A Self-Position Recognition Method for Mobile Robots Based on Robot Calling by a User Using a Cellular Phone

Yasuo Saito Student Member (Soka University, ysaitou@soka.ac.jp)
 Yongwoon Choi Non-member (Soka University, choi@t.soka.ac.jp)
 Taketoshi Iyota Non-member (Soka University, iyota@t.soka.ac.jp)
 Kazuhiro Watanabe Member (Soka University, watanabe@t.soka.ac.jp)
 Yuzuru Kubota Non-member (Soka University, yuzuru@t.soka.ac.jp)

Keywords : cellular phone, robot calling and guiding, self-position recognition, map-matching, mobile robot

A service robot system consisting of a cellular phone available to common users and mobile robots has been investigated and developed for the purpose of supporting such human activities as the delivering documents and goods, guiding visitors and patrolling an indoor environment.

The system is composed of the cellular phone (a) of common users, one pair of a QR-code (b) and a barcode (g) to be pasted on the walls or doors expected, mobile robots (f) and management server (d) that controls the whole system, as shown in Fig. 1.

A feature of the system is spontaneously able to recognize own location of the robot using the notion of Map-matching, by complying with the request called by a user with a cellular phone. This is possible because the robot's location can be corrected with a barcode of simple structure which is detected by a slit-ray sensor on the robot and a QR-code including location information to be read by a cellular phone. These codes also have the features that

Fig. 1. System configuration for calling a robot and making it guide with a cellular phone

Fig. 2. Schematic of the running experiments and their trajectories performed in an indoor corridor

are simple to install them in the environment and easy to operate because users don't use an exclusive controller like keyboard on computers, but their own accustomed cellular phone for calling the robot.

Fig.2 shows the schematic trajectories of a robot run by the proposed method (solid line) and the dead reckoning (dash-dotted line) for an ideal path (broken line) in an actual corridor. The robot starts from room F603 and moves a total of 1160 (cm) to the front of the door of room F601 via room F602 to avoid an obstacle A. By being corrected at B and C locations with the self-position method, we could confirm the measurement errors for x, z-axis are within 3.7, 8.6 (cm), respectively.

From the repeated experiments performed with the robot in the indoor corridor, the proposed system was successfully evaluated in the measurement accuracy for some self-positions of the robot called and the reliability for practical navigation.

In addition, when the robot was arrived at a certain location, its behaviors to unexpected action of the user and the effect affected on it are discussed.

携帯電話を用いたユーザによるロボット呼出しとそれに付随した移動ロボットの自己位置認識

学生員 斎藤 康夫* 非会員 崔 龍雲*
 非会員 伊与田 健敏* 正 員 渡辺 一弘*
 非会員 久保田 譲*

A Self-Position Recognition Method for Mobile Robots Based on Robot Calling by a User Using a Cellular Phone

Yasuo Saito*, Student Member, Yongwoon Choi*, Non-member, Taketoshi Iyota*, Non-member, Kazuhiro Watanabe*, Member, Yuzuru Kubota*, Non-member

A service robot system consisting of a cellular phone available to common users and mobile robots has been investigated and developed for the purpose of supporting such human activities as the delivering documents and goods, guiding visitors and patrolling an indoor environment. The system has the feature that is spontaneously able to recognize the robot location on it using the notion of Map-matching, by complying with the request called by a user with a cellular phone. This is possible because the robot's location can be corrected with a barcode of simple structure which is detected by a slit-ray sensor on the robot and a QR-code including location information to be read by a cellular phone. These codes also have the features that are simple to install them in the environment and easy to operate because users don't use an exclusive controller like keyboard on computers, but their own accustomed cellular phone for calling the robot. From the repeated experiments performed with the robot in an indoor corridor, the proposed system was successfully evaluated in the measurement accuracy for some self-positions of the robot called and the reliability for practical navigation. In addition, when the robot was called at a certain location, its behaviors to unexpected action of the user and the effect affected on it are discussed.

