

俊敏かつ安全な移動機能を持つ
人間共生ロボットの研究

細田 祐司

システム情報工学研究科
筑波大学

2011年7月

概要

第1章 はじめに

少子高齢化による社会環境の変化や、生活の質に対する関心の高まりを背景に、安心・安全・ゆとりをもたらす、人の暮らしを助けるロボットの登場が期待されている。一方、製造分野を対象に発展・普及してきた従来の産業ロボットに続く次世代のロボットとして、公共・医療福祉・生活分野など、より人に近い場所でサービスを提供するサービスロボットが大型市場を形成することが期待されている。これらの社会的動向から、オフィスサービス、ホームユース、エンターテインメント分野など多方面のロボットの開発が活発になっている。

このような背景のもとに、「人間共生ロボット」の実現を目指した開発を推進している。ここで言う、人間共生ロボットとは、人と同じ空間で暮らし、人の作業を支援するロボットである。この実現のためには、次の3つの条件を満足すべきだと考える。

- 1) 人と生活や作業の場を共有できる
- 2) 人との親和性が高いコミュニケーションができる
- 3) 人の仕事をサポートする能力を備える

条件1)は、人間共生ロボットにとって基本的かつ重要な機能であり、人と同じ場で、人に対しサービス作業を行ったり、人と協働したりする場合に、まず人に対し危害を加えず、人の動きや作業を邪魔せず、効率良く、信頼性の高い仕事を安全に実行できることを要求するものである。例えば、作業を基本的な移動作業と考えた場合、人や周囲の構造物に衝突することのない安全性、人の動きに合わせて移動することができる俊敏性を求められる。

条件2)は、人との情報のやり取りを行いながら働く人間共生ロボットに対する、もう一つの基本的な要求である。ロボットが人から情報を受け取る手段としては、キーボードやタッチパネル等の端末からの直接的な情報入力が高確率な手段であるが、音声対話の様な、人にとってより日常的で自然な情報交換の手段が可能であれば手間がかからず、特に端末の取り扱いに不慣れた高齢者等のユーザーに対し利便性が向上する。さらに、人のように話し言葉以外に顔の表情や身振り手振りのような非言語表現が可能であれば、情報伝達がより確実になり、またユーザーのロボットに対する心理的距離が縮まり、より円滑なコミュニケーションが可能となる。このような人に対して寄り添う親和性の高いコミュニケーション能力が、人間共生ロボットの社会受容性を形成する一つの要素になると考えられる。

条件3)は、ロボットを用いたサービスアプリケーションに対する本質的な要求である。製品としてのロボットは、何らかの形で人の作業を支援し、人ではなし得ない価値を人に

与えることを求められる。ここで最も大事な点は、ロボットに何をやらせるかというニーズの把握と、それに基づくサービスコンセプトである。一方、シーズはこれを実現する手段として十分なものが開発される必要がある。サービスアプリケーションが情報サービス系であれば、有用な情報コンテンツの構築と、条件2) で述べたコミュニケーション能力の高度化が必要とされる。また、家事支援等の物理的な作業を伴うサービスアプリケーションに対しては、その作業に耐えるハードウェア、自律もしくは半自律的に作業を遂行することが可能な知的制御技術及びそれを支えるセンシング技術が必要となる。

これらの技術を進化させることで、将来的には、オフィス環境や更には一般家庭内など社会の広い範囲で人の作業を支援する人間共生ロボットの実現を目指す。

筆者らは、このようなロボットの開発の第一ステップとして、人間共生ロボットの基本機能である移動の技術を固めるために、条件1) に対しては、安全かつ俊敏な移動を実現することとした。移動形態としては、車輪型移動、クローラ型移動、脚型移動等があるが、まず、屋内外の環境の多くの場所にて適用可能で、移動効率が良くかつ移動の安全性が高い車輪型移動を選択した。また、対人サービス機能の基礎を固めるために、条件2) に対し、音声認識性能の高度化を図るとともに、親和性の高い身体およびモーションによる非言語対話の効果を確認することとした。さらに、条件3) については、物理的作業機能は基礎の移動機能をベースとし、条件2) に対して築くコミュニケーション能力を有効に活かす、情報サービス系のサービスアプリケーションの実証を行うこととした。これらの技術を総合的に実証するプロトタイププラットフォームとする方針で、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「次世代ロボット実用化プロジェクト」の一環として、2004年より人間共生ロボット **EMIEW (Excellent Mobility and Interactive Existence as Workmate)** の開発を行った。

EMIEW の開発においては、安全かつ俊敏な移動を特徴として取り組んでおり、この目的のために、床面占有面積を狭くでき邪魔にならず、小回りが利いた俊敏な移動が可能で、かつ姿勢安定性を能動的に制御可能なため近年ロボットの移動手段に適用する例が増えてきた倒立振り移動機構を導入した。これに対し、人とロボットの接触が発生した場合のリスクを軽減するために、走行位置決め剛性を下げる安全方針を選択し、これに対し精度の良い走行ができるようにフィードフォワード制御をベースとした新規の走行制御方式を開発した。さらに、最重要要求である安全性に対し、複数の歩行者に対し将来移動位置を推定して衝突を回避する制御アルゴリズムの開発を行った。

本論文では、人間共生ロボット **EMIEW** の設計コンセプト及び構成につき紹介し、この中の移動機能のコア技術である、倒立振り移動機構の制御方式及び衝突回避制御の研究成果について述べる。

第2章 人間共生ロボットのシステム

第2章では、本論文の主テーマである第3章及び第4章に記載の移動制御技術の適用先であり、その性能実証のプラットフォームとなった人間共生ロボット EMIEW の設計コンセプト及び構成について紹介する。

なお、EMIEW は人間共生ロボットの総体としての実証評価を目指し、(株)日立製作所の各部門の技術を統合させて完成を目指した。本章で述べる EMIEW の開発コンセプトの策定及びハードウェア及び制御ソフトウェアは、筆者らが主体となり研究開発を行った。この中で、対人コミュニケーション機能に適用した音声認識技術と音声合成技術については、(株)日立製作所・中央研究所が主体となって研究開発を行った。一方、ロボットの機械的特性を活かした非言語対話機能及び外観デザインについては、(株)日立製作所・デザイン本部の協力を得て、筆者らが主体となって研究開発を行った。

EMIEW の開発において、初期段階のアプリケーションを、インフォメーションデスクでの顧客の受付・案内、オフィスの物流支援作業、ビル建屋内の巡回監視作業等の、オフィス作業支援と想定した。これらの作業を実現するためには、次に示す3つの機能の確立が必要である。

- 1) 俊敏な移動
- 2) 安全かつ確実な衝突回避
- 3) 人とのコミュニケーション

これらのアプリケーションに用いられるロボットは、人間が早足で歩く程度の俊敏さを備える必要がある。案内ロボットが素早く移動できない場合、ロボットについて歩く人間に対し、「遅い」というストレスを与える。さらに、セキュリティ用途の作業では、早歩きをする人間に追いつくことは、ロボットにとって本質的に備えるべき機能である。一方、移動するロボットの近くに存在する人間に対する安全確保は重要課題であり、移動するロボットが備えるべき人間との衝突を回避する機能は、人間共生作業にとって不可欠である。これらの機能を実現するために、ロボットを転倒させることなく急激に加速及び減速し、さらに、ロボットの周辺を動き回る障害物を実時間で認識し、また障害物回避のための最適な経路を実時間で生成する移動制御技術を開発した。

上記したアプリケーションに適用されたロボットは、人間からの命令を確実に受け取り、また人間に対し身近である必要がある。そのため、ロボットは、人間共生作業で共に働く人々誰とでも、知的な会話ができるようになる必要がある。この目的のため、特別なヘッドセットマイクなどを用いず、離れた人の音声を認識する遠隔音声認識を導入した。さらに、人間との親和性の高いコミュニケーションを実現するために、ロボットの全身のモーショ

ンを用いた非言語対話機能を併せて開発した。

EMIEW は、上記の 1) の機能のために、倒立振子制御アルゴリズムにより姿勢の動的安定を保ちながら走行する倒立振子移動機構を備える。この機構を用いた理由は、人間共生環境での作業の優位性及び移動時の安定性と俊敏性の両立である。人間共生環境で人間と共に働くロボットの床面占有面積は、人間の作業に対する干渉や、人間やその他の障害物との衝突を回避するために、極力狭くする必要がある。しかしながら、必要な機能を保証するためには所定の体積が必要であり、床面占有面積を削減した場合、一般的にロボットの重心位置は高くなる。一方、重心の高いロボットは、高速俊敏な移動動作に対して不安定となる。これらの問題を、両立して解決する手段として、倒立振子移動機構を採用した。倒立振子移動機構は、倒れこもうとするロボットの姿勢を修正し、常時一定に維持するため、全体システムの重心位置が高い場合でも安定な移動が可能となる。さらに、姿勢のバランス制御の効果により、人手で押される等といった計画外の突発的な外乱に対しても、ロバストな姿勢維持が可能である。このシステムにより、EMIEW は、姿勢を適切に変更することで、急峻な加速、減速ができる、さらに、EMIEW は、独特の移動手段として、全身の重心位置を左右の側面方向に移動するためのボディースイング機構を備えている。この機構は、旋回移動でロボットに加わる遠心加速度を基に、全身の重心位置を制御する。このような移動システム構成により、最高速度 1.7 m/s (6 km/h)、最大加減速度 4 m/s²、最小旋回半径 0.5 m と、人間並みの俊敏な移動を可能とした。ただし、倒立振子制御を用いた移動では、加減速時等に重心移動の予備動作を必要とし移動軌跡精度が悪くなる問題があった。この問題については、第 3 章で述べる走行制御方式を開発し、人間と協調動作を行う場合などに必要な精度の良い移動軌跡の生成を可能とした。

2) の衝突回避の機能については、第 4 章で詳細な制御アルゴリズムを紹介するが、ボディー正面に設けたレーザスキャナにより、周囲の複数の移動障害物を検出し、ロボットと障害物間の相対速度に基づき、0.8 m/s (3 km/h) の走行条件で所定の衝突回避マージンをもつ衝突回避軌跡を生成し、俊敏かつ安全な衝突回避機動が可能であることを確認した。さらに、移動位置決めに関しては、走行環境に円筒状の複数のランドマークを設置し、レーザスキャナの掃引データによるスキャンマッチングにより現在位置の校正を行った。

3) のコミュニケーション機能の内、遠隔音声認識技術及び高品位音声合成技術は、(株)日立製作所・中央研究所で開発を行った。騒音レベルの高い環境下で人間の発話を確実に聴き取るために、頭部に設定した 8 Ch のマイクロフォンアレイで捉えた音声信号の相互位相から発声源の水平方向を同定し、認識対象の音声情報を絞り込み、さらに、頭部に設けた TV カメラで捕らえた顔画像から発声方向での人間の存在を確認して、音声認識を行うシステムを製作した。これにより、70dB の高騒音下でも 1 m 以上離れた地点から、100 語の音声コマンドの聴き取りが可能であった。また、発声手段としては、高品位音声合成技術を導入しており、予め声優の発音をサンプルして得た音素を、テキストに従って自動的にスムーズにイントネーション接続を行い、人間の語りと同様の品質の音声応答を可能と

した.

さらに、EMIEW の開発においては、外観や身振りの非言語対話の親和性に重きを置いた。身体は人間と同等の 1.3m の身長で、1 自由度 5 指のハンドを供えた 6 自由度の双腕と、2 自由度の頭部、さらには上記したボディースイング機構による上体の傾斜、全体移動のモーションを総合して、発声に伴う感情表現を試みた。

以上のような設計コンセプトでシステム開発を行い EMIEW を完成し、2005 年の愛知万博において、展示会場での任意顧客の音声オーダーにより希望の品物を運んで引き渡すデモ及び高速走行をベースとした 2 体の EMIEW と一人のクラウンとの協同パフォーマンスで、開発成果を実証した。

第3章 倒立振子移動機構の走行制御方式

第2章で紹介したように EMIEW には移動手段として、床面占有面積を小さくすることができ、かつ小回りの効く倒立振子移動機構を採用している。第3章では、この倒立振子移動での問題となる重心移動にともなう軌跡誤差を解決する走行制御方式の開発について述べる。

人間共生ロボットの設計に当たり、第一に考慮すべきは、ロボットの周囲に存在する人間に対する安全性の確保である。人間の生活空間で活動するロボットの基本機能として、人間を含む障害物との衝突を事前に回避する必要がある。これについては、上位の安全制御機能として第4章で述べる衝突回避制御の開発を行った。さらに、衝突回避がうまくいかず、人とロボットとの間に接触が発生した場合、ロボットが柔軟に停止するか離脱する機能が必要になる。この要求に対しては、ロボットの位置決めサーボに柔軟さを持たせることで対処する方針とした。すなわち、接触に伴いロボットに働く外乱による位置ずれを許容し位置目標追従性能の優先度を低くする方針をとした。ロボットに対する接触安全性に対し上記の制御戦略を選択する一方で、ロボット本来の作業機能として、倒立振子制御による走行の安定性確保、精密で機敏な走行の実現も必須である。そこで、走行制御系の設計方針として、ロボットの動作に伴う既知の外乱を相殺するフィードフォワード制御を採用して所定の機能を実現することとした。この点において、本開発でロボットの移動に伴う作業として考慮したのは、マニピュレータ等のロボット上体の運動と移動との連動、傾斜路面での走行、俊敏かつ精度の良い移動軌跡制御の実現である。最後の移動軌跡制御に関しては、最大移動速度、最大加速度を決定した走行指示をできることが望ましい。また、移動する障害物に対する回避では、衝突予測の精度を高めるために経路上を計画した時間に沿って走行できることが重要である。しかし、倒立振子移動機構は、姿勢を維持する制御のために、車軸の位置または速度の目標値としてステップ入力を与えると、移動開始時には一旦目標位置から逆方向に移動し、移動終了時には目標位置を一度追い越して止まるという特徴を持っている。このため、単純な台形速度パターンによる走行制御や、高周波成分を制限した目標値を位置や速度に与える方法では、倒立振子移動機構を目標値に対して偏差無く追従させることができなかつた。このような制約条件を考慮した目標値生成手法としてモデル予想制御の方法があるが、整形目標値を得るための計算負荷が大きいという点で計算能力に限られる移動ロボットへの搭載はまだ難しい。

本研究では、対人安全性のための走行位置決め制御剛性を抑えた倒立振子制御システムにおける、ロボット上体の運動に対し、また傾斜走行面に対し安定な走行を実現する走行制御の提案を行い、さらに、移動機構制御に関して、任意に選定した最大加速度、最大移動速度、移動距離を制約条件として、偏差無く追従可能な軌跡目標パターンが生成でき、かつ、移動ロボット制御系に組み込んだ状態で障害物回避等の実時間軌跡制御に適用できる程度に所要計算負荷が小さな、倒立振子移動機構の移動体動作計画方式について提案し

た。また、本章では、EMIEW の倒立振子走行制御系の構成につき概説し、ロボットの上体の運動及び傾斜走行面走行に対する走行補償制御について述べ、また移動軌跡制御のコアとなる、目標値の生成に必要な不動点の概念を提案し、これを活用した移動作業計画方式につき述べ、走行実験結果から、提案した移動作業計画方式の有効性を示した。

倒立振子走行機構系は、基本的に上体と車輪の2質点で表現し2自由度モデルに単純化した。マニピュレータ等の上体稼動部の総合重心をモデルに反映して車輪駆動補償トルクを生成することで、上体自由度の運動に対し走行位置の変動を補償なしの場合に比べ3分の1に軽減した。また、傾斜走行面に対する走行補償では、傾斜面傾斜角度も含めた状態モデルを形成し傾斜角度をカルマンフィルタで推定することで、斜面上の重力外乱を補償し、0.05m の位置決め精度を確保できた。移動作業計画方式に関しては、倒立振子走行機構の上体重心と車軸重心の間の空間に存在し、加減速に伴う機体の傾斜の大きさに係わらず、一定の位置を代表可能な不動点の存在を見出した。さらに、不動点の位置を表現する仮想回転角により、倒立振子走行制御に伴う期待の姿勢変動を意識せずに、一意に走行軌跡を生成する手法を提案した。本研究では、仮想回転角の4階微分量をステップ応答波形で定義し、任意の最大加速度、最大速度、所定移動距離を条件に直線走行運動の生成を試みた。さらに、EMIEW を用いた走行実験を試み、最高速度 1.7 m/s (6 km/h)、最大加速度 0.4 m/s² の条件で、到達点での位置決め精度 0.04 m、速度精度 0.06 m/s の成果を得た。

以上述べた成果により、第2章にて述べる、高速走行を伴う人間との協同演技等の、予定軌跡と走行作業の同期時間管理が必要な信頼性の高い走行制御が実現できた。さらには、第4章で述べる、衝突回避軌跡生成に対し信頼性の高い軌跡追従走行が実現できた。

第4章 衝突回避制御

第2章で述べるように、EMIEWの用途としては、人が存在するオフィスや駅などの複雑な環境での、案内作業や巡回監視作業を想定している。また、第2章で述べるように、このような人のペースに合わせたサービスには、人と同等はそれ以上の移動速度が必要とされ、EMIEWの最高速度は人の早めの歩行速度と同等の1.7 m/s (6 km/h) としている。人と混在する環境での作業においては、人に対する安全性の確保が重要な課題であり、俊敏な移動に対して、衝突事故のリスクを極力小さくする必要がある。このため、ロボットは複数の移動体との衝突回避を効率的に行う機能を必要とする。さらに、ロボット組込コントローラへの実装の制約から、移動障害物に対する衝突回避アルゴリズムは、その計算パワーを小さく抑える必要がある。

衝突回避アルゴリズムについては、古くからポテンシャル法による静止障害物に対する効率的な回避経路の策定が試みられており、ローカルミニマム問題の解決についてもラプラスポテンシャル法を用いた確度の高い回避経路生成を行う方法等が提案されている。ただし、これらの方法は、既知の静的環境に対し最適回避経路を策定するものであり、また経路を得るために繰り返し演算を要し、動的な環境に対し実時間の経路策定を行うに適していない。未知の環境に対し、実時間で衝突回避経路を生成する手段としては、**dynamic window**を適用し衝突回避に適した速度指令を逐次生成する方法や、移動目標や障害物の周囲環境の状態をファジイ関数として表現し少ない規範により速度指令を生成する方法等が提案されている。しかし、前者では、障害物の運動が考慮されておらず、後者では限られた物体の運動のみを取り扱っており、本研究で目標としている複数の障害物の移動に対する衝突回避経路の生成には適さない。一方、多数の障害物の移動に対し衝突回避経路を効率良く求める手法として、坪内らの手法が提案されている。ここでは、ホロノミックな移動を行うロボットを想定し、3次元時空間内の絶対座標上でのロボットと全ての障害物の時空間移動体形状の相互関係を捉え、幾何学的な解析により衝突判定や衝突回避経路の策定を行った。

本章では、この手法にヒントを得て、2次元移動空間内でのロボットと複数の移動障害物との間の相対速度に着目したより解析計算負荷が小さく実時間処理が容易な衝突回避経路生成アルゴリズムを提案し、さらに非ホロノミックなEMIEWの走行特性に適合した衝突回避軌跡を生成する手法を含む動的衝突回避ナビゲーション制御を提案し、性能実証結果について述べる。

本章で述べる衝突回避アルゴリズムは、障害物の位置と速度を推定する障害物検出、障害物とロボットとの間の衝突の可能性を推定する衝突判定、衝突を回避する適正な経路を決定する回避経路計画、ロボットの動特性に合わせて実現可能な回避軌跡を生成する回避軌跡生成プロセスからなる。上記のアルゴリズムは、移動障害物の代表である歩行者を、ほぼ等速で移動し、他者の存在を避けるパーソナルスペースを確保するものと仮定して構

成した。このアルゴリズムのポイントは、上記の衝突判定と衝突回避計画の演算処理において、ロボットと複数障害物の間の相対速度ベクトルに着目したシンプルな幾何学解析計算で処理を行ったことにより、衝突回避制御演算の負荷を低減したことである。また、複数の障害物に対する衝突回避経路の候補選択において、全ての衝突回避パターンの中から総当りで最短回避経路を選択する場合、衝突回避パターンが膨大になるため、坪内らにより提案された準最適解として最短に近い経路を逐次効率的に見出す方法を導入し、パターン選択処理の効率につき評価した。これらの方法で生成した回避経路は、中継点を結んだ折れ線経路であり、実際の回避走行を実現するためには、ロボットの機動特性に応じた軌跡補正が必要となる。適用対象の **EMIEW** は非ホロノミック走行を行うため、衝突回避の要求による軌跡の変更は滑らかな曲線とする必要があり、ロボットの走行速度に依存せずに適正な補正軌跡を生成する演算手法を提案した。これらのアルゴリズムを **EMIEW** に実装し、複数歩行者を障害物として回避する実験を行った結果、ロボットの速度を 0.8 m/s (2.9 km/h) 一定とし、約 1.2 m/s (4.3 km/h) で移動する5人の歩行者を、安全かつスムーズに回避して走行可能なことが確認された。このような、回避走行において、障害物検出から回避軌跡生成までの一連の回避制御処理時間は、 4 ms 以下であり、提案したアルゴリズムの計算負荷低減効果が確認された。

第5章 結論

人間共生ロボット EMIEW の基本的特徴を、俊敏な移動、安全な衝突回避、親和性の高いコミュニケーションの3点として開発を進めた。俊敏な移動については、倒立振子移動機構の採用により、人間の早足並みの俊敏さを達成した。衝突回避については、任意の方向に移動する複数の歩行者を効率良く回避しながら走行を継続できることを確認した。コミュニケーション機能については、遠隔音声認識システムの導入により、騒音下でも確実な音声対話を実現し、さらに、全身のモーションを用いた非言語コミュニケーションにより親和性の高い対話を実現した。これらの開発成果は、2005年開催の愛知万博にて一般客相手のデモンストレーションにより実証された。

EMIEW の移動機能のコア技術である、倒立振子移動機構の走行制御方式については、上体運動補償制御及び傾斜走行制御を開発し、移動位置決めサーボ剛性を低減することで、接触に対する安全性を確保した。さらに、倒立振子移動機構の姿勢変動に影響を受けない代表位置として不動点の概念を提案し、これをベースとした走行軌跡方式を提示した。以上の成果により、高速走行を伴う人間との協同演技などの、予定軌跡と走行作業の同期時間管理が必要な、信頼性の高い走行制御が実現でき、また衝突回避軌跡生成に対し信頼性の高い軌跡追従走行が実現できた。

EMIEW の移動機能のもう一つのコア技術である、衝突回避制御については、ロボットと移動する障害物との間の相対速度ベクトルに基づき演算を単純化した衝突回避軌跡生成アルゴリズムを提案した。この手法を用い、最大5人の歩行者に対する衝突回避走行実験において回避処理に要した演算時間は、障害物検出から回避軌跡生成までの全体で4ms以下であり、実時間衝突回避の要求に対し十分計算負荷が小さいことが実証された。

本報告で述べる、サービスロボットのプロトタイプとしての EMIEW の開発を通じて、移動要素技術及び対人インターフェース技術の基礎が固められた。本章の後半では、これらの技術をベースにした次世代サービスロボットの事業展開に向けた、筆者らの取り組みについて紹介した。まず、製品としてのサービスロボットが成立する条件として、人間ではなし得ない価値を提供することが必須であることにつき言及し、さらに、現在市場が存在しないサービスロボットの事業化には、プロトタイプシステムによるユーザーとサービス提供者との間の共通概念の醸成が必須であることにつき言及した。この様な事業化の条件を考慮し、現在筆者らが開発を進めている、情報搬送系、物体搬送系、人間搬送系の、3種類のサービスロボットに関する事業化に向けた取り組みについて紹介した。

目 次

第1章 はじめに	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 社会の少子高齢化の推移	1
1.1.2 サービスロボット市場の変遷と実用化に向けた動き	4
1.2 本研究の目的	8
1.3 従来の研究	10
1.4 本論文の構成	12
第2章 人間共生ロボットのシステム	13
2.1 はじめに	13
2.2 アプリケーションの仮定	14
2.3 設計コンセプトと開発仕様	16
2.4 システム構成	19
2.4.1 全体システム	19
2.4.2 移動システム	21
2.4.3 衝突回避・航法制御システム	26
2.4.4 対人コミュニケーションシステム	27
2.5 制御システム	32
2.5.1 ハードウェア構成	32
2.5.2 ソフトウェア構成	34
2.6 機能の実証	38
2.7 まとめ	44
第3章 倒立振子移動機構の走行制御方式	45
3.1 はじめに	45
3.2 EMIEW の走行制御系	47
3.3 走行制御方式	51
3.3.1 上体運動補償制御	51
3.3.2 傾斜走行制御	53
3.4 軌跡追従制御方式	57
3.4.1 移動計画への要求	57
3.4.2 軌跡追従制御の方法	58
3.4.3 不動点を用いた状態目標値の生成	59

3.4.4	移動制御計画の効果	65
3.5	まとめ	70
第4章	衝突回避制御	71
4.1	はじめに	71
4.2	歩行者のモデル化	73
4.3	衝突回避アルゴリズム	74
4.3.1	障害物検出	74
4.3.2	衝突判定	76
4.3.3	単一障害物の衝突回避計画	78
4.3.4	複数障害物の衝突回避計画	81
4.3.5	回避軌跡生成	84
4.4	衝突回避性能の評価	87
4.5	まとめ	91
第5章	結論	92
5.1	本研究の成果	92
5.2	今後の展開	93
5.2.1	製品化の条件	93
5.2.2	事業化のプロセス	95
5.2.3	人間共生ロボット開発の展開	97
5.2.4	最後に	101
	謝辞	102
	参考文献	103
	著者研究業績目録	109

目次

1.1	年齢区分別将来人口推移	2
1.2	65歳以上の人口比の推移	3
1.3	R T市場規模の将来推移推定	6
1.4	R T市場の内訳比率	7
2.1	人間共生ロボットの活用イメージ	15
2.2	EMIEWの外観及び主要構成要素	20
2.3	倒立振子移動制御系の構成	23
2.4	ボディースイング機構の概念	24
2.5	移動機構の構造	25
2.6	遠隔音声認識の処理フロー	29
2.7	音源分離処理による雑音除去効果の例	29
2.8	マニピュレータ機構	30
2.9	ハンド機構	30
2.10	モーションエディタ	31
2.11	制御システムのハード構成	33
2.12	制御システムのソフト構成	36
2.13	制御ソフトモジュールの相関関係	37
2.14	「プロトタイプ展」デモでのEMIEWの作業状況	40
2.15	日立グループ館でのデモの状況	41
2.16	直線走行時の走行消費パワー	43
3.1	EMIEWの機構モデル	48
3.2	走行制御系の構成	50
3.3	上体のつり合い条件	52
3.4	上体運動補償制御の効果例	52
3.5	傾斜走行のモデル	54
3.6	斜面走行補償の構成	56
3.7	斜度推定値の補正	56
3.8	斜面データベースの例	56
3.9	不動点と仮想回転角 q の概念	60
3.10	仮想回転角 q を用いた軌跡パターン計画	64
3.11	目標軌跡パターンと軌跡追従実験結果の比較	66
3.12	台形速度制御のシミュレーション例	67

3.13	EMIEW を用いた衝突回避実験	68
3.14	愛知博における 2 台の EMIEW による走行デモンストレーション	69
4.1	障害物検出の方法	75
4.2	衝突判定の方法	77
4.3	単一障害物に対する衝突回避経路計画の方法	79
4.4	複数の障害物に対する衝突回避経路計画の方法	82
4.5	衝突回避軌跡の生成方法	85
4.6	6 人の歩行者に対する衝突回避の実験例	89
4.7	EMIEW を用いた衝突回避実験	90
5.1	製品化の条件	94
5.2	事業化のプロセス	96

表目次

1.1	RT製品の将来市場規模推定	5
2.1	EMIEWの開発仕様	18
2.2	性能評価の結果	42
3.1	機構モデルのパラメータ値	48
4.1	衝突判定演算頻度の低減効果	83
5.1	移動機能とサービス機能の課題と事業化へのアプローチ	97

第1章 はじめに

1.1 本研究の背景

本論文では、従来の産業ロボットの分野とは異なる非製造業向けのサービスロボットの開発を対象としている。そこで、まず本節ではサービスロボットの社会的位置付け、事業対象としての将来の普及性に関して概観する。

1.1.1 社会の少子高齢化の推移

日本における人間共生ロボットを含むサービスロボットの需要に関する社会的背景としては、少子高齢化による社会環境の変化や、安心・安全・ゆとり等の生活の質に対する関心の高まりがあると考えられる。この中でも少子高齢化の問題は、特に早急に取り組むべき問題である。図 1.1 は、2055 年までに推定される年齢区分別将来人口推移[1]を表したものである。また、図 1.2 は、このデータより、現在の就労年齢の上限である 65 歳以上の人口の比率をプロットしたものである。これらのデータで見るように、2055 年には、総人口は 2010 年の 70%に減少し、就労年限の 65 歳を越える年代の全人口に対する比率は、2010 年の約 20%から約 40%に増大すると推定されている。このような就労人口の絶対的な減少により、社会経済の根幹である製造産業や、社会生活を下支えするサービス業等の更なる合理化、質の改革が必須となると考えられる。製造現場では、従来の産業ロボットの高度化がより進み、従来人手作業が多かった組立や、搬送作業等の工程も、ロボットで代行するか人間の作業をロボットが支援するようになっていくと思われる。また、社会インフラの維持や、社会生活の基盤となるサービス業については、人の暮らしの中に積極的に係わり、従来人手で行ってきた種々のサービスを代行するロボットの適用が進んでいくと思われる。特に、社会の高齢化が進行する中、高齢者に対する就労の支援、社会参加の促進・活性化、日常生活活動の支援、介護支援などに力が注がれると思われる。

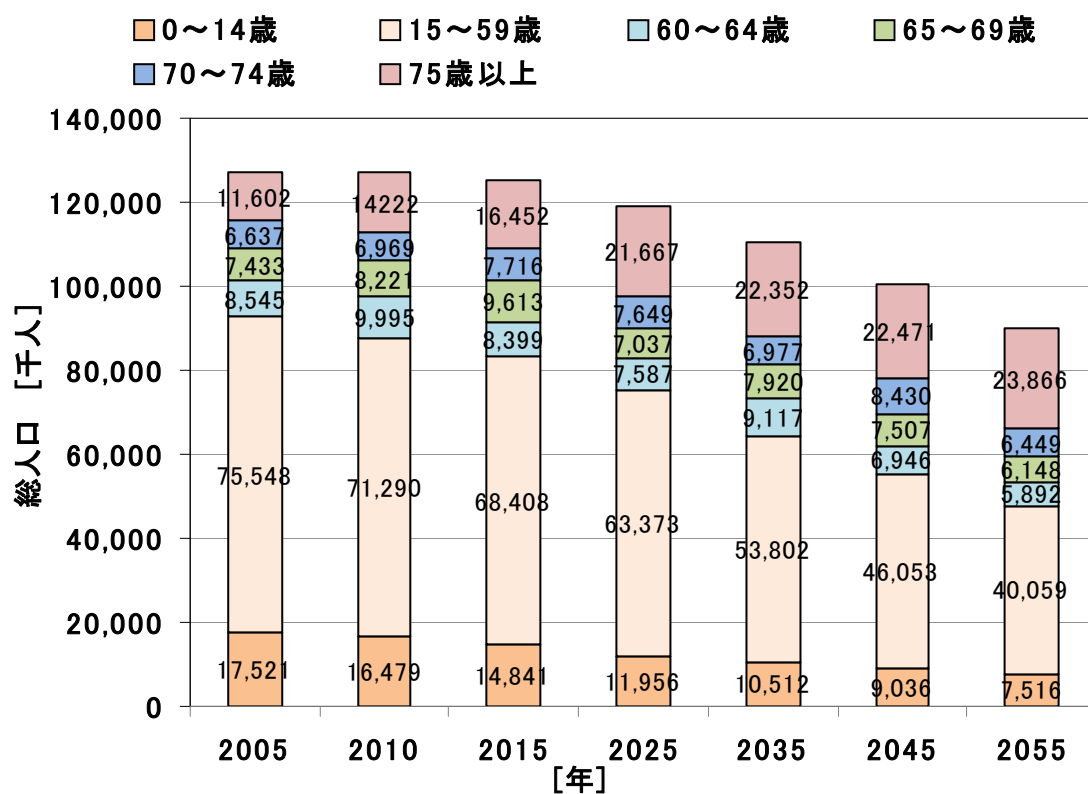


图 1.1 年齢区分別将来人口推移

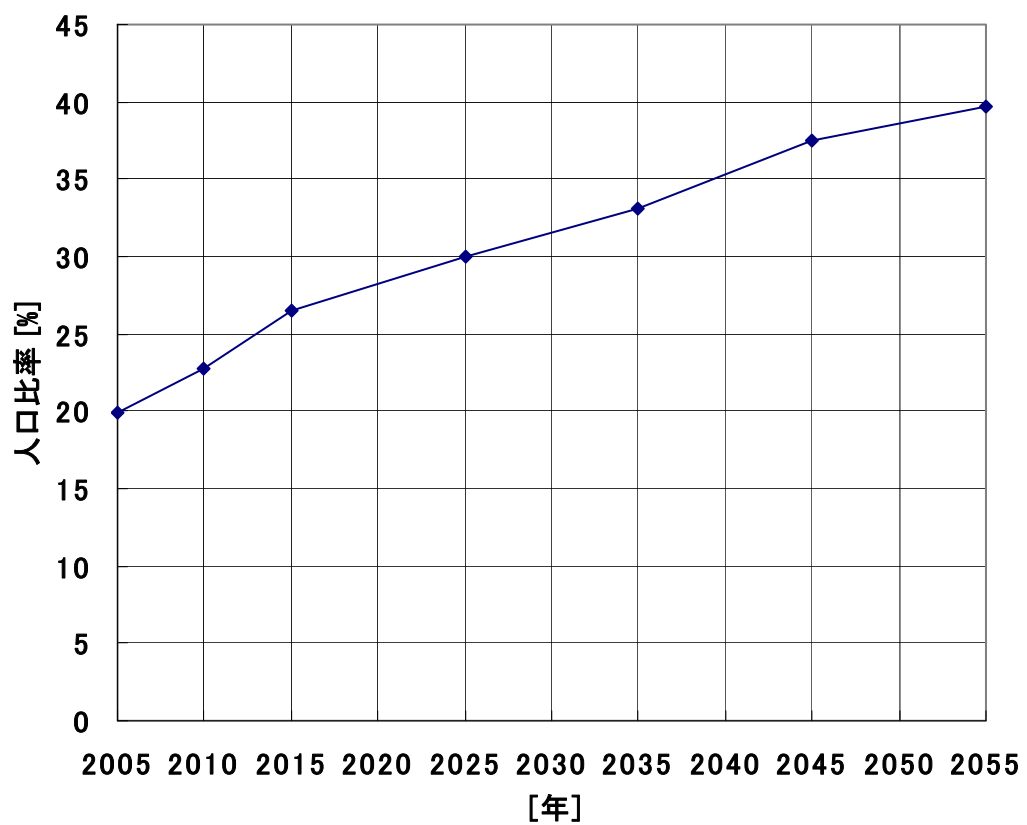


図 1.2 65 歳以上の人口比の推移

1.1.2 サービスロボット市場の変遷と実用化に向けた動き

前節で述べたように、人の暮らしの中で各種のサービスを提供するロボットの実用化が期待されている。これら新規分野でのロボット産業の進展には、経済活動の一環として持続的に実践する全社会的な施策が必須となり、また、新規産業の持続性については、市場のクリティカルマスの確保が必須である。表 1.1 は、2008 年度の日本ロボット工業会の調査[2]で提示されたサービスロボットを含む R T 製品の将来市場規模推定である。また、図 1.3 は、この表の大分類の、ものづくり・R T 製品、安心・安全、生活・サービスに関する 2030 年までの市場規模をグラフ化したもの、図 1.4 は、2005 年度、2010 年度及び 2030 年度の、小分類の各種サービスロボットの売り上げ比率をグラフ化したものである。図 1.3 に示すように、2030 年においては、約 50%を占めるものづくり・R T 製品では 4.7 兆円、前節で述べた高齢化社会対応に係わりの深い安心・安全公共の分野及び生活サービスの分野では、各々 2.7 兆円、2.3 兆円の市場規模を予想している。図 1.4 より、詳細項目での市場規模比率を見ると、製造業に直接係わる産業用ロボット、次世代組立ロボット、セル生産、AGV 及び R T 製品の多くを占める組込 R T 自動車の合計比率は、2005 年で約 94%、2010 年で約 86%、さらに 2030 年には約 38%と、縮小していき、製造業以外の分野でのサービスロボットの比率が増加していくと推定されている。ニーズと適用環境が明確であり、採算性などの事業的・経済的実績がある、製造業と自動車業に係わる上記の分野に関しては、2010 年度現在の製造業向け産業ロボットの約 0.8 兆円、また組込 R T 自動車の約 0.2 兆円の市場規模を基点に、世界の製造業規模や自動車保有数の拡大に従い、推定のように右肩上がりの成長を遂げると考えられる。一方、その他の非産業ロボットとして定義されるサービスロボットの市場の伸びは、一部の掃除ロボット[3] [4]等に限られまだ顕在化しているとは言えない。上記の将来市場予測が成立するためには、それに見合うユーザーメリット、事業メリットが明確となり、利益率の高いサービスソリューション事業が成り立つことが条件となろう。この解を求めて、多くのメーカーがロボットを活用したサービスコンセプト[5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13]を試行し、国策としては、サービスロボットの普及を促進するために、実用システムの技術開発、安全基準の確立や各種法環境などの環境整備に力を注いでいる。

