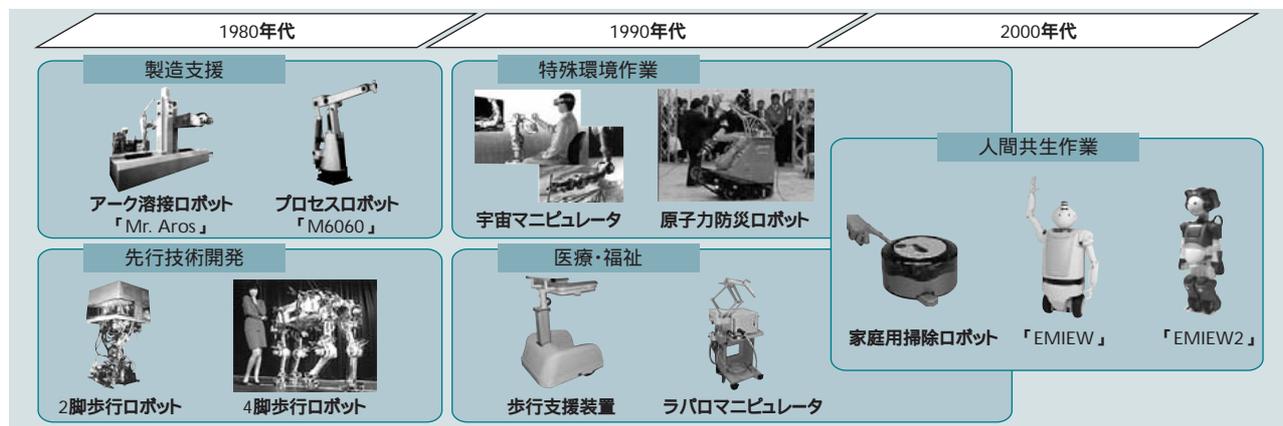


図1 日立のロボット開発の歴史

1980年代は産業ロボットの普及および国家プロジェクト主導で先行技術開発を進め、1990年代はより実用化に重きを置き、特殊環境作業などの公共分野、医療・福祉分野での開発を進めてきた。2000年代に入り、家庭用掃除ロボットを皮切りに人間共生ロボットの開発に着手した。

術をより人間の生活に結び付けた実用技術に展開することをめざして医療・福祉分野に取り組み、歩行支援装置<sup>7)</sup>や手術支援システムなどの開発を進めている。特殊環境作業対応ロボットについては、1970年代から原子力プラント対応を中心に開発を継続しており、1990年代には、宇宙マニピュレータ、原子力防災ロボット<sup>8)</sup>などの開発を進めた。

以上に述べたように、日立のロボット技術開発は、初期の製造支援分野から、人間生活に密接する非製造分野に軸足を移しながら進展してきた。このような技術基盤の積み重ねの上に、新たな事業分野への展開をめざして、生活支援を目的とした家庭用掃除ロボット<sup>9)</sup>をはじめとする人間共生活業用ロボットの開発に着手した。

### 3 人間共生ロボットの開発状況

人の日常生活に溶け込んで、人間に安全・安心や便利・ゆとりをもたらし、人の暮らしをサポートするロボットを実用化するためには、以下の機能が必要と考える。

- (1) 人と同じ作業空間で安全かつ効率的に作業ができる。
- (2) 人と確実かつ親和性の高いコミュニケーションができる。
- (3) 人の仕事を支援できる。

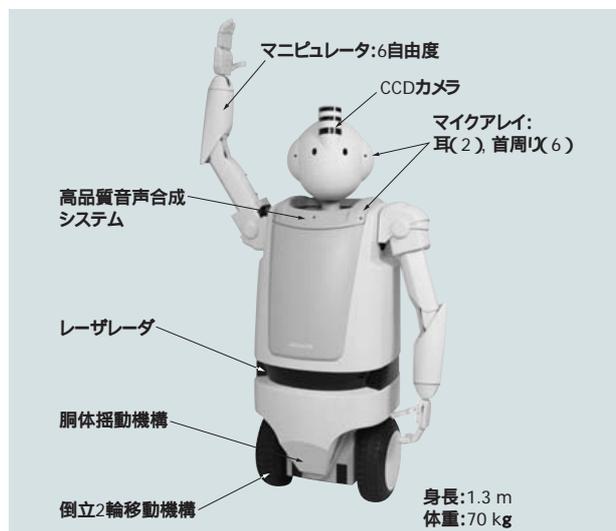
これらの機能は、一朝一夕に実現できるものではないが、ステップバイステップで適切な実用出口を見つけながら技術向上を図っていく計画である。われわれの最初の取り組みとして(1)については、人の邪魔にならず安全かつ俊敏に移動する技術(2)については、聞く能力として、人間側のヘッドセットマイクの装着なしに、騒がしい環境の中でも音声コマンドの認識が可能な遠隔音声認識技術の開発を行うこととした。また、(3)については、(2)の対話の信頼性、親和性を高めるための全身運