キーワード：携帯電話，ロボット呼出・案内，自己位置認識，マップマッチング，移動ロボット

Keywords: cellular phone, robot calling and guiding, self-position recognition, map-matching, mobile robot

1. はじめに

近年，ロボットの要素技術の発達により，ロボットの利用環境や利用形態も大きく様変わりしている。企業・大学等数多くの機関で，人間と同じ環境で多彩な仕事を行うサービス提供型ロボットが提案・開発されている。本研究室では屋内環境で用いるサービス提供型ロボットの実用化研究を行っているが，このようなロボットシステムで必要となる要素技術として以下の2つに着目する。

- (1) ユーザの要求に応じてロボットを呼出すための技術
 - (2) 呼出し機能に付随したロボットの自己位置認識技術
- まず，サービス提供型ロボットの場合，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。ここで言うコミュニケーションとは，ユーザとロボットが自宅・オフィス間のような，まったく離れた場所でやり取りをする遠隔操作のことではなく，ロボットとユーザが同じ建物内において直接タスクを依頼すると言った，もっと近接したコミュニケーションのことである。

従来のロボットシステムにおける同一環境内でのユーザ・ロボット間のコミュニケーション手法を見てみると，①ユーザがロボットの近くまで移動してタッチパネルや音声認識によって行う手法⁽¹⁾，また，②巡回中のロボットがカメラなどのセンサでユーザを発見した場合に音声などで行う手法⁽²⁾がある。しかし，どちらの場合も，ユーザとロボットがお互いを確認できる位置にいないとコミュニケーションを取る事は困難である。いかに，ロボットにユーザをサポートするための優れた技術が搭載してあったとしても，ユー

* 創価大学大学院工学研究科

〒 192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236

Graduate School of Engineering, Soka University

1-236 Tangi-cho, Hachioji, Tokyo 192-8577

ザがロボットとコミュニケーションを取りたいと思う時に、ロボットが身近にいないためにそのサポートを受けられないというのであれば、その優れたロボットの技術も十分に生かされているとは言えない。

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。従来もロボットと同一ネットワーク内に固定型の PC 端末や専用端末を設置したり、ハンディタイプの専用端末を用いてロボットとコミュニケーションをとる手法が提案されているが、ロボットを呼出す状況は必ずしも PC 端末が常に整備された環境とは言えない。また、このような端末をいたるところに設置するのは環境構築の面から現実的ではない。加えて、ハンディタイプの専用端末を用いる場合でも、その端末をはじめて利用する人は、ロボットを呼出すために、まず、その端末の操作方法を理解しなければならない。そこで本研究では、この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。この手法は、ロボットの呼出しや案内にユーザが普段から使い慣れている自分の携帯電話を用いることで、いたるところに PC 端末を設置するといった煩雑な環境整備や、ロボット呼出しのためだけに利用するコントローラのような専用機器の導入、また、その場を初めて訪れたユーザが理解するのに時間を要する難解な操作やガイダンスの必要性がなく、簡単にロボットを呼出すことを可能にするものである。

次に、ユーザがロボットを呼出した時やそこから別の場所へロボットに案内させる時に、ロボットが目的の場所まで正確に到達できなければ意味がない。そこで、自己位置認識技術が不可欠となるが、本研究では、ロボットの呼出し行為自体がユーザのタスク要求に加えて、自然のうちに自己位置認識の 1 プロセスとなる、いわば、カーナビゲーションの人間が介在したマップマッチング技術を組み入れている。

自己位置認識については、従来までも様々な手法が提案されているが、環境にランドマークを取り付ける手法⁽³⁾⁽⁴⁾はシステムが大規模で環境に取り付けるセンサ自体に電源装置が必要である。また、環境内の特徴点をランドマークとして画像処理する手法⁽⁵⁾はあらかじめテンプレートを準備し、複雑な処理を要してしまう。そこで筆者らは、こうした大規模な外的センサの設置などによる既存の環境の変更を極力抑え、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、障害物回避用の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、ドアに貼り付けるだけで、それ自体に電源装置等が必要としないことや、バーコードのビット数を増やすことで簡単に設置個所の増加が可能な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の新たな専用センサを準備する必要がなく、赤外線スリット光センサの特徴を活かすことができる。

そして、システムの複雑さや冗長さを決めるさらに重要な点として、ランドマークを利用した自己位置認識の頻度とタイミングが挙げられる。ランドマークの数が少なすぎるとあるランドマークから次のランドマークに移動するまでに誤差が蓄積されてしまい、ランドマークの発見が行えなかったり、誤認識の原因となったりする。逆にランドマークの数が多すぎると環境が煩雑になり、冗長な自己位置認識を繰り返して、ロボットの処理負荷が増大する。そこで本手法では、必要最低限のランドマークで、単純かつ精度の高い自己位置認識を実現するために、屋外環境で最も一般的な測位システムである GPS(Global Positioning System) の応用技術であるカーナビゲーションシステムで採用されているマップマッチングという概念を取り入れた。