このような社会動向から、筆者らも 2000 年代に入り、ビルサービスロボット[14]、掃除ロボット[15] [16]等の、サービスロボットの実用化に向けた開発に着手した。さらに、上記の国策の流れの一環として、2004 年に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「次世代ロボット実用化プロジェクト」が開始され、筆者らはこれに参加し、本論文の研究対象とする人間共生ロボット EMIEW (Excellent Mobility and Interactive Existence as Workmate) [17]の開発を行った。

表 1.1 RT製品の将来市場規模推定

(単位: 億円)		2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年	備 考
もの づくり ・ RT製品	産業用ロボット	6,766	7,817	8,556	9,384	10,313	11,359	自動車と電気機械分野は、次世代組立、セルロボットにシフトすると仮定し伸び率を半減にして推計。数値は輸出を含めた出荷額。
	次世代組立ロボット (自動車用)		1,072	2,655	4,255	5,925	7,691	輸出を含む。輸出は一律に国内出荷額の50%と仮定。
	セル生産 (電気機械)		130	1,465	2,999	4,846	7,147	ロボットセルは電気機械分野のみを推計。輸出は2010年に国内出荷の50%、以降、年率5%で比率が増えたと仮定。
	AGV (無人搬送車)	150	171	223	292	382	499	
	組込RT家電	91	283	1,218	2,401	3,834	5,516	2005年実績値は、ジョーパ+ルンパ+エアコン気流制御の推定値
	組込RT自動車	540	2,330	4,120	5,910	7,700	9,490	先進自動車(ASV)のうち車両の動作を自動的に制御するRT部分の価格。※昨年度NEDO調査を参考に計算。
	農業	200	275	1,473	2,036	2,666	3,588	
	建設	220	429	708	987	1,266	1,545	ブルドーザと油圧ショベルの無人化施工を推計
	小計	7,967	12,507	20,418	28,264	36,932	46,835	
安心・ 安全	手術・診断用RT		162	643	1,146	1,676	2,242	手術支援RT+内視鏡RT+リハビリ支援RT
	医療施設用RT		4	492	980	1,467	1,955	病院等の受付、案内、搬送等
	介護・福祉 (施設用)	2	79	1,099	2,727	5,237	9,012	2005年の実績値は、介護・リハビリと介護介助を合算したもの
	介護・福祉 (個人用)		9	1,279	2,708	4,109	5,522	
	レスキュー		6	12	58	291	583	
	メンテナンス		67	987	2,550	4,615	7,641	
	小計	2	327	4,512	10,169	17,395	26,955	
生活・ サービス	家庭用サービス	3	138	590	1,853	4,500	9,606	コミュニケーション、癒し、ヘルスケア等の用途を含む。
	教育	4	53	104	258	350	430	
	ホビー	11	61	245	694	1,499	1,981	ペット・オモチャ型・ホビーロボット
	アミューズメント		100	223	376	556	879	アーケードゲーム機、テーマパーク を推計。
	業務用サービス	1	72	1,605	3,723	6,231	9,645	商業施設、空港、博物館の案内及び搬送、清掃ロボットを推計。
	小計	19	424	2,767	6,904	13,136	22,541	
総合計	7,988	13,258	27,697	45,337	67,463	96,331		

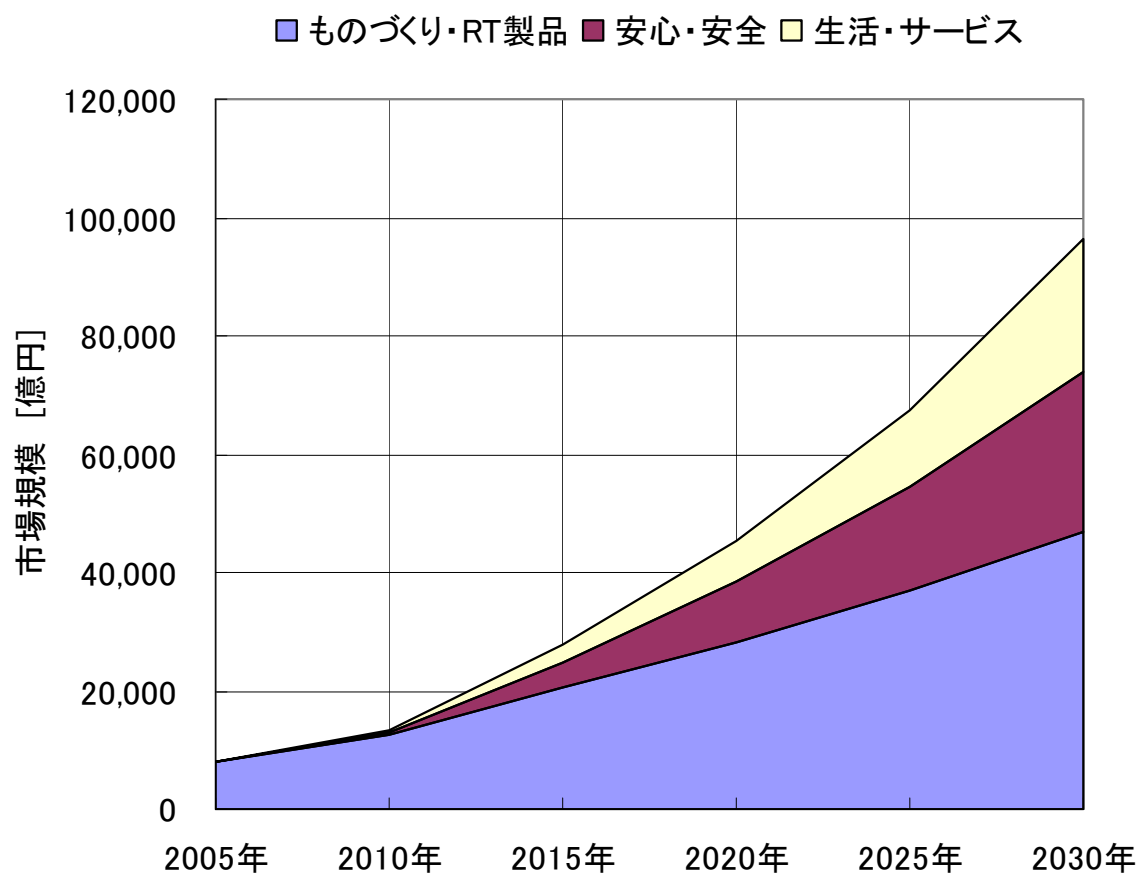
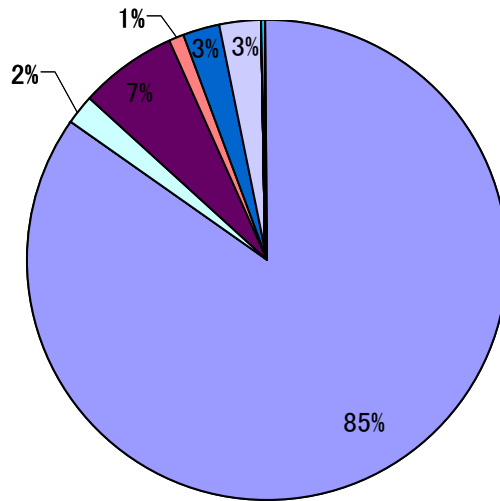
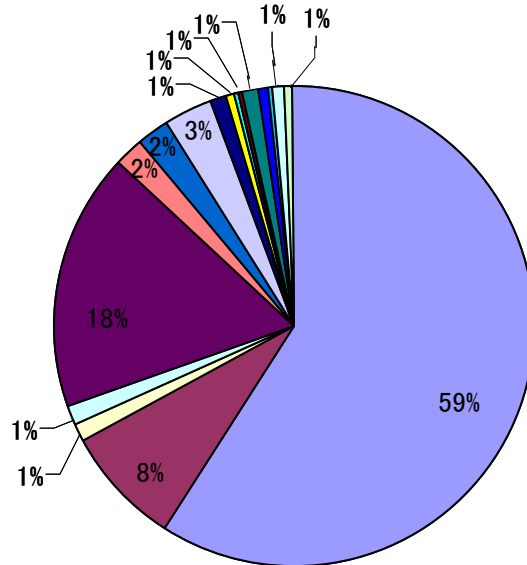


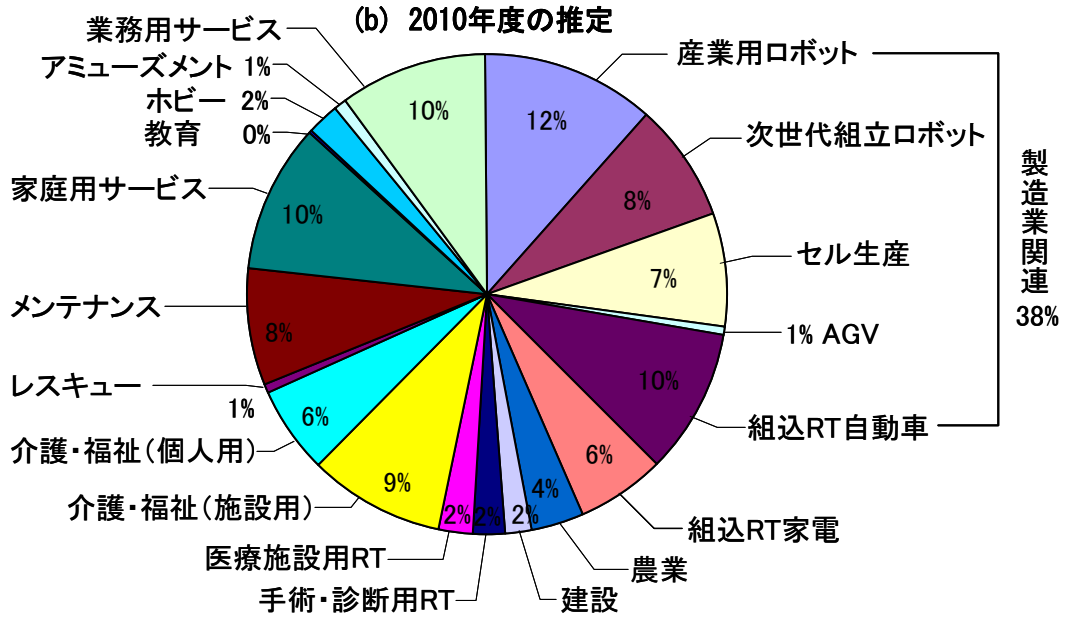
図 1.3 RT市場規模の将来推移推定



(a) 2005年度の実績



(b) 2010年度の推定



(c) 2030年度の推定

図 1.4 RT市場の内訳比率

1.2 本研究の目的

前節で述べた背景から、「人間共生ロボット」の実現を目指した開発を推進している。ここで言う、人間共生ロボットとは、人と同じ空間で暮らし、人の作業を支援するロボットである。この種の実用ロボットは、次の3つの条件を満足すべきであると考える。

- 1) 人と生活や作業の場を共有できる
- 2) 人との親和性が高いコミュニケーションができる
- 3) 人の役に立つ能力を備える

条件1)は、人間共生ロボットにとって基本的かつ重要な機能であり、人と同じ場で、人に対しサービス作業を行ったり、人と協働したりする場合に、まず人に対し危害を加えず、人の動きや作業を邪魔せず、効率良く、信頼性の高い仕事を安全に実行できることを要求するものである。例えば、作業を基本的な移動作業と考えた場合、人や周囲の構造物に衝突することのない安全性、人の動きに合わせて移動することができる俊敏性を求められる。

条件2)は、人との情報のやり取りを行いながら働く人間共生ロボットに対する、もう一つの基本的な要求である。ロボットが人から情報を受け取る手段としては、キーボードやタッチパネル等の端末からの直接的な情報入力が高確率な手段であるが、音声対話の様な、人にとってより日常的で自然な情報交換の手段が可能であれば手間がかからず、特に端末の取り扱いに不慣れた高齢者等のユーザーに対し利便性が向上する。さらに、人のように話し言葉以外に顔の表情や身振り手振りのような非言語表現が可能であれば、情報伝達がより確実になり、またユーザーのロボットに対する心理的距離が縮まり、より円滑なコミュニケーションが可能となる。このような人に対して寄り添う親和性の高いコミュニケーション能力が、人間共生ロボットの社会受容性を形成する一つの要素になると考えられる。

条件3)は、ロボットを用いたサービスアプリケーションに対する本質的要求である。製品としてのロボットは、何らかの形で人の作業を支援し、人ではなし得ない価値を人に与えることを求められる。ここで最も大事な点は、ロボットに何をやらせるかというニーズの把握と、それに基づくサービスコンセプトである。一方、シーズはこれを実現する手段として十分なものが開発される必要がある。サービスアプリケーションが情報サービス系であれば、有用な情報コンテンツの構築と、条件2)で述べたコミュニケーション能力の高度化が必要とされる。また、家事支援等の物理的な作業を伴うサービスアプリケーションに対しては、その作業に耐えるハードウェア、自律もしくは半自律的に作業を遂行することが可能な知能制御技術及びそれを支えるセンシング技術が必要となる。

これらの技術を進化させることで、将来的には、オフィス環境や更には一般家庭内

など社会の広い範囲で人の作業を支援する人間共生ロボットの実現を目指す。

筆者らは、このようなロボットの開発の第一ステップとして、人間共生ロボットの基本機能である移動の技術を固めるために、条件1) に対しては、安全かつ俊敏な移動を実現することとした。移動形態としては、車輪型移動、クローラ型移動、脚型移動等があるが、まず、屋内外の環境の多くの場所にて適用可能で、移動効率が良くかつ移動の安全性が高い車輪型移動を選択した。また、対人サービス機能の基礎を固めるために、条件2) に対し、音声認識性能の高度化を図るとともに、親和性の高い身体およびモーションによる非言語対話の効果を確認することとした。さらに、条件3) については、物理的作業機能は基礎の移動機能をベースとし、条件2) に対して築くコミュニケーション能力を有効に活かす、情報サービス系のサービスアプリケーションの実証を行うこととした。これらの技術を総合的に実証するプロトタイププラットフォームとする方針で **EMIEW** の開発を進めた。

本研究は、条件1) 2) 3) の要求を実現する **EMIEW** のシステム構成の研究、さらには、条件1) の要求である、俊敏かつ安全な移動を実現する走行制御方式及び衝突回避制御の研究を目的とする。

1.3 従来の研究

1990年代末の2足歩行ヒューマノイドの発表以来,種々のサービスロボットの実用化研究が進められてきた.ここでは,EMIEWに類似する車輪移動型の人間共生ロボットの開発例を取り上げ,本研究との比較を行う.

従来の人間共生ロボットとしては,エンターテイメント用途[5],家電情報サービス用途[6][7],接客・販売支援等の一般客相手の作業用途[8][9][10][11][12][13]等のものが開発され社会実証試験が行われており,国外でも,家事支援用途[18],案内用途[19]等の実験的な運用が試みられ,また人間共生ロボットプラットフォーム[20]の開発が進められている.これらのロボットの形態は,多くの場合,人間共存環境に存在する作業対象,すなわち人間や机等の家具等に対する働きかけのために,身長は大体人間と同様の設定となっている.また,人間が作業をする環境で,人間と同等の移動をさせるために,ロボットの床面占有面積は,人間の寸法仕様に近いものとなっている.従って,ロボットの身長と床面占有面積の比率は,必然的に人間に近いものになり,移動システムとしては,自動車などの静的安定を保つシステムに比べ,重心が高めの構成となる.これらの人間共生ロボットの多くは,ロボットの底面に配した駆動輪およびキャスタなどの補助輪を配した移動機構を備え,車輪接地点を結んで形成される多角形の安定領域内に,ZMP(zero moment point)を維持することで,ロボットの姿勢を安定に維持し移動を行う.このため,加速・減速時の慣性力に対し,ロボットの転倒を防止するために,ロボットの構成要素の内,重量の重いものをなるべく下に配置し重心を下げ,安定領域を広げるために可能な限り床面占有面積を広げるといった設計上の工夫がされる場合が多い.この問題に対する解決策として,同軸2輪の駆動輪の接地のみで走行を行い,移動体の姿勢を動的なバランス制御により安定に維持する倒立振り移動機構を採用するロボット[21][22][23][24]や搭乗型移動システム[25][26]が増えてきた.これらは,いずれも人の邪魔をせずスムーズな移動を実施することを目的として,重心が高くても床面占有面積を容易に狭くすることが可能な倒立振り移動機構を採用している.筆者らが開発を進めたEMIEWにおいても,同様な思想から移動システムとして,倒立振り移動機構を採用している.従来の,倒立振り移動機構の適用は,上記した姿勢の安定性と床面占有面積低減の両立と,余分な補助輪を用いない2つの駆動輪のみの移動による小回りの良い機動性を狙ったものであるが,EMIEWの開発においては,これらの特徴を活かした上で,さらに移動の安全性および俊敏性を向上する開発を進めた.1点は,第2章で紹介する,ボディースイング機構による側面方向重心移動による,旋回運動の走行信頼性の向上,2点目は,第3章で紹介するフィードフォワード走行制御方式の適用であり,ロボットとの接触による人に対する圧迫力を低減することによる安全性の拡大,ロボットの機動限界の加減速を安全に引き出すことによる俊敏性の確保,倒立振り移動機構特有の加減速時の姿勢・位置変動の挙動を予め繰り込んだ走行制御による移動精度の向上である.

人間共生作業においては,人間を傷つけない安全性の保証が必須であり,上記の倒

立振子移動機構は、実作業に有利な高い重心のロボットを安全にかつ俊敏に走行させる手段である。これを下位レベルの安全性の保証として、さらに、その上位の走行軌跡生成の段階での安全保障が必要である。すなわち、ロボットが目標地点に到達するまでに遭遇する軌道上の障害物を回避して安全に走行するための、衝突回避制御が必須となる。第4章に紹介するように衝突回避アルゴリズムはこれまで多くの研究がなされており、人間共生ロボットの開発例でも、超音波センサで発見した固定障害物を回避して人を追従する[27]といったものがある。また、実証レベルで稼働する多くのサービスロボットは、歩行者のような動的障害物を発見した場合停止して、やり過ごす安全戦略を取っている。これに対し、EMIEWの開発においては、移動の俊敏性と安全性の両立を迫り、ロボットの走行を継続しながら多数の動的障害物の移動速度を推定し実時間で衝突を回避する制御アルゴリズムを開発し、その性能を実証した。

人間共生ロボットのサービス機能として、人との情報交換は基本的な機能であり、音声対話および人に近い身体のコモーションを用いた非言語会話による親和性の高いコミュニケーション能力を目指す研究[9][28][29]が多く見られる。EMIEWの開発においても、コミュニケーションにおける対人親和性を重視し、第2章に紹介するように、親和性の高い人型の外観デザインとコモーション制御、ヘッドセットマイクのような特別な道具を必要としない遠隔音声認識技術の導入により、人と人が対面して話し合うような親和性の高いスムーズな対話を実現した。

1.4 本論文の構成

本論文では，第2章で人間共生ロボット EMIEW の開発コンセプト，システム設計及び移動機能と対人コミュニケーション機能による人間共生作業の実証の結果について述べる．第3章では EMIEW で採用している倒立振子移動機構を適用した移動システムの俊敏かつ安全な走行を実現する走行制御方式，さらに第4章では，安全な移動の基礎となる EMIEW の衝突回避制御方式について論じる．

第2章 人間共生ロボット EMIEW のシステム

2.1 はじめに

本章では、本論文の主テーマである第3章及び第4章に記載の移動制御技術の適用先であり、その性能実証のプラットフォームとなった人間共生ロボット EMIEW の設計コンセプト、ハード構成、制御ソフト構成及び EMIEW を適用して実施した人間共生サービスの実証結果について述べる。EMIEW の基本的な開発方針は、1.2 節及び 1.3 節で述べたように、人間共生環境において安全かつ俊敏な移動が可能であること、さらに、親和性の高い対人コミュニケーションが可能なことである。

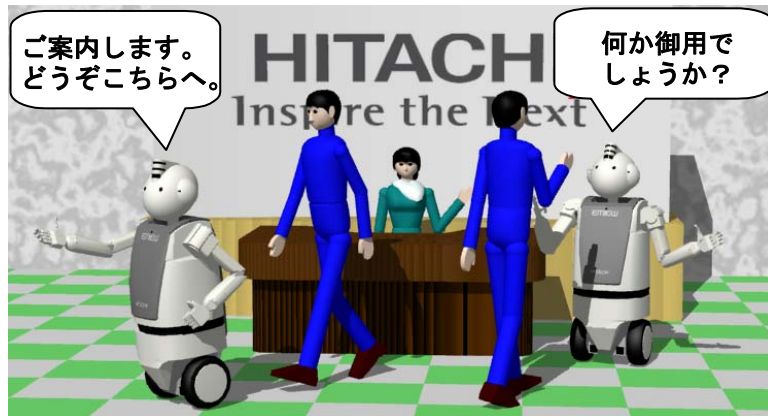
なお、EMIEW は人間共生ロボットの総体としての実証評価を目指し、(株)日立製作所の各部門の技術を統合させて完成を目指した。本章で述べる EMIEW の開発コンセプトの策定及びハードウェア及び制御ソフトウェアは、筆者らが主体となり研究開発を行った。この中で、対人コミュニケーション機能に適用した音声認識技術と音声合成技術については、(株)日立製作所・中央研究所が主体となって研究開発を行った。一方、ロボットの機械的特性を活かした非言語対話機能及び外観デザインについては、(株)日立製作所・デザイン本部の協力を得て、筆者らが主体となって研究開発を行った。

2.2 アプリケーションの仮定

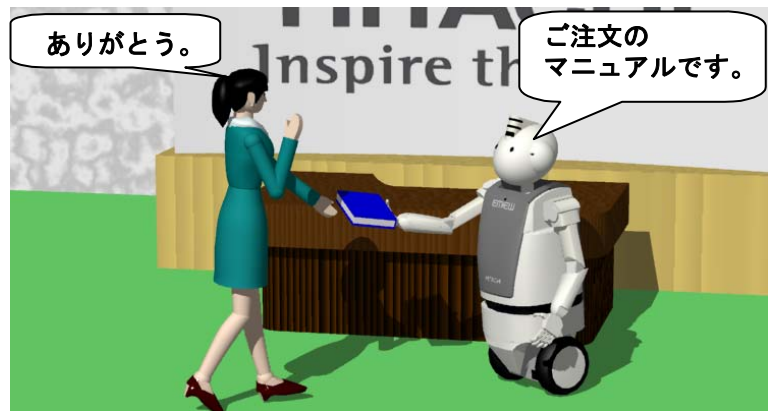
EMIEW の開発においては、そのサービスアプリケーションとして、図 2.1 に示す 3 種の作業を仮定した。いずれも、オフィス環境での作業支援を目指したもので、主に移動要素技術と対人コミュニケーションの要素技術を必要としたものである。図 2.1 (a) は、会社やデパート等のインフォメーションデスクでの受付作業及びお客の案内作業を行うもので、不特定のお客との確実に親和性のある対話と、オフィスや売場等の多数の人間が往来する環境での安全かつ迅速な誘導移動作業の機能を必要とする。図 2.1 (b) は、オフィスでの郵便物や書類等を、人から人に受け渡す物流支援作業である。機能的には、事務室の様に椅子の位置が不定な比較的複雑な障害物と多数の人間が往来する環境での安全かつ迅速な移動作業の機能を必要とする。物の受け渡しについては、図に示すようなマニピュレータによる手渡しは必須ではなく、書類入れ等の専用ツールの併用でマテリアルハンドリングを実施しても良い。最後の図 2.1 (c) は、夜間のオフィスの巡回警備作業である。基本的な作業としては、建屋内通路等の規定の巡回コースを自律走行し、動く物体等を不審者として発見し、警備センターへの通報と通信を開始し、不審者を追跡して警告を与えるといった動作を想定している。このケースでは、基本的に不審者を追尾可能な迅速な移動性能が必要となる。警備の自動化については、既存の監視カメラ網が普及しているが、遮蔽物が多く盲点の発生しやすい計算機室や駐車場等の監視では、多数の監視カメラを要しコスト高になり、移動型カメラとしてのロボットの活用が有効になる。

これらのアプリケーションのロボット化に対する有効性は、基本的にはそれまで人間が行っていた作業の代行による経費の節減である。従って、いずれの作業においても、現状で多数の人員を用いる作業環境で特に有効になる。また、昼間の作業である (a) (b) と夜間作業の (c) は、同様な情報サービス系の 1 種類のロボットでこなすことも可能であり、24 時間フル活用によるコストパフォーマンスの向上も見込める。また、経済性以外のロボット化のメリットは、(c) の警備作業における警備員の事件による損耗を避け得ることが上げられる。テロ等の世界的な治安の悪化等を考慮すると、今後必要性が高まってくると考えられる。ロボットの外観デザインやコミュニケーション機能による対人親和性の効果は、(a) や (b) の用途で、有効に生かされる。例えば、(a) の派生作業として、百貨店や量販店等での試食、試供品配布等の促販作業等に用いた場合、人間以上の効果を持つことが期待される。

以上の想定から、不特定多数の人が往来する環境で安全かつ俊敏に移動し、対人親和性の高いコミュニケーションが可能な人間共生型ロボットの開発を目指した。



(a) 受付・案内支援



(b) オフィスでの物流支援作業



(c) 夜間巡回監視作業

図2.1 人間共生ロボットの活用イメージ

2.3 設計コンセプトと開発仕様

EMIEW の開発仕様を表 2.1 に示す。EMIEW の身長は、おおよそ人間の子供の身長と同等な 1.3 m とした。これは、人間の寸法諸元に合わせて構成された環境で、人間と供に働くことを最終目標としているためである。例えば、平均的な高さ 0.7 m の机の上に置かれた物を扱ったりすることを想定している。EMIEW の全体質量は、安全性を考慮して人間と同等の体重を目標として 70 kg 以下とした。1.3 節で述べた、協働する人の邪魔をしないための床面占有面積の低減については、人間に近い寸法仕様として、胴周りで幅 0.5m×厚み 0.5m とした。

EMIEW の開発コンセプトの一つは、俊敏な移動である。2.2 節で述べた案内作業では、客を案内するために、客の歩行速度以上の速度余裕を持って先行誘導する必要がある。ロボットの速度が遅く客がそれに従わされる事になれば、ストレスとなりサービスとしては不合格となる。また、巡回監視作業では、逃げる不審者を追跡して証拠の映像を記録する、また警告を発生する等の必要がある、このためやはり、ロボットには人間並みの移動速度が要求される。そこで、EMIEW の最高速度は 1.7 m/s (6 km/h) とした。この速さは、人間が早足で歩く速度と同等である。さらに、素早い発進や安全かつ俊敏な停止を実現するために、走行時の最高加速度を及び最高減速度は、 4 m/s^2 とした。また、旋回走行時に EMIEW に働く遠心加速度の許容値も、 4 m/s^2 とした。また、小回り性能の追求として、旋回の機動性については、最高速度 1.7 m/s (6 km/h) の走行条件で、上記の遠心加速度限界で制限される最小約 0.5 m の旋回半径を目標とした。

もう一つの重要な EMIEW のコンセプトは、安全な移動である。開発目標としては、走行状態で周囲を歩き回る複数の歩行者との衝突を回避することとした。EMIEW は、常時その前方領域に存在する人間の有無を探索し、発見した人間の位置に基づき、衝突を回避するように、移動軌跡を修正する。基本的に走行制御により歩行者との衝突は未然に防ぐシステムとして設計するが、万が一ロボットと人間との間に接触が発生しても、人体に過大な衝撃や圧迫力を与えない対策が必要である。このためには、ロボットのボディーを柔軟な構造にする等の手段に加え、今回の研究では、第 3 章に詳細に述べるロボットの位置決め剛性を柔軟に設定する手段の実現を試みた。

アプリケーションの展開として重要な EMIEW の 3 番目のコンセプトは、人間との親和性の高いコミュニケーションであり、EMIEW は、2つのコミュニケーション手段を持たせることとした。主たるコミュニケーション手段は、音声による会話である。スムーズで親和性の高い会話を行うためには、特別な道具を用いる必要のない自然な対話をする能力が必要となる。また、EMIEW が働く人間共生環境は、多くの人が発生する背景騒音が大きいと思われ、遠隔音声認識の耐雑音対策が重要になる。そこで、EMIEW の開発においては、耐雑音性の高い遠隔音声認識技術を、(株)日立製作所・中央研究所から導入し、多数の人が集合した環境での暗騒音条件化で、接話マイクローンを使用せずに、不特定話者と 1 m 以上離れても会話ができることを目標とした。

さらに、会話の開始の信頼性を向上するため、ロボットの周囲 360° の音を常時聴き取り、最初の発声を捉え、自動的に会話を開始することを可能とすることとした。音声対話の表現手段については、高品位音声合成技術を（株）日立製作所・中央研究所から導入し、人間と同様な自然でなめらかな話しを可能とすることとした。

音声会話を親和性の面で補助する、すなわち対話をする人間の情緒に訴えかける第 2 の表現手段として、マニピュレータや身体のマーションを用いた非言語コミュニケーションの機能を備えることとした。そこで、人間と同様な動きが可能な両腕マニピュレータを備えることとし、このマニピュレータと全身の動作及び高品質合成音声を駆使することで、人間と話しているような親和性の高い対話が可能なことを目標とした。さらに、EMIEW の外観は、冒頭に記載したように、概ね人間の寸法に近く、外観形状もデフォルメした人型とし、見た目からの親和性の向上を図っている。

表 2.1 EMIEW の開発仕様

身長	1.3 m
床面占有面積	肩幅 0.7 m, 胴幅 0.5 m×胴厚み 0.5m
体重	約 70 kg
俊敏性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最高移動速度：1.7 m/s (6 km/h) ・ 最高加減速度：4 m/s² ・ 最小旋回半径：0.5 m (1.7 m/s 時)
安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 複数歩行者に対する衝突回避 ・ 接触時の圧迫力緩和
対人コミュニケーション	<p>((株) 日立製作所・中央研究所による開発)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔音声認識：接話マイクロフォン無しで 1 m 以上の距離での対話 ・ ロボットの全周囲にわたる発声方向の検出 ・ 高品位音声合成
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全身モーションによる非言語コミュニケーション <ul style="list-style-type: none"> ・ マニピュレータ：6 自由度, 手先先端速度：1 m/s ・ ハンド：1 自由度 ・ 頭部：2 自由度 ・ 親和性の高い準人型の外観

2.4 システム構成

2.4.1 全体システム

図 2.2 に EMIEW の外観及び主要構成要素を示す。前節で述べたように移動機構としては、同軸 2 輪型の倒立振子移動機構を採用している。その上の上体は、ボディースイング機構により、倒立振子移動機構を足場として側面方向の任意位置に傾斜できるようになっている。移動制御に係わるセンサとして、胴部前面にレーザスキャナが装備されており、走行環境に存在する障害物や歩行者などの形状を計測する。倒立振子移動機構の前面と後面には、足元との背の低い障害物を検出する赤外線反射型の床面障害物センサを設けている。胴体背面には、リチウムイオン電池のカートリッジを内蔵しており、人手で交換する構成となっている。上体には、ほぼ人間の寸法と同等な双腕マニピュレータが設けられている。各々 6 自由度の関節を持ち、先端には握り・開放の 1 自由度を持つ 5 指ハンドが設けられている。頭部姿勢はパン、チルトの 2 自由度の制御が可能な構成となっている。頭部の両耳に当たる部位には 2 個、首部の周囲には 6 個、合計 8 個の無指向性マイクロフォンが装備されており、これらからなるマイクロフォンアレイにより、遠隔音声認識を実施している。首の根元にはスピーカーが設置されており、内蔵された高品位音声合成装置により生成された音声を発生する。頭部の額に相当する部分には CCD カメラが装着されており、ロボット周囲の監視や、対面する人間の顔認識に用いられる。全体の寸法は、前節の開発仕様で述べたように、身長 1.3 m、胴幅 0.5 m、胴厚さ 0.5 m、体重は約 70 kg とほぼ人間に近い。さらに、外観も下半身が車輪型移動機構になっているものの、上半身はほぼ大人の体格で全体的に丸みを帯びたユーモラスなデザインとし、ロボットと対面する人間が親近感を持つように配慮している。胴体の外装の素材には、自動車のバンパーに使用されるエンジニアプラスチックを使用しており、柔軟性に富み割れにくく、仮にロボットが人間に衝突した場合には衝撃を吸収し、また破壊破片によるけがが無いように配慮している。

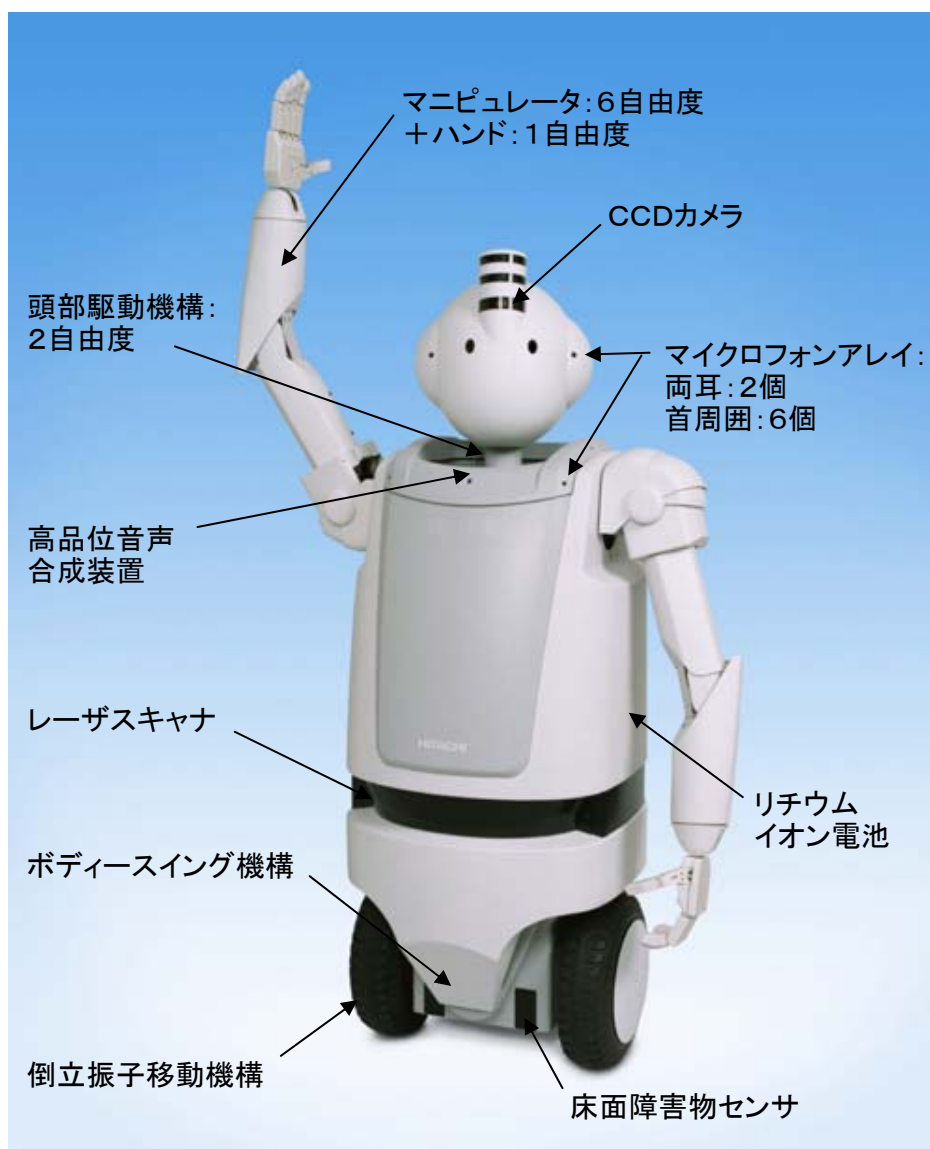


図 2.2 EMIEW の外観及び主要構成要素

2.4.2 移動システム

EMIEW は、倒立振子移動制御により姿勢のバランスを保ちながら走行する倒立振子移動機構を備える。1.3 節で述べたように、人間共生環境でのロボット運用に対する倒立振子移動機構の適用は、ロボットの姿勢変動を抑え常時一定に維持する制御を行うために、以下のメリットをもつ。

- 1) 高い重心位置の設定が許されロボットの床面占有面積を低減できる。
- 2) ロボットの背中を押される等の外乱に対する姿勢の安定性が高い。
- 3) 安全のための急停止などの急峻な減速に対しても姿勢を安定に維持できる。
- 4) 走行の妨げになる補助輪が無く 2 輪の駆動輪のみの接地で走行するためにその場旋回等の小回り走行性能に優れている。

一方、倒立振子移動機構の採用のデメリットとしては次の問題がある。

- a) 電源が遮断されると姿勢制御を失う。
- b) 加速、減速時に、姿勢変動を伴うため、例えば車軸位置に規定した位置基準が付随的に動くため、軌跡位置制御の精度が低下する。

前者の問題に対しては、搭載電池の残存容量の監視を常時行いパワーダウンの前にロボットを静止モードに移行することで対処した。また後者の問題に対しては、第 3 章に述べるフィードフォワード型走行制御により精度の良い走行を実現した。