動を用いた非言語表現システムの開発をめざした。われわれは、このような目標を掲げ、人間共生ロボットの開発に着手した。まず、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「次世代ロボット実用化プロジェクト(プロトタイプ開発支援事業)」(2004~2005年)に参画し、人間共生ロボットのプロトタイプとして、「EMIEW(Excellent Mobility and Interactive Existence as Workmate)」を開発した<sup>10)</sup>。このEMIEWの開発の知見に基づき、安全性、使い勝手の向上をめざし、2007年には、後継機の「EMIEW2」を発表した<sup>11), 12)</sup>。

本章では、これらの人間共生型ロボットの開発状況について紹介する。

#### 3.1 人間共生ロボット「EMIEW」

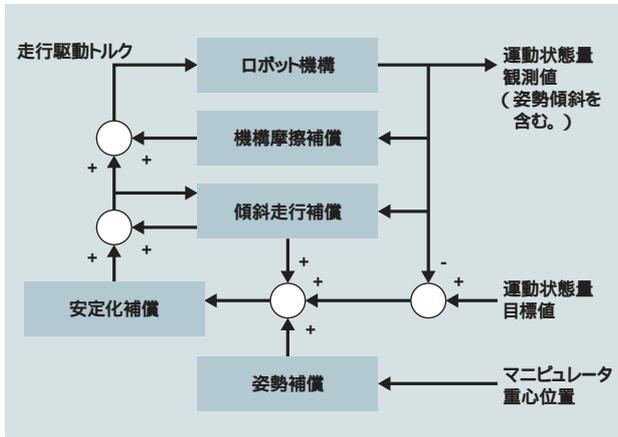
前述の(1)~(3)の機能実現をめざしたEMIEWの構成を図2に示す。



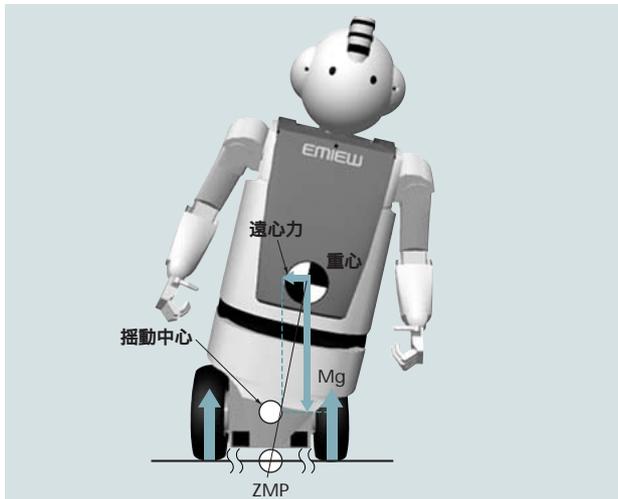
注：略語説明 CCD (Charge Coupled Device)

図2 EMIEWの構成

俊敏な移動が可能な倒立2輪移動機構、遠隔音声認識システム、およびモーション表現のための腕を備えている。



**図3** 倒立2輪走行制御系の構成  
 ロボットの重心を鉛直方向に維持する状態フィードバック制御を行い、上半身の運動、走行面傾斜に対する補償制御を含む。



注：略語説明 ZMP (Zero Moment Point)  
**図4** 胴体揺動機構の機能  
 旋回走行時の遠心力に応じて左右の車輪の接地力が均等になるように胴体を傾斜させる。

移動手段としては、倒立2輪移動機構を採用しており、旋回時の走行安定性を維持するための胴体揺動機構を備えている。胴部には、ロボット周囲の障害物を検出するレーザレーダを備える。対話インターフェースとして、頭部周辺には、遠隔音声認識用のマイクアレイ、高品位音声合成システム、CCD(Charge Coupled Device)カメラを搭載している。さらに、6自由度の双腕マニピュレータを備えており、頭部や胴部の揺動自由度と併せ、表現力豊かなモーション表出が可能である。身長は人と同様の作業が可能で1.3 mとし、体重は70 kgである。

