

屋内環境における案内・誘導タスクの実現を目的とした 人間支援型自律移動ロボットに関する研究

A study on mobile robots for supporting human guidance and navigation in indoor environments

01D5102 齋藤 康夫 指導教授 久保田 譲 教授

SYNOPSIS

In recent years, various mobile robot systems that deliver documents and goods, guide visitors and patrol surroundings in indoor environments, have been widely investigated and developed for the purpose of supporting humans in their daily activities. When developing the robots of such types, it is very important to consider the interface for users so that the robots can be easily called and operated by them, and moreover devise the solution of power supply for prolonged activity of mobile robots. Here, a method for the interface has been proposed as a solution to call the robots by using a cellular phone. The method has two features; one is to be easily available as the interface of robots because users are accustomed to their own cellular phone. The other is that a robot called by user can correct its own location by following a given path. This can be done by making the robot read a barcode installed in the environment as the robot passes through its way. In addition, as a new approach of the solution for power supply, a battery support system has been developed that consists of a work robot, a support robot, a battery charge station and a server PC to manage the entire system. While the work robot monitors itself, if its battery power falls down below a certain threshold, it requests the server PC to support itself. Then, the prolonged activity of the work robot is realized by making the support robot deliver and exchange fresh batteries. In the present paper, the details of the robot calling system by a cellular phone and the performance of the battery support system formed with the practical mechanisms are described, and the experimental results are presented.

Keywords : Mobile Robot, Self-position correction, Robot calling, Battery exchange, prolonged activity

1.序論

近年, IT技術の進歩と共に, ロボットに対する期待も高まり, 我々にとってもロボットは身近な存在になってきた. 産学の機関において, 人間と同じ環境で作業を行う人間支援型ロボット^{1)~3)}が提案・開発されている. 筆者は, 人間支援型ロボットの一環として, 屋内環境における案内・誘導タスクの実現を目指してロボットシステムの開発を行ってきた. そして, このようなタスクを実現するロボットに必要な要素技術として, 以下の3点に着目した.

- (1)簡便な構成で実現できるロボットの自己位置認識手法
- (2)ユーザの要求に応じてロボットを呼出すための技術
- (3)ロボットの長時間活動時におけるバッテリー交換手法

まず, 移動することでタスクを実行するロボットにとって自己位置を把握することは非常に重要な要素である. 従来までも様々な手法^{4)~7)}が提案されているが, 本研究では比較的簡便な処理で自己位置の認識が可能な手法として, 赤外線スリット光センサと, そのセンサを利用して認識が可能で, かつ, 構造が単純なバーコードを用いた自己位置認識手法を考案した. ランドマークとしてバーコードを用いる利点は, 従来の手法に比べて, 電源装置等を必要としないことや, 既存の環境の変更を極力抑えられる点などが挙げられる. また, 本研究のバーコードは, それを認識するためにもともとロボットに搭載されている障害物回避用の赤外線スリット光センサを利用するため, センサの増設を必要としない.

次に, 人間支援型ロボットは, ロボット自身が自律的に作業を行うだけでなく, ユーザとコミュニケーションを取りながら行う作業も数多く考えられる. そこで重要となるのが, ユーザが必要に応じてロボットを呼出すためのシステムである. 本研究では, ロボットとのコミュニケーションに携帯電話を利用する手法を考案した. ロボットの呼出しや案内に携帯電話で読み取り可能なQRコードと, ユーザが普段から使い慣れている携帯電話を用いることで, 煩雑な環境整備や専用機器の導入, また, 難解な操作やガイダンスの必要がなく, 人間のシンプルかつ日常的なタスクの中にロボットの呼出し行為を取りこむ事が可能となる.

最後に, 移動ロボットが長時間活動を行う場合, 同一環境内に充電ステーションやバッテリー交換ステーションを設置する手法^{8),9)}が提案されているが, これらの方法ではロボットはス

テーションに戻る必要があるので, その都度作業を中断しなければならない. これは, ユーザとコミュニケーションを取りながら案内タスクを実行するロボットにとって深刻な問題になりかねない. そこで, 本研究では, この電力供給問題に対して, 従来とは違った視点からのアプローチとして, 作業用のロボットとは別にバッテリー運搬専用ロボットを用意して, 作業ロボットが作業を中断することなく, 作業を行っている場所でバッテリーを交換する手法の開発を行った.

本論文では, 案内・誘導用ロボットシステムを構築する上で必要と思われる上記3点の要素技術について検討・開発を行い, 実際に屋内環境で行った実験をもとに検証したシステムの有用性について述べる.