EMIEW は、倒立振子移動制御を行いながら任意の 2 次元移動を行うが、その倒立振子移動制御の構成は、図 2.3 に示すようになっている。ロボットの旋回運動の制御に関しては、本質的には、進行方向の矢状面内の運動とロボットの旋回運動との相互干渉を考慮した制御を考慮すべきであるが、ロボットの旋回角速度が $60^\circ/\text{s}$ 程度の低速運動の場合は、それぞれを独立のものと切り分けて制御しても十分実用に耐えることが知られている[30][31]。そこで、ここでも同様の方針で制御系を構成した。ロボット機構は、第 3 章の式 (3.3) で定式化される矢状面内の運動モデルと、ロボットの鉛直軸周りの慣性モーメント J で表される旋回運動モデルに分けてモデル化している。図中の $\mathbf{x} = \mathbf{y} = [\theta_0 \quad \dot{\theta}_0 \quad \theta_1 \quad \dot{\theta}_1]^T$ は、進行方向の矢状面内の運動に関する状態量であり、 θ_0 は左右の駆動輪間の平均回転角度、 θ_1 は上体の傾斜角度である。また、状態量 $\boldsymbol{\phi} = [\phi \quad \dot{\phi}]^T$ は旋回運動に関する状態量で、 ϕ は旋回角度である。ロボット機構へ

の入力トルク τ_{right} 及び τ_{left} は、左右の駆動輪の駆動トルクであり、各々の和が矢状面内運動の入力になり、各々の差が旋回運動の入力になる。ここで、 r は駆動輪の半径、 L は駆動輪のトレッド幅である。 \mathbf{K} は、1入力4出力系の線形2次最適レギュレータであり、目標状態量 \mathbf{X}_r に対し状態量 \mathbf{y} をフィードバックすることにより、ロボットの姿勢を安定に維持しながら所定の走行速度で走行する。 \mathbf{K}_t は旋回制御のための1入力2出力系の線形2次最適レギュレータであり、目標状態量 ϕ_r に対し状態量 ϕ をフィードバック制御し、倒立振り移動制御とは独立に旋回角度及び角速度が制御される。図 2.3 中 τ_r は、フィードフォワード制御用の補償トルクの入力であるが、詳細については、第3章にて述べる。入力トルク τ_{right} 及び τ_{left} は、 \mathbf{K} の出力の半値に \mathbf{K}_t の出力の半値を加算して得ている。なお、EMIEW の走行動作実証では、最高角速度 $200^\circ/\text{s}$ の旋回運動が可能であった。

前節で述べたように、EMIEW は移動制御の補助手段として、全身の重心位置を左右の側面方向に移動するための、ボディースイング機構を備えている。この機構は、図 2.4 に示すように、旋回移動でロボットに加わる遠心加速度を基に、全身の重心位置を制御する。この制御では、走行面に投影された ZMP (Zero Moment Point : ロボットの重心に加わる遠心力及び重力に起因する回転モーメントの総和が零となる空間位置) を、左右の駆動輪接地点の中間位置に維持するように、上体の側面方向の姿勢を操作する。倒立振り移動機構の制御においては、接地摩擦力の不足により駆動輪が空転した場合、姿勢維持制御が著しく不安定になる弱点があるが、上記の制御により、左右の駆動輪の接地力 F_r 及び F_l を常に均等に維持できるので、大きな遠心加速度が働く高速かつ旋回半径の小さな俊敏な走行も安定にこなすことができる。

図 2.5 に移動機構の構造を示す。移動機構は、外径 0.28 m の2つの駆動輪を備えており、2つの走行モータ (150 W, ブラシレス DC サーボモータ) が、駆動輪を直接駆動する高精度遊星減速機 (出力軸バックラッシュ : 3分以下) と共に筐体に内蔵されている。ボディースイング機構の揺動旋回中心位置は、2つの駆動輪の回転中心と同じ高さに設定しており、揺動角度範囲は、 $\pm 25^\circ$ である。さらに、バーチカルジヤイロセンサが移動機構の筐体の上に設置されており、このセンサにより検出された鉛直方向を基準とした絶対的な姿勢傾斜に基づき、倒立振り移動機構の姿勢制御が実行される。

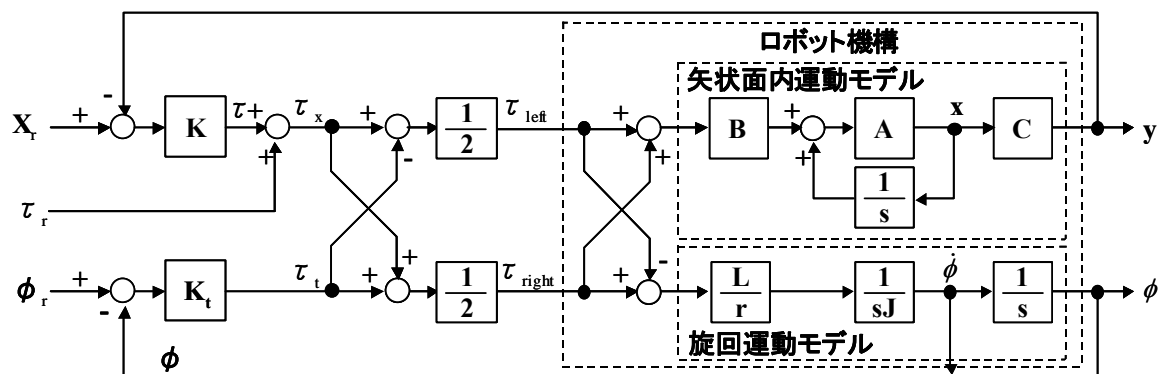


図2.3 倒立振り子移動制御系の構成

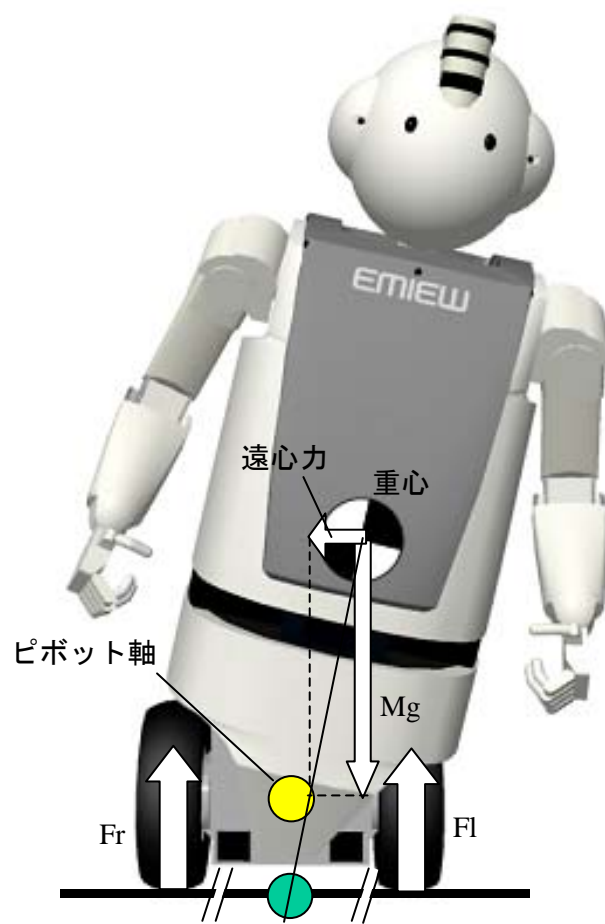


図2.4 ボディスイング機構の概念

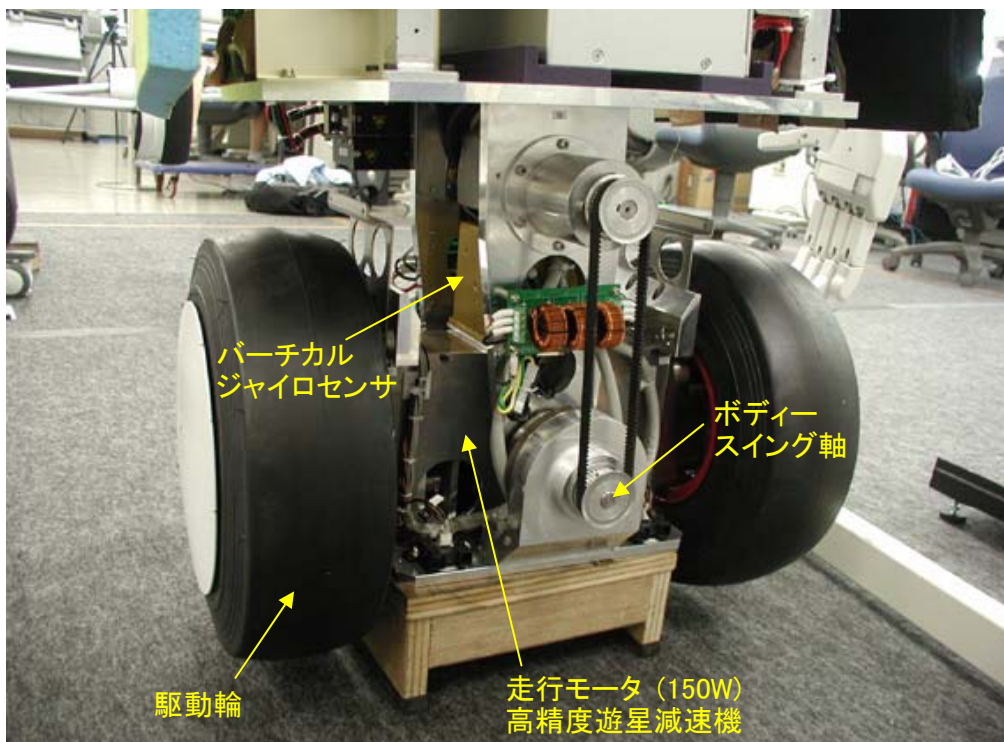


図2.5 移動機構の構造

2.4.3 衝突回避制御及び航法制御システム

EMIEW は、複雑な走行環境の中を、安全に通り抜けるために必要な衝突回避機能を持つ。衝突回避のための主力センサは、EMIEW の前方領域に存在する障害物を検出するために胴体前方に設けたレーザスキャナである。レーザスキャナの測距レンジは 8 m であり、水平方向の検出範囲は 180° である。第 4 章で紹介する衝突回避制御アルゴリズムにより、EMIEW は走行（速度 0.8 m/s (2.9 km/h)）を継続しながら歩行（速度約 1.2 m/s (4.3 km/h)）する人間を含む移動障害物を回避する。EMIEW が移動する複数の障害物を発見した場合、まず検出した各々の障害物の移動速度ベクトルに基づき、これらの障害物が将来通過するであろう移動軌跡を推定し、将来の衝突を回避可能でかつ当初の目標地点に向かう新たな走行軌跡を実時間で生成する。EMIEW は、レーザスキャナに加え、移動機構の最下端部の 4 角に床面障害物センサを備えている。これらのセンサは、赤外線型近接センサで、レーザスキャナでは補足できない床面上の高さの低い障害物を検出する。

EMIEW の航法制御には、駆動輪の回転データとバーティカルジャイロにより計測される方位角速度に基づくオドメトリー制御が用いられている。オドメトリー制御による現在位置及び方位の推定値の累積誤差は、レーザスキャナにより得られるロボットの現在位置情報により補正される。この開発では、EMIEW の絶対位置を計測するための位置基準ランドマークとして、位置座標が既知である複数の円筒（外径 400 mm）を移動環境に設置し、レーザスキャナのスキャンデータよりその中心位置を推定した。将来的には、走行環境の壁面形状などの形状データを計測し、既存の建屋地図データと比較することで、自己位置を推定する、インフラレス自己位置同定の開発を進める。

2.4.4 対人コミュニケーションシステム

本節で述べる音声認識技術と音声合成技術については、(株)日立製作所・中央研究所が主体となって研究開発を行った。一方、本節の後半に述べるロボットの機械的特性を活かした非言語対話機能及び外観デザインについては、(株)日立製作所・デザイン本部の協力を得て、筆者らが主体となって研究開発を行った。

EMIEW は、遠隔音声認識及び高品位音声合成技術により、接話マイクロフォン等のユーザー側の特別な道具を用いることなく、不特定話者との自然な対話ができる。

遠隔音声認識の処理フロー[32][33]を図 2.6 に示す。EMIEW の頭部の両耳に設置された 2 個のマイクロフォン及び首部周囲に設置された 6 個のマイクロフォンにより構成されたマイクロフォンアレイにより、EMIEW を中心として全周囲の音を計測し、8 チャンネルの音信号の相互位相差より、複数の音源の方向を同定する。このように仕分けられた音源のうち音声フォルマントを含むものを人間が発生する音声の候補として分離選別し、この候補に対し音声認識を実施する。このように、音声が発生すると推定される方向に聴音場を絞り込むことにより、EMIEW の周辺で発生する背景騒音の影響を抑制することができる。図 2.7 は、音源分離処理による雑音除去の効果を示した例であり、きれいに背景雑音が除去されているのがわかる。後に述べる展示会場でのデモンストレーションの実績では、平均騒音レベル 70 dB の背景騒音条件で、1～4 m の距離を経て遠隔音声認識が可能であった。音声認識は不特定話者の発声に対応し、識別可能な語彙は 100 語である。さらにキーワード識別機能を持ち、予め対話のキーとなる単語を登録しておくことで、聴き取ったフレーズの中に該当する単語が存在した場合のみ、対応するアクションを発生できる。

EMIEW はこの他に、頭部に設けた CCD カメラで捕らえた画像から、人の顔を認識する機能を備えており、カメラの視線を音声発生方向に向け、その視線上に人の顔を検出した場合には、音源が人間であると特定する機能を持っている。この機能により、オーディオや TV 等が発生する機械音声と人間の肉声を識別できる。

以上が、受け手としての EMIEW の能力である。これに対し、対話の発信及び表現の機能としては、発声機能と身振りによる非言語表現の 2 つの能力を持つ。

EMIEW が発生する音声は、搭載した高品位音声合成シンセサイザーにより生成される。このシンセサイザーは、予め計測された声優の多くのバリエーションの音素データベースを持ち、話し言葉のテキストデータから音素のシーケンスを生成し、さらに音素間の接続やイントネーションを自動的に最適化することで、人間の肉声と同等な滑らかで自然な発声を行うことができる。

もう一つの表現手段である身振りによる非言語表現は、情報系のサービスアプリケーションにおいて、物理的作業が本来の目的であるロボットを有効に活かせる機能である。EMIEW の開発目標の一つである親和性は、ロボットに対する人間の感性に直結する特性である。このため、第一印象としての外観は重要であり、EMIEW は人間

の形状をデフォルメした、親しみやすいデザインとした。2.4.1 節で示したように、EMIEW は、頭部に2自由度、1自由度のハンドを備えた6自由度の双腕マニピュレータとボディースイング機構の可動部を備える。図 2.8 にマニピュレータの機構を示す。マニピュレータの設計に当たっては、人間のしぐさをなるべく忠実に再現することを主眼とし、人間に近い寸法仕様の形状とし、また人間の腕のポーズを再現可能な自由度配置を選び、動作速度も人間が普通に腕を動かす程度の動作ができるようにした。人間の腕は、肩3自由度、肘1自由度、手首3自由度の合計7自由度を持つ。これに対しマニピュレータの構成では、全体的な動きの再現を重視し、肩関節には差動機構で回転軸を1点に交差する3自由度を配し、前腕の位置及び姿勢を人間と同様の動作ができるようにした。また、人間の手首横振りの自由度は比較的動きが小さいために省き手首を2自由度で構成し、肘関節の1自由度と合わせて、全部で6自由度の構成とした。これによりマニピュレータの冗長自由度を無くし腕のモーション生成過程を容易にした。肘関節には2重関節機構を用いることで、関節の動作範囲を人間並みの 120° と大きく取れるようにした。さらに、マニピュレータの動作速度を人間並みに素早くすることに関しては、マニピュレータの手先質量を軽量化する必要があり、手首機構の駆動モータを上腕部に配置し、肘関節を介したワイヤ駆動機構で手首の曲げ及びひねりの2自由度を駆動する構成とした。この設計の結果、マニピュレータの先端移動速度を人間並みの 1 m/s とすることができた。ハンド機構は、図 2.9 に示すように、人間と同じ5指を持ち、ワイヤ駆動機構による連動動作により、握りと開きの1自由度動作を行う。手のひらには、ハンドリング対象の把持と開放を確認する接触型の把持センサを設けている。

EMIEW は、このマニピュレータと頭部とボディースイング機構のモーションを連動し表情豊かな非言語コミュニケーションを実施することができる。特に、ボディースイング機構は、本来移動性能の向上のために設けた自由度であったが、上体の大きな動きによるユーモラスな表現に有用であった。また、移動機構に採用した倒立振り子移動機構については、ランダムな外乱要因による若干の位置揺らぎが発生し、これが他の研究例でも報告されているが[22]、生体の動きを連想させ親和性に寄与した。

非言語表現のコンテンツ、すなわちモーションの振り付けの良し悪しは、親和性の性能に直結する重要な要件である。ロボットのモーションコンテンツを制作するためには、上記した多くの自由度を有機的に連動させる必要があり、各自由度毎の調整によるデータ作成は非常に手間がかかる。このため、EMIEW の開発過程において、図 2.10 に示すモーションエディタ開発し、実際の俳優の動きをモーションキャプチャでデータ化し、これを機構自由度の制約に合わせて自動変換し、EMIEW のモーションデータを生成した。この結果、EMIEW は、ダイナミックで滑らかな人間に近い仕草ができ、円滑かつ親和性の高いコミュニケーションが可能となった。

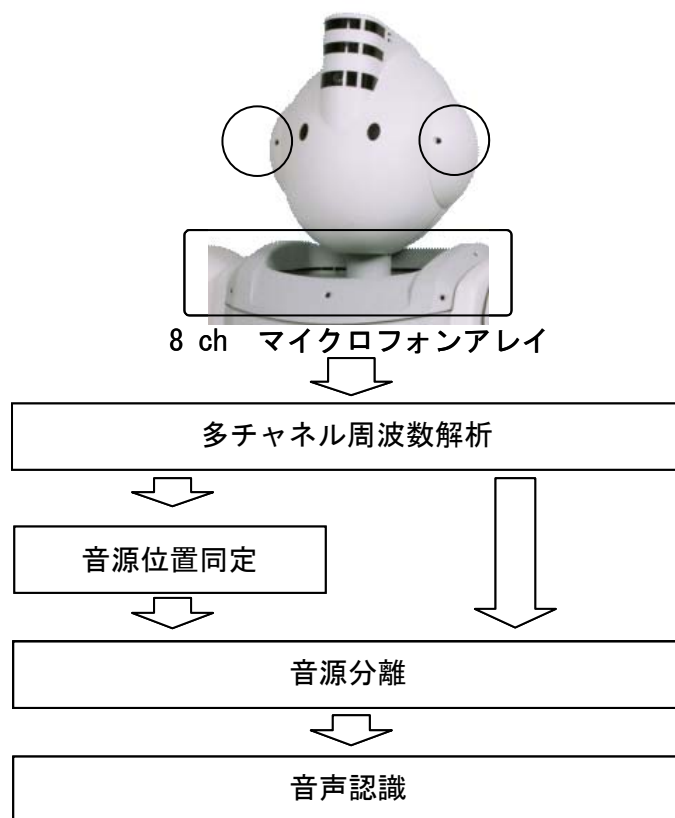


図2.6 遠隔音声認識の処理フロー



図2.7 音源分離処理による雑音除去効果の例

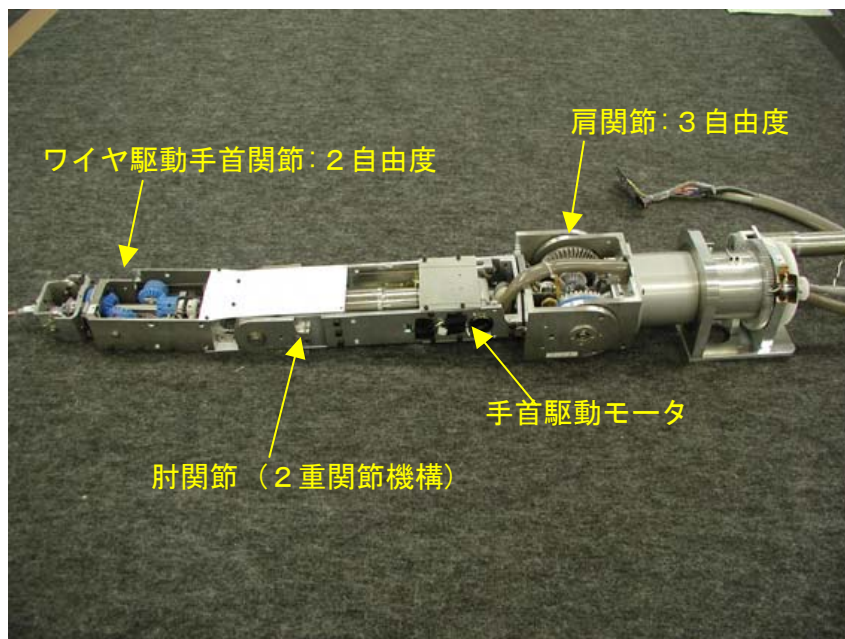


図2.8 マニピュレータ機構

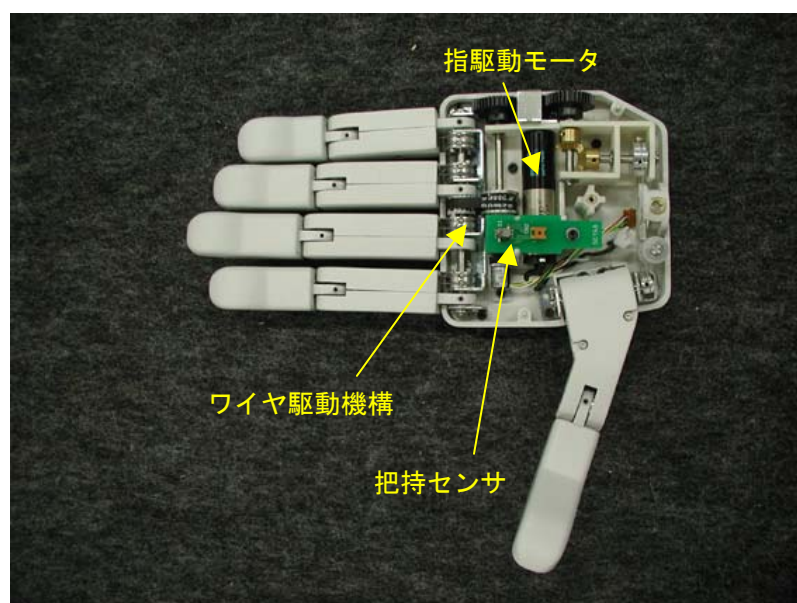


図2.9 ハンド機構



図2.10 モーションエディタ

2.5 制御システム

2.5.1 ハードウェア構成

図 2.11 に示すハード構成のように、制御システムは、ロボット全体の作業を管理する統合制御部と、それに支配される対人インターフェースとしての対話部、機構制御を受け持つ移動制御部とマニピュレータ制御部及び無線システムなどのサブシステムから構成される。統合制御部と、各サブシステムは LAN (Ethernet 100BASE-TX) で相互に結合されている。統合制御部は、CPU としてクロック周波数 933 MHz の CISC を実装しており、後述するようにセンサフィードバックを含む移動制御を実行するために組込実時間 OS を実装している。対話部は、統合制御部と同様の CPU を実装しており、実時間性よりも音声認識等の大規模演算処理の機能を重視し、OS には非実時間 OS を実装している。移動制御部とマニピュレータ制御部は、コンパクトな実時間制御システムを組むために、CPU として組込 RISC を用い、組込実時間 OS を実装している。さらに、対話部は、マイクロフォンアレイにより取得した 8 ch の音声信号から音位同定を行う処理を高速に実行するために DSP ボードを有する。無線システムは、外部 PC との通信を受け持つ。基本的に、EMIEW の大部分の動作は自律制御に基づいており、外部 PC は、EMIEW の作業状態及び内部制御状態の監視及び非常停止操作に用いられる。

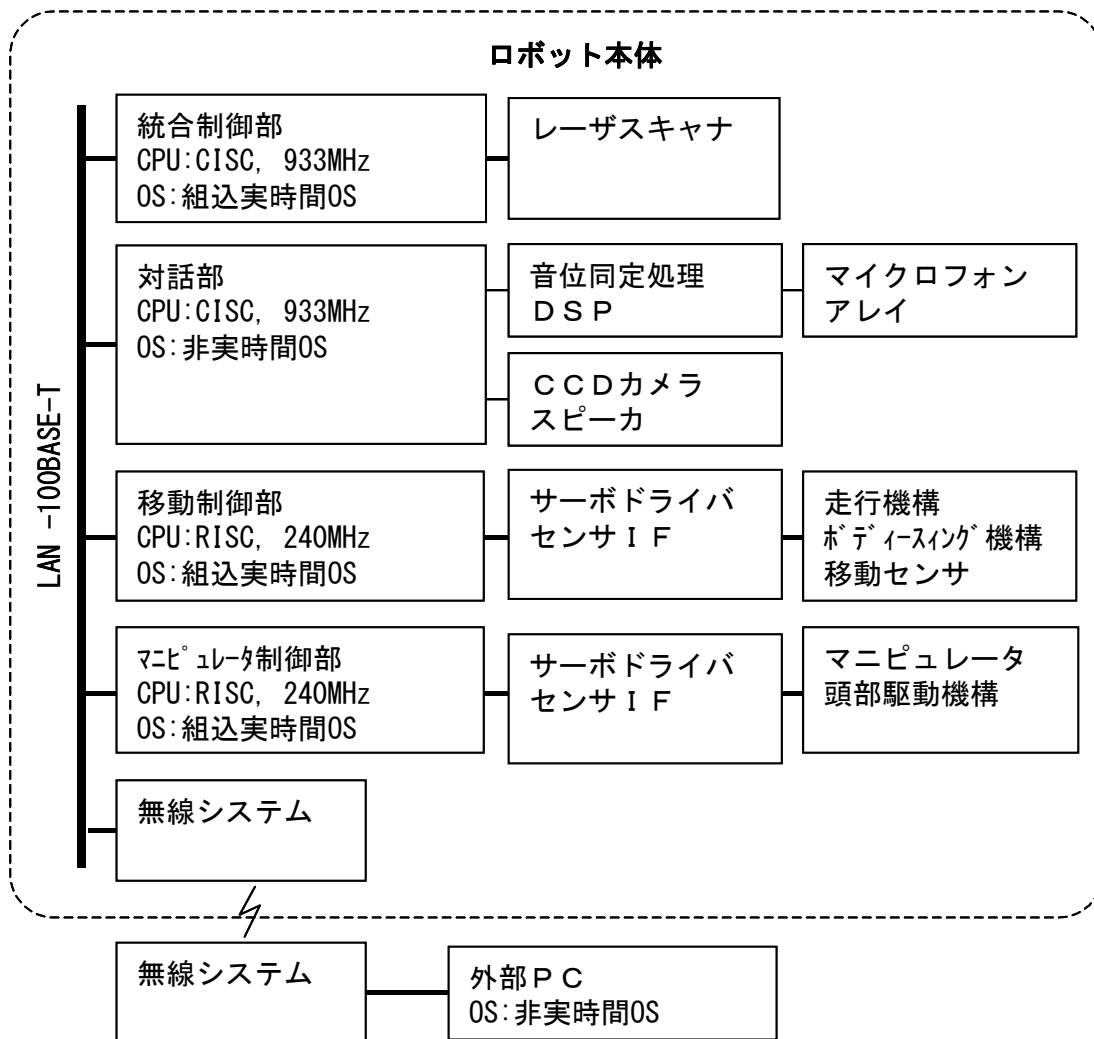


図2.11 制御システムのハード構成

2.5.2 ソフトウェア構成

統合制御部及び各サブシステムの中に構築される制御ソフトの構造は、図 2.12 に示すように、OS の下にセンサ系、モータ駆動系等とのデータ交換インターフェースとして I/O ドライバを持ち、OS 上に制御タスクに応じた複数の制御ソフトモジュールを実装している。フィードバック制御を司る制御ソフトモジュールは実時間制御を保証するために、I/O ドライバと直接情報交換を行う構成としている。一方、各システム間及び同一システム内の制御ソフトモジュール間の情報交換は、各々の通信制御を窓口として、LAN もしくはシリアル通信を介して実施する構成としている。この構成により、制御ソフトモジュール毎のタスクは分散処理されるため、各モジュールの独立性が高く平行開発が容易となっている。一般的に、このような分散処理系では、LAN の通信オーバーヘッドがネックになり、システム全体の制御処理の実時間性が課題となるが、今回構築したシステムの制御処理負荷の条件では、50 ms の制御周期でのデータ交換で、遅れ時間は数 ms 程度に収まっており、制御ソフトモジュールの連携による制御に支障はなかった。

次に、図 2.13 に示す制御ソフトモジュールの相関関係に基づき、全体の制御の流れを説明する。

統合制御部上のシナリオ制御モジュールでは、各サブシステムから送られる作業状態や作業要求を把握して、それらの情報で作業の流れを変更するイベントドリブンの作業シナリオに基づき、各サブシステムに作業実行の指令を与える。ロボットの実時間作業制御全体を司る統合制御部の運動計画モジュールと対人インターフェースに係わる作業全体を司る対話部の対話制御モジュールは、シナリオ制御モジュールの直接支配化にある。統合制御部の位置認識／環境認識モジュールは、レーザスキャナのスキヤニングデータを取り込み、位置基準ランドマークの中心位置の推定、周辺の壁や移動する人間などのロボットに対する相対位置の推定を行う。また、走行制御部の走行制御モジュールは、倒立振り子移動制御やボディースイング制御を実施するとともに、駆動輪の回転数やジャイロセンサから得る移動方向に基づき推定されるロボットの絶対位置情報を運動制御モジュールに送る。運動計画モジュールは、位置認識／環境認識モジュール及び走行制御モジュールから得た、走行環境上の障害物や位置基準指標の相対位置と走行制御モジュールから得た絶対位置情報に基づき移動軌跡を生成し、これを走行制御モジュールに作業指令として与えることで、絶対位置補正処理、移動軌跡に沿った目標位置への移動及び衝突回避制御を実施する。運動計画モジュールは、ロボットが持つ全ての機構を連動させて作業を実行するために、モーションエディタで制作した、走行機構、マニピュレータや頭部等の機構可動部のモーションパターンを複数蓄積したデータベースを持っている。運動計画モジュールは、シナリオ制御モジュールからの作業指示により、データベースから指定されたモーションパターンを選択し、移動軌跡を定めると共に、マニピュレータや頭部の運動を直接制御するマニピュレータ制御部のマニピュレータ・頭部制御モジュールに、関節角指令値の形で与

えることで、移動作業に同期した全身モーションを発生する。

次に、人間との対話情報処理を専門に受け持つ対話部は、以下の機能を持つ。

- 1) マイクロフォンアレイの信号に基づく音位同定をベースとした遠隔音声認識
- 2) CCD カメラで捉えた人間の顔の認識処理
- 3) 顔の認識処理と遠隔音声認識処理結果に基づく話者の識別処理
- 4) 上記の処理結果と対話ルールに基づく対話作業の形成
- 5) 高品位音声合成処理

上記の機能は、対話部上の各モジュールにより分担処理される。1) の機能は、音声認識モジュール、2) の機能は顔認識モジュール、3) 及び4) の機能は対話制御モジュール、さらに、6) の機能は音声合成モジュールで実施される。対話部の運用形態には、対話モードとコマンドモードがある。対話モードにおいて、対話制御モジュールは、シナリオ制御モジュールからの対話指示に基づいて、予め蓄積している複数の対話応答パターンの一つを選択し、認識された音声キーワードに対応する発声指示を音声合成モジュールに指令することで、簡単な対話を成立させる。音声合成モジュールは、予め複数の発声パターンを蓄積しており、発声指示に対応するセリフの音声生成する。一方、コマンドモードにおいては、対話制御モジュールは、所定のキーワード音声を認識した場合、シナリオ制御モジュールに対し、キーワード音声に対応する行動を要求する。この制御構成により、「右手を上げて。」といった人間の音声指示に対し、右手を上げる、といった身体応答作業を実施する。また、対話制御モジュールは、シナリオ制御モジュールからの発声指示を音声合成モジュールに受け渡すことで、作業シナリオに沿ったセリフの発声を実施する。

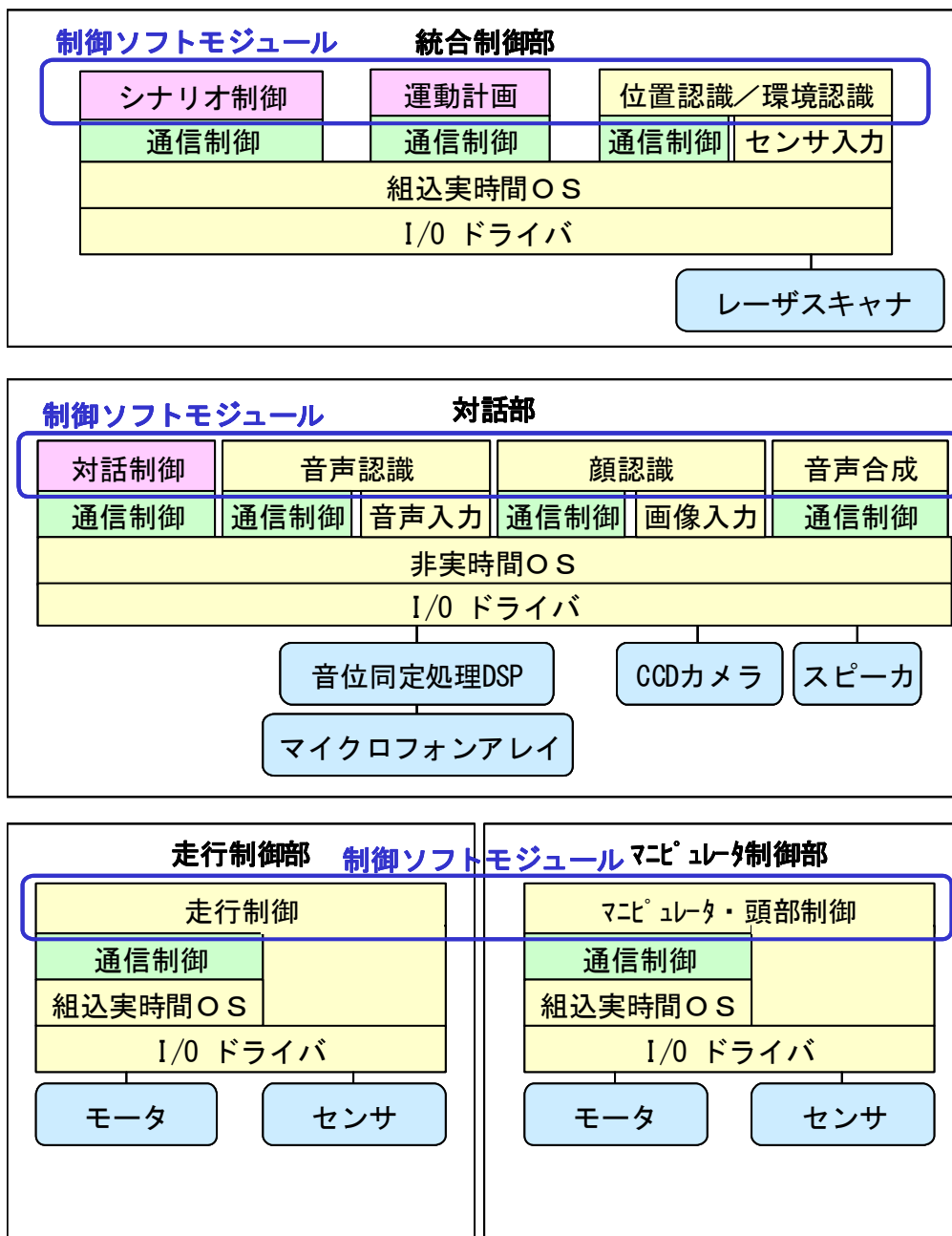


図2.12 制御システムのソフト構造

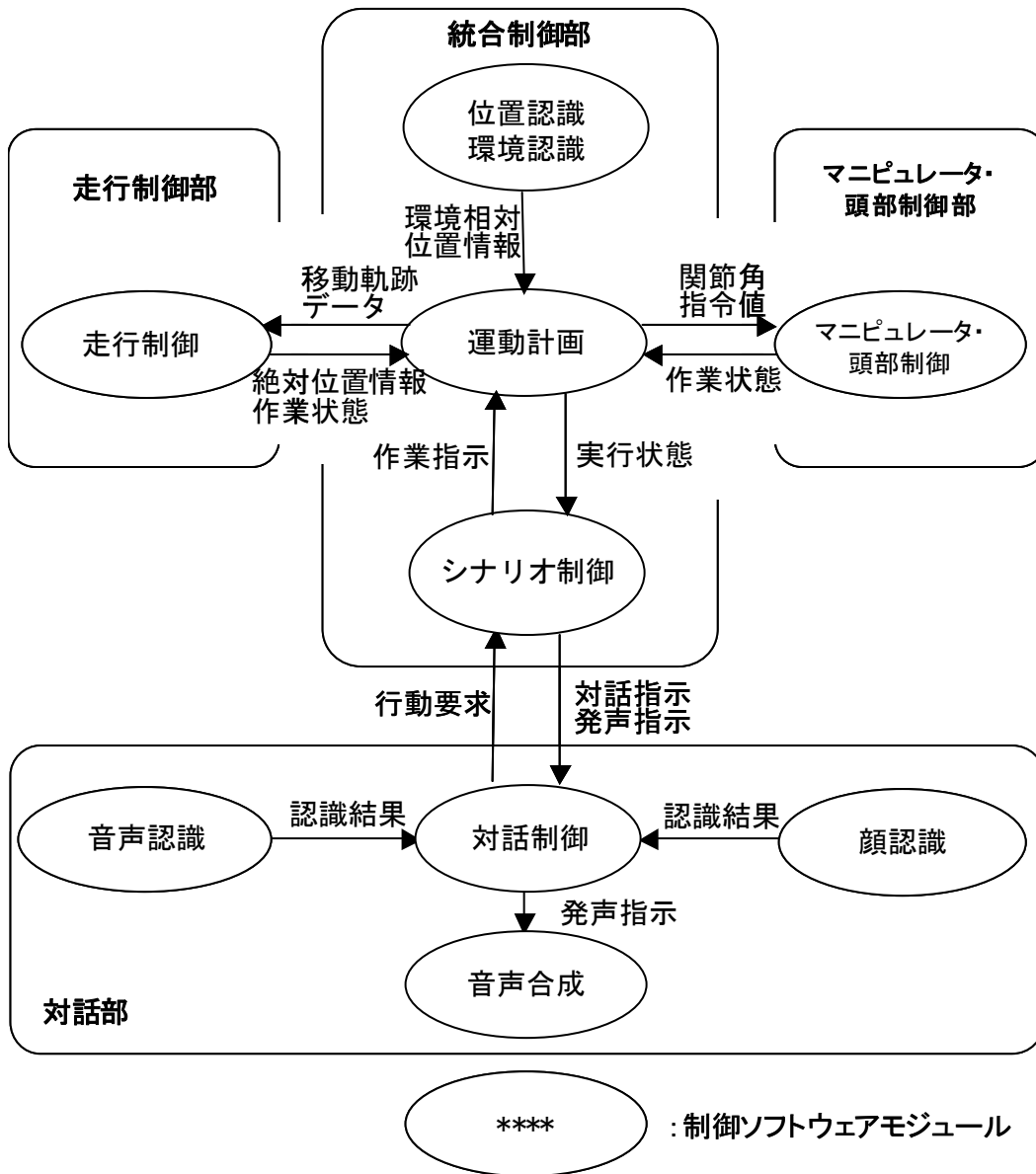


図2.13 制御ソフトモジュールの相関関係

2.6 機能の実証

EMIEW は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構のプロジェクトとして、「愛・地球博」の会場内の「モリゾー・キッコロメッセ」で 2005 年 6 月 9 日～19 日の間に開催された「プロトタイプロボット展」に、このプロジェクトで開発された他の 64 種のロボットと共にデモ・展示を行った。また、同年 8 月 6 日～28 日の間に、日立グループ館の屋外入場待ちスペースでデモ展示を行った。