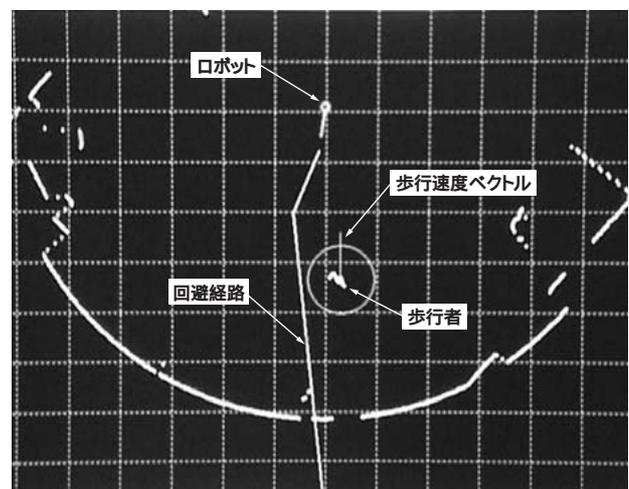
倒立2輪移動機構は、ロボットが転倒しないように走行輪の速度を操作し、ロボットに加わる外乱負荷に対して姿勢を常時安定に維持する倒立2輪走行制御系により制御される(図3参照)。この機構を採用することにより、2輪のスムーズな旋回性と急な加減速に対する姿勢の維持を実現し、俊敏な移動が可能となる。また、ロボットの姿勢を動的に安定に保つために、ロボットの横断面積を抑

えた重心の高い機体を採用することが可能となる。スリムな機体は、人混在環境で、人の邪魔にならないための重要な要素であり、また重心高さの制約をなくすことにより、ロボットの作業性を拡大できる。また、図3に示した姿勢制御にあたっては、ロボットの傾斜姿勢だけでなく、上半身の運動や、走行路面の傾斜を既知の外乱として補償し、姿勢安定制御のロバスト化を図っている。

さらに、俊敏な走行を実現する手段として開発した胴体揺動機構は、図4に示すように、旋回走行時に重心に加わる遠心力に応じて、胴体を側面方向に傾斜させ、ZMP(Zero Moment Point)を常に左右の車輪接地点の中間位置に維持することで、両車輪の接地力を均等にする。この機能により、急な旋回でも倒立2輪走行に不可欠な車輪接地の安定性を保証している。上記の構成により、人の早足程度の最高走行速度6 km/h、最高加減速度4 m/s<sup>2</sup>を実現し、最高速度での最小旋回半径は0.5 mとなっている。

俊敏な走行に対する安全性保障手段として、動的障害物回避の技術を開発した。胴部中央に設けたレーザレーダにより(図2参照)、半径5 mの範囲の周囲環境に存在する歩行者を捕捉(そく)する。ロボットは、捕捉した複数の歩行者位置の時間履歴からおおのこの移動速度ベクトルを検出するとともに、これとロボットの移動速度ベクトルから、将来衝突リスクの高い領域を推定し、衝突回避可能な経路を50 ms周期で生成する(図5参照)。これまで、走行速度4.3 km/hでロボットを走行させて、歩行速度約4 km/h、最大5人の歩行者のランダムな歩行に対し、ノンストップですり抜け走行を行えることを確認している。