2.人間支援型自律移動ロボット

本研究で使用するロボットは市販のPC汎用ボードを用いて構成されており, メンテナンス, バージョンアップが簡単に行えるよう設計した. また, 動作環境は, オフィスや大学等の比較的整備された屋内空間の平坦な廊下を想定している. ロボットはあらかじめ, 環境内のマップを保持しており, エンコーダを用いて自機の位置や姿勢(回転角や方向)などを推定しながら空間内を移動する. しかし, 内界センサのみでは走行中に誤差が蓄積されてしまうため, ロボット上部には外界センサとして, 1台のCCDカメラと1台の赤外線スリット光投射器からなる赤外線スリット光センサが搭載されている. ロボットはこれを用いて自己位置の認識を行う. また, バッテリー交換を行うためのスロット機構とユーザとのコミュニケーションを取るためのスピーカも搭載している.

3.バーコードを用いた自己位置認識手法

屋内環境で様々なタスクを実現する移動ロボットにとって, 自己位置を知る事は非常に重要である. これを解決する手段として, 筆者はロボットに搭載されている赤外線スリット光センサで認識が可能で, かつ, 構造が単純なバーコードを用いた自己位置認識手法を開発した.

3.1 バーコードの構成と自己位置認識アルゴリズム

本手法で用いるバーコードは, 縦297[mm]×横210[mm]の白色台紙に黒色テープを貼り付けたもので, このバーコードをドアに貼り付けた様子をFig.1(a)に示す. バーコード上の白い横ラインは赤外線スリット光センサから照射される赤外光で, それを赤外線スリット光センサの赤外線透過フィルタ付

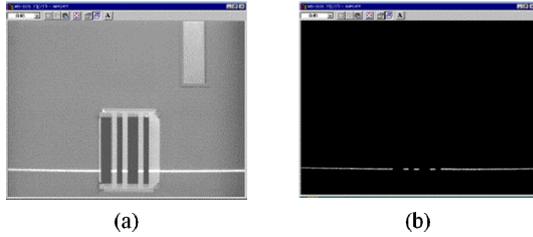


Fig.1 A visible image (a) and its filtered image (b) of a bar-code posted on a door

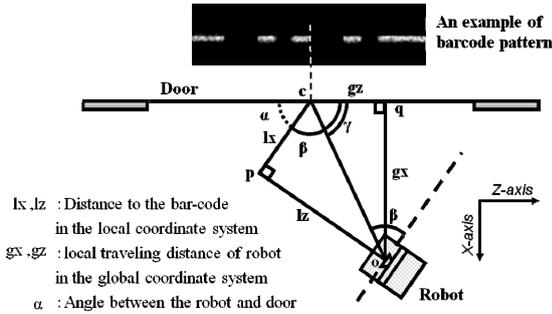


Fig.2 A method of finding the distance to guide a robot from the current location to the front of the bar-code

CCDカメラで撮像した画像がFig.1(b)である。同図のバーコードは、白色バーと黒色バーの素材の違いにより、図のように途中でいくつかに分断されたスリット光の画像が得られる。

実験に用いたバーコードは10本のバーで構成され、黒色バーに0、白色バーに1を対応させている。最初の5本をスタートビットと呼び、これは常に00101を表現しており、ロボットの走行環境内にバーコードと類似した模様がある場合にそれらの模様とバーコードを区別するためのものである。後半の5ビットはデータビットと呼び、この値によって部屋番号を識別する。Fig.1に示すバーコードの例では0010100101で、5号室を表わしている。

バーコードを貼り付ける位置は、Fig.2の点cを通る点線で示すようにスタートビットとデータビットの境界線がドアの中心になるようにする。ロボットはあらかじめ環境内のグローバル座標系での各ドアの位置座標を保持しているため、デッドレコニングによって目的のドア付近まで移動する。そして、赤外線スリット光センサでバーコードを検出すると、次に述べる方法で自己位置を補正するための移動距離を導出する。

Fig.2に示すように、赤外線スリット光センサの原理¹⁰⁾を用いて、ロボットからバーコードまでの距離 lx, lz [cm]と、ロボットとバーコードのなす角度 α [rad]を得る。この lx, lz [cm]からロボットとドアの中心との直線距離 co [cm]、ロボットと co [cm]とのなす角度 β [rad]が求まる。求めた α [rad]と β [rad]から co [cm]とドアとの角度 γ [rad]を算出し、(1)式より環境内のグローバル座標系でのロボットの位置 gx, gz [cm]が求まる。この gx, gz [cm]とドアの位置座標との差を計算することで、ロボットはドアの中心に正対する位置に移動することができる。

$$gx = co \cdot \sin \gamma, \quad gz = co \cdot \cos \gamma \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

$$co = \sqrt{lx^2 + lz^2}, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{lz}{lx}, \quad \gamma = \pi - (\alpha + \beta)$$