一般的に、カーナビゲーションシステムでは衛星局からの信号を定期的に受信することで、リアルタイムに自己位置を認識することができる。最近では、技術の発達により誤差 $\pm 10[\text{m}]$ 程度の精度で測位が可能である。しかし、測位精度が向上した現在でも、位置認識には GPS からの位置情報だけを利用しているのではなく、それと共に車載センサを用いた推測航法、マップマッチングという技術を併用して、GPS だけでは補いきれない誤差を補正している。マップマッチングとは現在地が道路以外を指している場合、「車は通常道路上を走っている」という前提に基づき、現在地を近傍の道路上に修正するものである。これは自己位置認識の全てをコンピュータ制御で行うのではなく、人間の操作を信頼し、より精度の高い測位を実現するものである。その根底にあるのは、機械制御に全てを任せるのではなく、その中で人間が担当できる部分は人間の操作を利用するという考えである。

カーナビゲーションシステムの場合は、自動車と操縦者が常に一緒に移動するため、走行中に生じる位置誤差をほぼリアルタイムに補正する事ができる。これは、いわば常時マップマッチングと呼べるものであり、言い換えれば、人間が移動体を常に監視する事ができるシステムである。それに対して、移動ロボットの場合は、その挙動を常に人間に監視させる事は現実的ではない。しかし、常時には及ばずとも、折々に人間の持つ確かな知識をロボットに活かす、いわば部分的マップマッチングが利用できれば望ましいと考えられる。

そこで本手法では、ロボットの自己位置認識用バーコードとユーザがロボット呼出しに用いる QR コードを 1 セットとして各部屋のドアに設置し、ユーザがロボットを呼出すという行為自体が自然のうちにロボットの自己位置認識の第一段階も兼ねるという点で部分的マップマッチングを取り入れている。このように、人間が折々に介在する事で、人間の先見的知識、すなわち、ユーザが部屋を間違えることは無いという前提を利用し、ランドマークの数を軽減させるなど、冗長な処理を行わないようにすることが可能と考えている。さらに、その介在の程度は、第三者が常にロボットを遠隔監視しているような、ユーザに特別な作業を

強いものではなく、単にロボットを呼出すという程度の、ユーザに負担にならないシステムとなっている。

本稿では上に述べたように、サービス提供型ロボットに必要な要素技術であるロボットの呼出し手法とそれに付随した自己位置認識手法を提案し、この2つの手法をマップマッチングという概念を用いて統合する事で屋内環境で利用可能なサービスロボットシステムを構築した。そして、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. 提案するシステムの概要

本章では、提案するシステムの構成およびユーザに呼出されたロボットが自己位置認識を行い目的地に到着するまでの手順について述べる。

まず、本システムの構成は、図1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、次の3.2節で説明する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、QRコード(b)には、管理用サーバ内のウェブページのURLと共に、貼り付けられた場所の位置座標が格納されている。また、バーコード(g)はロボットが目的地近傍まで到達したあとの自己位置認識に用いる。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。ロボット(f)は座標が指定されれば、その場所まで移動することができる自律型の移動ロボットである。

次に、システムの流れを順に説明する。ユーザが携帯電話(a)でQRコード(b)を撮像・認識する。そして携帯電話

の画面の指示に従って、管理用サーバ(d)内のウェブページにアクセスすることで、管理用サーバにロボット(f)への呼出し要求を伝える。この時、その携帯電話の個体識別番号も一緒に送信する(c)。呼出し要求を受けた管理用サーバはデータベースを参照し、その部屋の位置座標とユーザ情報をロボットに送信する(e)。2つの情報を受け取ったロボットは命令に従って呼出された部屋付近まで移動し、部屋のドアに貼り付けてあるバーコード(g)を用いて自己位置認識を行い、部屋の前まで移動する(h)。この時、到着したロボットはユーザに合わせて対応することができる。具体的には、データベースにすでに登録されているユーザからの呼出しであれば、ロボットに搭載されているスピーカで「こんにちは、〇〇さん」とそのユーザの名前を呼び、未登録の来客の場合であれば「はじめまして、ゲストさん」などのコミュニケーションを取ることができる。さらに、現在地から他の場所までの移動も携帯電話を用いてロボットに案内を促すことができるようになっている。