EMIEWは、本節の冒頭で述べたように、人間との対話



**図5** 動的障害物回避制御  
 レーザレーダチャート上に、ロボットと歩行者の運動を重ね合わせて表示したものを示す。歩行者の移動速度ベクトルを推定し、将来衝突が予測される地点の通過を避けるように実時間で回避経路を生成する。

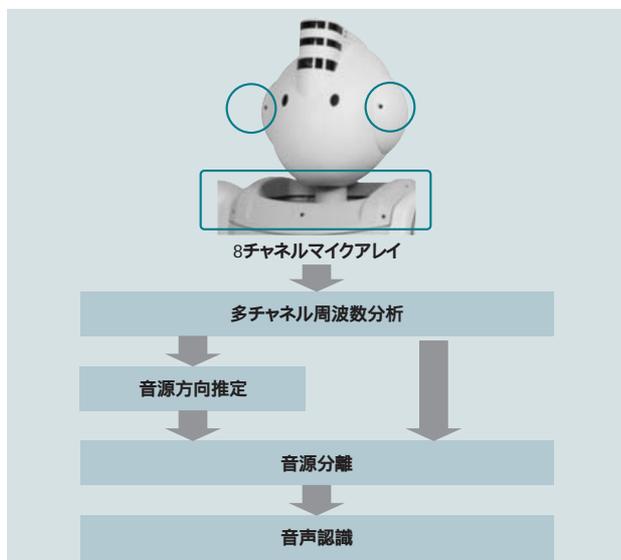


図6 遠隔音声認識処理

ロボット頭部および首周辺に設けたマイクアレイの音声信号群から、音源方向を推定し、音源方向から伝わる音信号を音声として集中して取得する。

インタフェースとして、日立製作所中央研究所で開発した遠隔音声認識機能<sup>13)</sup>、高品位音声合成機能、これに加えて全身のモーションを活用した非言語表現の機能を備えている。特に遠隔音声認識は人に近い対話を可能としており、人とロボットが、離れた場所からでも特別なヘッドセットマイクを使わずに言葉でコミュニケーションできるように、ロボットの頭部および首周辺に8チャンネルのマイクアレイを装備している。遠隔音声認識システムは、マイクアレイから取得した音声信号群から、発声者の位置同定を行い、発声方向の音信号を音声候補として集中的に拾うことで、周囲の騒音を消去する(図6参照)。多数の観客の話し声が背景ノイズとなる展示会場などでの実績では、平均70 dBの騒音下でも、1.5 m程度の距離から音声コマンドを確実に聞き取ることができた。音声認



図7 愛・地球博「日立グループ館」でのデモンストレーション

2005年8月6日～28日の間、日立グループ館の入館整理券配布待ちエリアでのサービスとして、屋外ステージで、2体のEMIEWと人間のクラウンとの協調による大道芸のパフォーマンスを披露した。

識の確度を上げるための工夫として、頭部に設けたCCDカメラにより人の顔の有無を検出し、もし顔を検出した場合は、発声対象を人間と判断して対話シーケンスを始める構成としている。さらに高品位音声合成技術によって自然な声で応答するとともに、人間と同様の動きができる両腕と全身のモーションを使った感情表出により、親和性の高いコミュニケーションが可能である。

開発したEMIEWは、2005年に愛知県で開催された「愛・地球博」(2005年日本国際博覧会)のNEDOプロトタイプロボット展に出展され、約1週間、市民参加型の基本機能実証デモンストレーションを実施した。さらに、8月6日～28日の夏季期間中、「日立グループ館」の屋外ステージにおいて、2体のEMIEWと人間のクラウンとの競演による大道芸のパフォーマンスを実施した(図7参照)。その後も、種々のデモ空間での、人との協調作業のパフォーマンスの実証を重ねた。

### 3.2 人間共生ロボット「EMIEW2」

EMIEWの開発により、人間共作業に必要とされる安全かつ俊敏な移動機能、人との対話インタフェース機能の見通し、また、親和性に対するヒューマノイド型機体のモーションコンテンツの有効性に感触を得た。これらの知見を基に、サービスロボット実用化のプロトタイプモデルとしてEMIEW2の開発を行い、2007年11月に発表した。

本開発では、実用化での最優先事項を安全性ととらえ、機体の小型化、軽量化により、衝突エネルギーの低減を図るとともに、転倒の可能性を持つ倒立2輪走行の安全性向上を図った。体重と速度を指標として、従来開発されてきたロボットの特性を図8に示す。ホビー用途のものは、体重が軽く比較的安全だが速度が遅く実用性に乏しい。