3.2 自己位置認識精度の計測実験

本手法による自己位置認識精度の計測を行った。Fig.3に実験環境と走行軌跡のモデル図を示す。実験環境は本学研究棟の廊下とし、F601、F602、F603の各部屋のドアにバー

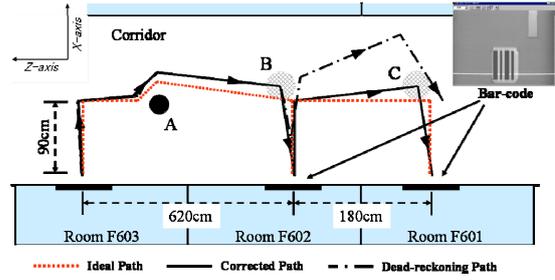


Fig.3 Schematic of the running experiments and their trajectories performed in an indoor corridor

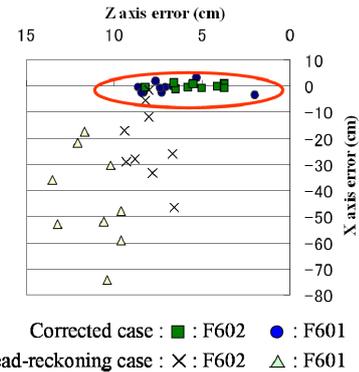


Fig.4 Location errors of the robot actually run for the ideal location

コードが貼り付けてある。図中の黒丸Aは障害物を表す。今回の走行経路はF603のドアの前から、F602のドアの前を経由して、F601のドアの前まで移動するもので、走行距離はX軸方向、Z軸方向合わせて1160[cm]である。再現性を確認するために、同様の条件で10回走行させた。

ロボットが走行中にまったくずれを生じなければ、図中の点線で示すように理想的な経路を描き、F601のドアの前まで走行する。しかし、ロボットはデッドレコニングで走行するため、一点鎖線で示すように経路にずれが生じてしまい、正確に目的地に到達することができない。そこで、自己位置のずれを各部屋前のグレーの部分B、Cで補正することで、ロボットは実線で示す経路のように正確に目的地の部屋に到達することができる。

Fig.4はF602、F601の前の理想的な到達位置に対し、実際の走行時におけるX軸、Z軸方向のずれをまとめて表示したものである。図中の×、△はF603のドアの前からF602、F601のドアの前までデッドレコニングで走行した場合の到達位置の誤差を示している。ロボットは連続的にF602からF601へ向かうので、それに伴い、走行時のずれも徐々に増加していることがわかる。それに対し、本手法を用いた場合は、F602のドアの前の位置誤差(■)、F601のドアの前の位置誤差(●)共に、楕円で囲まれた範囲に収まっており、明らかに位置誤差が小さくなっていることが確認できた。また、最大位置誤差を比較しても、デッドレコニングによる走行の場合、X軸で74.5[cm]、Z軸で13.5[cm]の誤差を生じているのに対し、本手法を用いた場合は、X軸、Z軸それぞれ、3.7、8.6[cm]まで改善されていることが確認できた。

4.携帯電話を用いたユーザによるロボット呼出し手法

本手法では従来手法と異なり、ロボットの呼出しに専用端末ではなく携帯電話を用いている。今までにも、携帯電話とロボットを組み合わせた研究^{11),12)}はいくつか提案されているが、それらのロボットシステムは携帯電話を使って、離れた場所にいるロボットを遠隔操作したり、ロボットの見ている画像を携帯電話で監視したりするもので、ロボットの呼出しのための

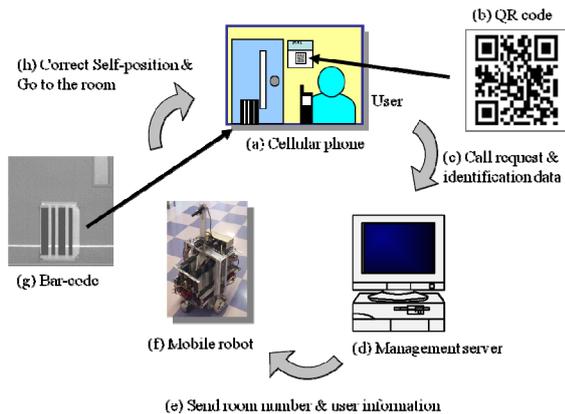


Fig.5 System configuration for calling a robot and making it guide with a cellular phone