3. 携帯電話を用いたロボット呼出し手法

本システム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はいくつか提案されており、代表的なものに、株式会社東芝で開発されたホームロボット「ApriAlpha」⁽⁶⁾や株式会社ゼットエムピーの人型ロボット「nuvo」⁽⁷⁾、三洋電機株式会社の留守番ロボット「番竜」⁽⁸⁾などがある。しかし、こ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、テレビ電話機能付き携帯電話であれば、ロボットの見ている画像をそのまま携帯電話に転送し、その場の状況を監視したりするもので、携帯電話の特長とロボット技術を上手く連動させてはいるが、あくまで遠隔操作のための手法であり、我々の提案するロボットを呼出すための手法ではない。

それに対して、本手法ではQRコード読取機能と個体識別番号という携帯電話に搭載されている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、従来手法よりも開発コストや操作性の面で優れた手法と言える。

〈3・1〉QRコード読取機能 本システムで用いるQRコード読取機能は数年前から実用化され、今後発売される新型機種の携帯電話のほとんどに標準で搭載が期待される機能である。そもそも、近年、高画素カメラ付き携帯電話が普及したことにより、カメラを情報入力手段として利用することが検討されてきた。その応用として、印刷されたQRコードをカメラで撮影し、画像認識によってQRコードに格納されている情報を抽出する技術が発達してきている。これにより、名刺上に自分の電話番号やメールアドレスなどの情報が埋め込まれたQRコードを印刷し、携帯電話への個人情報の登録を簡便化することや、通信販売のカタログに商品と一緒にQRコードを印刷し、そのQRコードを読み取ることで携帯電話の通信機能を利用して通信販

図1 ロボット呼出し・案内システムの構成

Fig.1. System configuration for calling a robot and making it guide with a cellular phone

売のショップのウェブページにアクセスし、インターネットを介して商品の購入ができるサービスや、電子クーポンなど携帯電話と QR コードを連動させることで、実環境のメディアと電子メディアとの双方向コミュニケーションを提案する企業も増えつつある⁽⁹⁾。

〈3・2〉 个体識別番号 本システムでは携帯電話の个体識別番号とその携帯を所有しているユーザの名前などの情報を関連付け、あらかじめデータベースに登録しておくことで、ロボットがユーザとコミュニケーションを取る時のユーザの識別に利用している。

个体識別番号とは、各携帯電話機が持つ機種や製造番号等の固有の番号のことである。この番号は製造時に割り振られるので、同じ番号の携帯電話は存在しない。電話番号のように、機種変更を行った場合にも引き継げるものとは違い、携帯電話が変わると个体識別番号も変更される。この个体識別番号を利用したサービスとしては、携帯電話から接続できるウェブサイトでのユーザ登録などに利用され、个体識別番号をそのサイトに送信し、登録しておくことで、次の接続時からは煩雑なユーザ ID やパスワードを入力する必要がなく、个体識別番号を送信するだけで登録ウェブサイトアクセスすることができる。最近ではこのようなサイトも増えてきている。

4. ユーザとロボット間のコミュニケーション

ロボットは環境内のネットワークに接続しており、環境内のコンピュータからであればアクセスが可能である。しかし、携帯電話を用いてコミュニケーションを取る場合、たとえユーザがその環境内にいたとしても、直接環境内のネットワークにアクセスするわけではなく、携帯電話から携帯電話会社のサーバ、そして、ロボットの動作する環境内のサーバを経由してロボットにアクセスすることになる。

そこで、本手法でも環境内に設置されたシステム管理用サーバに、外部からアクセスできるウェブページを作成し、

それを用いることでユーザとロボットのコミュニケーションを行っている。ウェブページの作成には PHP(PHP: Hypertext Preprocessor) を用いる。これは JavaScript のように HTML ファイルの中に埋め込んで、動的な Web ページを作成するためのオープンソースで提供されているサーバサイドスクリプト言語である。JavaScript の場合はクライアント側のブラウザで解釈されて動くため、ブラウザの種類やバージョンといったクライアント環境で動作が大きく変わってしまうことがあるが、PHP はサーバサイドスクリプト言語なので、クライアント側の環境に依存せずに動作させることができる。また、CGI や Perl に比べて非常に高速に実行でき、しかも負荷が少ないという特長もある。