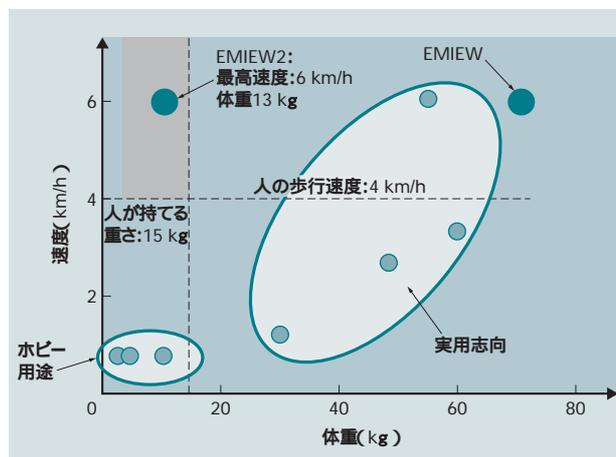


図8 EMIEW2の設計方針

ロボットの体重と速度を指標として、従来のロボットに対するEMIEW2の位置づけを示す。実用的な作業に必要な人の歩行速度4 km/h以上の速度で移動でき、人が安全かつ容易に持ち運べる体重15 kg以下を開発目標とした。

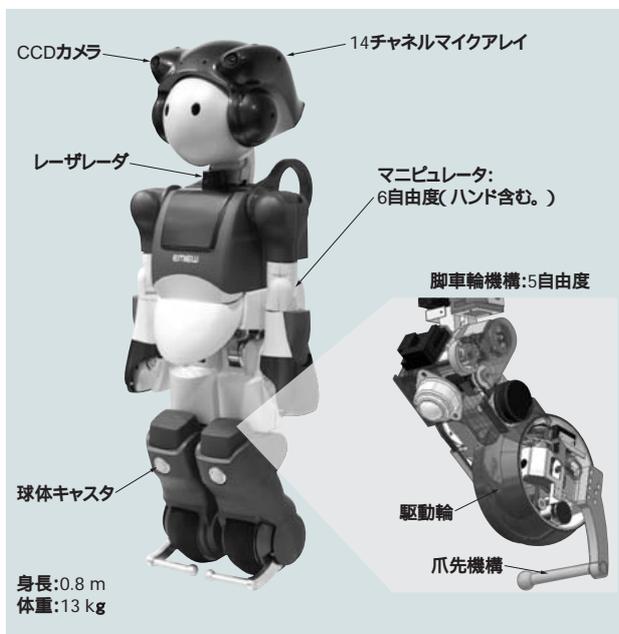


図9 EMIEW2の機構構成

従来の倒立2輪走行機能は踏襲し、5自由度の脚機構と走行輪を融合した新機構を開発した。これにより、転倒リスクを緩和し、段差などの踏破も可能となった。

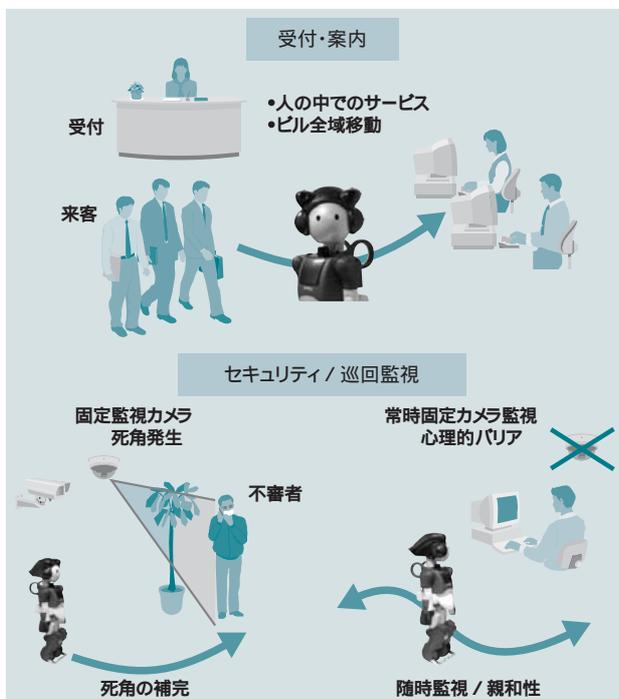


図10 EMIEW2の応用展開例

効果的な用途としては、受付・案内、巡回監視によるセキュリティサービスなどが考えられる。

一方、実用指向のサービスロボットは、作業用途に応じて体重が数十キログラム以上であり、大きな体重に対し安全性を確保する意味で速度を低速に抑える傾向にあった。この評価の中で、実用的な作業に必要な俊敏性の特徴は維持し、人の歩行速度4 km/h以上を保証すること、体重は安全性を旨に、一般に女子職員でも手持ち可能な15 kg以下とすることを設計における目標とした。最終的に、EMIEW2の最高速度は6 km/hとEMIEWと同等、