手法とは異なる。それに対して、本手法は、QRコード読取機能と個体識別番号という携帯電話の2つの機能に着目し、ロボットの呼出しに携帯電話を利用する事で、従来手法に比べ、より人間に身近で効果的な手法と言える。

4.1 システムの概要

本システムは、Fig.5に示すように携帯電話(a)、QRコード(b)、バーコード(g)、ロボット(f)、そしてそれらのシステム全体を管理するサーバコンピュータ(d)からなる。管理用サーバ(d)には、ユーザがロボットを用いて呼出し・案内を必要とした時に携帯電話からアクセスするためのウェブページと、携帯電話の個体識別番号とユーザ情報を対応させたデータベースが用意されている。そして、QRコードとバーコードのセットは、あらかじめロボットを呼出す用途がありそうな場所に貼り付けられている。ここで、携帯電話(a)は本システムのために特別に用意したものではなく、QRコード読取機能が搭載されているユーザ個人のカメラ付き携帯電話である。

4.2 ロボット呼出し・案内実験

本手法の有用性を確認するため、ロボットをユーザからの呼出しに応じて目的地まで正確に移動させる呼出し・案内実験を行った。実験はユーザ個人の携帯電話を用いて、待機中のロボットをF601に呼出し、そこから隣のF602へ案内させるといふもので、事前に登録されているユーザ(user1, user2)とゲストの3人の場合をそれぞれ3回ずつ、計9回行った。

user1を例に、Fig.5に沿って実験の流れを説明する。user1が、F601の前で自分の携帯電話(a)を用いて、QRコード(b)を撮像する。その後、携帯電話の指示に従ってロボット呼出し用ウェブページにアクセスすると、部屋情報とその携帯電話の個体識別番号(c)が管理用サーバ(d)を経由してロボットに送信される(e)。その信号を受信したロボット(f)は、F601に向かい移動を開始する。ロボットは呼び出された部屋付近まで到着すると、ドアに貼り付けられているバーコード(g)を用いて自己位置認識を行い、ドアの前に正確に到着する(h)。そして、管理用サーバから送信された個体識別番号でuser1を識別し、名前を呼び上げ次の指示を待つ。そこで、user1が携帯電話でF602への案内を指示すると、ロボットは続けてuser1をF602まで案内する。

9回行った実験の結果、ユーザの誤認識、部屋の誤認識等することなく正確に目的地まで走行し、ユーザに合わせた音声会話も実行することができ、本システムの再現性、実用性を確認することができた。

5.長時間活動のためのバッテリーサポートシステム

移動ロボットが長時間活動を行うための手法は、従来から数多く提案されている。しかし、いずれの方法でもロボットはステーションに戻る必要があるため、その都度作業を中断し

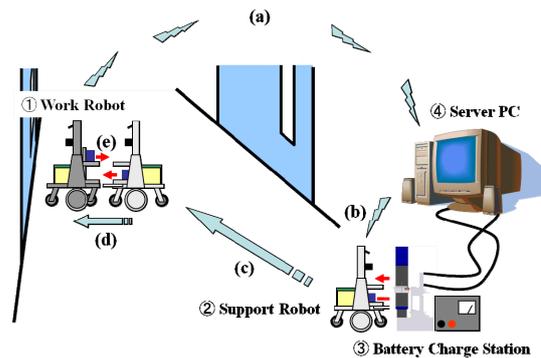


Fig.6 Configuration of the battery support system

なければならない。そこで、本研究では、作業用のロボットと合わせてバッテリー運搬専用ロボットを用意して、作業ロボットの場所でバッテリーを交換する手法の開発を行った。

5.1 システムの概要

Fig.6を用いて、本システムの構成および実行されるタスクについて述べる。まず、本システムは2台のロボット:①作業ロボット・②救援(バッテリー運搬専用)ロボットと③バッテリーステーション、そしてシステム全体を管理する④サーバPCで構成される。

次に、実行されるタスクを同図(a)~(e)の順に説明する。

(a)作業ロボットは作業中、自機のバッテリー残量を監視し、その状態や自機の位置を継続的にシステム管理サーバに送信する。

(b)システム管理サーバでは、作業ロボットから送られてくるバッテリー状態・位置情報から、救援ロボットが作業ロボットとドッキングを行い、バッテリー交換が終わるまでに要する時間を計算し、バッテリーステーションに待機している救援ロボットに救援要請を送る。