図 2 に管理用サーバ上に作成したウェブページの構成を示す。ウェブページは全部で 5 つのファイルから構成されており、携帯電話で QR コードを撮像すると、携帯電話の画面にはトップページ (top.php) へアクセスするための URL が表示される。例えば、座標が $x=-83.0$, $z=590.0$ の位置の部屋に貼り付けてある QR コードを認識した場合、携帯電話の画面には `http://www.succ.soka.ac.jp/ysaitou/top.php?x=-83.0`

&z=590.0 と表示される。この URL の top.php までの部分は管理用サーバのアドレス、それ以降は各部屋の位置座標を引数として送信している。また、top.php を作成する際に、HTML の機能の一つである utn 属性を使用することで、ユーザ所有の携帯電話の个体識別番号を次の call.php に送信している。call.php ではウェブサーバ内の内部データを参照するための環境変数 \$HTTP_USER_AGENT を用いて、top.php から送信された个体識別番号を取得している。そして、各ユーザの携帯電話の个体識別番号が登録してある user_data.php と各ユーザの名前が登録してある user_name.php を読み込み、ユーザと携帯電話の対応を確認し、ロボットに移動命令と同時にユーザ情報を送信する。select.php は目的地に到着したロボットに対して、ユーザが新たな目的地への案内を希望する場合に、目的地番号を指定するためのページである。select.php で新たな目的地の部屋番号を指定すると、再び、call.php に表示が切り替わり、ロボットに移動命令とユーザ情報を送信する。

このようなウェブページを管理用サーバに用意することで、ユーザは携帯電話を用いてロボットを呼出したり、案内を指示したりするというコミュニケーションを取ることができる。

5. バーコードを用いた自己位置認識

ロボットの自己位置認識には、できるだけ簡便で確実な方法が望ましいため、赤外線レーザスリット光レンジファインダー (以下、赤外線スリット光センサと呼ぶ) と、そのスリット光で認識が可能で、かつ、構造が単純なバーコードを用いた手法を提案する。

〈5・1〉 赤外線スリット光センサ 従来から、3 次元データ取得や屋内ロボットの物体認識などに赤外線スリッ

図 2 システム管理用サーバ内に作成したウェブページの構成

Fig. 2. Web page configuration on the management server built for calling a robot and making it guide with a cellular phone

ト光センサのような赤外線系のセンサを用いた研究は数多く報告されている。赤外線系センサを用いている理由は、機構的に簡便で対象物のエッジ検出能力に優れているためである。本稿で提案するシステムでは、ロボットの動作環境はオフィスの廊下のような比較的狭く障害物の存在する場所を想定しているため、その環境認識に用いるセンサには対象物のエッジ検出能力に優れた赤外線スリット光センサをロボットに実装した。赤外線スリット光センサは、赤外線投光器とカメラから構成される。赤外線投光器には赤外線半導体レーザを用い、その赤外光をシリンダリカルレンズでスリット状にしている。このセンサを用いると、対象物のエッジのみならず、例えば、カメラ画像面の投影像が楕円弧であれば実環境での円柱の存在を示し、その半径と中心座標が求まる。また、直線の場合は実空間での柱や壁などの平面を示し、直線までの距離とその傾きを求めることができる⁽¹⁰⁾。

〈5・2〉 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] の白色の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図 3(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カメラで撮像した画像が図 3(b) である。同図

図 3 ドアに貼られたバーコードの画像 (a) とそれを赤外線透過フィルタ付きカメラで撮像した画像 (b)

Fig. 3. A visible image(a) and its filtered image(b) of a bar-code posted on a door

図 4 バーコードを用いたロボットの自己位置認識手法

Fig. 4. A method of finding the distance to guide a robot from the current location to the front of the bar-code