体重は13 kgとし、EMIEWの約 $\frac{1}{5}$ とした。

EMIEW2の機構構成を図9に示す。

軽量化と取り扱いの簡便さ、安全性の確保を目標とし、EMIEWに比べ大幅なコンパクト化を図った。オフィス環境での実用性を想定し、標準0.75 m高の机上の状況を頭部に設けたCCDカメラで監視できる仕様として、身長は人間の幼児並みの0.8 mとした。軽量化に関しては、寸法諸元の短縮のほか、構造骨格の薄肉化、ドライバー一体型サーボモータの採用などの手段を講じた。

移動機構は、5自由度の脚機構の先端に駆動輪を持つ脚車輪機構から構成されている。高速移動時には、脚を伸ばし二つの駆動輪で、倒立2輪走行を行う。待機状態、搬送走行など、より安定性が必要な場合には座位姿勢になり、膝の球体キャストと駆動輪によって4輪走行を行う。床面上のコードや段差などの障害物が存在した場合は、爪先機構を接地させ、駆動輪と合わせて着地面を形成し、2脚歩行による踏破が可能である。特に、脚先端部分は、コンパクト化を図るために、駆動輪の内部に爪先機構の2自由度位置決めサーボモータを内蔵するなど高密度実装設計を行った。

ナビゲーション制御機能としては、日立製作所基礎研究所で開発したインフラレス自律移動技術<sup>14)</sup>を導入しており、首部に設けたレーザレーダで捕捉した走行環境の形状データから、未知環境の地図を生成し、この地図を手がかりに自己位置を同定できる。この機能により、机が並んだような狭い空間でも、精度よく安全に走行が可能である。また、走行安全制御として、動的障害物回避制御系もEMIEWから継承している。

対人インタフェースとしては、頭部に、14チャンネルのマイクアレイが実装されており、EMIEWと同様な遠隔音声認識が可能である。マニピュレータについても、EMIEWとほぼ同等なモーション表出機能により、日立製作所デザイン本部の手による親和性の高い外装デザインと併せて、非言語コミュニケーションの有力なツールとなっている。

今後は、EMIEW2を、サービスロボット実用化可能性を評価するための社会実験プラットフォームとして活用していく計画である。図10に示すように、応用展開の例としては、人の中でのスムーズな移動、会話のサービス、エレベーターなどのインフラとの連動によるビル全域の移動の機能を想定し、オフィスビルでの受付・案内作業が考えられる。また、ビル内の巡回監視サービスに適用した場合、すばやい自律移動機能を生かし、既存の固定監視カメラとの併用による死角なしの監視、心理的バリアの少ない職場状況のモニタが可能になると考えられる。

## 4 人間共生ロボットの事業化に向けた展望

今後の人間共生ロボットの事業化進展に対する主たる課題は、製品としての価値の訴求および人間社会の中での使用に耐える安全性の追求であると考えられる。

第一に、製品としてのロボットは、自動車や家電製品のように、日常生活に必要不可欠な存在となることをめざす必要がある。近年の成功の手がかりとして、PCや携帯電話のビジネスアナロジーがある。これらは、ニッチな存在から始まり、ユーザーの潜在的欲求に訴えることにより、生活文化自体を改変して需要を拡大した。この場合のユーザーの潜在的欲求は、情報収集能力と、人と人の情報交換能力の飛躍的拡大である。これに対し、ロボットに関するユーザーの潜在的な価値観は、情報処理と物理的作業を支援する道具としての存在、心理的には日常生活のパートナーとしての存在だと考えられる。残念ながら、現在のロボット技術の水準は、これらの欲求を十分に満たす域には達していない。したがって、要素技術の開発を継続しながら技術的に可能なところから実物を提示し、ユーザーとのキャッチボールでニーズやサービスコンテンツを地道に発掘していく過程が必要である。その意味では、ロボット自体の事業化は一気に進展することはなく、メーカーでの開発継続のためには、ロボット開発で得られた要素技術のシナジー効果で、既存製品のロボット化を図ることも事業戦略上重要であると考えられる。