(c)救援ロボットは、ステーションで充電した未使用バッテリーを装填し、作業ロボットの位置情報と自機の現在位置から走行経路を導出し、適宜自己位置認識を行いながら、作業ロボットの場所まで走行する。

(d)救援ロボットは、ある程度作業ロボットに近づくと、ドッキングのためのLEDを用いた位置補正手法を用いて、位置・姿勢制御を行い作業ロボットとドッキングする。

(e)2台のロボットに搭載されているバッテリー交換専用スロットを用いてバッテリーの交換を行う。この時、使用済みバッテリーから未使用バッテリーに電力供給を円滑に変更する。その後、作業ロボットはそのまま作業を続け、救援ロボットはバッテリーステーションに戻る。

このようなシステムを実現することで、作業ロボットのバッテリー容量によって決まってしまう活動範囲の制限や、充電時間と充電前後の移動時間によって起こる作業の中断といった問題を解決することができる。詳細は本論文に譲るが、著者はシステムを構築する上で、全体を5つの機構、すなわち、「バッテリー残量検出機構」、「システム管理サーバ」、「ドッキングのための位置補正手法」、「バッテリー交換機構」、「バッテリーステーション」に分けて開発を行った。

5.2 システム統合実験

各要素技術を統合し、バッテリーサポートシステム全体の再現性とバッテリー交換の平均時間を算出するため、実際の屋内環境で20回の動作実験を行った。実験環境は本学研究棟の廊下(幅240[cm])で、救援ロボットが1000[cm]先にある作業ロボットの場所まで移動してバッテリーを交換するものである。

Fig.7に実験環境のモデル図を示す。①の場所に待機している救援ロボットが管理サーバからの救援要請を受け、作業ロボットの真後ろに設定したサブゴール(黒点)を目指して走

行する。ロボットは予め、環境内のマップを保持しており、バーコードによる自己位置認識手法を用いて、離散的に自己位置を補正しながら走行している。実際には②で示すように、ロボットは理想的な走行経路(図中央点線)から徐々にずれ、③のようにサブゴールとは多少異なる位置に到達することが多い。しかし、本システムでは、救援ロボットが作業ロボット後方で灰色の実線に囲まれた範囲に到達できれば、LEDを用いた自己位置補正手法によって、④の様に正確なドッキングが可能である。ドッキング後は、未使用バッテリーを作業ロボットに装填し、使用済みバッテリーを回収する。

実際に行った実験の様子をFig.8(a)~(d)に示す。(a)の奥に位置するのが作業ロボットで、手前にあるのが救援ロボットである。(b)以降では救援ロボットを黒い矢印で示す。救援ロボットは救援要請を受けると、作業ロボット後方のサブゴール近傍まで移動し、作業ロボットと中心軸を合わせるために位置補正を行う。(b)はその様子である。この時、2台のロボットの角度誤差が4.32[deg.]以下であれば、救援ロボット両側のガイドアームを用いて、確実にドッキングができる(c)。その後のバッテリー交換も円滑に行われており、救援ロボット側の未使用バッテリーが作業ロボットに移動し、作業ロボット側の使用済み

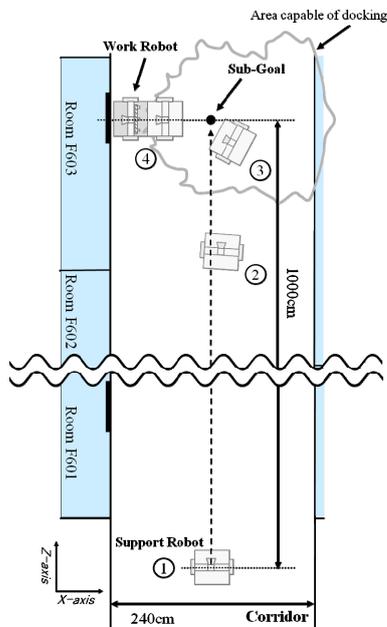


Fig.7 Schematic of an indoor corridor to make a series of performance test of the battery support system with two robots