のバーコードは、白色バーの部分ではスリット光が多方向に散乱するため、カメラで撮像できる。一方、黒色バーの部分は光を反射する素材であり、また、スリット光投光器の角度がカメラの光軸に対して下向きに取り付けられているため、赤外光がカメラとは別の方向に反射し、カメラには撮像されない。その結果、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、1 つのバーの太さは 2[cm] である。この太さは、幅 240[cm] の廊下の中心を走行するロボットが自己位置認識を行う場合、それまでに累積された走行時のずれが、ドアに貼り付けたバーコードの正面から 120[cm] の地点を中心とする半径 30[cm] 以内に納まると仮定した場合に、その範囲内で認識可能な太さを実験的に求めて設定した。ここでは、黒色バーに 0、白色バーに 1 を対応させている。10 本のバーのうち最初の 5 本をスタートビットと呼び、これは常に 00101 を表現している。このスタートビットは、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識別するためのもので、これによってバーコードの認識率を向上させることができる。次に、センサがスタートビットから、撮像画像中にバーコードを発見すると、後半の 5 ビットの認識に移る。後半の 5 ビットはデータビットと呼び、このビットの値によって部屋番号を識別する。図 3 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カメラの視野角を考慮に入れ、床面から 18[cm] の高さで、図 4 の c 点を通る点線で示すようにちょうど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実験環境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ので、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、ロボットは目的のドアの前に到達すると一旦停止し、赤外線スリット光センサを用いてバーコードの探索に移る。もし、1 回目の撮像でバーコードが赤外線スリット光センサのカメラの視野角に入らなければ、その場で左右に旋回しながらバーコードの探索を続ける。ロボットはドアの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。

まず、図 4 に示すように、赤外線スリット光センサの原理を用いて、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。次に、 α [rad] と β [rad] から co [cm] とドアとの角度 γ [rad] を求め、最終的に (1) 式より実験環境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、ロボットはそれまでのデッドレコニングによって蓄積された位置や姿勢の誤差を補正し、ドアの中心に正対する位置に移動することが可能となる。

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

ここで,

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

6. 実 験

本稿で提案するシステムの有用性と再現性を確認するため、実際に屋内環境で移動型ロボットを用いて動作実験を行った。

〈6・1〉 ロボットのシステム構成 本実験で使用するロボットの外観を図5に示す。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されている。ロボットの前部には Celeron850[MHz] のCPUを搭載したCPUボードや無線LANカード等を含むPC汎用ボードが、後部にはスピーカーが搭載されている。また、外界センサとしてロボット上部には5.1節で説明した赤外線スリット光センサが搭載されており、これを用いて、ロボットは自己位置認識や障害物回避⁽¹¹⁾を行い、自律的に指定された場所まで走行することが可能である。スピーカーはユーザとの音声会話に用い、ユーザに対して指示を促すコミュニケーションに用いる。通常、ユーザが携帯電話を用いて呼出し要求を行った場合、ロボットは本研究で提案する赤外線スリット光センサとバーコードを用いて自己位置認識を行い、指定された部屋の前まで移動し、ユーザとのコミュニケーションを取る。

〈6・2〉 自己位置認識精度の計測実験 まず、ロボットがユーザから呼出された場合を想定し、その自律性を確認するために、簡単な障害物のある環境で走行時の自己位置認識精度の計測を行った。図6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(幅240[cm])とし、F601, F602, F603の各部屋のドアには5.2節で説明したバーコードが貼り付けてある。図中の黒丸Aは円柱型の障害物を表し、その半径は11[cm]である。今回の走行経路はF603のドアの前をスタート地点とし、障害物Aを回避し、F602のドアの前で一旦停止し、続けて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。

もし、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廊下を走行するため、図中の一点鎖線で示すように走行経路にずれが生じてしまい、正確に目的地点に到達することができない。そこで、デッドレコニングによる自己位置のずれが大きくなる前に、本手法を用いて自己位置認識を行っている。具体的にはロボットの走行時のずれが理想的な経路を中心として半径30[cm]を超える前に、そのずれを各部屋の前のグレーの部分B, Cで補正することで、図

図5 実験用移動ロボットの概観

Fig.5. Overview of the robot used in running experiments

図6 廊下で行った実験の走行軌跡のモデル図

Fig.6. Schematic of the running experiments and their trajectories performed in an indoor corridor

図7 自己位置認識の計測精度

Fig.7. Location errors of the robot actually runned for the ideal location

中の実線で示す経路のように正確に目的の部屋に到達させることが可能である。

図7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、F601のドアの前ではF602のドアの前に比べ、さらに位置誤差が大きくなっ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。

〈6・3〉ロボット呼出し・案内実験 次に、ロボットがユーザからの呼出しに応じて目的地まで移動し、正確な自己位置認識を行えるかどうかを確認するための呼出し・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研究室に呼出し、そこから隣のF602研究室へ案内させるというもので、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。図8(a)~(h)がその実験の様子である。各研究室のルームプレートには、その部屋情報が格納されたQRコードが貼り付けられている。(a)はF601研究室のルームプレートにQRコードが貼られている様子である。写真からもわかるように、QRコードは携帯電話で撮像できれば良いので、普通紙に印刷したもので、大きさも 2.7×2.7 [cm]と非常にコンパクトである。