図 2.14 に示す「プロトタイプロボット展」での技術紹介デモでは、EMIEW の機能をシナリオに従って実証した。デモのコンセプトは、「ロボットカフェ」のウェイターとして対象物の搬送作業を行うというものである。図 2.14 (a)のシーンでは、観衆からの呼びかけに答えて接近し、観衆の一人から、希望の品の名前を聴き取る。このデモで、EMIEW は良好な遠隔音声認識の機能を実現した。200 人近い観衆が発生する平均 70 dB の騒音の中で、若年から高齢の広い世代の男性、女性及び子供の発話を確実に認識することができた。図 2.14 (b)のシーンでは、要求された品物の受け取りである。ここでは、品物を供給するスタッフに対し、EMIEW が品物のオーダーを発声し、スタッフの「(注文された品物の名前) できました。」という音声回答を、約 4 m 離れた距離から聴き取り、これを出発の合図として、最高速度 1.7 m/s (6 km/h) で、スタッフの位置に移動し、品物を受け取った。図 2.14 (c)のシーンでは、衝突回避のデモを行った。EMIEW は、品物を受け取った後、要求を受けた観客の位置に戻る帰路で、第 2 のスタッフにより進行を妨害されるが、これに対し、経路変更を行い目的位置に到達した。最後の図 2.14 (d)のシーンでは、観客に品物を渡す。このデモでは、安全のために、第 3 のスタッフを介して品物を観客に渡した。以上示したデモにより、EMIEW の代表的な機能を実証することができた。

このデモのスペースは、3.5×6m であり、図 2.14 (b)において EMIEW の横にある白い円筒は、絶対位置同定に用いた位置基準ランドマークである。

図 2.15 に示す日立グループ館でのデモは、館入場待ちの客を対象とした。「プロトタイプロボット展」は要素技術を見せることを主眼においたデモであったが、ここでは人とロボットと一緒に暮らす姿をイメージしてもらうことを目指したデモを行った。このデモでは、7.5×7.5 m の演技スペースにおいて、継続的な最高速度走行や急旋回を伴う走りを主体としたショーコンテンツで、2 体の EMIEW の同期運用を試みた。作業の同期には、部分的に音声による起動を試み、人間であるクラウンと 2 体の EMIEW が、インタラクティブにデモ作業を進行させた。さらに、モーションエディタにより、効率的にモーションデータの生成を行うことで、ショーのストーリーを構成する人間らしいパントマイムや各種の踊りのパフォーマンスを実現した。なお、このデモは図 2.15 に示すように、屋外環境で実施されたものであり、連日 1 日 1 回 20 分程度の長さで、8 月の炎天下で継続された。このデモを通じて、ダイナミックな運動を伴う作業での人とロボットの相互関係の持ち方、システムの耐環境性、長時間駆動の機構耐久性等、貴重な知見を得られた。

最後に、上記のデモンストレーションや要素実験等で実証された EMIEW の性能を、表 2.2 にまとめる。

EMIEW の特徴である俊敏性に関する走行性能については、最高速度 1.7 m/s (6 km/h)、最高加減速度 4 m/s²、最小旋回半径 0.5 m (速度 1.7 m/s 時)、最高旋回角速度 200 ° /s と、当初の目標性能を達成した。人との協働作業の信頼性に係わる倒立振子移動制御自体の走行軌跡目標値に対する再現精度は、第 3 章で述べる走行制御の効果により、移動距離精度は約±0.04 m、速度精度は約±0.06 m/s であった。さらに、俊敏性と並ぶ重要な安全性に係わる衝突回避の性能に関しては、第 4 章で述べるように、これまでの実績では少なくとも 5 人の歩行者に対し、0.8 m/s (2.9 km/h) の速度を維持しながら衝突を回避できた。衝突回避軌跡の生成時間は 100 ms 以下であり、制御の実時間性に対しても十分な性能を得られた。第 4 章で述べるように、衝突回避可能な人数に理論的な上限はないが、ロボットに搭載されたレーザスキャナで同時に検出できる歩行者の数が制約条件となり、レーザスキャナの距離計測レンジ内で、ロボットの正面にすり抜け可能な密度で歩行者が並ぶとすると、実効的には 5 から 6 人程度が有効な処理対象となる。情報系サービスアプリケーションで重要な対人コミュニケーションの基礎である遠隔音声認識の性能については、平均背景騒音レベル 70 dB の環境で 1.5 m の距離を隔てた対話で、約 100 語のキーワードを聞き分けることができた。最後に、EMIEW の電力消費に関しては、制御系の定常消費電力が約 170 W であり、最高速度で走行した場合の総合消費電力は 245 W であった。図 2.16 に示すように、走行運動に消費される電力はほぼ走行速度に比例している。またマニピュレータの運用に伴う総合消費電力は 203 W となった。今回の開発で使用したリチウムイオン電池の容量は 680Wh であり、フル充電時の稼働時間は、最高速度走行を継続した条件で約 2 時間である。電池はカートリッジの形で背面に内蔵されており、デモ時の迅速なエネルギー補充のため交換は手作業にて行う方針とした。将来の自律作業を基本とした運用を考えた場合、自律充電機能もしくは自律電池交換機能は必須となるので、次の開発ステップでは実装を考慮する。



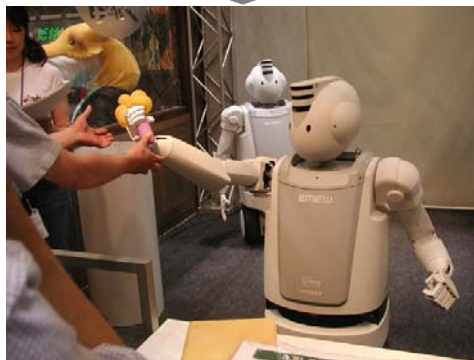
(a) 観客のリクエストを聴き取る



(b) 品物を受け取りに移動



(c) 帰路衝突回避のデモ



(d) 観客にリクエストの品物を渡す

図2.14 「プロトタイプ展」デモでのEMIEWの作業状況



図 2.15 日立グループ館でのデモの状況

表 2.2 性能評価の結果

走行性能	最高速度	1.7 m/s (6 km/h)
	最高加減速度	4 m/s ²
	最小旋回半径	0.5 m (1.7 m/s 時)
	最高旋回角速度	200 ° /s
走行軌跡目標値の再現精度	移動距離精度	約±0.04 m
	速度精度	約±0.06 m/s
衝突回避の性能	回避歩行者数実績	5 人 (歩行者速度：約 1.2 m/s, ロボット移動速度：0.8 m/s)
	衝突回避軌跡生成時間	100 ms 以下
遠隔音声認識の性能 (株)日立製作所・中央 研究所による開発)	認識可能距離	1.5 m
	認識可能平均背景騒音レベル	70 dB
	認識可能語彙数	約 100 語
電力消費	制御系定常消費	169 W
	走行時総合消費 (0 km/h)	173 W
	走行時総合消費 (5.8 km/h)	245 W
	マニピュレータ運動時総合消費	203 W

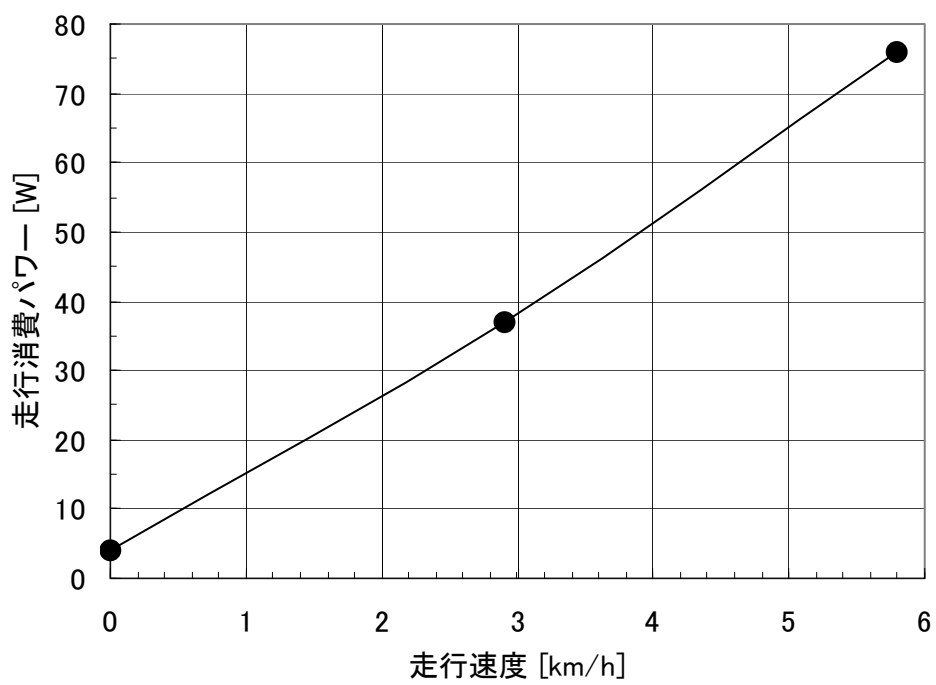


図 2.16 直線走行時の走行消費パワー

2.7 まとめ

人間共生アプリケーションとして、インフォメーションデスクでの顧客の受付・案内、オフィスの物流支援作業やビル建屋内の巡回監視作業等の、オフィス作業支援を想定し、安全かつ俊敏な移動、親和性の高い対人コミュニケーションの機能を特徴とした人間共生ロボット EMIEW のシステム開発を行った。移動システムとして、床面占有面積を狭くでき人の邪魔にならず、小回りが利き俊敏な移動が可能であり、重心の高い移動体の姿勢をアクティブに安定に制御可能な、倒立振子移動システムを採用し、人間並みの移動速度 1.7 m/s (6 km/h) で、 4 m/s^2 の加減速を可能とした。また、移動の安全性については、胴体の実装したレーザスキャナによる実時間障害物監視と、それに基づく実時間衝突回避制御を開発した。対人コミュニケーションについては、特別な接話マイク無しに自然に対話が可能な遠隔音声認識技術を導入し、平均 70 dB の背景騒音化で 1 m 以上の距離でのコマンド音声認識を可能とした。さらに、高品位音声合成応答による音声応答と、双腕と全身のモーションを使った非言語コミュニケーションを用いた親和性の高い対人インターフェースを実現した。

さらに、開発の集大成として、「愛・地球博」等での一般公開デモにて、これらの機能を統合した人間共生作業を実証した。

第3章 倒立振り子移動機構の走行制御方式

3.1 はじめに

第2章で紹介したように EMIEW には移動手段として、床面占有面積を小さくすることができ、かつ小回りの効く倒立振り子移動機構を採用している。本章では、重要課題である対人安全性の向上を図り、さらに倒立振り子移動特有の重心移動にともなう軌跡誤差を低減する走行制御方式の開発について述べる。

人間共生ロボットの設計に当たり、第一に考慮すべきは、ロボットの周囲に存在する人間に対する安全性の確保である。人間の生活空間で活動するロボットの基本機能として、人間を含む障害物との衝突を事前に回避する必要がある。これについては、上位の安全制御機能として第4章で述べる衝突回避制御の開発を行った。さらに、衝突回避がうまくいかず、人とロボットとの間に接触が発生した場合のリスク対策として、人に危害を与えないように、ロボットが柔軟に停止するか離脱する機能が必要になる。このような接触の発生から、人間に対する衝撃力や圧迫力を速やかに緩和するためには、ロボット側に速い応答性が要求される。EMIEW の設計においては、2.4.1 節に述べたように、上体のカバーの素材に比較的柔軟な素材を採用し、瞬間的に加わる衝撃力を低減する配慮をしている。一方、圧迫力については、人間に対するロボットの進行を速やかに軽減する必要がある。この方策として、何らかのセンサで接触を判定し、ロボットの進行方向を切り替えるといった方針も考えられるが、接触判定の情報処理や運動切り替えの一連の操作に時間を要することが懸念される。そこで、より速い応答性を求めて、ロボットの走行位置決めサーボに柔軟さを持たせることで、ロボットに加わる人間との間の圧迫力を、外乱として素早く受け流す方針とした。すなわち、位置目標追従性能の優先度を低くし、接触に伴いロボットに働く外乱による位置ずれを許容する方針をとした。

ここで、この方針の有効性について考えてみる。EMIEW の移動システムは非ホロノミックなシステムのため、上記の対応は主にロボットの進行方向近傍に対して有効である。このような、安全対策は全方向で有効であるのが理想であり、例えば全方向移動システム等のホロノミックな移動の場合、全方向に進行し接触と圧迫を発生する可能性があるため、全方向性の安全対策は必須となる。一方、非ホロノミックシステムでは、人間へのアプローチが走行軌跡の接線方向に限定されるために、ホロノミックシステムに比べ安全対策の全方向性の要求は低いと考えられる。また、極端な例として壁にほぼ平行に走行するロボットと壁との間に、人間が挟まれるという状況が想定されるが、仮に接触が発生したとしても実際には人間がロボットのどこかに接触することにより、ロボットが外乱を受け接触力を緩和する動作を行うことで、リスクを回避することができると考えられる。

ロボットに対する接触安全性に対し、上記の制御戦略を選択した一方、ロボット本来の作業機能として、倒立振り子制御による走行の安定性確保、精密で機敏な走行の実

現は必須である。そこで、走行制御系の設計方針として、ロボットの動作に伴う既知の外乱を相殺するフィードフォワード制御を採用して所定の機能を実現することとした。この点において、本開発でロボットの移動に伴う作業として考慮したのは、マニピュレータ等のロボット上体の運動と移動との連動、傾斜路面での走行、俊敏かつ精度の良い移動軌跡制御の実現である。最後の移動軌跡制御に関しては、最大移動速度、最大加速度を決定した走行指示をできることが望ましい。また、移動する障害物に対する衝突回避では、衝突予測の精度を高めるために経路上を計画した時間に沿って走行できることが重要である。しかし、倒立振り子移動機構は、姿勢を維持する制御のために、車軸の位置または速度の目標値としてステップ入力を与えると、移動開始時には一旦目標位置から逆方向に移動し、移動終了時には目標位置を一度追い越して止まるという特徴を持っている。このため、単純な台形速度パターンによる走行制御や、高周波成分を制限した目標値を位置や速度に与える方法では、倒立振り子移動機構を目標値に対して偏差無く追従させることができなかつた。このような制約条件を考慮した目標値生成手法としてモデル予想制御[34]や杉江等の方法[35]があるが、整形目標値を得るための計算負荷が大きいという点で計算能力に限られる移動ロボットへの搭載はまだ難しい。

本研究では、対人安全性のための走行位置決め制御剛性を抑えた倒立振り子制御システムにおける、ロボット上体の運動に対し、また傾斜走行面に対し安定な走行を実現する走行制御の提案を行い、さらに、移動機構制御に関して、任意に選定した最大加速度、最大移動速度、移動距離を制約条件として、偏差無く追従可能な軌跡目標パターンが生成でき、かつ、移動ロボット制御系に組み込んだ状態で障害物回避等の実時間軌跡制御に適用できる程度に所要計算負荷が小さな、倒立振り子移動機構の移動体動作計画方式について提案した。

本章では、ロボットの上体の運動及び傾斜走行面走行に対する走行補償制御について述べ、また移動軌跡制御のコアとなる、目標値の生成に必要な不動点の概念を提案し、これを活用した移動作業計画方式につき述べ、走行実験結果から提案した移動作業計画方式の有効性を示した。

3.2 EMIEW の走行制御系

ロボットの倒立振子制御系は、図 3.1 に示す機構モデルをベースに構築している。ロボットの上部自由度が固定されているとし、またロボット全身が左右対称である前提から、ロボットの片半身をモデル化した。なお、2.4.2 節で述べたように、EMIEW の走行条件では、旋回運動と倒立振子制御の運動との相互干渉は無視できるので、機構のモデル化も進行方向の矢状面内の運動のみに限定し簡素化している。このモデルの矢状面内の運動は、式(3.1)に示す二自由度の運動方程式で記述される。

$$\left\{ \begin{array}{l} (Mr^2 + J_0 + n^2 J_2) \ddot{\theta}_0 \\ + (Mr^2 + J_0 + nJ_2 + m_1 lr \cos \theta_1) \ddot{\theta}_1 \\ - m_1 rl \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 + d \dot{\theta}_0 = n \tau \\ (Mr^2 + J_0 + nJ_2 + m_1 lr) \ddot{\theta}_0 + \\ (Mr^2 + J_0 + J_1 + J_2 + m_1 l^2 + 2m_1 lr \cos \theta_1) \ddot{\theta}_1 \\ - m_1 rl \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 - d \dot{\theta}_0 - m_1 gl \sin \theta_1 = 0 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

ここで、 m_0 は車輪質量、 m_1 は上部半身の質量、 m_2 はモータ質量、 J_0 は車輪慣性モーメント、 J_1 は上部半身の慣性モーメント、 J_2 はモータ慣性モーメント、 r は車輪半径、 l は上体重心と車軸の間の距離を、 n はモータから車輪への減速比である。上部が鉛直方向に対しなす角度を上体傾斜角度 θ_1 とし、車輪の回転角度 θ_0 は、上部に対する相対角度として定義している。モータトルク τ から、車輪駆動トルクを $n\tau$ とし、表記を簡潔にするために $M = m_0 + m_1 + m_2$ とおいた。 d は粘性抵抗である。さらに、ロボットの身体は、走行時にほぼ直立に維持されることから、 $\theta_1 = 0$ の近傍で近似し、また粘性抵抗 d を無視できるとして、式(3.1)の運動方程式は式(3.2)の様に線形化できる。

$$\left\{ \begin{array}{l} (Mr^2 + J_0 + n^2 J_2) \ddot{\theta}_0 + (Mr^2 + J_0 + nJ_2 + m_1 lr) \ddot{\theta}_1 = n \tau \\ (Mr^2 + J_0 + nJ_2 + m_1 lr) \ddot{\theta}_0 + (Mr^2 + J_0 + J_1 + J_2 + m_1 l^2 + 2m_1 lr) \ddot{\theta}_1 = m_1 gl \theta_1 \end{array} \right. \quad (3.2)$$

式 (3.2) の中で用いられる各パラメータの数値を表 3.1 に示す。

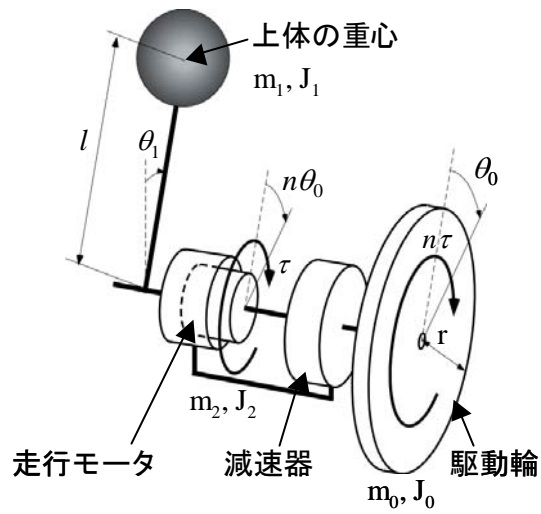


図 3.1 EMIEW の機構モデル

表3.1 機構モデルのパラメータ値

m_0 [kg]	3.8
m_1 [kg]	33.6
m_2 [kg]	1.6
M [kg]	39.0
J_0 [kgm ²]	3.73×10^{-2}
J_1 [kgm ²]	2.55
J_2 [kgm ²]	1.36×10^{-5}
r [m]	0.147
l [m]	0.487
n	63

$\mathbf{x} = \mathbf{y} = [\theta_0 \ \dot{\theta}_0 \ \theta_1 \ \dot{\theta}_1]^T$ を各々システムの状態量及び出力, u を入力トルクとして, 式 (3.2) より下記の状態方程式を得ることができる.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\boldsymbol{\alpha}^{-1}\boldsymbol{\beta} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\alpha}^{-1}\boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \frac{Mr^2 + J_0 + n^2J_2}{n} & \frac{Mr^2 + J_0 + nJ_2 + m_1lr}{n} \\ Mr^2 + J_0 + nJ_2 + m_1lr & Mr^2 + J_0 + J_1 + J_2 + m_1l^2 + 2m_1lr \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -m_1gl \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

次に, 走行制御系について述べる. 3.1 節で述べたように, 対人安全性の確保のために, 走行位置決め目標値追従性能の優先度を低くし, 接触に伴いロボットに働く外乱に対し位置ずれを許容する方針とした. この設計方針を前提としたロボットの走行制御系の構成を図 3.2 に示す. なお, ロボットの制御系の全体構成は, 図 2.3 に示すように旋回運動制御を含むが, 2.4.2 節で述べたように本研究では旋回運動と倒立振り子移動運動は独立とみなしているため, ここでは, 倒立振り子移動制御に関する部分のみを切り出して表現している. 制御対象は式(3.3)を前提にしており, \mathbf{f}_r は移動軌跡を決定する状態目標値, u はプラントへの入力トルク, \mathbf{y} は出力状態である. \mathbf{K} は, 1 入力 4 出力系の線形 2 次最適レギュレータである. 前述したロボットの安全運用のために, \mathbf{K} は積分要素を含まない制御器とし, 位置決め剛性に繋がる直流ゲインを制限している. このため, 低周波域での外乱抑制能力は制限されるが, これに対して, 既知の外乱に対する補償手段として, フィードフォワード入力 τ_r を入力トルク u に加算する構成としている. ロボットの走行制御のベースは, 軌跡生成要素により発生する \mathbf{f}_r 及び τ_r による, 走行軌跡のフィードフォワード制御であり, これに加え, ロボット上体の運動による移動位置ずれの抑制を行う上体運動補償要素, 及び傾斜走行環境での移動位置ずれの抑制を行う傾斜走行補償要素により生成する目標状態補正值 \mathbf{f}_e 及び τ_r を与えることにより, 各々の既知外乱による移動位置ずれを補償する.

なお, EMIEW の運用において位置決め剛性は, 約 100 N/m (変位 0.1 m 当たり約 1 kgf の圧迫力) に設定しており, ロボット接触時の圧迫力を十分低く抑えている.

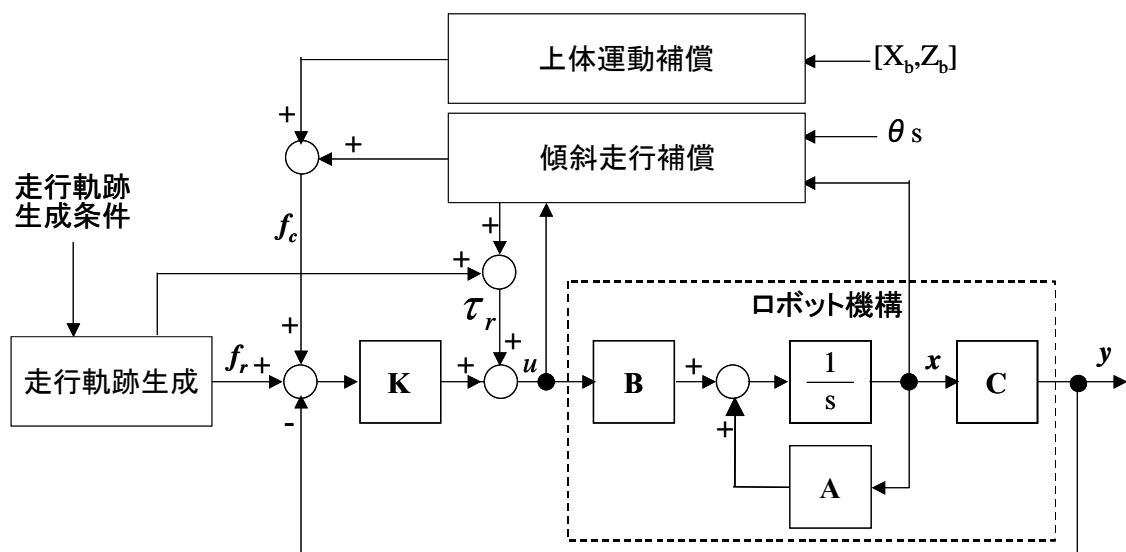


図 3.2 歩行制御系の構成

3.3 走行補償制御方式

ここでは、前節で紹介した補償要素の制御構成及び性能について述べる。

3.3.1 上体運動補償制御

上体運動補償制御は、ロボットのマニピュレータや頭部などの運動に伴う、上体の重心移動による移動位置のずれを抑制することを目的とする。図 3.3 は、集中質量 m_{1b} で代表される上体固定部の重心と、集中質量 m_{1a} で代表されるマニピュレータ等の可動体のある瞬間の重心のつり合いを示している。可動部重心が、車軸位置を原点とした上体の座標上で、 $[X_b, Z_b]$ にあるとすれば、 m_{1a} と m_{1b} との合成質量 m_l の重心位置が車軸軸上に位置する様バランスを取るためには、以下の条件を満足すれば良い。

$$\theta_a = \tan^{-1}\left(\frac{m_{1a}X_b}{m_{1b}l + m_{1a}Z_b}\right) \quad (3.4)$$

従って、上体運動補償要素で、式(3.4)に基づき姿勢補正角度 θ_a を逐次演算し、目標状態補正值 $\mathbf{fc} = [-\theta_a \ 0 \ \theta_a \ 0]^T$ を走行制御系に与えることで、上体可動部の運動によるロボットの移動位置の変動を低減できる。図 3.4 に、EMIEW のマニピュレータを運動させた場合の、立ち位置 0 に対する変動を示す。ここでは、両腕の肘関節を伸ばしたまま、下→前→上→前→下→前→上→前の動作を行っており、補償していない場合の位置変動は補償した場合の約 1/3 に抑制されていることが分かる。変動を完全に 0 に抑え切れていないのは、両腕運動の動力学成分によるものである。

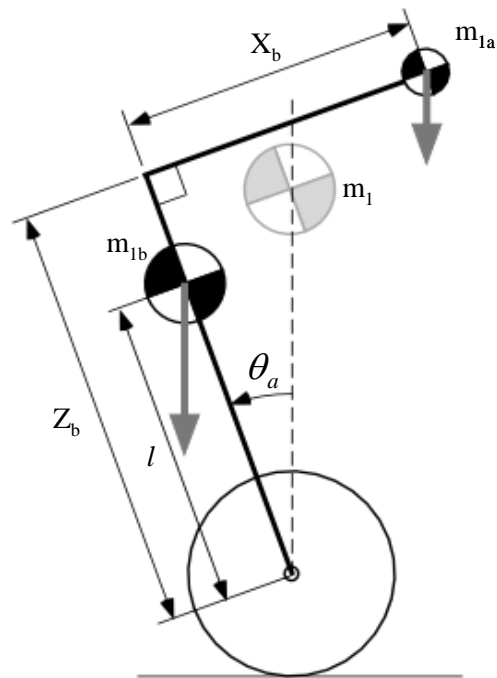


図 3.3 上体のつり合い条件

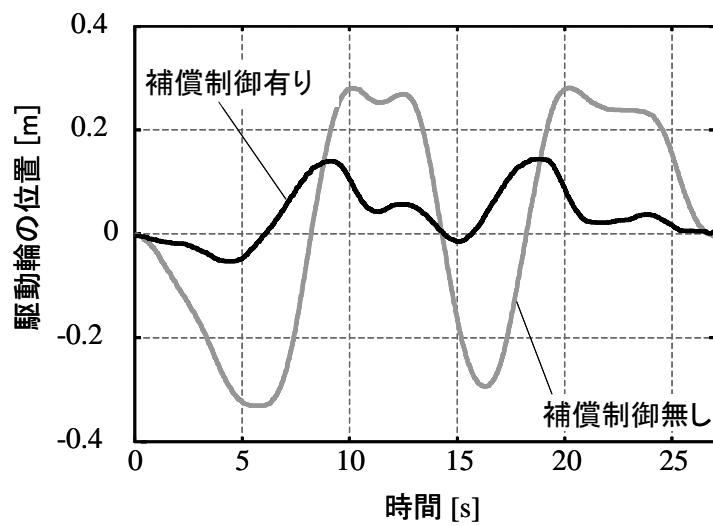


図3.4 上体運動補償制御の効果例

3.3.2 傾斜走行補償制御

傾斜面での走行では，斜面に沿った重力負荷が外乱として働き，3.2 節で述べたように，移動位置決めのサーボゲインを低く設定した場合の大きな誤差要因となる．これに対応するために，傾斜走行補償要素では，斜度 θ_s を推定し，フィードフォワード制御量を生成する．傾斜面でのロボットの姿勢及び位置の維持には，図 3.5 に示すように，ロボット上体と車輪の質量の総合重心を車輪と斜面の接地点直上に維持する必要がある．このつり合い条件から， θ_s 及び θ_1 を微小と考え，姿勢補正角 θ_1 は，次式で算出される．

$$\theta_1 = \frac{Mr}{m_1 l} \theta_s \quad (3.5)$$

さらに，重力負荷に対し立ち位置を維持するために必要な車輪の駆動トルク τ_s は次の様に算出される．

$$\tau_s = Mgr\theta_s \quad (3.6)$$

次に，斜度 θ_s の推定に付いて述べる．斜度 θ_s を状態変数として含む状態量を $\mathbf{x}_s = [\theta_0 \ \theta_1 \ \dot{\theta}_0 \ \dot{\theta}_1 \ \theta_s]$ として，図 3.5 に示す傾斜条件を入れたモデルは，状態空間表現で次式の様に記述できる．

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s + \mathbf{B}_s u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_s \mathbf{x}_s \end{cases} \quad (3.7)$$

このようなモデルを用い，斜度変化率 $\dot{\theta}_s = 0$ として，オブザーバーを構成し，斜度推定値 $\hat{\theta}_s$ を得て，傾斜走行補正量を算定する方法が知られている[36]．しかし，この方法では，例えば，障害物との接触により発生した力も傾斜によるものと捉えるので，より強い力で障害物を押し出そうとする挙動を取ることになる．これは，本制御の安全設計思想である，柔軟な対人接触の妨げとなる．そこで，本開発では，次式の様に，予め走行範囲の斜面データをデータベースとして持ち，ここから得た現在位置の斜度 θ_s を基準として，所定の振れ幅 $\theta_{s,lim}$ の範囲内で，斜度の推定を行い，外乱抑制能力を調整できるようにした．

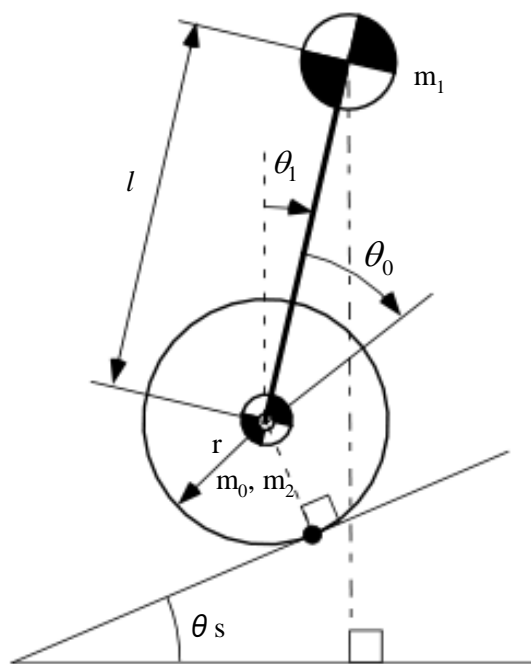


図3.5 傾斜走行のモデル

傾斜走行補償要素の構成は、図 3.6 に示すようになる。まず、状態量 \mathbf{x}_s 及びトルク入力 u から、式(3.7)のモデルを内在したカルマンフィルタ \mathbf{P} により $\hat{\theta}_s$ を推定し、さらに計算要素 \mathbf{Ls} で式(3.8)及び図 3.7 に示す関数に基づき基準斜度 θ_s をベースとした推定値 $\hat{\theta}_s$ の制限を施す。

$$\hat{\theta}_s = \begin{cases} \theta_s - \theta_{s \text{ lim}} & : \hat{\theta}_s - \theta_s < -\theta_{s \text{ lim}} \\ \hat{\theta}_s & : -\theta_{s \text{ lim}} \leq \hat{\theta}_s - \theta_s \leq \theta_{s \text{ lim}} \\ \theta_s + \theta_{s \text{ lim}} & : \theta_{s \text{ lim}} < \hat{\theta}_s - \theta_s \end{cases} \quad (3.8)$$

さらに、計算要素 \mathbf{Ks} で \mathbf{Ls} より出力された $\hat{\theta}_s$ と式(3.5)から θ_1 を算出し、目標状態補正值 $\mathbf{f}_c = [-\theta_1 \ \theta_1 \ 0 \ 0]^T$ を出力し、また $\hat{\theta}_s$ と式(3.6)から、フィードフォワードトルク τ_r として τ_s を出力する。図 3.8 に、EMIEW の走行実験で用いた斜面データベースの例を示す。ここでは、斜度は 1m 四方ピッチで量子化記録され、最大斜度は約 6° である。この条件で、傾斜走行補償制御無しに EMIEW を起立させた場合、重力起因の外乱により最大 0.4m の位置ずれが生じたが、補償制御をかけることにより位置ずれを 0.05m 程度に抑制することができた。また、 $\theta_{s \text{ lim}} = 5^\circ$ の設定とし、大部分の走行領域でカルマンフィルタにより推定された斜度 $\hat{\theta}_s$ に基づき傾斜走行補償制御を行い安定なデモ走行を実現できた。