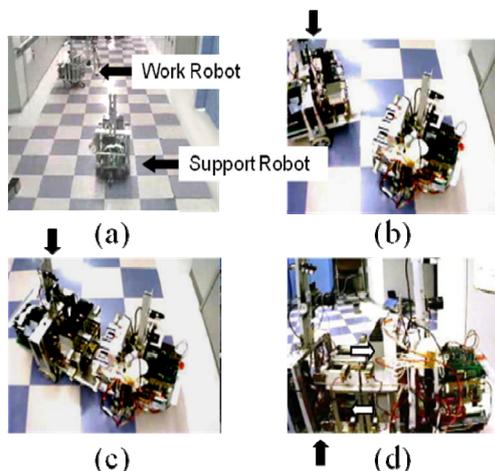


Fig.8 Performance scenes of the battery support system by two robots implemented in an actual corridor

バッテリーが救援ロボットに回収されることも確認できた(d)。

実験の結果、100[%]の再現性が確認できた。20回の試行の結果、バッテリー交換に要した時間は平均1分40秒で、従来のシステムよりも本システムの方が短時間でバッテリー交換を行える事が確認できた。これら一連の救援タスクを実現する上で、各機構が正常に動作し、バッテリー残量の常時監視・残量低下時の救援要請・ロボット同士の正確なドッキング・円滑なバッテリー交換など、ロボットの長時間活動支援を目的とした本システムの安定的な動作を確認することができた。

6.結論

本研究では、人間支援型ロボットの一環として、屋内環境における案内・誘導タスクの実現を目的としたロボットシステムの開発を行った。さらに、このようなロボットシステムを開発する上で重要となる3つの要素技術(1)自己位置認識(2)ロボット呼出し(3)バッテリー交換についての新たな手法を検討し、実環境でのロボットを用いた実験からその有用性を明らかにした。自己位置認識手法については、構造が単純なバーコードと赤外線スリット光センサを用いることで、簡便な手法でありながらも屋内環境を走行するロボットにとって十分な認識精度を得ることができた。ロボット呼出しについては、従来手法のような専用コントローラ等を用いず、ユーザが普段から使っている携帯電話とQRコードという身近なツールを利用することで、人間の日常的なタスクの中にロボットの呼出し行為を取りこんだ効果的で利用しやすいシステムを提案することができた。そして、バッテリー交換については、一般的に考えられているバッテリーステーションでのバッテリー交換ではなく、作業用のロボットとは別にバッテリー運搬専用ロボットを用意して、作業ロボットの場所でバッテリーを交換する手法を提案した。本手法の提案によって、ロボットの長時間活動に対する1つの解決策を示すと共に、ロボットに求められる物理的な物品搬送や受け渡し、協調動作などのタスクに対する知見を得ることができた。以上のことから、ロボット開発における案内や誘導といったタスクに対して本研究が有用であることが示唆された。加えて、今後さらに需要が増すであろう人間支援型ロボットシステムにおける要素技術の統合への1つのモデルを示すことができた。

参考文献

- 1) 神田 他：サービスロボット「enon」の開発，日本ロボット学会誌，Vol.24，No.3，pp.288-291.
- 2) 安川 他：ホームロボットMARON-1の開発(1)-機能と構成-，第20回日本ロボット学会学術講演会予稿集，3F11.
- 3) 藤田：NECにおけるパーソナルロボットの開発，日本ロボット学会誌，Vol.20，No.7，pp.676-679.
- 4) 富松 他：歩行ガイドロボットによる空港のナビゲーション，第20回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1L15.
- 5) 山本 他：移動ロボットの目標方向センサによるセンサベース・ナビゲーション，日本ロボット学会誌，vol.16，no.8，pp.1083-1090.
- 6) 美馬 他：偏光フィルムを用いた移動ロボット用ランドマークシステムの開発，日本ロボット学会誌，vol.16，no.4，pp.518-526.
- 7) 紙 他：天井画像列を用いた屋内ナビゲーション，第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol.1，pp.331-332.
- 8) 総合警備保障 C4，ROBODEX 2003 オフィシャルガイドブック，p.27.
- 9) 長島：接客ロボット wakamaru，愛・地球博 ロボットプロジェクト GUIDE BOOK，pp.30-33.
- 10) 崔 他：レーザーシートビーム光投影法を用いた曲面平面混在環境の認識，レーザー学会誌，Vol.27，No.6，pp.421-425.
- 11) 聞き分けロボット ApriAlpha V3，パートナーロボット資料集成，エヌ・ティー・エス，第3編 現代ロボット図鑑 p.5.
- 12) T73S 番竜，パートナーロボット資料集成，エヌ・ティー・エス，第3編 現代ロボット図鑑 p.69.