二つ目の課題である安全性保証は、製品化に向けては不可避の問題であり、自律的に作業をする社会的な存在としてのロボットをどのように扱うか、官民挙げての検討・取り組みが必須である。人間を隔離することで使用条件を限定して安全を確保している産業ロボットに対し、人間共生ロボットでは、人間との共存作業を前提とした安全性確保が必要である。ロボットの活用環境および活用条件は多様であり、基本的には、ロボットの種別、運用コンセプトに応じた個別の安全設計の積み重ねで対処するほかはない。一方、製品安全性をオーソライズする仕組みの整備も並行して進める必要があり、国際安全規格ISO 10218<sup>15)</sup>のような安全ガイドラインの整備、公的安全認証制度の確保に向けた国レベルでの対応推進を期待したい。また、人間共生ロボットの社会への受け入れ態勢としては、道路交通法、建築基準法、労働法などのロボット運用に関連する法規制の見直しが必須となる。すでに幾つかのロボット特区で社会的受容性の検証が試みられているが、今後さらに活動の範囲を広げ、ロボット導入の社会的メリットの実証、法規制検討のための具体的なケーススタディの積み上げが進むことを期待する。

## 5 おわりに

本稿では、これまでのロボット開発に対する取り組み、人間共生ロボットの開発状況および事業化の展望について述べた。

筆者らは、本稿で述べたように、オフィス作業支援の方向で、人間共生ロボットの实用化展開の検討を進めている。国内外で、一斉に人間共生ロボットの開発が活性化しているが、そのビジネスは黎明期にある。現状は、メーカー側もユーザー側も何があればよいか、何ができるか、ということを試行錯誤している状況であると考えられる。今後の事業化の促進に向けては、産官学挙げての技術開発およびロボットの社会導入のための制度整備に期待するとともに、ロボットの段階的な製品化により、ユーザーとメーカーが相互に協調してロボットが存在する生活文化のビジョンを育成していくことが必要である。

なお、本稿で紹介した障害物回避技術は、筑波大学日立連携事業実施協定の一環として推進している、坪内教授・油田教授らの研究グループと日立製作所機械研究所との共同研究の成果を活用したものである。

### 参考文献など

- 1) 黒木, 外: 高度モーションエンターテインメント機能を有する小型二足歩行ロボットSDR-4XII, 第21回ロボット学会学術講演会予稿集, 1A21(2003)
- 2) 尾崎, 外: ロボット情報家電ApriAlphaの情報サービス機能, 第22回ロボット学会学術講演会予稿集, 1E16(2004)
- 3) 植木, 外: サービスロボットの開発(1) ハードウェア構成, 第23回ロボット学会学術講演会予稿集, 1I31(2005)
- 4) 日立のロボット開発の歴史, [http://www.hitachi.co.jp/rd/research/robotics/history/1960\\_70.html](http://www.hitachi.co.jp/rd/research/robotics/history/1960_70.html)
- 5) 加藤, 外: 脚方式移動ロボットの開発, 日立評論, 68, 10, 787~792(1986.10)
- 6) M.Fujie, et al: Control Algorithm for Dynamic Walking with Full-Scale Quadrypedal Machine, Proc. of The 2nd Workshop on Manipulators, Sensors and Steps towards Mobility, International Advanced Second Robotics Program IARP, pp.24-25 (1988)
- 7) S.Egawa, et al: Electrically Assisted Walker with Supporter-Embedded Force-Sensing Device, Advances in Rehabilitation Robotics, pp.313-322 (2004)
- 8) Y.Hosoda, et al: 'SWAN': a robot for nuclear disaster prevention support, Advanced Robotics, Vol.16, No.6, pp.485-488(2002)
- 9) 荒井, 外: 家庭用掃除ロボットのシステム設計, 第48回自動制御連合講演会予稿集, G2-53(2005)
- 10) Y.Hosoda, et al: Development of human-symbiotic robot "EMIEW" Design Concept and System Construction, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.2(2006)
- 11) 中村, 外: 人間共生ロボットEMIEW2の開発, ROBOMEC2008講演会予稿集, 2P1-103(2008)
- 12) 柄川, 外: 人間共生ロボットEMIEW2のコンポーネント指向ソフトウェア構造, ROBOMEC2008講演会予稿集, 2P1-104(2008)
- 13) 戸上, 外: 周波数振り分け法の出力結果に基づく最小分散ビームフォーマの適応化方式, 2005年度日本音響学会秋季大会予稿集, 2-2-20(2005)
- 14) 日立ニュースリリース, カメラロボット <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2006/03/0307b.html>
- 15) ロボットハンドブック, p.218~221, 社団法人日本ロボット工業会(2005)