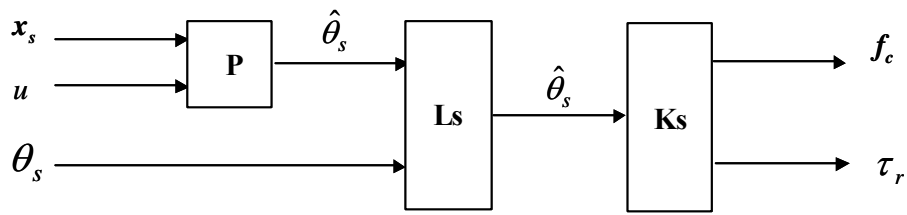


図3.6 斜面走行補償の構成

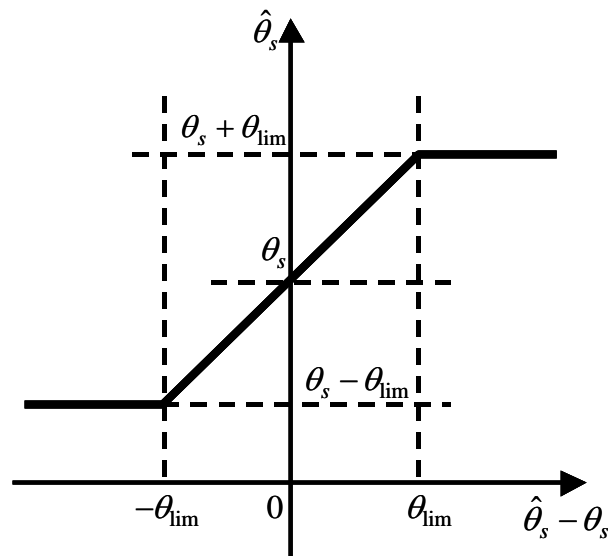


図3.7 斜度推定値の補正

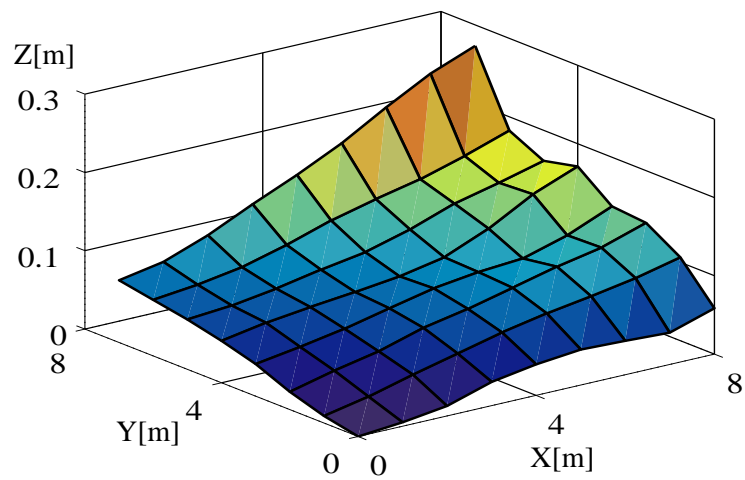


図3.8 斜面データベースの例

3.4 軌跡追従制御方式

3.4.1 移動作業計画への要求

3.1節で述べたように，EMIEWの開発方針とし

- 1) 機敏な移動
- 2) 時間精度の良い移動作業制御

の2点を重視している。

1)の機敏な動作に関しては，移動機構が潜在的に持つ最大移動速度，最大加速度の性能を十分に引き出し，かつ走行の安定性が保証できる走行作業目標パターンを生成する必要がある。2)の要求は，安全運用の基本機能である衝突回避走行や，複数ロボットの協調移動作業計画に必要とされる。衝突回避走行では，第4章で述べるように，障害物の推定移動経路とロボット自身の移動経路の時空間上での衝突の可能性を判断するが，衝突予測の精度を高めるために，ロボットが経路上を計画した時間に従って走行できることが重要である。複数ロボットの協調移動作業は，例えば，章末で紹介する複数のロボットによる演技走行等，予め計画したシナリオの時間軸に従って，相互に交差する軌跡を走行する様な運用を想定したものであり，この場合にも，交差軌道上の衝突の無い計画した時間に沿った走行が必要となる。

3.4.2 軌跡追従制御の方法

移動作業の実行時間を管理するためには、移動位置及び速度の両者を計画通りに発生する必要がある。しかしながら、式(3.3)で与えられるシステムでは、同時に任意の位置 θ_0 と速度 $\dot{\theta}_0$ パターンを状態目標値として与えても、それぞれを偏差無く追従させることはできない。そこで、 θ_0 と $\dot{\theta}_0$ の目標値を設計する段階で、各値を決定するための拘束条件に、1) 2)の要求から与えられる制限を盛り込み、これに追従するように制御系を運用することにより、上記の問題を解決する。具体的には、図3.2に示す軌跡生成要素にて、ロボットの動特性を含みかつ拘束条件を満たす目標値 \mathbf{fr} ($=[\theta_0 \ \dot{\theta}_0 \ \theta_1 \ \dot{\theta}_1]^T$)を求め、 \mathbf{fr} の設計結果として推定される所要モータ出力トルクが、実現可能な範囲であるように、 \mathbf{fr} の設計修正を行うことで、1)の要求を満足する。この方法で得られた \mathbf{fr} は、 θ_0 と $\dot{\theta}_0$ の所要仕様を両立して満足するため、2)に要求される計画時間に従った移動作業を実現できる。状態目標値 \mathbf{fr} を以上の手段で求め、さらに所用モータ出力トルクをフィードフォワードトルク入力 τr として、図3.2に示す走行制御系に与えることで、1) 2)の要求を満たす偏差の少ない走行軌跡制御を実現できる。

3.4.3 不動点位置を用いた状態目標値の生成

四輪車両の様な移動機構では、車輪と車両本体の移動距離が一致しているため、車両の移動位置の基準となる原点を車両上の任意の位置に設定し、原点位置の移動軌跡の目標パターンを、単純に車輪回転角度のパターンとして与えることができる。一方、倒立振り子移動機構は、図 3.9 に示すように、移動開始時及び終了時に、車輪を進行方向に対し逆走もしくは先行させることで、上体姿勢を加速方向もしくは減速方向に倒す。この挙動により、上体の移動距離は車輪の移動距離と一致せず、四輪車両のように車輪回転角度の目標パターンのみで精度の良い軌跡制御を行うことができない。この問題を解決するためには、走行中の上体姿勢の変動に左右されない原点を定める必要がある。

図 3.9 に示すように、倒立振り子移動機構の原点の移動距離 rq は、車輪の移動距離 $r\theta_0$ に上体の姿勢変動分の位置ずれ $r\lambda\theta_1$ を加算したものとなる。ここで、 q は原点の位置を表す仮想回転角であり、 r は車輪の半径、 λ は車輪軸からみた原点の高さを規定する係数である。後で詳細に記載するように、式 (3.2) に記載する運動条件と整合性を持つ適切な λ を設定することにより、仮想回転角 q で記述した移動目標パターンは、車輪回転角 θ_0 と上体姿勢角 θ_1 の制御目標パターンを、一意に定めるように生成することができる。この様な条件を満たす高さ $r\lambda$ にある原点の進行方向の位置は、 q の移動目標パターンにより決定されるので、走行中に発生する上体姿勢角 θ_1 の変動の影響を受けない。このような原点の選び方により、上記の倒立振り子移動機構の軌跡精度の問題を解決することができる。ここで、このような原点を不動点と称することとする。

この節では、この不動点の位置を用い、 θ_0 と $\dot{\theta}_0$ の拘束条件を反映した状態目標パターンの生成方式について提案する。

ここで、移動作業の基本パターンは、停止状態に始まり停止状態で終わる距離 d の 2 点間の直線移動と仮定し、移動開始時刻 t_s 、移動終了時刻 t_e における θ_0 、 $\dot{\theta}_0$ 、 θ_1 及び $\dot{\theta}_1$ は次の条件を満たすこととする。

$$\begin{cases} \theta_0(t_s) = 0 \\ \theta_0(t_e) = d/r \\ \dot{\theta}_0(t_s) = \dot{\theta}_0(t_e) = 0 \\ \theta_1(t_s) = \theta_1(t_e) = 0 \\ \dot{\theta}_1(t_s) = \dot{\theta}_1(t_e) = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

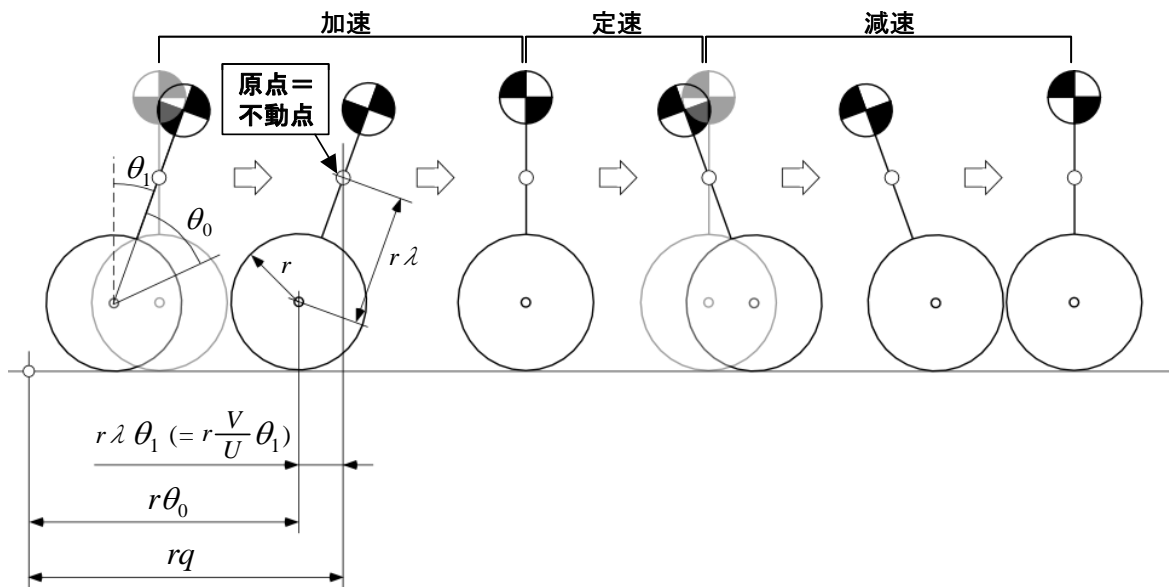


図 3.9 不動点と仮想回転角 q の概念

式 (3.2) を用いて各状態量の計画を導くには式を連立して解く必要があり, 式 (3.9), 最大速度, 最大加速度及び移動距離を満たすように計画を行うことは難しい. そこで仮想回転角 q を導入することにより式を簡潔にし, 簡単にかつ低い計算負荷で走行の計画を行う手法を提案する.

まず, 式 (3.2) を変形し, 状態変数の係数を S, T, U, V にまとめる.

$$\begin{cases} S\ddot{\theta}_0 + T\ddot{\theta}_1 = \tau \\ U\ddot{\theta}_0 + V\ddot{\theta}_1 = \theta_1 \end{cases} \quad (3.10)$$

ここで,

$$S = \frac{Mr^2 + J_0 + n^2 J_2}{n} \quad T = \frac{Mr^2 + J_0 + nJ_2 + m_1 lr}{n}$$

$$U = \frac{Mr^2 + J_0 + nJ_2 + m_1 lr}{m_1 gl} \quad V = \frac{Mr^2 + J_0 + J_1 + J_2 + m_1 l^2 + 2m_1 lr}{m_1 gl}$$

次に, 本節の冒頭で説明したように θ_0 に θ_1 の比例項を加算した形で仮想回転角 q を次式のように定義する.

$$q = \theta_0 + \lambda\theta_1 \quad (3.11)$$

さらに, 係数 λ は次のようにして求める. 式 (3.11) を 2 階微分した次式と式 (3.10)

$$\ddot{\theta}_0 + \lambda\ddot{\theta}_1 = \ddot{q} \quad (3.12)$$

の 2 行目を比較して, $\ddot{q} = (1/U)\ddot{\theta}_1$ の条件を満たすように仮想回転角 q の関数を設計し, $\lambda = V/U$ とすれば, 式 (3.11) に含まれる変数は, 式 (3.10) の運動条件を満たす. 以上から, 仮想回転角 q は, 次式のように定義される.

$$q = \theta_0 + \frac{V}{U}\theta_1 \quad (3.13)$$

以上定義した q を用いて式 (3.10) を展開することにより、次式の様に、 τ 、 θ_0 及び θ_1 は一括して q の関数として記述できる。

$$\tau = S\ddot{q} + (TU - SV)q^{(4)} \quad (3.14)$$

$$\theta_0 = q - V\ddot{q} \quad (3.15)$$

$$\theta_1 = U\ddot{q} \quad (3.16)$$

なお、 $q^{(i)}$ は q の i 階時間微分である。式 (3.14) ~ (3.16) は、倒立振り機構の動特性を継承しているので、式 (3.15) (3.16) を用いて任意の q の計画に対し、走行可能な θ_0 及び θ_1 を導出することができ、式 (3.14) より移動作業計画を実現するために必要なトルク τ を求めることができる。

次に q の決定手法について考察する。移動作業計画の条件として挙げた式 (3.9) より q の境界条件は以下のように定められる。

$$\begin{cases} q^{(3)}(t_s) = q^{(3)}(t_e) = 0 \\ \ddot{q}(t_s) = \ddot{q}(t_e) = 0 \\ \dot{q}(t_s) = \dot{q}(t_e) = 0 \\ q(t_s) = 0 \\ q(t_e) = d/r \end{cases} \quad (3.17)$$

式 (3.17) の境界条件を満たせば、移動作業目標パターンを形成する関数は任意に選択可能であるが、 $q^{(4)}$ をステップ関数としてパターン設計条件を簡単化することを目的に、 q を四次の多項式で表現することにした。最終的には、最大加速度、最大速度、移動距離の3つの設計目標仕様を満たす移動作業目標パターンを生成するために、加減速時間 t_1 、等速時間 t_2 、振幅 k の3つの条件を持たせ、式 (3.17) を満たすように $q^{(4)}$ をステップ関数として式 (3.18) のように決定した。 $q^{(3)}$ 、 \ddot{q} 、 \dot{q} 及び q の目標パターンは、式 (3.17) に基づき $q^{(4)}$ を積分して図 3.10 に示すように算出される。

$$q^{(4)} = \begin{cases} k & \left(0 \leq t \leq \frac{t_1}{4}\right) \\ -k & \left(\frac{t_1}{4} < t \leq \frac{3t_1}{4}\right) \\ k & \left(\frac{3t_1}{4} < t \leq t_1\right) \\ 0 & (t_1 < t \leq t_1 + t_2) \\ -k & \left(t_1 + t_2 < t \leq \frac{5t_1}{4} + t_2\right) \\ k & \left(\frac{5t_1}{4} + t_2 < t \leq \frac{7t_1}{4} + t_2\right) \\ -k & \left(\frac{7t_1}{4} + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2\right) \end{cases} \quad (3.18)$$

式 (3.16) に示すように、 \ddot{q} は上体姿勢角 θ_1 を規定し、 $q^{(3)}$ は上体姿勢角速度 $\dot{\theta}_1$ 、 \dot{q} は不動点の移動速度、 q は不動点の移動位置を規定している。このように、仮想回転角 q は、状態量 $\mathbf{x} = [\theta_0 \ \dot{\theta}_0 \ \theta_1 \ \dot{\theta}_1]^T$ の情報を、3 階微分値までの間に継承していることが分かる。

式 (3.18) から求めた $q^{(4)}$ から q 、式 (3.15) 及び式 (3.17) を用いて、車軸位置の移動距離 d 、最大移動速度 V_{max} 及び最大加速度 A_{max} と q の関係は、式 (3.19) のよ

$$\begin{cases} d = r\theta_0(t_e) = \frac{r}{32}k(t_1 + t_2)t_1^3 \\ V_{max} = r\dot{\theta}_0(t_1) = \frac{r}{32}kt_1^3 \\ A_{max} = r\ddot{\theta}_0\left(\frac{t_1}{2}\right) = \frac{r}{16}k(t_1^2 + 16V) \end{cases} \quad (3.19)$$

うに求まる。従って、式 (3.19) から求めた t_1 、 t_2 、 k によって q の目標パターンを決定でき、さらに式 (3.15) 及び (3.16) を用いて、状態目標値 \mathbf{z} を算出できる。

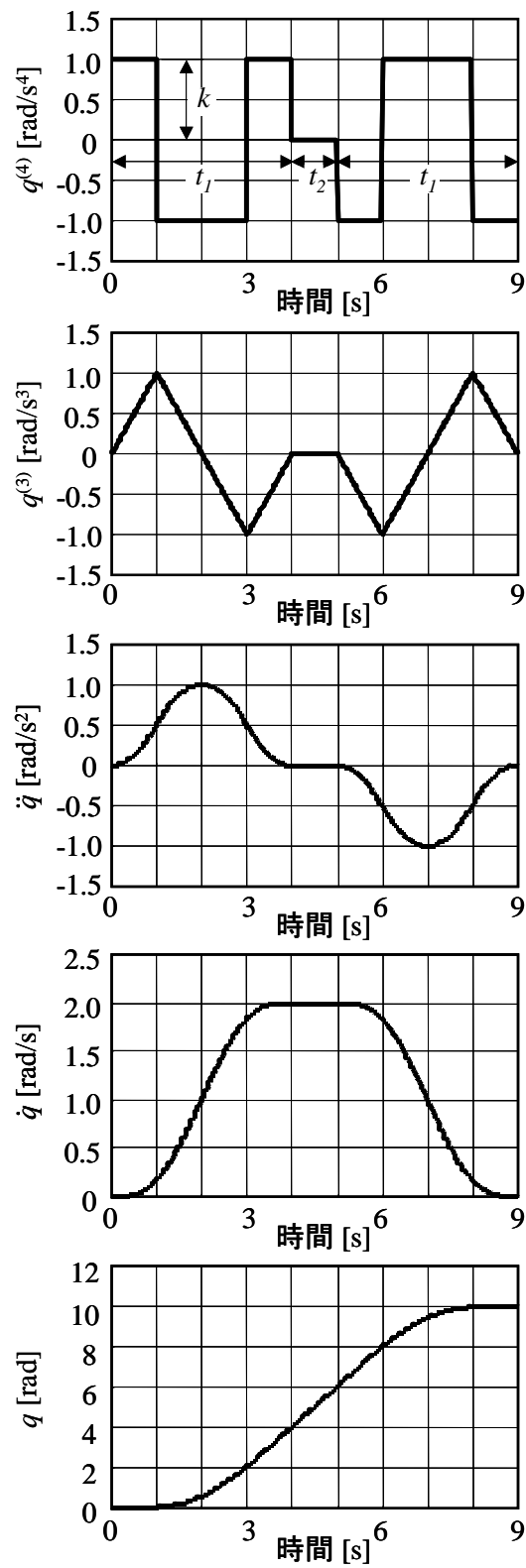


図3.10 仮想回転角 q を用いた軌跡パターン計画

3.4.4 移動作業計画の効果

仮想回転角 q を介して生成された目標値に対して倒立振り子二輪走行機構が偏差無く追従できることを EMIEW を用いた実験を行い確認した。 q を生成するための条件については、以下の様に定めた。

- ・ 移動距離：6 m
- ・ 最大移動速度：1.67 m/s (6 km/h)
- ・ 最大加速度：0.4 m/s²

求めた目標値を用いて直線経路上を移動させた結果を図 3.11 に示す。ここで、移動距離と移動速度は、車軸位置の値を、車輪回転を検出するエンコーダの値から計測したもので、上体傾斜角及び上体傾斜角速度はロボットの上部に設けたジャイロセンサにより計測したもので、モータ駆動トルクは、モータ駆動電流の計測結果から求めたデータである。移動中の距離誤差は最大で 0.04 m、速度誤差も最大で 0.06 m/s であり、計画した目標パターンに対してよく追従することが確認できた。特に移動速度の特性に顕著に見られるが、加減速の開始及び終了時に逆方向の速度変動を発生する挙動が目標パターンに予め盛り込まれており、実際の動作も計画に従い小さな誤差で再現されている。比較データとして、図 3.12 にシミュレーションにて車軸位置の速度を台形速度パターンで与えた場合の軌跡追従制御性能を計算した結果を示す。位置誤差は、最大 0.5m と、提案した方式の 10 倍程になり、速度の遅れも大きく発進時、停止時の出遅れ行き過ぎが大きいのが分かる。

図 3.11 に示す、モータ駆動トルクが目標パターンに対して正方向の偏差を持っているが、これは機構のモデル化の過程で省略した車輪の回転に対する粘性抵抗や車輪の変形に伴う走行抵抗等によるものであると考えられる。これらの外乱トルクはモータのトルクマージンによりカバーされている。

最後に、本報告で提案した移動作業計画方式を EMIEW の走行軌跡制御に適用した実例について紹介する。図 3.13 は、移動障害物回避の実証実験の様子を示したものであり、5 人の歩行者の間を衝突することなく取り抜けることができた。この実験で、ロボットの速度は 0.8 m/s (2.9 km/h) であり、障害物回避軌跡の更新周期は最短 100ms 周期であったが、前節で述べたように移動作業計画はいくつかの多項式の演算で構成されているため計算負荷が軽く、このような実時間軌跡生成を要する用途にも容易に導入できた。また、図 3.14 は、二体の EMIEW をシナリオ制御に基づいて速度 1.7 m/s (6 km/h) で連動させる走行演技の様子を示したものである。ここでは、複雑に交差した移動軌跡上で EMIEW 同士が衝突することなく安全にデモ走行を実現できた。このデモ性能は、提案した移動作業計画方式により生成した移動軌跡の時間精度の高さにより得られた。

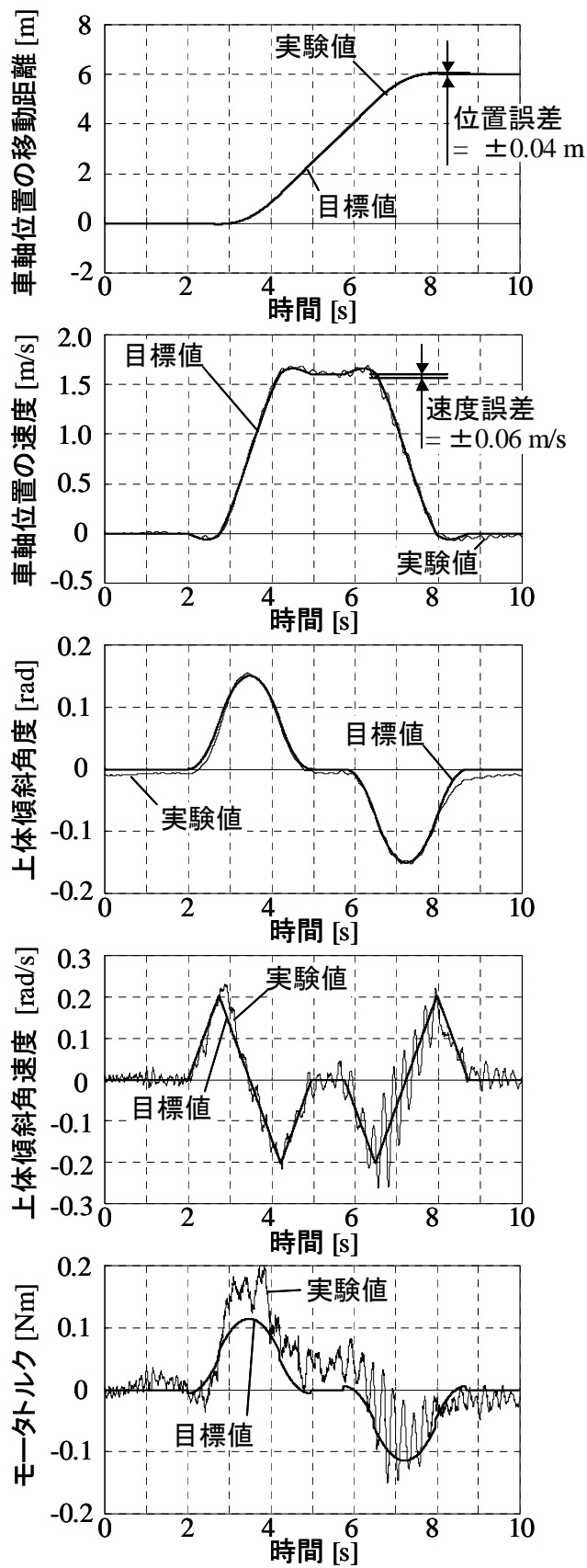


図 3.11 目標軌跡パターンと軌跡追従実験結果の比較

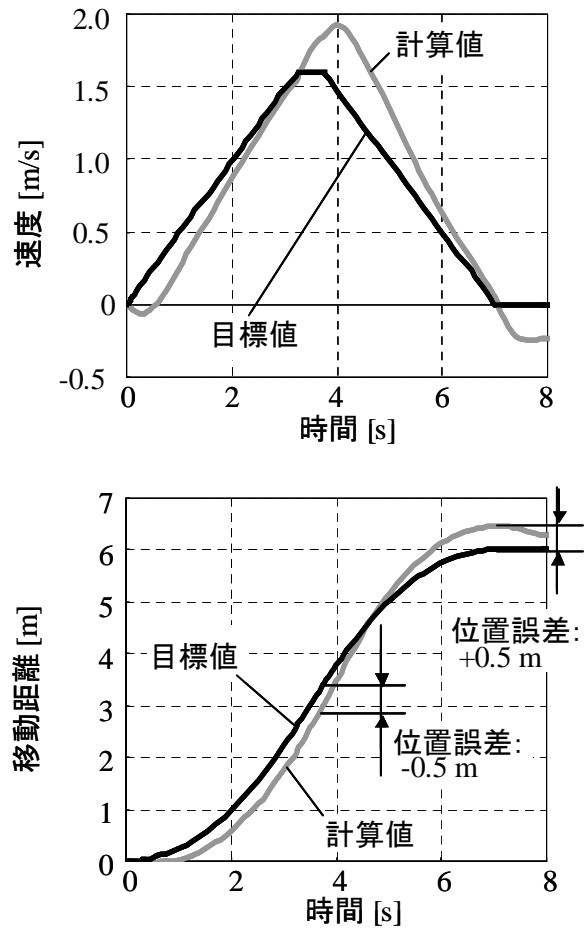


図3.12 台形速度制御のシミュレーション例

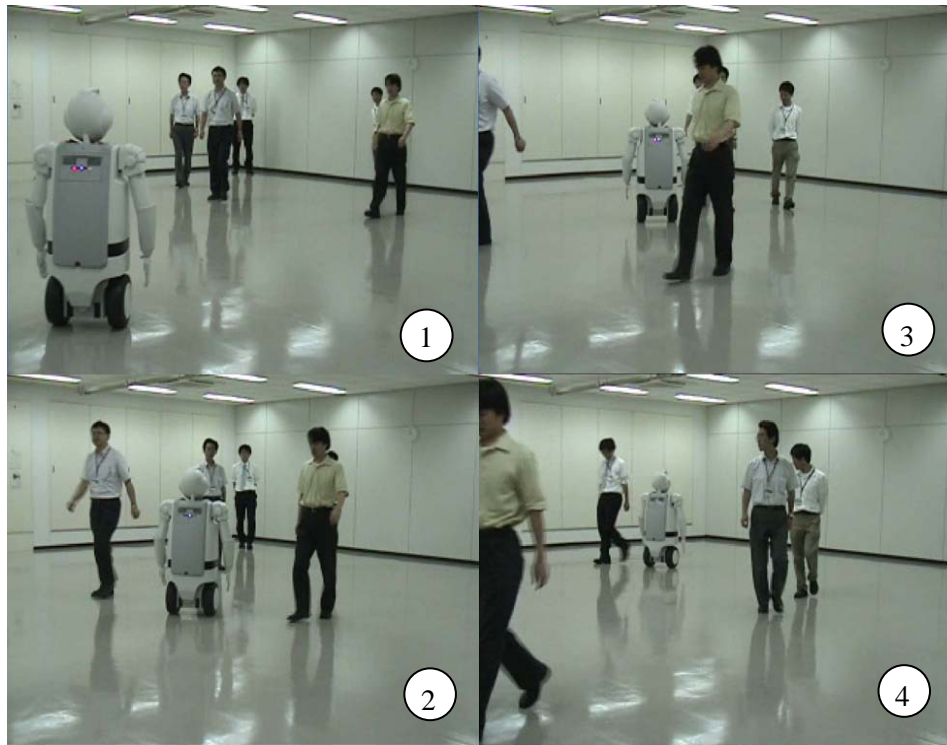


図 3.13 EMIEW を用いた衝突回避実験

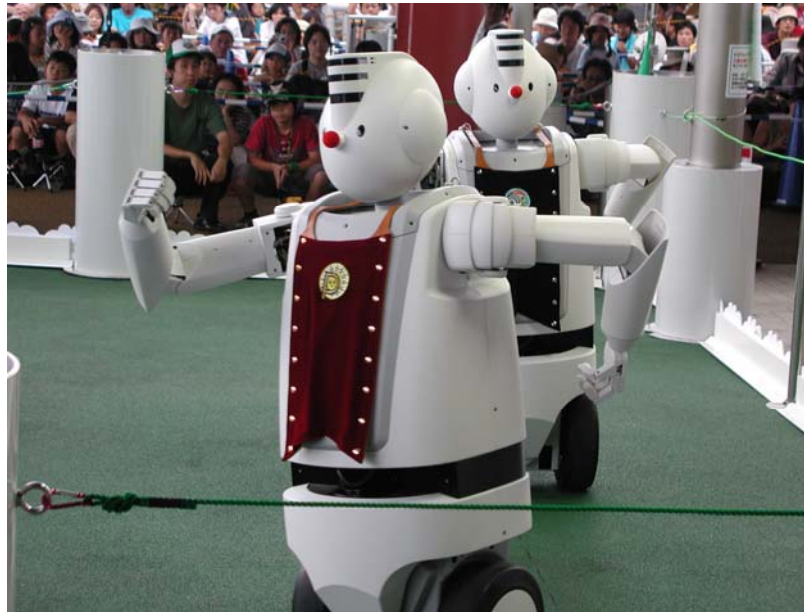


図 3.14 愛知博における 2 台の EMIEW による走行デモンストレーション

3.5 まとめ

人間共存型ロボットの安全設計の一環として、位置決め剛性を低くした倒立振り子移動機構の走行制御系につき、既知の外乱要因であるロボット上体の運動に伴う位置ずれの発生、傾斜面での走行位置ずれの発生を抑制し、精度の良い安定な移動を実現する補償制御方式を提案した。さらに、高精度の軌跡追従制御方式として、倒立振り子移動機構の位置指定を行うための原点として不動点の概念及び不動点の位置に基づく移動作業計画方式を新たに提案した。この方法を用いて、安全かつ誤差無く追従可能な目標パターン生成が可能であることを示し、いくつかの移動実験にてこの方式の有効性と精度の高い軌跡制御機能を実証した。

第4章 衝突回避制御

4.1 はじめに

第2章で述べるように、EMIEWの用途としては、人が存在するオフィスや駅などの複雑な環境での、案内作業や巡回監視作業を想定している。また、第2章で述べるように、このような人のペースに合わせたサービスには、人と同等またはそれ以上の移動速度が必要とされ、EMIEWの最高速度は人の早めの歩行速度と同等の1.7 m/s (6 km/h) としている。一方、人と混在する環境での作業においては、人に対する安全性の確保が重要な課題となり、機敏な移動に対して、衝突事故のリスクを極力小さなものにする必要がある。このため、ロボットは複数の移動体との衝突回避を効率的に行う動的衝突回避の機能を必要とする。さらに、ロボット組込コントローラへの実装の制約から、動的障害物に対する衝突回避アルゴリズムは、その計算量を小さく抑える必要がある。

衝突回避アルゴリズムについては、古くからポテンシャル法による静止障害物に対する効率的な回避経路の策定が試みられており[37]、ローカルミニマム問題の解決についてもラプラスポテンシャル法を用いた確度の高い回避経路生成を行う方法[38]等が提案されている。ただし、これらの方法は、既知の静的環境に対し最適回避経路を策定するものであり、また経路を得るために繰返し演算を要し、動的な環境に対し実時間の経路策定を行うに適していない。未知の環境に対し、実時間で衝突回避経路を生成する手段としては、dynamic windowを適用し衝突回避に適した速度指令を逐次生成する方法[39][40]や、移動目標や障害物の周囲環境の状態をファジイ関数として表現し少ない規範により速度指令を生成する方法[41]等が提案されている。しかし、前者では、障害物の運動が考慮されておらず、後者では限られた物体の運動のみを取り扱っており、本研究で目標としている複数の障害物の移動に対する衝突回避経路の生成には適さない。一方、多数の障害物の移動に対し衝突回避経路を効率良く求める手法として、坪内らの手法[42]が提案されている。ここでは、ホロノミックな移動を行うロボットを想定し、3次元時空間内の絶対座標上でロボットと全ての障害物の時空移動体形状の相互関係を捉え、幾何学的な解析により衝突判定や衝突回避経路の策定を行った。

本章では、この手法にヒントを得て、2次元移動空間内でのロボットと複数の移動障害物との間の相対速度に着目したより解析計算負荷が小さく実時間処理が容易な衝突回避経路生成アルゴリズムを提案し、さらに非ホロノミックなEMIEWの走行特性に適合した衝突回避軌跡を生成する手法を含む動的衝突回避ナビゲーション制御を提案し、性能実証結果について述べる。

なお、本研究では、衝突回避制御開発の第1段階として、ロボットの安全運用上最も重要な対象である歩行者を障害物の対象として取り扱い、歩行者以外の車両などの移動障害物や壁などの周辺構造物に対する取扱いは、次の段階で取り扱うものとし

た．このため，EMIEWの移動運用は，周辺構造物の存在しない走行可能領域に限定し，走行可能領域内には，歩行者以外の障害物は存在しないものとした．

4.2 歩行者のモデル化

人間共生ロボットが走行する場合の代表的な障害物は歩行者である。従って、前節で述べた、俊敏さと安全性を併せ持った走行性能を実現するためには、ロボットは、人間の移動特性および回避特性に合わせた行動をとる必要がある。そこで、まず人間の歩行挙動を参考に、衝突回避制御の方針を定める。人間の歩行挙動の研究[43][44]によれば、人密度の少ない空間における歩行者の特性は、次の通りである。

- 1) 人の平均歩行速度は、 $1.2 \sim 1.4 \text{ m/s}$ ($4 \sim 5 \text{ km/h}$) で、ほぼ等速に歩行し、歩行周期は約 0.5 s である。
- 2) 他者の侵入を許さない領域であるパーソナルスペースを確保しつつ回避行動を行う。
- 3) 人は回避中においても、等速での歩行を維持する傾向がある。

最後の 3) の回避特性は、人の密度の少ない空間に於いて、常に $1 \sim 2 \text{ s}$ 後までの安全を確保しつつ、その先の経路を計画する歩行戦略であり、今回の衝突回避回避アルゴリズム開発において、人間の歩行挙動の前提条件としている。

以上の条件を参考にして、障害物としての歩行者のモデル化を行い、ロボットとの歩行者との衝突可能性の推定を行うアルゴリズムの開発を行った。以下にその手法を紹介し、性能評価を行った結果について述べる。

4.3 衝突回避アルゴリズム

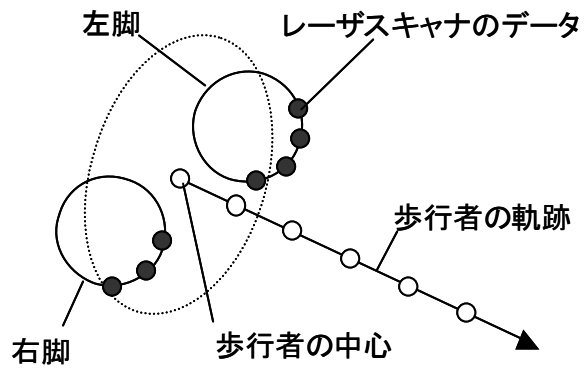
衝突回避アルゴリズムは、障害物の位置と速度を把握する障害物検出、障害物とロボットとの間の衝突の可能性を推定する衝突判定、衝突を回避する適正な経路を決定する回避経路計画、ロボットの動特性に合わせて実現可能な回避軌跡を生成する回避軌跡生成のプロセスからなる。本節では、各プロセスについて提案する。

なお、EMIEWの走行は、建屋内での床面や、屋外に於いては舗装路面等、比較的平滑な面上での運用を前提としており、以下に紹介する衝突回避アルゴリズムは、移動に伴う振動等により障害物のセンシングが乱されず、また、衝突回避経路の生成も水平面内の移動に限定するものとする。

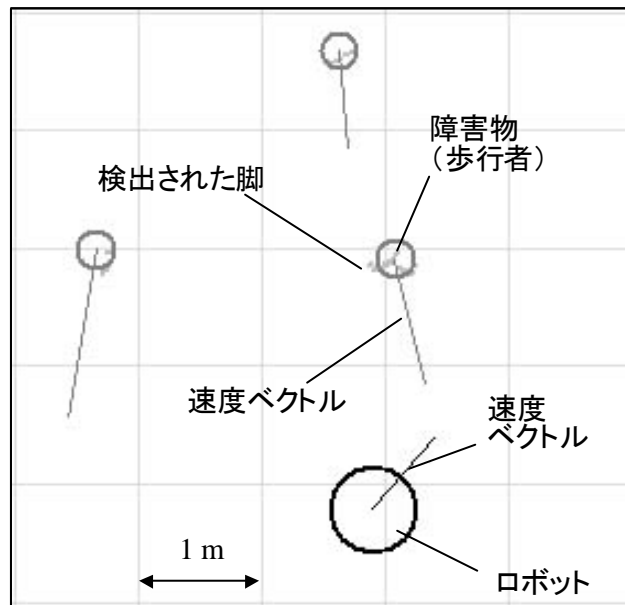
4.3.1 障害物検出

図 2.2 に示すように、EMIEW は胴体部に障害物検出用のレーザスキャナを実装しており、地上高約 0.4m の走行空間を水平スキャンする。図 4.1(a)に示すように、歩行者の左右の脚は、レーザスキャナの検出データから円弧パターンとして推定され、各々の重心位置から歩行者の中心位置を推定している。この検出を 26.6 ms の周期で実行し、歩行者の位置をトラッキングし、移動速度ベクトルを算出している[45]。

図 4.1(b)に、複数の移動障害物（歩行者）の検出結果の例を示す。上述した手法により、各歩行者の歩行速度ベクトルが算出され、また、ロボットの移動履歴に基づく移動速度ベクトルが出力されている。次節で述べるように、これらの速度ベクトル情報により、動的障害物回避の制御を実行する。



(a) 歩行者の追尾



(b) 障害物の検出例

図 4.1 障害物検出の方法

4.3.2 衝突判定

図 4.2 に衝突判定の方法を示す。まず、障害物周囲の衝突領域を算出する。図 4.2(a) に示すように、衝突領域は衝突判定を容易にするために、円として定義している。その半径 R は、式 (4.1) に示す様に、円として定義した障害物存在領域の半径 R_o に、

$$R = R_o + M_p + R_r \quad (4.1)$$

第 2 節で定義したパーソナルスペース分の他者の排他距離 M_p と、円として定義したロボットの存在領域の半径 R_r を加算したものである。衝突領域円には、ロボットの大きさが含まれるので、ロボットは点として扱える。移動するロボットと障害物との衝突の判定は、図 4.2(b) に示すように、各障害物を中心とした相対座標での幾何学関係により容易に実行できる。

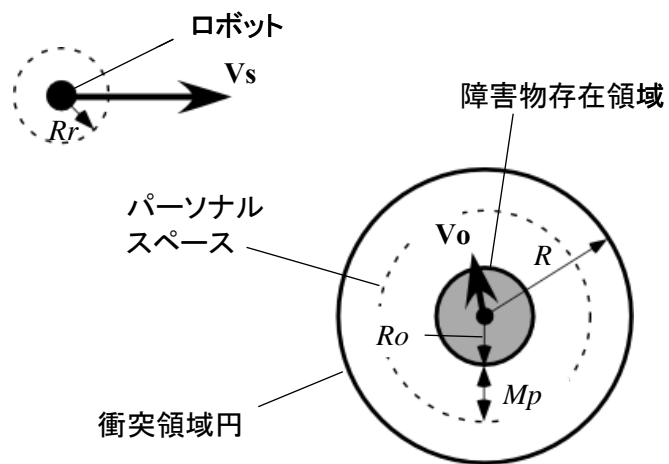
ここで、相対座標の原点は各障害物の衝突領域円の中心に存在し、相対座標の座標軸の方向は絶対座標の座標軸の方向と平行なものと定義する。以下に述べる、相対座標と絶対座標の関係はこの定義に基づくものとする。

前節で述べた条件から、ロボットも障害物も定速移動するとし、衝突の可能性は、図 4.2(b) に示す様に、ロボットの絶対速度 \mathbf{V}_s と障害物の絶対速度 \mathbf{V}_o より求まる相対速度 \mathbf{V}_r のベクトルが、衝突領域円を貫くか否かで判断できる。この判定条件は、障害物の相対位置ベクトル \mathbf{P} と相対速度ベクトル \mathbf{V}_r から、次式のように記述される。すなわち、図 4.2(b) において、 $SA > SB$ となる場合、衝突発生の可能性を持つ。この上

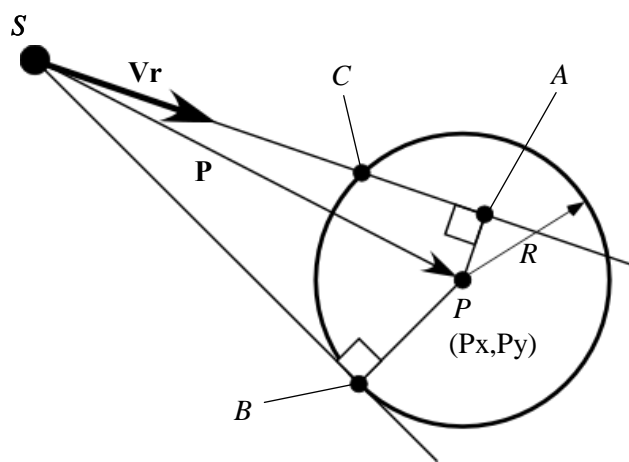
$$\frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_r}{|\mathbf{V}_r|} > \sqrt{|\mathbf{P}|^2 - R^2} \quad (4.2)$$

で、ロボットが C 点で衝突領域円に交差するまでの到達時間 T_c が、ゴールに到達する時間 T_g より短い場合、衝突が起こると判定する。ここで、 T_c は、次式で計算される。

$$T_c = \frac{SC}{|\mathbf{V}_r|} = \frac{|\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{P}| - \sqrt{R^2 - |\mathbf{V}_r \times \mathbf{P}|^2}}{|\mathbf{V}_r|^2} \quad (4.3)$$



(a) 絶対座標



(b) 相対座標

図4.2 衝突判定の方法

4.3.3 単一障害物の衝突回避経計画

衝突回避の経路は折れ線で表され、衝突回避経路計画では、この折れ線の頂点、すなわち経路点を生成する。生成する経路は大局的な走行計画であり、実際にロボットが走行する滑らかな軌道は、次節で説明する走行軌跡生成の手法で生成する。図 4.3 に一つの障害物に対する回避経路計画方法を示す。図 4.3(a)に示すように、障害物に最も接近する経路は、相対座標での衝突領域円の接線である。ロボットの速度は一定とすることを前提としており、図 4.3 (b)に示すように、絶対座標でのロボットの移動速度ベクトル $\mathbf{Vs1}$ と $\mathbf{Vs2}$ の大きさは同等である。さらに、 $\mathbf{Vs1}$ ($\mathbf{Vs2}$) の方向は、接線に平行な相対移動速度ベクトル $\mathbf{Vr1}$ ($\mathbf{Vr2}$) により決められる。開始点 S と衝突回避経路の経路点との間の距離は、 $\mathbf{Vs1}$ ($\mathbf{Vs2}$) と S 点から点 D (B) に至る移動時間とから計算される。

$\mathbf{Vs1}$ ($\mathbf{Vs2}$) と、相対座標での接点に対応する、絶対座標での経路点の位置の導出過程に関する詳細を以下に示す。まず、図 4.3 (c)に示す、接線 SB 及び SD に対応する単位接線ベクトル \mathbf{Be} 及び \mathbf{De} を求める。各々は、障害物の相対位置ベクトル \mathbf{P} との間で次の関係をもつ。

$$\begin{cases} \mathbf{P} \cdot \mathbf{Be} = SB \\ |\mathbf{Be}| = 1 \\ \mathbf{P} \cdot \mathbf{De} = SB = SC \\ |\mathbf{De}| = 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

式 (4) の解として、 \mathbf{Be} 及び \mathbf{De} は以下に求まる。

$$\begin{cases} \mathbf{Be} = \left[\frac{P_x \cdot SB + P_y \cdot R}{|\mathbf{P}|^2}, \frac{P_y \cdot SB - P_x \cdot R}{|\mathbf{P}|^2} \right] \\ \mathbf{De} = \left[\frac{P_x \cdot SB - P_y \cdot R}{|\mathbf{P}|^2}, \frac{P_y \cdot SB + P_x \cdot R}{|\mathbf{P}|^2} \right] \\ SB = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - R^2} \end{cases} \quad (4.5)$$

次に、 \mathbf{Be} 及び \mathbf{De} を用いて、ロボットの回避速度ベクトル候補の $\mathbf{Vs1}$ 及び $\mathbf{Vs2}$ を求める。図 4.3 (d)は、相対座標上のロボットの現在位置 S 付近を拡大したものである。図において、現在の障害物とロボットの間での相対移動速度ベクトルを \mathbf{Vr} 、ロボットの絶対移動速度ベクトルを \mathbf{Vs} 、障害物の絶対移動速度ベクトルを \mathbf{Vo} としている。障害

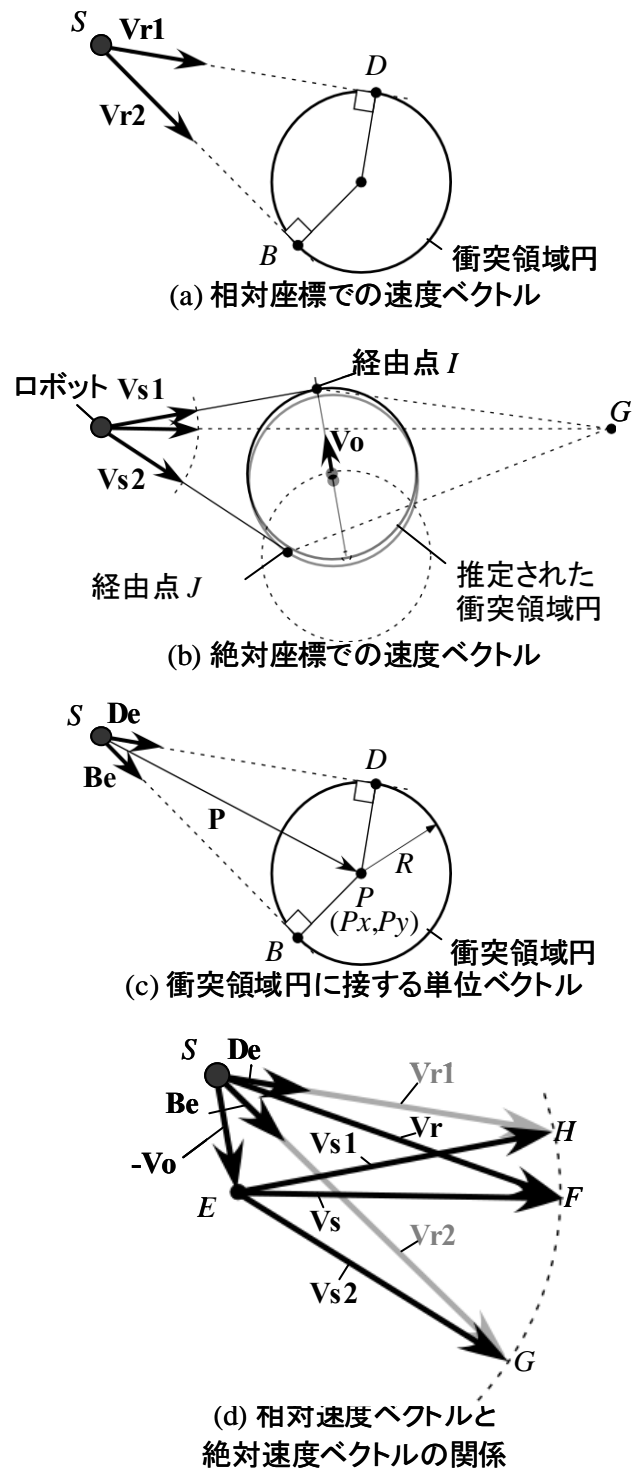


図4.3 単一障害物に対する衝突回避経路計画の方法

物を回避するためには、点 S を始点とした回避後の相対移動速度ベクトルの終点が、2本の回避接線 SB 及び SD に挟まれた領域の外側に存在する様にロボットの移動速度ベクトルを変更する必要がある。従って、点 E を始点とした $\mathbf{Vs1}$ 及び $\mathbf{Vs2}$ の終点 G 及び H は、回避接線 SB 及び SD 上の点とする。さらに、第2節での前提条件から、回避後もロボットは等速で移動するので、図 4.3 (d) に示す様に、 \mathbf{Vs} の終点 F 、 $\mathbf{Vs1}$ 及び $\mathbf{Vs2}$ の終点 G 及び H は、点 E を中心とした円弧上に存在する。以上の関係から $\mathbf{Vs1}$ 及び $\mathbf{Vs2}$ は、次のように求められる。

$$\begin{cases} \mathbf{Vs1} = k\mathbf{De} + \mathbf{Vo} \\ k = -\mathbf{De} \cdot \mathbf{Vo} + \sqrt{|\mathbf{Vs}|^2 + |\mathbf{De} \cdot \mathbf{Vo}|^2 - |\mathbf{Vo}|^2} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Vs2} = l\mathbf{Be} + \mathbf{Vo} \\ l = -\mathbf{Be} \cdot \mathbf{Vo} + \sqrt{|\mathbf{Vs}|^2 + |\mathbf{Be} \cdot \mathbf{Vo}|^2 - |\mathbf{Vo}|^2} \end{cases} \quad (4.7)$$

図 4.3 (c) から、ロボットが、障害物に最接近する点 D もしくは B に到達する時間 $T1$, $T2$ は、次式で求められる。

$$\begin{cases} T1 = SD / k \\ T2 = SB / l \\ SB = SD = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - R^2} \end{cases} \quad (4.8)$$

最後に、絶対座標での経由点 I 及び J の位置ベクトル \mathbf{SI} 及び \mathbf{SJ} は、式 (4.6), (4.7) 及び (4.8) で求めた、 $\mathbf{Vs1}$, $\mathbf{Vs2}$, $T1$ 及び $T2$ を用いて、次式で得られる。

$$\begin{cases} \mathbf{SI} = T1 \cdot \mathbf{Vs1} \\ \mathbf{SJ} = T2 \cdot \mathbf{Vs2} \end{cases} \quad (4.9)$$

以上で、ロボットと障害物双方の速度ベクトル情報に基づき、将来の障害物との衝突を回避することが可能な経由点を生成することができる。もし、点 S から点 G までの直線経路が衝突領域円と交差すると判定した場合、ロボットは、推定された経由点 I もしくは J を含む経路の距離を比較して、短い方を選択する。

なお、図 4.3 (b) に示すように、経由点から点 G までの経路は衝突円の一部を通過する場合があるが、これに対しては図 4.2 (a) に示すパーソナルスペース Mp を適切に選択することにより実際的な衝突を回避している。これまでの実績では、 $Mp = 0.5 \text{ m}$ とし、安全な回避が可能であった。

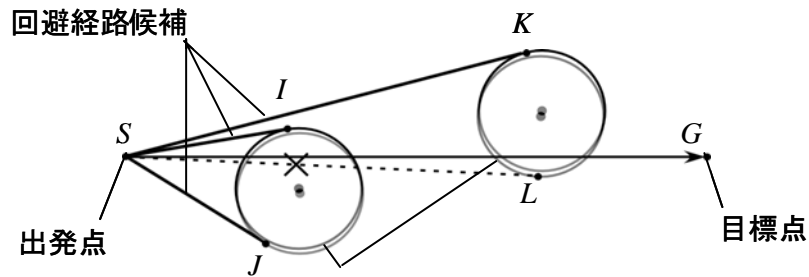
4.3.4 複数障害物の衝突回避経計画

前節で述べた単一障害物の回避経路生成を基礎にして、複数の障害物の回避経路を生成する方法を提案する。障害物が複数存在する場合、回避を行う順序を考慮する必要がある。障害物が静止している場合は、グラフ探索法[46]などを用いて最適経路を求めることができる。しかし、障害物が移動している場合は、時刻により障害物の位置が変化するため、最適経路を算出することは容易ではない。例えば、回避順序を全て調べた場合、その組み合わせ数 P は、障害物が n 個存在するとすると式 (4.10) で

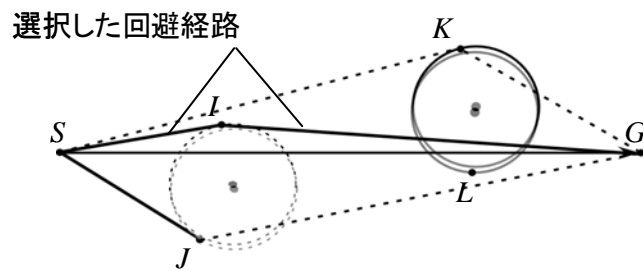
$$P = \sum_{i=0}^n \frac{n \times 2^i}{(n-i)!} \quad (4.10)$$

算定され、ここで、 $n = 3$ とすると、 $P = 79$ 通り、 $n = 4$ の場合は、633 通り、 $n = 5$ の場合は 6331 通りと、障害物 1 個の増加毎に対し約 10 倍の計算量の増加となる。従って、可能な組み合わせを全通り調べる方式は、実時間制御を必要とする障害物回避にとって計算負荷が大き過ぎる。この問題の解決方法として、全てのパターンを調査して最短回避経路を確定する代わりに、準最適解として最短に近い経路を逐次効率的に見出す方法が、坪内らにより提案されており[42]、ここではこれを適用した。この方針を考慮した複数の動的障害物の回避経路を生成するシーケンスを図 4.4 に示す。

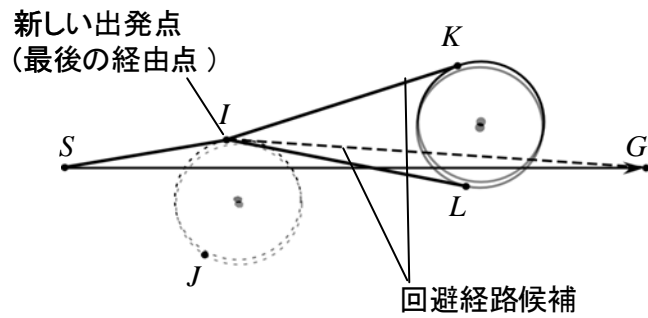
- 1) ロボットは開始点 S と目標点 G 間の直線経路と障害物との衝突を調べ、衝突が無い場合はその経路を解とする。
- 2) 経路が障害物と衝突する場合は、その時点で検出された全ての障害物の内、開始点より目標点 G に近い障害物の各々に関して、開始点から各障害物の衝突領域円上に経路点を求める。(図 4.4 (a), (c))
- 3) 開始点から各経路点を結ぶ経路につき、ロボットの実動作を可能とするための下記の a)~d) の条件を満足するものを選択し、選択された経路点を介して点 S と点 G を結ぶ経路を候補経路とする。(図 4.4 (b), (d))
 - a) 障害物と干渉しない
 - b) 壁などで規定される走行可能領域の外に出ない
 - c) ロボットの方向変化量が限界値以下：ロボットの旋回機動が可能
 - d) 開始点と経路点の間の距離が限界値以上：ロボットの旋回機動が可能
- 4) 候補経路の内最短のものを選択し、選択した経路の上の最も点 G に近い経路点を、新しい開始点とする。(図 4.4 (c))
- 5) 衝突無しの経路を見出すまで、1) から 4) の処理を繰返し、全障害物の回避可能な経路の解を得る。(図 4.4 (d))



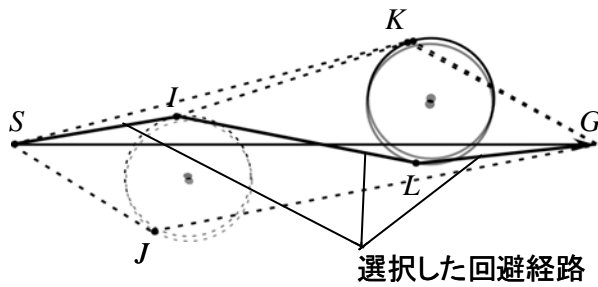
(a) 衝突判定



(b) 最短経路の選択



(c) 衝突判定



(d) 最短経路の選択

図4.4 複数の障害物に対する衝突回避経路計画の方法

1) から 5) の処理は一定周期で反復され、経路は、障害物の挙動に応じて常時更新される。平均的な歩行者の歩行周期は 2 節で言及したように約 0.5 s である。さらに、歩行の方向の変化は、この歩行周期に同期するものと推定される。この観点から、経路更新の反復周期は 0.5 s と設定した。

ここで、上記したアルゴリズムの経路生成の効率を評価するために、開始点 S と目標点 G 間の準最短衝突回避経路を探索するのに要する衝突検出演算の回数を評価してみる。上記の経路探索手順に必要な衝突検出演算の回数は、開始点 S と目標点 G 間の直線経路近傍の障害物の配置により変化するが、障害物が n 個存在する場合に必要な衝突検出演算の最大回数 $C(n)$ は次式のように算定される。これに対して、式(4.10)で

$$C(n) = n + 2n(n-1) + n(n-1) + 2(n-2) \sum_{i=1}^{n-1} (n-i) = n^3 \quad (4.11)$$

示した様に全ての障害物配置の順列組み合わせについて探索し最短回避経路を見出す場合、必要な衝突検出演算の最大回数 $M(n)$ は次式のように算定される。

$$M(n) = \sum_{i=0}^n \frac{n \times 2^i}{(n-i)!} [2(n-1) + (n-2)(i-1)] \quad (4.12)$$

表 4.1 は、 $C(n)$ と $M(n)$ の値を比較したものである。通常の廊下などでの歩行者の回避等の例を考えると、勘案すべき障害物の個数は 1 ~ 5 個程度であると考えられる。このオーダーの n の増加に対し、 $M(n)$ は指数関数的に増大する。一方 $C(n)$ は、 $n=5$ で $C(n) = 125$ 回と、実時間処理にとって無理のない回数に削減されていることが分かる。

表 4.1 衝突判定演算頻度の低減効果

n	1	2	3	4	5
$C(n)$	1	8	27	64	125
$M(n)$	1	26	435	6,964	117,125

4.3.5 回避軌跡生成

本研究で制御対象としている EMIEW は，倒立振り子移動機構を採用しており，基本的に非ホロミック走行を行う．そのため，全方向移動のような任意方向の機動は困難であり，衝突回避の要求による軌跡の変更は，変更前の進行方向から漸近的に滑らかに行われる必要である．このことは，ロボットを高速の状態に保ち衝突回避機動を行う上でも重要である．その手段として，前節の 3) の c) 及び d) で述べた衝突回避経路候補の選択条件で，過大な移動方向転換を要求する経路設定は予め除外している．さらに，前節で得た経路点間を結ぶ折れ線状の回避経路を，本節で述べる回避軌跡生成手段により，滑らかに追従することが可能な走行軌跡とする．

図 4.5 に示すように，衝突回避計画により，現在位置においてロボットから計測された障害物に対し，衝突領域円上に経路点が設定される．現在位置と経路点を直接結んだコースに追従するようにロボットを走行させた場合，ロボットの動特性により，コース内側を走行し，衝突領域円内に侵入する危険性がある．そこで，ロボットの進行方向線上に，結合点を設定し，その結合点と経路点を結ぶ新たな目標直線を設定し，ロボットをその目標直線の外側で追従走行させることで衝突領域円内への侵入を防ぐこととした．目標直線に対する追従走行制御には，式 (4.13) に示すロボットの移動距離 s をベースにした二次遅れ系演算を用いて， s の進行に伴うロボットと目標直線との間の距離偏差 e と，方向偏差 ϕ を漸近的に 0 にした．

$$\begin{cases} \frac{d^2 e}{ds^2} + k_d \frac{de}{ds} + k_p e = 0 \\ k_p = \omega_o^2 = \frac{4\pi^2}{L_o^2} \\ k_d = 2\omega_o \xi = \frac{4\pi\xi}{L_o} \end{cases} \quad (4.13)$$

ここで， k_d は微分ゲイン k_p は比例ゲイン， L_o は s の進行に伴う e の波打ちに対する固有波長， ξ は減衰係数である．

以下，式 (4.13) の導出について説明する．まず，ロボットの運動モデルを，次式として定義する．

$$\begin{cases} \frac{de}{dt} = v\phi \\ \frac{d\phi}{dt} = \omega \end{cases} \quad (4.14)$$

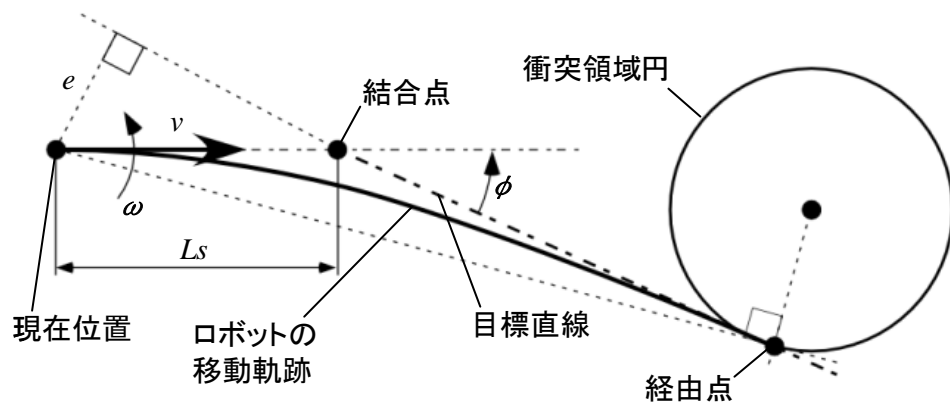


図4.5 衝突回避軌跡の生成方法

ここで、 v 及び ω はロボットの移動速度、旋回角速度である。 v は s を用いて次式として表せるので、

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (4.15)$$

式 (4.15) を用いて、式 (4.14) のモデルを s の関数に変換して式 (4.16) を得る。

$$\begin{cases} \frac{de}{ds} = \frac{de}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} = \phi \\ \frac{d^2e}{ds^2} = \frac{d\phi}{ds} = \frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} = \frac{\omega}{v} \end{cases} \quad (4.16)$$

次に、追従制御のフィードバック制御則として、次式を式 (4.16) に導入し、式 (4.13) の制御式を得る。

$$\omega = -v(k_p e + k_d \phi) \quad (4.17)$$

制御パラメータの設定としては、減衰係数 ξ を 1 とし蛇行の無い追従軌跡を得ることができる。固有波長 L_o については、大きな値を設定すると追従軌跡が目標直線から外側に離れて行き、他の障害物との接触の危険性が出てくるため、なるべく小さく設定し追従性を上げる必要がある。基本的に、式 (4.13) による制御は時間項に依存せず、軌跡追従性は、速度 v に依存しないが、実際にはロボットの旋回速度の上限値等により制限され、過小な L_o を選択した場合は、蛇行が発生する。従って、 L_o の下限値は、旋回運動の実験に基づき決定した。方向偏差 ϕ の初期値及び現在位置と結合点間の距離 L_s の選択も軌跡追従性に影響を与えるため、適正な選択が必要である。 ϕ の初期値に関しては、過大な角度の場合、追従し切れなくなるため、上限値を決めて衝突回避計画を実行しており、今回の開発では、 90° を上限値としている。 L_s の長すぎる設定は、目標直線に対する追従が不完全なうちに次の経路点への移行するため経路点を結ぶ回避経路から逸脱する現象が生じる。今回の開発では、実験的に適正值を求め L_s を 2.9 m とした。

4.4 衝突回避性能の評価

EMIEW に上記の衝突回避制御の機能を実装し、複数の歩行者を回避する回避行動試験を行った例を図 4.6 に示す。ここで、EMIEW の速度は 0.8 m/s (2.9 km/h) で一定とした。図 4.6(a)(b)は、歩行者 6 人が、最大 1.2 m/s (4.3 km/h) で走行する EMIEW に向かって歩いた実験である。図 7 (a)の例では、最初の歩行者を右に回避し 3 番目の歩行者を見て左に回避し、既に歩行者が存在しなくなった空間を通過しゴールに至った。図 4.6(b)の例では、EMIEW は最初の歩行者を回避した後、2 番目の歩行者を発見し、進行方向の急激な変更を避けるため 2 番目の歩行者の前を通り右方向に回避する行動を取った。この他の走行挙動として、複数の歩行者が、衝突領域円の直径以下の間隔で並び EMIEW の通過空間を塞いだ場合は、走行可能経路無しと判断し停止した。図 4.6 (c)は、7 人の人間が静止して立っている中を、EMIEW が走行した例である。人間が EMIEW の進行方向線上に存在していたため左に回避した後、右手の広い空間を選択し、S 字状の軌跡を形成して人間達の間をすり抜けた。

図 4.7 は、EMIEW が、5 人の歩行者の間で衝突回避を行いゴールに到達する様子である。上記に述べた条件での回避処理時間は、障害物検出から回避行動計軌軌道生成までの全体で 4 ms 以下であった。

このように、提案したアルゴリズムにより、複数の歩行者の移動に応じて衝突を回避しながら、最短に近い経路を移動することが可能であることが確認された。提案したアルゴリズムでは、図 4.6(b)の例のように、歩行者の進行方向の前方を過る経路選択も区別なく可能としている。この様な場合でも、歩行者の速度ベクトルに応じて将来の衝突回避の可否を決定し、衝突回避マージンを適切に選ぶことにより衝突回避を保証している。また、歩行者の速度の変動に対しても、一定周期毎（本報告では 0.5s 毎）の衝突回避軌跡の更新により、逐次衝突回避を保証している。

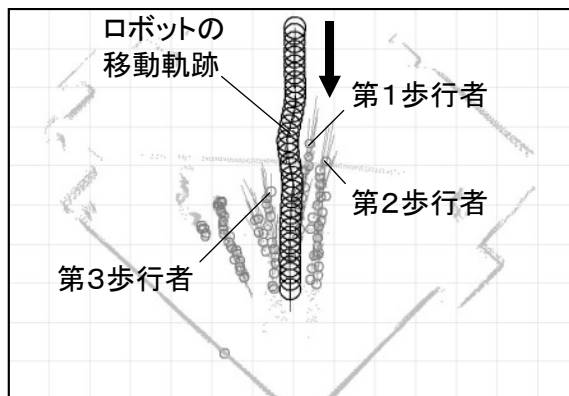
4.3.5 節に於いて、衝突回避軌跡の補正を行いロボットの機動を確実なものにする方法を紹介した。実験実績では補正アルゴリズムで生成した目標軌跡に対するロボットの走行誤差は 0.05m 以下のオーダーであり、一方、4.3.2 節で述べた、パーソナルスペース M_p 、すなわち、ロボットと歩行者の衝突に対するマージンは 0.5 m に設定している。このため、複数歩行者に対する各衝突回避実験に於いては十分安全な回避動作が実現できた。

提案したアルゴリズムでは、取り扱う障害物の数には制限を持たないが、例として示した実証実験では、実用的な条件として衝突回避対象とする歩行者数を 5~6 人としている。この条件は、幅 3 m 程度の一般的な建屋内通路でロボットと複数の歩行者が対向して移動する場合を想定している。通路の歩行では、通常には横並びの人数は多くても 3 人位で歩行者はほぼ道なりに連なって歩行すると考えられる。ロボットは、レーザスキャナで歩行者の検出を行うが、安定に検出できるのは、ロボットに最も近い正面の 2~3 人程度の歩行者であり、後方に続く歩行者の姿は前方の歩行者に遮られ検出されない場合があり、5~6 人以上の歩行者がいる場合でも検出の条件は大差な

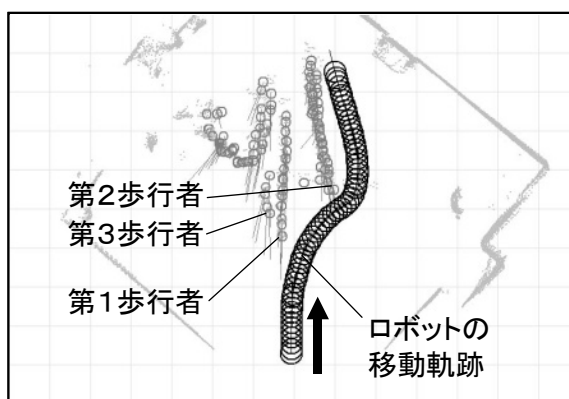
いと考える。この観点から、図 4.7 の実証実験の結果で述べた、5 人の歩行者に対する 4 ms の回避処理時間は、最も計算負荷の大きな条件での性能と考えられる。

上記の歩行パターンの前提の他に、通路一杯に歩行者が広がって歩くといったことも考えられるが、この状況でロボットが通過可能な空間が無ければ、ロボットは上記した様に通過可能な経路が見つかるまで停止して待つ。

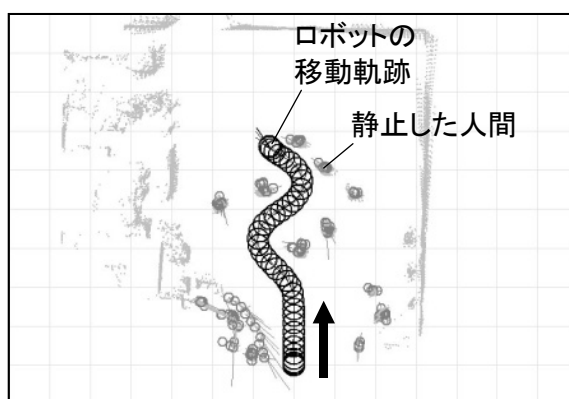
今回提案した衝突回避制御は、反射レベルの基礎制御であり、実用化に向けた次のステップとしては、安全性をより確実にするために、急速に接近する対象、速度ベクトルの変動が大きな対象に対して、衝突リスクをより高く見積もり、最短距離経路選定の規範に対し停止待機を優先する等の、上位の安全戦略を実行する階層的な制御体系を構築することが有効と考える。



(a) 動的衝突回避の例



(b) 動的衝突回避の例



(c) 静止した人間に対する衝突回避の例

図4.6 6人の歩行者に対する衝突回避の実験例

ロボットの速度 = 0.8 m/s (2.9 km/h)

歩行者の速度 = 1.2 m/s (4.3 km/h)



図4.7 EMIEWを用いた衝突回避実験

4.5 まとめ

人との共存環境で移動作業を行うロボットを実用化する上で、周囲に存在する人との衝突を回避しつつ効率的に移動することは、基本的な機能である。本章では、ロボットと移動する障害物との間の相対速度ベクトルに基づき将来の衝突の可能性を幾何学的に簡易に判定する手段及びロボットの動特性を考慮して生成した回避経路に対し滑らかに追従走行させる回避軌跡の生成する衝突回避アルゴリズムを新たに提案し、また複数の障害物との衝突判定を実行して目標地点に向けた準最短経路を逐次生成する手段を導入し衝突回避処理の効率について評価した。さらに、人間共生型ロボット **EMIEW** を用いた実証実験により、人の歩行周期に近い 0.5 s 毎の衝突回避軌跡の更新を行い、人の回避行動に近い滑らかな軌道での衝突回避が実現できることを確認し、アルゴリズムの有効性を示した。また、実運用上有効に検出されるだろう最大数の 5 人の歩行者に対する衝突回避走行実験において、回避処理に要した演算時間は、障害物検出から回避行動計軌生成までの全体で 4 ms 以下であり、実時間衝突回避の要求に対し十分計算負荷が小さいことが実証された。

なお、4.1 節で述べたように、本研究では、障害物として歩行者のみを取り扱っており、その他の障害物に関しては今後の課題としている。今後のアプローチとして、歩行者よりも大きな車両などの移動障害物に関しては、移動障害物の輪郭に沿って複数の衝突領域円を並べて衝突領域を定義することで、歩行者を衝突領域円として定義した今回の衝突回避制御アルゴリズムを援用することが可能である。壁などの予め既知の固定障害物に関しては、基本的には現状の運用のように、固定障害物の存在しない領域を走行可能領域として、初期の経路計画段階で衝突回避を考慮するのが無駄な処理をせずに効率的な運用であると考え。これらの障害物に関しては、何らかのアクシデントにより、ロボットが走行可能領域の外に出た場合のみ、上記の動的障害物に対する処理と同様の手段で障害物の検出と回避を行い、もとの走行可能領域へ復帰する動作を実施すれば良いと考える。

第5章 結論

5.1 本研究の成果

人間共生ロボット EMIEW の基本的特徴を、俊敏な移動、安全な衝突回避、親和性の高いコミュニケーションの3点として開発を進めた。俊敏な移動については、倒立振子移動機構の採用により、人間の早足並みの俊敏さを達成した。衝突回避については、任意の方向に移動する複数の歩行者を効率良く回避しながら走行を継続できることを確認した。コミュニケーション機能については、遠隔音声認識システムの導入により、騒音下でも確実な音声対話を実現し、さらに、全身のモーションを用いた非言語コミュニケーションにより親和性の高い対話を実現した。これらの開発成果は、2005年開催の愛知万博にて一般客相手のデモンストレーションにより実証された。

EMIEW の移動機能のコア技術である、倒立振子移動機構の走行制御方式については、上体運動補償制御及び傾斜走行制御を開発し、移動位置決めサーボ剛性を低減することで、接触に対する安全性を確保した。さらに、倒立振子移動機構の姿勢変動に影響を受けない代表位置として不動点の概念を提案し、これをベースとした走行軌跡方式を提示した。以上の成果により、高速走行を伴う人間との協同演技などの、予定軌跡と走行作業の同期時間管理が必要な、信頼性の高い走行制御が実現でき、また衝突回避軌跡生成に対し信頼性の高い軌跡追従走行が実現できた。

EMIEW の移動機能のもう一つのコア技術である、衝突回避制御については、ロボットと移動する障害物との間の相対速度ベクトルに基づき演算を単純化した衝突回避軌跡生成アルゴリズムを提案した。この手法を用い、最大5人の歩行者に対する衝突回避走行実験において回避処理に要した演算時間は、障害物検出から回避軌跡生成までの全体で4ms以下であり、実時間衝突回避の要求に対し十分計算負荷が小さいことが実証された。

5.2 今後の展開

本論文で述べた人間共生ロボット EMIEW の研究を通じて、人間共存環境での作業に適した移動機能のコア技術ができたと考える。ここでは、今後の人間共生ロボットの実用化展開に必要な条件につき考察し、最後に著者らが EMIEW の開発を受け継ぎ実施している人間共生ロボット開発展開について紹介する。

5.2.1 製品化の条件

第1章で述べたように、サービスロボットの将来市場は拡大のポテンシャルを持つと思われるが、現在主流の産業ロボットのように製品としての具体的な価値を示すことができなければ、持続的発展には至らない。そこで、サービスロボットが製品となり、それを生かした事業が成立する条件について考える。基本として、人間では出来ない仕事や機能・性能などの価値を提供し得ることが、あらゆる製品の成立条件であり、サービスロボットも例外ではない。図 5.1 は、製品化の条件を模式的に描いたものである。製品には、横軸に示す種々の価値が存在する。縦軸は人間を基準とした製品の性能であり、値が1の場合、人間と同等の性能を持つと考える。製品が製品足りえる条件はシンプルで、製品が持つ種々の特性の内、人間を超えるレベルの性能を持つ価値を必ず有することである。この価値の人間に比した性能が高いほど、また、人間を超える性能をもつ価値の数が多いほど、さらにその価値の有用性が高いほど、優れた製品として消費者が購入する。例えば、産業ロボットは、人間では達成し得ない製造コスト、繰り返し精度、対環境耐久性等の価値を提供することで、製品たりえ事業が成立している。製品としての価値の尺度は、種々の方向性が考えられる。ロボットを用いたサービスコストと人件費との比較は最も明確であり強力な尺度である。その一方で、人に対する好感度・親和性や癒しの効果など、定量的な尺度では測りにくい価値もある。前者のコスト意識は製品化の基本であり、明確な製品メリットに対し、適切なコストパフォーマンスの訴求が要求される。一方、後者はこれまでに無い価値尺度を提示するところに革新的な事業を生み出す可能性を持つ。携帯電話やパーソナルコンピュータ等は、その実用的な機能・性能を持つハードウェアが出現するまで存在し得なかった個人の遠隔コミュニケーションや汎用情報処理という価値を提供することで、生活文化の変革を起し強力なニーズを創り出した。

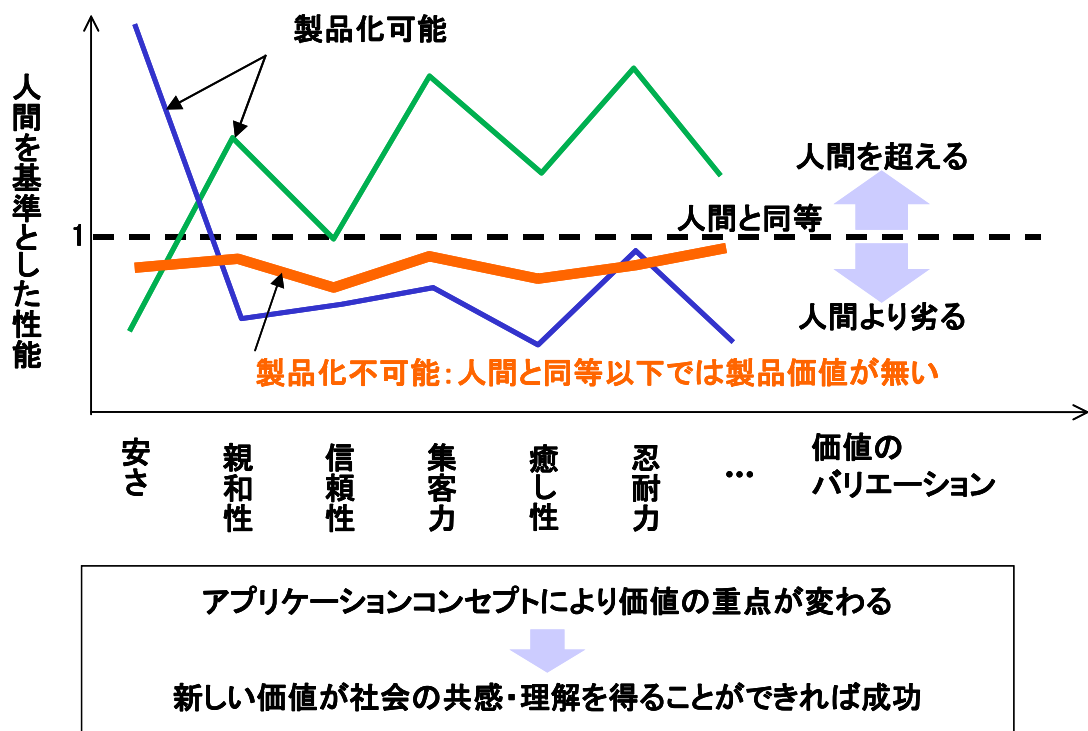


図 5.1 製品化の条件

5.2.2 事業化に向けたプロセス

前節では、サービスロボットが製品として成立する条件につき述べ、人が達成し得ない性能を持つ価値を訴求することが基本であることを示し、また、これまでにない新しい価値やその尺度を見出すことが、革新的な製品や事業を創生に繋がることを指摘した。ここでは、市場がまだ定まらず価値開拓途上のサービスロボットの事業化に向けたプロセスについて考える。

サービスロボットをベースとしたソリューションビジネスが軌道に乗るとすれば、新たな価値基準を備えたコンセプトの提示が必須であろうと思われる。もちろん、絶対的な条件として、人間の機能・性能を超えるもしくは拡張するというシーズ要素を備える必要があるが、課題はサービスコンセプトであり、何をやるべきかを提案することである。この解決のためには、サービスの受け手のニーズを掴み、その分析に基づき最適なソリューションを提示するプロセスが必須である。そのソリューションの最適な解としてサービスロボットの必要性が明確となればビジネスが回り始める。図 5.2 は、事業化のプロセスを模式的に描いたものである。既存事業が成長するプロセスは、ニーズのキャッチアップからソリューション提示の一過性の流れで成立するものではなく、多くの場合、双方のキャッチボールにより事業性の確度が上がっていく。このような事業化検討には、ニーズを主張する側とソリューションを提案する側の双方に、基本となる実際的な製品の機能・性能の概念やその具体的なメリットのイメージの共有が不可欠である。これに対し、図 5.2 の右に示すサービスロボットのような未知の事業を成長させるケースでは、特に新しい価値観のサービス提供を検討する場合、まだ実体や実績の無い実用化版ロボットを仮想して、事業検討を行うことが多い。この場合、ニーズ主張側とソリューション提供側の事業イメージの共有が困難な場合が多く、なかなか事業化に至らないのが現状であると考え。この問題の解決のため、サービスロボットの試作品をたたき台として、ニーズ主張側とソリューション提供側双方で共通イメージを育てながら、事業化方向を模索するとの有効と考える。このためには、中途半端な機能・性能のロボットを取り上げてもソリューションの実現性が把握できず、ある程度実用化のレベルに近い完成度のサービスロボットの実現が必要となる。シーズ提供側ではこの点がミッションとなる。

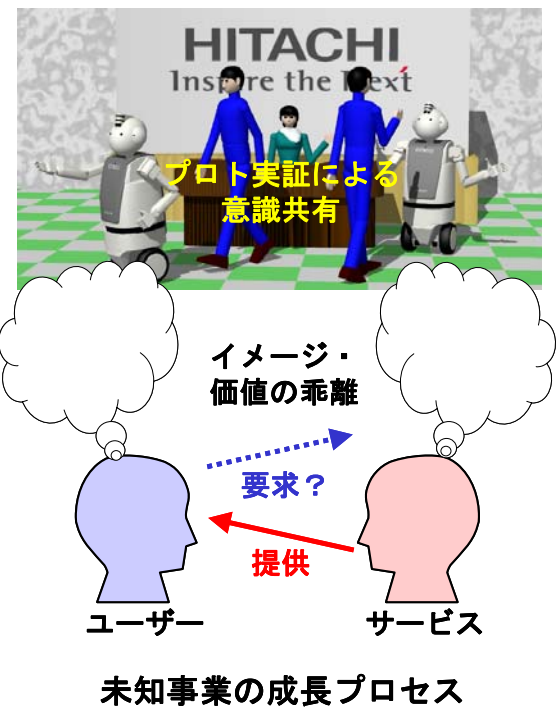
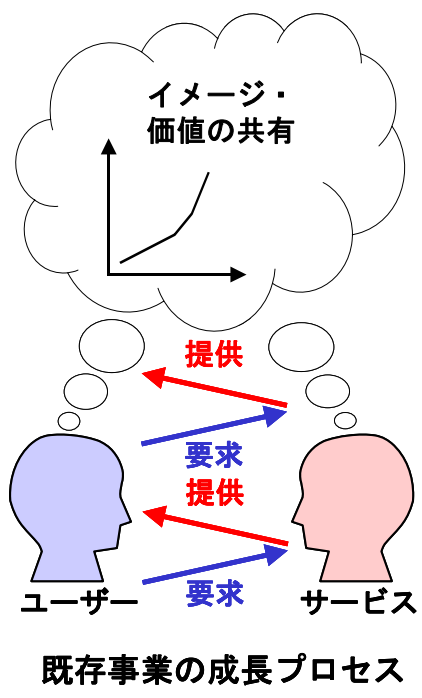


図 5.2 事業化のプロセス

5.2.3 人間共生ロボット開発の展開




ここでは、著者らが EMIEW の開発を受け継ぎ実施している人間共生ロボット開発展開について紹介する。

移動機能に着目しサービスアプリケーションを分類すると、運ぶ対象別に次の3つのバリエーションに分けられると考える。

- 1) 情報搬送：受付・案内，巡回監視，販売支援，プレゼンテーション，アミューズメント，アバター，見守り支援，盲導犬等
- 2) 物体搬送：物流支援，ポーター，自動清掃等
- 3) 人間搬送：運転支援型パーソナルモビリティ等

著者らは、これらの各々の分野に対し、表 5.1 に示すように、移動機能およびアプリケーション特有のサービス機能に対する課題を捕らえ実用化展開を試みている。

表 5.1 移動機能とサービス機能の課題と事業化へのアプローチ

アプリケーション	移動機能の課題	サービス機能の課題	事業化へのアプローチ
情報搬送	<ul style="list-style-type: none"> ・対人衝突回避機能の高度化 ・本質安全設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・親和性・意思伝達性能の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・後継機EMIEW2: 小型軽量化で安全性向上 ・病院での案内アプリ実証中 
物体搬送	<ul style="list-style-type: none"> ・対人安全性の確保 ・高精度の位置同定技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・マテリアルハンドリング系との連携 	<ul style="list-style-type: none"> ・物流支援ロボット: EMIEW衝突回避を継承 ・製造現場で試用中 
人間搬送 (高齢化社会対応)	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外耐環境性 ・高速状態での衝突回避 ・法整備: 道路交通法 	<ul style="list-style-type: none"> ・他ロボット, 走行環境インフラ等との情報交換 	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外運転支援ロボットカート: つくば市との協働で公道走行実証実験実施中 

以下に、各取り組みに関する概要を述べる。

5.2.3.1 情報搬送

情報搬送は特別な搭載物の搬送はせず、ロボット自体が動き回り、情報の収集、伝達をするサービスであり、本研究で取り上げた EMIEW で想定した受付・案内、巡回監視や、他に老人介護対話、プレゼンテーション支援、アミューズメントなどのサービスを含む。この用途では、多数の人の中で俊敏かつ安全に移動する機能が必要とされ、エレベータやドアと連動し屋内移動全域の移動が必要となる。また、サービス機能としては、顧客との親和性が高く確度の高いコミュニケーション能力を必要とする。このためには、本研究で適用した遠隔音声認識などの自然な対話や人型の形態やモーションを活かした非言語対話機能が有用であり、さらに、信頼性の高い顧客サービスのために、ロボットをアバターとした人間のオペレータによる遠隔対話の技術も有用であると考えられる。このジャンルでのユーザーメリットの訴求は、アバターとしてのロボット群の運用による、対話オペレータの人的費用の削減、サービス作業の自動化による情報提供、情報収集の質の向上、ロボットを表に出すことによる集客効果が上げられる。移動機能の課題としては、建屋内外での人の入り組む環境での走行安全性の更なる強化が第一であり、今回の研究で提案した移動体に対する反射的な障害物回避制御、移動位置決め剛性緩和による接触時の物理的衝撃緩和などの機能に加え、走行環境の状態や障害物の素性を把握し上位の判断により安全走行管理における例外状態発生頻度を低減し、走行信頼性を上げる必要がある。また、物理的な安全対策も必要であり、情報搬送のように、搭載質量の要求がない用途では、ロボットの質量を極力抑え衝突エネルギーを低減し、本質的な安全を図ることが有効である。

著者らが EMIEW の後継機として開発した EMIEW2[47]では、身長を情報サービスの限界である 0.8m に縮小し、機体質量も EMIEW の 70kg から 14kg へと大幅に削減し、走行の本質安全を図った。ただし、移動機能の特徴である俊敏さは残し最大 1.7 m/s (6 km/h) の移動速度は継承した。また、EMIEW2 では、移動機構に脚車輪機構を採用し、高速移動では起立姿勢で EMIEW と同様の倒立振子移動を行い、ひざを突いた座位姿勢では 4 輪走行でより安定性の高い走行モードも選択可能とした。一方、サービス機能の課題は、親和性の向上を含めた意思伝達性能の向上である。EMIEW2 では、上記の脚車輪方式の採用により外観がより人間の子供に近い形態となり、感情移入のしやすい表現媒体となった。

5.2.3.2 物体搬送

物体搬送は、搬送機能の本来的なアプリケーションで、物を所定の場所から目的の場所に搬送することがミッションである。第2章で紹介したオフィスでの書面類の搬送などは一つの例であるが、多くの場合、工場製造現場や物流センタなどでの物流作業支援の用途が多いと考えられる。また、ビルの巡回掃除等もこのジャンルのアプリケーションといえる。すでに実用製品として床面のガイドテープに沿って走行する自動搬送装置などが普及している。これに対し将来は、セル生産などへの対応としてよりフレキシブルな走行経路設定が可能な走行環境インフラレスの搬送が、新たなコンセプトになると考えられる。将来の展開としては、駅、空港などの公共施設やスーパーマーケットや量販店などで顧客に追従しながら荷物を運ぶポーターサービスなども考えられる。このジャンルでのユーザーメリットの訴求は、省人化のコストメリットであり、耐環境性、繰り返し作業の信頼性など、産業ロボットと類似である。オフィス用途は、前節で述べた情報搬送サービスのオプションの位置づけと考える。ポーターサービスに関しては、施設の顧客サービス向上の他、次節で取り上げる高齢化社会問題の解決策の一つとしての支援サービスの有効な手段として期待される。これらのサービスでの移動機能の課題は、前節と同様、走行時の対人安全性の確保であり、更には広範囲な移動範囲での確実な搬送作業を保証する高精度の位置同定技術である。

著者らは、EMIEW で開発した衝突回避制御技術を継承した物流支援ロボット[48]を開発し、レーザスキャナデータによる、地図スキャンマッチングをベースにした自己位置同定機能を発展させ、インフラレス自律走行を実現した。本ジャンルの、サービス機能の課題は、搬送物の積み下ろし手段である。基本的な構成として、移動地点ごとに設置されたマテリアルハンドリング用のマニピュレータやローラローダー装置等との連携による搬送物の受け渡しが現実的であると考えられる。このジャンルでのヒューマンインターフェースは、工場用途では、従来のタッチパネルや音声インターフェースで十分であるが、ポーターロボット等の非製造用途でのアプリケーションではEMIEWに近い対人親和性の機能が要求されてくるものと思われる。

5.2.3.2 人間搬送

人間を運ぶ用途は、すなわち人間搭乗型の移動サービスである。サービス例としては、日常移動支援用のパーソナルモビリティサービスが想定される。このサービスは、特に高齢化社会の進行に伴い顕在化している交通弱者の問題の解決策として有望と考えている。自動車中心社会の影響により、公共交通の衰退、生活基盤である大規模商業施設の郊外集約化により、自動車の運転が出来ないか、運転に不安がでてきた高齢者の生活が立ち行かなくなる問題が発生し悪化の道を辿っている。さらに、このような状況から高齢者の移動の機会が減少し、社会参加のアクティビティが失われるという問題も発生している。この問題を解決する一つの施策として、居住空間と商業施設や病院等の生活支援施設を、半径 2 km 程度の地域に集約し、短距離の移動で全ての生活が充足する都市設計の構想が提案されている[49][50]。

このような都市設計では、都市内への一般乗用車の乗り入れを制限し、主交通を市街電車などの LRT (Light rail transit) や自転車などに置き換えることで、近距離移動の効率化を図り併せて環境負荷低減を図る。これらの交通システムの見直しにおいて、高齢者に対する Door to Door の移動手段としてロボット化を図ったパーソナルモビリティが有効であると考えられる。これは、自律衝突回避機能により運転技量が低下した高齢者でも安全に運転できるように運転操作を支援するものである。運用形態としては、都市内の乗り捨て可能なシェアリングシステムとして、携帯電話などでの呼び出しに応じユーザーの現在位置に至り、ユーザーの運転操作で目標地点に移動する、といったサービスを想定している[51]。このようなサービスは、高齢者のみならず、あらゆる年代層の移動支援につながるものと期待できる。このような搭乗型の移動システムの移動機能の課題は、前節と同様に走行安全性の追及である。新たに要求される点は、屋外の歩道や車道での運用となるため、天候などの環境に左右されずに、また最高 30 km/h 程度の速度でも、ロバストな衝突回避が可能なセンシング機能、回避情報処理である。技術面の他に、道路での運用に対する道路交通法の緩和等の法整備も大きな課題となる。一方、サービス機能の課題としては、他ロボット、走行環境インフラ及び交通管制センター等との交通安全や効率運用のための情報交換、ユーザーに対する対話処理などが考えられる。

著者らは、この分野の事業性への期待と社会的に避け得ない高齢化社会問題への取り組みをモチベーションに、屋外運転支援ロボットカートの開発を進めており[52]、つくば市と共同でパーソナルモビリティの社会実証実験を開始した。この取り組みにより、屋外運転支援技術と無人自律運用の信頼性向上に向けた開発を促進しつつ、パーソナルモビリティとしての安全性の実証を重ね、公道での運用の認可に向けた実績を積み上げる。また、最終的には一般ユーザーの搭乗活用を目指し、サービス効果の実証確認と有用性に対する社会的認知の獲得を目指している。

5.2.4 最後に

ここでは、本論文で論じた EMIEW の開発成果を参考として、人間共生ロボット全般に対し今後それらをどのように製品として実用化し社会展開すべきかについて考察した。具体論として、サービスアプリケーションを想定することで、実用化へのプロセスと克服すべき課題につき明らかにし、それらに対する施策の一例として現在の著者らの取り組みについて紹介した。サービスロボットの実用化開発やそれを受け入れるための社会整備は、先端ロボット技術を日本の強みとする国策により、現在も種々の国家プロジェクト等の形で、産学官を挙げて取り組まれている。その一方、現時点で期待に沿った実用化の伸びはまだ見られていないのも現実である。これは人間共生ロボットの技術が、まだ 5.2.1 節で述べた製品化の条件を満たす程に成熟していないこと、また社会的有用性に訴えかけるに足るサービスコンセプトが知られていないことによると思われる。前者の技術の問題に関しては、実用化実証による地道なブラッシュアップで完成度を上げることが必要であり、後者のサービスコンセプトの問題については、ロボットによる生活支援の実物を提示して、ニーズ側とシーズ側の共通イメージの下に、新しい価値概念を構築するプロセスが必要であると考ええる。これらにより、生活面、文化面の変革を起こすことで、人間共生ロボットの市場は爆発的に伸びる可能性を持つと考える。

謝辞

本研究は、筑波大学と(株)日立製作所・機械研究所との共同研究において、工学博士 坪内孝司 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻教授のご指導のもとに行われたものである。また、同教授には、本研究を進めるに当たり、研究内容の議論、研究結果の発表および論文の執筆のご指導を頂いた。

また、工学博士 油田信一 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻教授、博士(工学) 大矢晃久 筑波大学大学院システム情報工学科コンピュータサイエンス専攻准教授、博士(工学) 相山康道 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻准教授及び博士(工学) 松本治 独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門フィールドロボティクス研究グループ研究グループ長には、本論文のまとめ及び研究結果の発表でご指導を頂き、貴重なご助言を頂いた。

また、EMIEW の開発においては、(株)日立製作所・日立研究所(旧機械研究所)の中村亮介研究員、山本健次郎主任研究員、一野瀬亮子主任研究員、柄川索主任研究員、玉本淳一主任研究員、田島富士夫主任研究員、網野梓研究員、(株)日立製作所・中央研究所の戸上真人主任研究員、天野明雄主任研究員、(株)日立製作所・デザイン本部の星野剛司主任デザイナー、柳本学専門デザイナー、(株)日立プラントテクノロジー・研究開発本部の堀内俊彦所長、日立オートモティブシステムズ(株)・技術開発本部の深野善信主任技師及び日立ピアメカニクス(株)・制御設計本部の池勝久技師等その他多くの方々のご協力とご支援を頂いた。

皆様方に、この場を借りてあらためて深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 内閣府, “高齢化の状況及び高齢社会対策の実施の状況に関する年次報告”, 平成 22 年度版内閣府高齢化社会白書, 2010 年.
<http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/index-w.html>
- [2] 財団法人機械振興協会経済研究所, “RT (ロボットテクノロジー) による産業波及効果と市場分析”, 平成 19 年度委託調査研究事業, 2007 年.
http://www.jara.jp/publication/dl/rt_08summary.pdf
- [3] 青山元, 田島茂樹, 石川和良, 関淳也, 石村佐緒里, 高橋朝美, 薩見雄一, 足立佳儀, 西原逸男, 高藤宏一, 雫貞雄, 伊澤祥一, “サービスロボットの事業化”, 第 28 回ロボット学会学術講演会予稿集, 1E2-3, 2010 年 9 月.
- [4] 青山元, 田島茂樹, 石川和良, 岡村三男, 関淳也, 高藤宏一, 西原逸男, 雫貞雄, “床面掃除ロボットの稼働状況”, 第 24 回ロボット学会学術講演会予稿集, 3I17, 2006 年 9 月.
- [5] 石田健蔵, “エンターテインメントロボットへの応用”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 270–272, 2003年11月.
- [6] 尾崎文夫, 鈴木薫, 杉山博史, 上野晃嗣, 寺元圭一, 会津宏幸, 浦田耕二, 藤井寛子, 久間修一, “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 年 9 月.
- [7] 東芝 Apli 長健太, 溝口祐美子, 長野伸一, 稲葉真純, 川村隆浩, “生活オントロジインターフェースを備えたホームロボット”, ROBOMECH2007 予稿集, 1A1-D07, 2007 年 5 月.
- [8] G. Cen, I. Hagiwara, H. Nakamoto, N. Matsuhira, “Effective Application of Monte Carlo Localization for Service Robot”, Proc. of 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007), WeB6.1, Oct. 2007.
- [9] 日浦亮太, 大西献, 岡崎弘祥, 浅野伸, “接客ロボット wakamaru の開発と実証試験の概要”, ROBOMECH2006 予稿集, 1A1-E02, 2006 年 5 月.

- [10] 植木美和, 姜上, 岡林桂樹, 村瀬有一, 沢崎直之, 神田真司, “オフィスサービスロボットの開発 (第1報) -コンセプトと全体システム-”, 第22回ロボット学会学術講演会予稿集, 3D24, 2004.
- [11] 富士通/岩下純久, 境 克司他, “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.
- [12] 植木美和, 姜上, 岡林桂樹, 神田真司, 吉田靖治, 石嶋浩行, “サービスロボット enon の開発 (1) -サービスアプリケーションの開発-”, 第24回ロボット学会学術講演会予稿集, 3I11, 2006年9月.
- [13] 村川賀彦, 神田真司, 宍戸徳一, 十時伸, 十時郁代, : “サービスロボット enon の開発(2) : 商業施設での試験運用”, 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I12, 2006年9月.
- [14] 山本広志, 柄川索, 細田祐司, “ビルサービスロボットの開発”, 2005年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1P2-S-036, 2005年6月.
- [15] 荒井穰, 細田祐司, 柄川索, 小関篤志, 田島泰治, 朝 康博, 岡田 祐子, “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, G2-53, pp. 797-800, 2005年11月.
- [16] 岡田祐子, 柄川索, 朝康博, 荒井穰, 田島泰治, 小関 篤志, 細田 祐司, “家庭用掃除ロボットの動作制御アルゴリズム”, 第48回自動制御連合講演会, G2-54, pp. 801-804, 2005年11月.
- [17] Y. Hosoda, S. Egawa, J. Tamamoto, K. Yamamoto, R. Nakamura, and M. Togami, “Development of Human-Symbiotic Robot “EMIEW” – Design Concept and System Construction –”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.18, No.2, pp.195-202, 2006.
- [18] U. Reiser, C. Connette, J. Kubacki, A. Bubeck, F. Weisshard, T. Jacobs, C. Parlitz, M. Haegele and A. Verl, “Care-O-bot 3 – Creating a product vision for service robot applications by integrating design and technology”, *Proc. of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, MoIVT14.1, Oct. 2009.

- [19] H. M. Gross, Ch. Schroeter, S. Mueller, A. Koenig, E. Einhorn, “TOOMAS: Interactive Shopping Guide Robots in Everyday Use – Implementation & Experiences from Long-term Trails”, Proc. of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009), MoIVT14.3, Oct. 2009.
- [20] T. Wimbock, A. Albu-Schaffer, G. Hirzinger and D. Nenchev, “Experimental Study on Dynamic Reactionless Motions with DLR’s Humanoid Robot Justin”, Proc. of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009), WeIVT1.5, Oct. 2009.
- [21] T. Miyashita and H. Ishiguro, “Human-like natural behavior generation based on involuntary motions for humanoid robots”, International Journal of Robotics and Autonomous Systems, Vol.48, pp.203-212, 2004.
- [22] 光永法明, 宮下善太, 宮下敬宏, 石黒浩, 萩田紀博, “コミュニケーションロボット Robovie-IV の開発とオフィス環境での日常対話”, 日本ロボット学界誌, Vol.25, No.6, pp822-833, 2007年9月.
- [23] 松川善彦, 榊原瑞穂, 後藤誠, 小林昌市, 蜂谷修二, 足達勇治, 杉ノ内剛彦, “人追従荷物搬送ロボットの開発 – 第1報:概要 –”, 第23回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1I21, 2005年9月.
- [24] S. H. Jeong, T. Takahashi, “Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Inverted Mobile, Standing, and Sitting motion”, Proc. of 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007), WeB6.4, Oct. 2007.
- [25] 山岡正明, “パーソナルモビリティロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.8, pp.885-886, 2008年11月.
- [26] 本田技研工業(株) 広報 HP, “人との調和を目指した新たなパーソナルモビリティ技術を開発～前後左右に移動可能な世界初の駆動機構を採用～”.
<http://www.honda.co.jp/news/2009/c090924.html>
- [27] T. Yoshimi, M. Nishiyama, T. Sonoura, H. Nakamoto, S. Tokura, H. Sato, F. Ozaki, N. Matsuhira and H. Mizoguchi, “Development of a Person Following Robot with Vision Based Target Detection”, Proc. of 2006 IEEE/RSJ

International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), FP1-9(5), Oct. 2006.

- [28] N. Mitsunaga, T. Miyashita, H. Ishiguro, K. Kogure, and N. Hagita, “Robovie-IV: A Communication Robot Interacting with People Daily in an Office”, Proc. of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), FP1-3(4), Oct. 2006.
- [29] ATR 宮下善太, 光永法明, 篠沢一彦, 石黒浩, 萩田紀博, “人と対話するロボットの社会的役割と対話場所が印象に与える影響”, ROBOMECH2007 予稿集, 1A1-C09, 2007年5月.
- [30] Y. Ha, S. Yuta, “Trajectory tracking control for navigation of self-contained mobile inverse pendulum”, Proc. of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems 1994 (IROS94), pp.1875-1882, Oct. 1994.
- [31] 河瀬秀, 油田信一, “屋内環境を自律的にナビゲーションする平行二輪倒立振り子型自立移動ロボットの機能分散アーキテクチャによる実現”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2, pp.238-248, 1996年5月.
- [32] 戸上真人, 天野明雄, “人間共生ロボット EMIEW の騒音下音声認識技術”, 計測と制御, Vol.46, No.6, pp.484-487, 2007年6月.
- [33] M. Togami, Y. Obuchi, and A. Amano, “Automatic Speech Recognition of Human-Symbiotic Robot EMIEW”, The Second International Conference on Human-Robot Interaction, pp.395-404, Sept. 2007.
- [34] 大島正裕, 小河守正, “モデル制御予測制御－I 基礎編：発展の歴史と現状”, システム／情報／制御, Vol.46, No.5, pp.286-293, 2002年.
- [35] 杉江利治, 山本浩之, “状態および入力の制約を考慮した閉ループ系の目標値生成”, 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.9, pp.849-855, 2001年.
- [36] 松本治, 梶田秀司, 谷和男, “移動ロボットの内界センサのみによる姿勢検出とその制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.5, pp.541-550, 1990年10月.
- [37] O. Khatib, “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,”

International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No.1, pp.90-98, 1986.

- [38] Satou, K., "Deadlock-free motion planning using the Laplace potential field," *Advanced Robotics*, Vol. 7, No.5, pp.449-461, 1993.
- [39] D. Fox, W. Burgard, S. Thurn, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol.4, No.1, pp.23-33, 1997.
- [40] O. Brock, O. Khatib, "High-speed navigation using the global dynamic window approach," In *Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Robotics & Automation*, Vol.1, pp.341-346, 1999.
- [41] 津崎亮一, 吉田和夫, "ファジーポテンシャル法に基づく全方位視覚を用いた自律移動ロボットの行動制御", *日本ロボット学会誌*, Vol.21, No.6 , pp.656-662, 2003.
- [42] 坪内孝司, 浪花智英, 有本 卓, "平面を移動する複数の移動障害物とその速度を考慮した移動ロボットのプランニングとナビゲーション", *日本ロボット学会誌*, Vol.12, No.7, pp.1029-1037, 1994.
- [43] 建部謙治, 中島 一, "静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動 歩行者の回避行動に関する研究 (2)", *日本建築学会計画系論文報告集*, No.418, pp.51-57, 1990.
- [44] 依田光正, 塩田泰仁, "人間とすれ違い行動を行う移動ロボットの研究", *日本ロボット学会誌*, Vol.17, No.2, pp.202-209, 1999.
- [45] Jae Hoon Lee, Tsubouchi, T., Yamamoto, K., Egawa, S., "A Study on Multiple Moving Objects Tracking from a Robot in Motion," *Proc. of 6th SI2005 (The Society of Instrument and Control Engineers)*, 2D2-3, 2005.
- [46] R. A. Brooks, and T. Lozano-Perez, "A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Find-path with Rotation", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-15, No.2, pp.224-233, 1985.
- [47] 中村亮介, 網野梓, 一野瀬亮子, 柄川索, 玉本淳一, "人間共生ロボット「EMIEW2」の開発 (機構と制御システムの構成)", *ROBOMECH2007 予稿集*, 2P1-I03, 2008

年 6 月.

- [48] 細田祐司, “物流システムとロボット 知能型物流支援ロボットの開発”, 日本ロボット工業会機関誌 ロボット, No. 186, pp. 43-46, 2009 年 1 月.
- [49] 国土交通省東北地方整備局, “コンパクトシティーの推進”, 2003 年 2 月.
http://www.thr.mlit.go.jp/syourai/pdf/03_02_06.pdf
- [50] 国土交通省 都市・地域整備局 大都市圏整備課, “大規模都市圏におけるコンパクトな都市構造”, 2003 年.
<http://www.mlit.go.jp/crd/daisei/compact/>
- [51] 細田祐司, 古賀昌史, 山本健次郎, “将来都市交通要素としての自律移動技術”, 日立評論, Vol.92, No.11, pp.854-858, 2010 年 11 月.
- [52] 原祥堯, 小野幸彦, 中拓久哉, 山田弘幸, 城吉宏泰, 大島章, 池田慎太郎, 田中航, 岡和道, 松原満, 網野梓, 柄川索, “ピッチ・ロール傾斜させた 2D 測域センサを用いた屋外自律移動のための 3D 環境形状の取得”, SI2009 予稿集, 1B3-1, 2009 年 12 月.

者研究業績目録

本論文の内容に関係の深い発表文献

査読付雑誌論文

- 1) Y. Hosoda, S. Egawa, J. Tamamoto, K. Yamamoto, R. Nakamura, and M. Togami, “Development of Human-Symbiotic Robot “EMIEW” – Design Concept and System Construction –”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.18, No.2, pp.195-202, 2006.
- 2) 細田祐司, 中村亮介, 柄川 索, “人間共生ロボットにおける倒立振子移動機構の走行制御方式”, *日本機械学会論文集 (C編)*, 76 巻, 770 号, pp. 326-333, 2010 年 10 月.
- 3) 細田祐司, 山本健次郎, 一野亮子, 柄川 索, 玉本淳一, 坪内孝司, “人間共生ロボットの衝突回避制御”, *日本機械学会論文集 (C編)*, 77 巻, 775 号, pp. 484-494, 2011 年 3 月.

査読付国際会議論文

- 1) Y. Hosoda, S. Egawa, J. Tamamoto, K. Yamamoto, R. Nakamura, and M. Togami, “Basic Design of Human-Symbiotic Robot “EMIEW” ”, *Proc. of the 2006 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*, pp. 5079-5084, Oct. 2006.
- 2) Y. Hosoda, K. Yamamoto, R. Ichinose, S. Egawa, J. Tamamoto, T. Tsubouchi, and S. Yuta, “Collision-Avoidance Algorithm for Human-Symbiotic Robot”, *Proc. of the International Conference on Control, Automation and Systems 2010 (ICCAS 2010)*, pp. 557-561, Oct. 2010.

査読の無い講演論文

- 1) 細田祐司, 堀内敏彦, 柄川索, 玉本淳一, 戸上真人, “人間共生ロボット“EMIEW”の開発”, 2005 年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, ALL-N-007, 2005 年 6 月.
- 2) 細田祐司, 柄川索, 玉本淳一, 山本健次郎, 中村亮介, “人間共生ロボット“EMIEW”の開発 –開発コンセプトと全体システム–”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1I16, 2005 年 9 月.
- 3) Y. Hosoda, S. Egawa, J. Tamamoto, K. Yamamoto, R. Nakamura, M. Togami, “Development of human-symbiotic robot “EMIEW” - Design Concept and System Construction –”, Proc. of 36th International Symposium on Robotics 2005 (ISR2005), Nov. 2005.
- 4) 細田祐司, “人間共生ロボット“EMIEW””, ロボット工学セミナー 第 32 回シンポジウム 愛知万博次世代ロボット実用化プロジェクト, 2005 年 11 月.
- 5) 中村亮介, 柄川索, 細田祐司, “人間共生ロボット“EMIEW”における走行制御系の開発”, 計測自動制御学会 第 6 回 SI 部門講演会, 2005 年 12 月.
- 6) 細田祐司, “人間共生ロボットの技術動向とモータ活用”, 日本能率協会 第 26 回 2006 モータ技術シンポジウム, 2006 年 4 月.
- 7) 中村亮介, 柄川索, 細田祐司, “人間共生ロボット“EMIEW”の走行計画手法”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1L24, 2006 年 9 月.
- 8) 山本健次郎, 柄川索, 一野瀬亮子, 玉本淳一, 細田祐司, “人間共生ロボット“EMIEW”の衝突回避ナビゲーション”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1L23, 2006 年 9 月.
- 9) 柄川索, 山本健次郎, 一野瀬亮子, 細田祐司, “人間共生ロボット EMIEW におけるレーザレーダを用いた衝突回避”, 精密工学会 画像応用技術専門委員会 2006 年度第 3 回研究会, 2006 年 11 月.
- 10) Y. Hosoda, “Development of Human-Symbiotic Robot”, Taiwan International Robotics Forum 2008, May 2008.

- 11) Y. Hosoda, “Development of Human-Symbiotic Robot”, A Japanese-German Workshop: Service Robot Technologies and Applications, Oct. 2008.
- 12) 細田祐司, “サービスロボット“EMIEW”の開発”, 阪大シンポジウム「世界ものづくりサミット ワールドアライアンスフォーラム」, 2009年2月.

解説等査読無し寄稿

- 1) 細田祐司, “生活支援ロボット 人間共生ロボット「EMIEW」”, 日本ロボット工業会機関誌 ロボット, No. 167, pp. 11-12, 2005年11月.
- 2) 細田祐司, “特集 愛・地球博で競演したロボット:人間共生ロボット「EMIEW」”, 自動化推進「秋号」, Vol. 34, No. 4, 2005年12月.
- 3) 細田祐司, “人間共生ロボット「EMIEW」”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 171, 2006年3月.
- 4) 細田祐司, “人間共生ロボットの開発への取り組み”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 3, pp. 296-299, 2006年4月.
- 5) 細田祐司, “人間共生ロボットEMIEW”, 日本機械学会誌, Vol. 109, No. 1051, pp. 444-445, 2006年6月.
- 6) 細田祐司, “人間共生ロボット開発への取り組み”, 日立評論, Vol. 90, No. 9, pp. 774-779, 2008年9月.
- 7) 古賀昌史, 細田祐司, 守屋俊夫, “人間を指向した研究開発 ヒューマノイドロボットがつなぐ人間・機械・情報”, 日立評論, Vol. 91, No. 4, pp. 366-369, 2009年4月.

知的所有権

- 1) 細田祐司, 奥田雅夫, 萩谷茂, 柄川索, 山本広志, 特開 2005-329515, “サービスロボットシステム”.
- 2) 玉本淳一, 細田祐司, 堀内敏彦, 柄川索, 特開 2006-136963, “ロボット”.

- 3) 細田祐司, 柄川索, 玉本淳一, 中村亮介, 堀内敏彦, 特開 2006-136962, “移動ロボット”.
- 4) 玉本淳一, 細田祐司, 柄川索, 堀内敏彦, 特開 2006-146381, “自律移動装置, 並びに物体及び自己位置検出システム”.
- 5) 細田祐司, 特開 2006-247802, “移動ロボット”.
- 6) 玉本淳一, 田島不二夫, 細田祐司, 特開 2006-247804, “ロボットアーム”.
- 7) 細田祐司, 玉本淳一, 田島不二夫, 特開 2006-247805, “ハンド機構”.
- 8) 中村亮介, 柄川索, 細田祐司, 特開 2007-319991, “移動ロボット”.
- 9) 深野善信, 玉本淳一, 細田祐司, 特開 2007-319973, “ロボット装置”.
- 10) 玉本淳一, 細田祐司, 特開 2009-080804, “自律移動ロボットシステム”.

本論文と異なる内容の発表文献

査読付雑誌論文

- 1) 舘暲, 小森谷清, 谷江和雄, 大野武房, 阿部稔, 細田祐司, 藤村貞夫, 中島英博, 加藤一郎, “人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の一方法”, バイオメカニズム, Vol. 4, pp. 279-289, 1978年6月.
- 2) 舘暲, 小森谷清, 谷江和雄, 大野武房, 阿部稔, 細田祐司, “視線可動型センサを用いる自律移動機会の移動制御”, バイオメカニズム, Vol. 6, pp. 242-251, 1982年8月.
- 3) 榊原義宏, 菅和俊, 細田祐司, 服部誠, 藤江正克, “4脚歩行機構のための低衝撃足先軌道”, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 6, pp. 662-671, 1990年12月.
- 4) Y. Sakakibara, M. Hattori, K. Kan, Y. Hosoda, M. Fujie, “Low-impact foot trajectory for a quadruped walking machine”, Advanced Robotics, Vol. 7, No. 4, pp. 343-360, 1993.

査読付国際会議論文

- 1) M. Fujie, Y. Hosoda, T. Iwamoto, K. Kouji, “Mobile Robot System with Transformable Crawler Intelligent Guidance and Flexible Manipulator”, Proc. of Third International Symposium of Robotics Research, 1985.
- 2) Y. Hosoda, M. Fujie, H. Maki, “Development of quadrupedal walking machine”, Proc. of 3rd International Conference on Advanced Robotics (ICAR' 87), pp.65-76, Oct. 1987.
- 3) M. Fujie, Y. Sakakibara, M. Hattori, K. Kan, Y. Hosoda, “Control Algorithm for Dynamic Walking with Full-scale Quadruped Machine”, Proc. of IARP(Int. Advanced Robotics Program) 2nd Workshop on Manipulators Sensors and Steps towards Mobility”, Oct. 1988.
- 4) M. Fujie, Y. Sakakibara, M. Hattori, K. Kan, Y. Hosoda, “Development of Quadrupedal Mechanism (1) Study of Redundant Freedom Mechanism Control”, Proc. of 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May 1989.

- 5) Y. Sakakibara, M. Hattori, K. Kan, Y. Hosoda, M. Fujie, “Foot Trajectory for a Quadruped Walking Machine”, Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems '90, July 1990.
- 6) Y. Sakakibara, S. Sugiyama, M. Hattori, K. Kan, Y. Hosoda, M. Fujie, “Quadrupedal Walking Mechanism and its Intelligent Control”, Proc. of Japan Industrial Robot Association '91 Int. Symposium on Advanced Robot Technology", March 1991.
- 7) J. H. Lee, K. Abe, T. Tsubouchi, Y. Hosoda, R. Ichinose, K. Ohba, “Collision-Free Navigation Based on People Tracking Algorithm with Biped Walking Model”, Proc. of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Oct. 2008.

査読付国内会議論文

- 1) 岡田祐子, 柄川索, 朝康博, 荒穰, 田島泰治, 小関篤志, 細田祐司, “掃除ロボットにおけるスパイラル走行の実験的評価”, 第11回ロボティクス・シンポジウム, 2006年3月.

査読の無い講演論文

- 1) 小森谷清, 舘暲, 谷江和雄, 阿部稔, 中島英博, 細田祐司, “移動ロボットのランドマークトラッキングのシミュレーション”, 第5回バイオメカニズムシンポジウム予稿集, pp. 401-402, 1977年7月.
- 2) 小森谷清, 舘暲, 谷江和雄, 大野武房, 中島英博, 細田祐司, “盲導犬ロボットの研究 第1報 (システム構成と移動サブシステムの試作)”, 第16回SICE学術講演会予稿集, 1977年8月.
- 3) 舘暲, 小森谷清, 谷江和雄, 大野武房, 細田祐司, 藤村貞夫, “盲導犬ロボットの研究 第2報 (人との相対位置を一定に保つ移動ロボットの制御)”, 第16回SICE学術講演会予稿集, 1977年8月.
- 4) 舘暲, 小森谷清, 谷江和雄, 阿部稔, 細田祐司, “人と一定位置関係を保つ移動ロボットの制御”, 第1回ビークルオートメーションシンポジウム予稿集, pp. 65-68, 1978年1月.

- 5) 舘暲, 小森谷清, 谷江和雄, 阿部稔, 松田啓, 細田祐司, 朴浩相, “盲導犬ロボットの研究 第3報 (インターフェース設計とブレーキ・ランドマークセンサ装置の試作)”, 第17回 SICE 学術講演会予稿集, pp. 631-632, 1978年8月.
- 6) 小森谷清, 舘暲, 谷江和雄, 阿部稔, 松田啓, 細田祐司, 朴浩相, “盲導犬ロボットの研究 第4報 (ランドマークを使ったロボットの街路誘導)”, 第17回 SICE 学術講演会予稿集, pp. 629-630, 1978年8月.
- 7) 細田祐司, 清水知和, 舘暲, 谷江和雄, 小森谷清, 阿部稔, “盲導犬ロボットの研究 第5報 (簡易視覚情報による走行制御のシミュレーション)”, 第21回自動制御連合講演会予稿集, pp. 407-408, 1978年8月.
- 8) 舘暲, 小森谷清, 谷江和雄, 阿部稔, 細田祐司, “ランドマークを利用した移動ロボットの誘導”, 第2回ビークルオートメーションシンポジウム予稿集, pp. 17-20, 1979年11月.
- 9) 細田祐司, 藤江正克, 小島吉夫, “形状記憶合金を応用した3本指ロボットハンド”, 第1回日本ロボット学会学術講演会, pp. 213-214, 1983年12月.
- 10) 藤江正克, 細田祐司, 岩本太郎, 亀島鉦二, 中野善之, 橋本誠寿, “移動ロボットのシステム構成”, 第2回日本ロボット学会学術講演会, pp. 221-224, 1984年12月.
- 11) 細田祐司, 藤江正克, 山本広志, “移動ロボットの走行制御”, 第2回日本ロボット学会学術講演会, pp. 227-228, 1984年12月.
- 12) 本間 和男, 細田 祐司, 宇野 元雄, “形状記憶合金とゴム製空圧アクチュエータのロボットへの応用”, 日本能率協会 '86 小型モータ技術シンポジウム, 1986年3月.
- 13) 細田祐司, 酒井昭彦, 藤正克, “SMA ウェハハンドリング用グリッパ”, 第4回日本ロボット学会学術講演会, pp. 463-464, 1986年12月.
- 14) 細田祐司, “形状記憶合金のロボットへの応用”, 日本機械学講習会: 機械の大きな流れ — インテリジェント化と新材料化, pp. 53-58, 1987年7月.
- 15) 藤江正克, 細田祐司, 管和俊, 榊原義宏, 服部誠, “4脚歩行機構の開発(1) 冗長自由度機構の運動制御開発方式の検討”, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 321-324, 1988年10月.

- 16) 榊原義宏, 菅和俊, 細田祐司, 服部誠, 藤江正克, “4脚動歩行機構の開発(2) 単脚歩行実験による床反力と足先運動の評価”, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 325-328, 1988年10月.
- 17) 細田祐司, 服部誠, 藤江正克, 菅和俊, 榊原義宏, “4脚歩行機構の開発(3) 歩行機構の設計”, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 307-308, 1988年10月.
- 18) 細田祐司, 藤江正克, 菅和俊, 榊原義宏, 服部誠, “4脚歩行機構の開発(4) 動歩行時の倒れ込み運動に関する検討”, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 309-312, 1988年10月.
- 19) 服部誠, 榊原義宏, 細田祐司, 菅和俊, 藤江正克, “4脚歩行機構の開発(5) 足先距離センサを用いた階段歩行”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 699-700, 1989年11月.
- 20) 榊原義宏, 服部誠, 細田祐司, 菅和俊, 藤江正克, “4脚歩行機構の開発(6) 4脚歩行機構における重心移動軌道の生成”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 701-702, 1989年11月.
- 21) 榊原義宏, 服部誠, 細田祐司, 菅和俊, 藤江正克, “4脚歩行機構の開発(7) 4脚歩行機構の進路修正歩行”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 703-704, 1989年11月.
- 22) 細田祐司, 藤江正克, 菅和俊, 榊原義宏, 服部誠, “4脚歩行機構の開発(8) 歩行速度の評価”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 705-706, 1989年11月.
- 23) 菅和俊, 服部誠, 榊原義宏, 細田祐司, 藤江正克, “4脚歩行機構の開発(9) 脚移動制御システムの構成”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 707-708, 1989年11月.
- 24) 細田祐司, 服部 静子, 榊原 義宏, 服部 誠, 菅 和俊, 藤江 正克, “極限作業ロボットにおける移動機構とその制御”, 計測自動制御学会 第2回ロボティクス・自動化システムシンポジウム, 1990年5月.
- 25) 細田祐司, 谷和之, 椎名静子, 藤江正克, 服部誠, “対地適応歩行ロボットの開発

- (1) 固有運動型動歩行システムの構想”，第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 293-294，1990年11月。
- 26) 谷知之，細田祐司，椎名静子，藤江正克，菅和俊，“対地適応型歩行ロボットの開発（2）固有運動型動歩行機構の試作”，第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 295-296，1990年11月。
- 27) 椎名静子，細田祐司，谷知之，藤江正克，服部誠，“対地適応歩行ロボットの開発（3）固有運動型動歩行の歩行アルゴリズムの開発”，第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 297-298，1990年11月。
- 28) 服部誠，榊原義宏，細田祐司，菅和俊，亀島鉦二，“対地適応型歩行ロボットの開発（4）補正感度を用いた対地適応歩行アルゴリズムの開発”，第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 307-308，1990年11月。
- 29) 細田祐司，“生産設備のメンテナンス自動化ロボット化の現状と展望”，平成3年電気学会産業応用部門全国大会シンポジウム，1991年8月。
- 30) 服部誠，細田祐司，内沼善朗，木村康雄，石塚達郎，後藤和夫，東村豊，萩原修哉，“発電機水冷式固定子コイルの遠隔漏水検査装置”，第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 265-266，1997年9月。
- 31) 服部誠，細田祐司，志村孝夫，松本純，渡部孝男，“ICMハウジング取替工法用肉盛補修装置”，第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 79-80，1999年9月。
- 32) 鈴木正憲，大和田政孝，細田祐司，“原子力防災支援ロボット開発 小型軽作業ロボットSWANの開発”，日本原子力学会秋の大会予稿集，pp. 310-，2001年8月。
- 33) 細田祐司，山本広志，服部誠，坂入浩，岩本太郎，“原子力防災ロボットSWANの移動システムの開発”，第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 439-440，2001年9月。
- 34) 服部誠，細田祐司，坂入浩，山本広志，大和田政孝，菅野明弘，斉藤祐二，“原子力防災ロボットSWANのマニピュレータの開発”，第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 437-438，2001年9月。
- 35) 細田祐司，山本 広志，服部 誠，岩本太郎，大和田政孝，菅野明弘，“原子力防

- 災ロボットの開発”，第3回システムインテグレーション部門講演会(SI2002)，D42-02，2002年12月。
- 36) 服部誠，細田祐司，田代健，三浦啓二，荒谷猛，“経年ガス配管補修用穿孔ロボットの開発”，第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2G15，2004年9月。
- 37) 山本広志，柄川索，細田祐司，“ビルサービスロボットの開発”，2005年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，1P2-S-036，2005年6月。
- 38) 近藤弘和，荒谷猛，岡村栄二，田代健，三浦啓二，服部誠，細田祐司，“経年ガス配管補修用穿孔ロボットの開発”，2005年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，2P1-S-055，2005年6月。
- 39) 荒井穰，細田祐司，柄川索，小関篤志，田島泰治，朝 康博，岡田 祐子，“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，G2-53，pp. 797-800，2005年11月。
- 40) 岡田祐子，柄川索，朝康博，荒井穰，田島泰治，小関 篤志，細田 祐司，“家庭用掃除ロボットの動作制御アルゴリズム”，第48回自動制御連合講演会，G2-54，pp. 801-804，2005年11月。
- 41) 小野幸彦，細田祐司，生井 仁，守屋俊夫，西野 統，“半自律ロボットの開発（第1報）自律航法制御シミュレータの開発”，第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1G23，2006年9月。
- 42) 小野幸彦，細田祐司，木村宣隆，守屋俊夫，西野統，“先導者追従システムの開発 半自律ロボットの開発（第2報）”，第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 1026-，2007年9月。
- 43) 細田祐司，“日立のロボット研究開発”，第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2N1-02，2009年9月。
- 44) 細田祐司，“ロボット開発を通じたRT人材教育”，筑波研支援センター平成22年度ロボットテクノロジー総合技術者教育講座プレセミナー，2010年2月。
- 45) Y. Hosoda，“Robotics Development of Hitachi”，5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2010)，March 2010.（大阪）

- 46) 細田祐司, “企業におけるロボット教育”, 日本ロボット学会 ロボット感動教育シンポジウム, 2010年3月.
- 47) 岡田悠図, 坪内孝司, 細田祐司, 一野瀬亮子, “天井目地模様などを用いた移動ロボットの屋内自己位置推定”, 日本機械学会 2010年度ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1A2-E12, 2010年6月.
- 48) 細田祐司, 山本健次郎, “日立のロボット研究開発”, 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2E1-1, 2010年9月.

解説等査読無し寄稿

- 1) S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya, Y. Hosoda, M. Abe, “Study on Guide Dog (Seeing-Eye) Robot (1) – its basic plan and some experiments with MELDOG MARK 1 -”, Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory, No.32, pp.1-14, 1978.
- 2) 手塚治虫, 加藤一郎, 内山勝, 広瀬茂男, 細田祐司, 大島正毅, 下山直子, “座談会：鉄腕アトムの世界とロボット技術”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.3, pp.296-299, 1986年6月.
- 3) 細田祐司, “SMAロボットハンド”, エス・ディ・シー 形状記憶合金の応用と開発, 1986年11月.
- 4) 細田祐司, “SMAロボットハンド”, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.5, pp.122-122, 1989年11月.
- 5) 細田祐司, “生産設備のメンテナンス自動化・ロボット化の現状と展望”, 電気学会 生産設備のメンテナンス自動化・ロボット化調査専門委員会成果報告書, 1991年5月.
- 6) 藤江正克, 菅和俊, 細田祐司, 谷知之, “移動ロボットの実用化に向けて”, 富士技術出版株式会社 JOURNAL OF ROBOTICS AND MECHATRONICS DECEMBER '93, Vol.5, No.6, 1993年12月.
- 7) Y. Hosoda, H. Yamamoto, M. Hattori, H. Sakairi, T. Iwamoto, “SWAN: A robot for nuclear disaster prevention support”, Advanced Robot, Vol.16, No.6, pp.485-488, Dec. 2002.

- 8) 細田祐司, “物流システムとロボット 知能型物流支援ロボットの開発”, 日本ロボット工業会機関誌 ロボット, No.186, pp.43-46, 2009年1月.
- 9) 細田祐司, 古賀昌史, 山本健次郎, “将来都市交通要素としての自律移動技術”, 日立評論, Vol.92, No.11, pp.854-858, 2010年11月.

知的所有権

- 1) 奥名健二, 細田祐司, 中島功, 早山徹, 特開昭 57-043878, “プリンタ”.
- 2) 梁取美智雄, 細田祐司, 中島功, 五十嵐謙一, 黒沢誠, 細谷健正, 小林常樹, 特開昭 57-080068, “印字装置”.
- 3) 梁取美智雄, 細田祐司, 中島功, 特開昭 57-080067, “印字装置”.
- 4) 細田祐司, 中島功, 村野俊二, 特開昭 57-188390, “印字ハンマ駆動装置”.
- 5) 細田祐司, 中島功, 村野俊二, 特開昭 57-212073, “プリンタ”.
- 6) 細田祐司, 中島功, 黒沢誠, 中野広重, 特開昭 58-062069, “プリンタ”.
- 7) 細田祐司, 中島功, 黒沢誠, 中野広重, 特開昭 58-069082, “プリンタ”.
- 8) 村野俊二, 中島功, 細田祐司, 川上統平, 特開昭 58-151287, “サーマルプリンタ”.
- 9) 細田祐司, 中島功, 井桁義一, 特開昭 59-116737, “フィルム密着装置”.
- 10) 井桁義一, 中島功, 細田祐司, 特開昭 59-116738, “X線透視撮影用フィルム密着装置”.
- 11) 亀島鉦二, 中野善之, 藤江正克, 細田祐司, 岩本太郎, 本間和男, 特開昭 60-085885, “多関節機構の制御装置”.
- 12) 岩本太郎, 本間和男, 藤江正克, 亀島鉦二, 細田祐司, 特開昭 59-173880, “建屋内通路の認識方法および装置”.
- 13) 岩本太郎, 本間和男, 藤江正克, 亀島鉦二, 細田祐司, 特開昭 59-173881, “通路

認識方法および装置”。

- 14) 亀島鉦二, 細田祐司, 中野善之, 藤江正克, 岩本太郎, 本間和男, 吉田隆, 特開昭 60-084610, “誘導装置”。
- 15) 亀島鉦二, 細田祐司, 吉田隆, 中野善之, 藤江正克, 岩本太郎, 本間和男, 特開昭 60-084675, “画像処理装置”。
- 16) 細田祐司, 本間和男, 藤江正克, 亀島鉦二, 岩本太郎, 特開昭 59-186478, “撮像素子”。
- 17) 亀島鉦二, 細田祐司, 中野善之, 藤江正克, 岩本太郎, 本間和男, 吉田隆, 特開昭 60-073791, “画像処理装置”。
- 18) 亀島鉦二, 細田祐司, 中野善之, 藤江正克, 岩本太郎, 本間和男, 吉田隆, 特開昭 60-084669, “パターン処理装置”。
- 19) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 岩本太郎, 中野善之, 亀島鉦二, 小島吉夫, 特開昭 60-033612, “位置制御装置”。
- 20) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 岩本太郎, 中野善之, 亀島鉦二, 小島吉夫, 特開昭 60-034288, “駆動装置”。
- 21) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-022568, “クローラ走行車のクローラベルト”。
- 22) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-020692, “広視野装置”。
- 23) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-022569, “走行車の履帯張力制御装置”。
- 24) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-022570, “クローラ走行車”。
- 25) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-045485, “クローラ走行車”。

- 26) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-045882, “通路認識方法”.
- 27) 細田祐司, 本間和男, 藤江正克, 岩本太郎, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-034293, “皮膚感覺センサ”.
- 28) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-022572, “移動体の階段終端検出装置”.
- 29) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-022573, “クローラ走行車の駆動装置”.
- 30) 細田祐司, 本間和男, 藤江正克, 岩本太郎, 中野善之, 亀島鉦二, 小島吉夫, 特開昭 60-032980, “駆動装置”.
- 31) 細田祐司, 本間和男, 藤江正克, 岩本太郎, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-034294, “皮膚感覺センサ”.
- 32) 細田祐司, 本間和男, 藤江正克, 岩本太郎, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-034295, “皮膚感覺センサ”.
- 33) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-022574, “クローラ走行車”.
- 34) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-022575, “クローラ走行車”.
- 35) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-020108, “障害物検出装置”.
- 36) 岩本太郎, 山本広志 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 中野善之, 特開昭 60-023654, “変速機”.
- 37) 木村秀行, 鳥居卓爾, 細田祐司, 特開昭 60-062494, “駆動装置”.
- 38) 小島吉夫, 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 岩本太郎, 中野善之, 亀島鉦二, 特開昭 60-081476, “アクチュエータ”.

- 39) 木村秀行, 鳥居卓爾, 細田祐司, 特開昭 60-118483, “駆動装置”.
- 40) 藤江正克, 細田祐司, 亀島鉦二, 岩本太郎, 本間和男, 中野善之, 特開昭 60-076982, “ロボットシステム”.
- 41) 亀島鉦二, 小川優理子, 藤江正克, 本間和男, 岩本太郎, 細田祐司, 特開昭 60-081682, “指示装置”.
- 42) 亀島鉦二, 小川優理子, 藤江正克, 本間和男, 岩本太郎, 細田祐司, 特開昭 60-081612, “移動体の移動制御装置”.
- 43) 亀島鉦二, 小川優理子, 藤江正克, 本間和男, 岩本太郎, 細田祐司, 特開昭 60-200373, “画像処理装置”.
- 44) 山本広志, 岩本太郎, 本間和男, 細田祐司, 特開昭 60-193019, “移動体の位置補正装置”.
- 45) 山本広志, 岩本太郎, 本間和男, 細田祐司, 特開昭 60-193020, “移動体の進路補正制御装置”.
- 46) 木村秀行, 鳥居卓爾, 細田祐司, 特開昭 60-161089, “駆動装置”.
- 47) 岩本太郎, 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 亀島鉦二, 特開昭 60-191778, “マスタスレーブマニピュレータ”.
- 48) 岩本太郎, 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 亀島鉦二, 特開昭 60-191779, “マスタスレーブマニピュレータ”.
- 49) 木村秀行, 鳥居卓爾, 細田祐司, 特開昭 60-228095, “駆動装置”.
- 50) 山本広志, 岩本太郎, 本間和男, 細田祐司, 特開昭 60-195620, “移動体の進路補正装置”.
- 51) 亀島鉦二, 藤江正克, 細田祐司, 岩本太郎, 特開昭 60-196884, “画像処理装置”.
- 52) 亀島鉦二, 藤江正克, 細田祐司, 岩本太郎, 特開昭 60-196734, “照明制御装置”.
- 53) 亀島鉦二, 藤江正克, 細田祐司, 岩本太郎, 特開昭 60-197078, “画像処理装置”.

- 54) 岩本太郎, 亀島鉦二, 藤江正克, 細田祐司, 山本広志, 特開昭 60-197085, “撮像装置”.
- 55) 亀島鉦二, 大場佐代子, 藤江正克, 細田祐司, 岩本太郎, 特開昭 60-196738, “撮影装置”.
- 56) 鳥居卓爾, 木村秀行, 細田祐司, 特開昭 61-004688, “駆動装置”.
- 57) 木村秀行, 鳥居卓爾, 細田祐司, 特開昭 60-228778, “駆動装置”.
- 58) 木村秀行, 細田祐司, 特開昭 61-116078, “駆動装置”.
- 59) 本間和男, 細田祐司, 藤江正克, 特開昭 61-204947, “把持装置”.
- 60) 細田祐司, 本間和男, 藤江正克, 特開昭 61-239636, “把持装置”.
- 61) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 特開昭 61-239637, “把持装置”.
- 62) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 特開昭 61-241940, “把持装置”.
- 63) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 特開昭 61-223910, “駆動装置”.
- 64) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 特開昭 61-223911, “位置制御装置”.
- 65) 細田祐司, 小林暁峯, 本間和男, 特開昭 61-223305, “アクチュエータ”.
- 66) 平井明, 杉山謙吾, 細田祐司, 特開昭 62-107992, “関節装置”.
- 67) 榊原義宏, 細田祐司, 岩本太郎, 特開昭 62-107690, “速度制御装置”.
- 68) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 酒井昭彦, 特開昭 62-287989, “把持装置”.
- 69) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 酒井昭彦, 特開昭 62-292381, “把持装置”.
- 70) 榊原義宏, 岩本太郎, 細田祐司, 藤江正克, 亀島鉦二, 特開昭 62-285112, “移動体の走行制御装置”.

- 71) 酒井昭彦, 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 特開昭 62-292382, “把持装置”.
- 72) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 特開昭 63-074587, “把持装置”.
- 73) 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 特開昭 63-068384, “把持装置”.
- 74) 細田祐司, 藤江正克, 中野善之, 亀島敏二, 中野裕, 特開平 2-003581, “歩行脚制御装置”.
- 75) 細田祐司, 藤江正克, 中野裕, 特開平 1-205987, “関節機構”.
- 76) 細田祐司, 小林暁峯, 本間和男, 藤江正克, 菅和俊, 榊原義宏, 服部誠, 中野裕, 特開平 2-048282, “歩行制御装置”.
- 77) 服部誠, 谷知之, 細田祐司, 菅和俊, 榊原義宏, 藤江正克, 本間和男, 小林暁峯, 中野裕, 特開平 2-127180, “歩行機械の歩行脚制御装置”.
- 78) 菅和俊, 服部誠, 榊原義宏, 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 小林暁峯, 中野裕, 特開平 2-003580, “脚移動型歩行機械の制御装置”.
- 79) 榊原義宏, 細田祐司, 藤江正克, 亀島敏二, 服部誠, 小林暁峯, 本間和男, 菅和俊, 中野裕, 特開平 2-047530, “歩行脚試験装置”.
- 80) 服部誠, 細田祐司, 菅和俊, 榊原義宏, 藤江正克, 本間和男, 小林暁峯, 中野裕, 特開平 2-102884, “歩行脚の制御装置”.
- 81) 榊原義宏, 小林暁峯, 本間和男, 藤江正克, 細田祐司, 菅和俊, 服部誠, 中野裕, 特開平 2-048283, “歩行脚運動軌跡制御装置”.
- 82) 服部誠, 榊原義宏, 椎名静子, 細田祐司, 菅和俊, 藤江正克, 中野裕, 特開平 3-166078, “脚步行機構の制御装置”.
- 83) 菅和俊, 服部誠, 榊原義宏, 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 小林暁峯, 中野裕, 特開平 3-166077, “脚步行制御装置およびその制御法”.
- 84) 大泉純一, 望月明, 野田耕介, 浜田康義, 福留善雄, 木下和人, 徳山幹夫, 根本泰弘, 細田祐司, 特開平 3-078871, “カード処理システム”.

- 85) 榊原義宏, 服部誠, 菅和俊, 細田祐司, 藤江正克, 特開平 3-293531, “歩行脚進路修正歩行装置”.
- 86) 椎名静子, 細田祐司, 藤江正克, 菅和俊, 榊原義宏, 服部誠, 谷知之, 特開平 4-129683, “歩行パターン生成方法”.
- 87) 服部誠, 細田祐司, 菅和俊, 榊原義宏, 亀島鉦二, 藤江正克, 椎名静子, 特開平 4-201189, “脚步行機構の制御装置”.
- 88) 谷知之, 細田祐司, 椎名静子, 藤江正克, 特開平 4-152075, “歩行機械”.
- 89) 細田祐司, 藤江正克, 榊原義宏, 田島不二夫, 特開平 4-347165, “人工筋肉”.
- 90) 細田祐司, 吉田眞二, 特開平 5-139506, “保管設備”.
- 91) 細田祐司, 馬場信行, 特開平 5-294408, “ピッキングシステム”.
- 92) 細田祐司, 馬場信行, 特開平 5-330613, “オーダーピッキングシステム”.
- 93) 細田祐司, 馬場信行, 特開平 5-330614, “出庫システム”.
- 94) 細田祐司, 馬場信行, 特開平 6-100115, “ピッキング装置”.
- 95) 吉久保富士夫, 黒沢孝一, 榎本邦夫, 細田祐司, 佐藤一教, 特開平 6-114735, “ピーニング装置”.
- 96) 細田祐司, 中村富男, 特開平 6-144507, “ピッキング装置”.
- 97) 服部誠, 細田祐司, 藤江正克, 本間和男, 藤田永治, 佐々木輝, 梶原省三, 特開平 6-203616, “道路照明灯具の清掃・点検装置”.
- 98) 服部誠, 本間和男, 細田祐司, 藤江正克, 藤田永治, 岡本浩一, 北條徹, 特開平 7-021808, “機械清掃に適した道路照明灯具及びその清掃方法”.
- 99) 鈴木正憲, 梶山茂, 細田祐司, 守中廉, 特開平 7-055987, “原子炉の炉内点検補修装置”.
- 100) 細田祐司, 林英策, 鈴木正憲, 特開平 7-063213, “締結装置”.

- 101) 鈴木正憲, 梶山茂, 佐々木典, 細田祐司, 特開平 7-063704, “原子炉压力容器内の液体浸透探傷検査装置”.
- 102) 細田祐司, 鈴木正憲, 舟本孝雄, 志村孝夫, 近藤由英, 特開平 7-063879, “炉内遠隔作業装置”.
- 103) 武藤寛, 志村孝夫, 細田祐司, 鈴木正憲, 鶴田貞男, 特開平 7-063886, “原子力発電プラントにおける原子炉下部林立構造物予防保全作業におけるシール方法及びシール装置”.
- 104) 細田祐司, 鈴木正憲, 志村孝夫, 佐々木正祥, 特開平 7-072288, “炉内据付装置”.
- 105) 武藤寛, 志村孝夫, 細田祐司, 鈴木正憲, 鶴田貞男, 特開平 7-084083, “原子炉下部林立構造物の予防保全における水滴落下防御方法及びその装置”.
- 106) 滝沢竜, 細田祐司, 服部誠, 特開平 8-323578, “加工装置”.
- 107) 細田祐司, 服部誠, 特開平 8-333085, “起重機”.
- 108) 土屋雅弘, 細田祐司, 特開平 9-034508, “作業情報入力方法とその手段, 作業計画作成手段”.
- 109) 細田祐司, 服部誠, 合田憲次郎, 志村孝夫, 伊藤正人, 特開平 9-155678, “加工装置”.
- 110) 服部誠, 細田祐司, 特開平 9-193066, “遠隔作業装置”.
- 111) 合田憲次郎, 細田祐司, 志村孝夫, 大森信哉, 特開平 9-223222, “位置計測装置”.
- 112) 服部誠, 細田祐司, 内沼善朗, 特開平 10-038952, “コイル検査装置”.
- 113) 合田憲次郎, 細田祐司, 服部誠, 志村孝夫, 大森信哉, 多田伸雄, 武藤寛, 特開平 10-100022, “遠隔切断装置”.
- 114) 細田祐司, 合田憲次郎, 服部誠, 志村孝夫, 大森信哉, 多田伸雄, 武藤寛, 特開平 10-100023, “遠隔切断装置”.

- 115) 合田憲次郎, 細田祐司, 服部誠, 志村孝夫, 大森信哉, 多田伸雄, 武藤寛, 特開平 10-100024, “遠隔切断装置”.
- 116) 服部誠, 細田祐司, 合田憲次郎, 志村孝夫, 大森信哉, 多田伸雄, 武藤寛, 特開平 10-113824, “遠隔切断装置”.
- 117) 合田憲次郎, 細田祐司, 志村孝夫, 大森信哉, 多田伸雄, 特開平 10-253319, “位置計測装置”.
- 118) 山本広志, 細田祐司, 特開平 10-319828, “作業情報入力手段”.
- 119) 森貞雄, 渡部成夫, 細田祐司, 菅原弘之, 大津誠, 安田桂子, 今井良二, 特開平 11-064359, “流速計測方法および流速計測装置”.
- 120) 細田祐司, 坂入浩, 小山昌宏, 大城昌之, 神谷敬之, 特開平 11-085004, “動揺装置”.
- 121) 服部誠, 細田祐司, 志村孝夫, 菅原宣彦, 特開平 11-333654, “工具交換装置”.
- 122) 細田祐司, 服部誠, 志村孝夫, 菅原宣彦, 特開平 11-338532, “教示装置”.
- 123) 富田正道, 細田祐司, 銚谷義雄, 特開 2000-100920, “ウエハ把持装置”.
- 124) 服部誠, 細田祐司, 菅原宣彦, 特開 2000-246644, “水中切断装置”.
- 125) 小山昌宏, 細田祐司, 下津忠夫, 高瀬真人, 大橋敬典, 特開 2001-092795, “分散型プログラマブルサーボコントローラシステム”.
- 126) 細田祐司, 志村孝夫, 特開 2001-096366, “遠隔作業装置”.
- 127) 服部誠, 細田祐司, 菅原宣彦, 特開 2001-100806, “遠隔監視システム”.
- 128) 富田正道, 細田祐司, 藤井憲, 特開 2001-157477, “位置・速度制御装置およびこれを用いたステージシステム”.
- 129) 松永徹也, 高井英夫, 細田祐司, 江角昌邦, 福寄一成, 特開 2001-232483, “摩擦攪拌接合用押し出し形材”.

- 130) 松永徹也, 高井英夫, 細田祐司, 江角昌邦, 福寄一成, 特開 2001-232485, “摩擦攪拌接合方法”.
- 131) 松永徹也, 高井英夫, 細田祐司, 江角昌邦, 福寄一成, 特開 2001-232484, “摩擦攪拌接合方法”.
- 132) 富田正道, 細田祐司, 特開 2001-320198, “電子部品装着機及び電子部品装着方法”.
- 133) 富田正道, 細田祐司, 特開 2002-043800, “電子部品装着装置及び電子部品装着方法”.
- 134) 岩本太郎, 細田祐司, 大和田政孝, 特開 2002-120777, “クローラ走行車”.
- 135) 服部誠, 富田正道, 細田祐司, 藤井憲, 特開 2002-126964, “位置決めステージの制御装置”.
- 136) 富田正道, 細田祐司, 特開 2002-160055, “配管切断装置”.
- 137) 富田正道, 細田祐司, 特開 2002-198698, “実装データ作成支援システム”.
- 138) 服部誠, 細田祐司, 坂入浩, 斉藤祐二, 菅野明弘, 山本広志, 大城昌之, 神谷敬之, 特開 2002-264061, “移動作業ロボット”.
- 139) 小山昌宏, 細田祐司, 松下鶴正, 下津忠夫, 特開 2002-268896, “制御プログラム作成方法とその装置”.
- 140) 斉藤祐二, 細田祐司, 服部誠, 木下春雄, 菅野明弘, 特開 2002-341937, “作業ロボットの移動方法”.
- 141) 富田正道, 細田祐司, 特開 2003-145338, “配管圧着切断装置および方法”.
- 142) 富田正道, 細田祐司, 菊池孝司, 山内幹彦, 天野久徳, 大須賀公一, 特開 2003-269914, “車両位置測定装置およびそれを搭載した車両”.
- 143) 富田正道, 細田祐司, 菊池孝司, 天野久徳, 大須賀公一, 特開 2003-270384, “救助用ロボットシステム”.

- 144) 細田祐司, 特開 2004-017791, “移動体”.
- 145) 八木秀一, 清水精太, 服部誠, 細田祐司, 荒谷猛, 近藤弘和, 特開 2004-092184, “埋設配管分岐部穿孔装置及び穿孔方法並びに穿孔ツール”.
- 146) 富田正道, 細田祐司, 遠藤洋, 大谷健一, 特開 2004-168088, “水中構造物の点検装置および点検方法”.
- 147) 服部誠, 細田祐司, 内沼善朗, 特開 2004-258042, “コイル検査装置”.
- 148) 荒井穰, 細田祐司, 柄川索, 貞森博之, 田中博文, 山本亘, 田島泰治, 服部誠, 特開 2004-267236, “自走式掃除機およびそれに用いる充電装置”.
- 149) 荒井穰, 細田祐司, 柄川索, 貞森博之, 寺本律, 田中博文, 特開 2004-350713, “自走式掃除機”.
- 150) 尾坂忠史, 田島泰治, 細田祐司, 山本亘, 特開 2004-357768, “自走式掃除機”.
- 151) 中村真, 秋山浩, 山下淳一, 川崎恭一, 細田祐司, 貞森博之, 浅野英仁, 中村喜之, 特開 2005-052236, “放射線治療用ベッド装置”.
- 152) 貞森博之, 細田祐司, 川崎恭一, 中村真, 特開 2005-110887, “制御システムおよび放射線治療装置の治療台”.
- 153) 貞森博之, 細田祐司, 川崎恭一, 中村真, 特開 2005-334383, “放射線治療装置”.
- 154) 八木秀一, 清水精太, 服部誠, 細田祐司, 荒谷猛, 近藤弘和, 岡村栄二, 特開 2006-015413, “埋設管分岐部穿孔装置”.
- 155) 貞森博之, 細田祐司, 川崎恭一, 中村真, 八木橋卓人, 特開 2006-198119, “放射線治療装置”.
- 156) 岡田 祐子, 荒井 穰, 朝 康博, 細田 祐司, 柄川 索, 小関 篤志, 特開 2007-034866, “移動体の走行制御方法及び自走式掃除機”.
- 157) 貞森博之, 細田祐司, 川崎恭一, 中村真, 八木橋卓人, 特開 2007-061482, “放射線治療装置”.

- 158) 貞森博之, 細田祐司, 川崎恭一, 八木橋卓人, 特開 2007-289373, “放射線治療装置”.
- 159) 小野幸彦, 細田祐司, 大城昌之, 西野統, 特開 2007-310698, “無人車両”.
- 160) 岡田祐子, 荒井穰, 細田祐司, 服部誠, 朝康博, 川邊拓也, 田島泰治, 特開 2007-319485, “自走式掃除機”.
- 161) 貞森博之, 細田祐司, 川崎恭一, 八木橋卓人, 特開 2008-104790, “放射線治療装置”.
- 162) 荒井穰, 細田祐司, 柄川索, 貞森博之, 田中博文, 山本亘, 田島泰治, 服部誠, 特開 2008-155041, “自走式掃除機用充電装置”.
- 163) 小野幸彦, 細田祐司, 秋本修, 大城昌之, 特開 2008-191800, “先導者追従車両”.
- 164) 荒井穰, 細田祐司, 東石良治, 米谷豊, 岩間国彦, 特開 2008-145261, “燃料交換機”.
- 165) 貞森博之, 細田祐司, 川崎恭一, 八木橋卓人, 特開 2008-220553, “放射線治療システム”.
- 166) 岡田聡, 細田祐司, 山本広志, 小野幸彦, 妹尾誠, 高取洋介, 小林亮介, 特開 2008-298747, “水中検査装置”.
- 167) 荒井穰, 細田祐司, 東石良治, 岩間国彦, 特開 2008-304382, “燃料交換機”.
- 168) 山本広志, 岡田聡, 小林亮介, 細田祐司, 米谷豊, 特開 2009-069120, “潜航装置及び原子炉の検査方法”.
- 169) 原祥堯, 細田祐司, 玉本淳一, 一野瀬亮子, 正木良三, 升山義弘, 特開 2010-044530, “搬送ロボットシステム”.
- 170) 一野瀬亮子, 柄川索, 細田祐司, 特開 2010-055498, “自律移動ロボット装置及びかかる装置における飛び出し衝突回避方法”.
- 171) 原祥堯, 細田祐司, 古賀昌史, 特開 2010-181928, “車両用衝突回避支援装置”.