実験の流れについては、まず(b)に示すようにuser1が、F601研究室の前で自分の携帯電話を用いて、そのQRコードを撮像する。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、部屋情報と同時にその携帯電話の個体識別番号が管理用サーバを経由してロボットに送信される(docomo社の携帯電話の場合は送信・非送信を選択可能)。その信号を受信したロボットは、「わかりました。F601に向かいます」と発声し、移動を開始する(c)。それと同時に、user1の携帯電話画面にはロボットの状態がわかるように、「ロボットがF601に向かいます」と表示される。さらにロボットの移動中は、user1の携帯電話画面に(d)のようにロボットの到着までの経過が表示される。ロボットは呼び出された研究室付近まで到着すると、(e)のようにドアに貼り付けられているバーコード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。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、「こんにちは。user1さんですね。携帯電話で行き先を指定してください。」とuser1の名前を呼び上げ、次の指示を待つ。そこで、(f)のようにuser1が携帯電話の画面でF602研究室を指定すると、ロボットは「わかりました。F602へ向かいます」と発声し、移動を開始する。(g), (h)はその後、ロボットがuser1をF602研究室まで案内している様子である。

9回行った走行実験の結果、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の研究室まで走行し、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。

〈6・4〉長距離走行実験 最後に、本システムの走行

図8 ロボット呼出し・案内システムの運用実験の様子

Fig. 8. Scenes to show the experiment state from calling the robot to guiding a user

時における安定性、再現性を確認するために、障害物の数とロボットの走行距離を延ばし、より実用に近い状態での長距離走行実験を行った。この実験も上記2つの実験と同じ環境で行い、障害物A(半径12[cm]の円柱), B, C(幅35[cm], 奥行22[cm]の角柱)を図9のように配置した。なお、図中の各部屋の位置を示す座標の単位はすべて[cm]である。ユーザがF602の前でロボットを呼出し、Start地点にいるロボットが、障害物を回避しながらF602の前まで到着する。その後、ユーザの指示に従って、F603, F608を経由しF609まで3410[cm]の距離を案内走行させるという実験を5回繰り返し、走行時の安定性と再現性を確かめた。その中の1回分の実験結果の軌跡を図9に示す。図中の各部屋番号の右側の数値はStart地点を原点とした時の、各部屋の位置座標(x, z)である。ユーザから呼び出されたロボットは障害物を回避しながら、各経由先の部屋の

図 9 安定性と再現性を確認するために行った長距離走行実験で得られた走行軌跡

Fig. 9. A trajectory of running experiments for ensuring the stability and repeatability in long distance

前でドアに貼り付けてあるバーコードを用いて自己位置を認識し、走行時の誤差を蓄積することなく、正確に最終目的地である F609 に到達することができた。また、その都度、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こともできた。この結果から、本研究で提案するシステムが長距離走行の場合でも安定して動作することが確認でき、5 回ともにほぼ同様の軌跡を描いたことから再現性も確認することができた。さらに距離が延びた場合も、ロボットの走行誤差が 30[cm] を超えない適度な間隔で自己位置認識を行いながら走行することで連続的な走行が可能である。

7. ユーザの呼出し行為がロボットにもたらす効果

本稿ではユーザがロボットを手軽に呼出す事ができ、そのロボットが正確にユーザの場所まで移動し、指示に応じてユーザを案内するための手法について論じてきた。

この時、ロボットを呼出すユーザの状況は様々考えられる。例えば、ロボットを必要としたユーザが、携帯電話を用いてロボットを呼出したが、何らかの事情によりその場から離れる必要が出てきた場合、ユーザがロボットに期待する事として、その場所で待機してもらうか、再度ユーザの場所まで移動してもらうか、少なくともこの 2 つの選択肢が考えられる。そこで、本システムではロボットが到着した際に、その場にユーザがいなければ、呼出したユーザの携帯電話にメールを送信し、その場所に待機するのか、ユーザの場所まで移動するのかの指示を受けられる機能を搭載した。これによって、ロボットはユーザの状態によって作業を中断することなく、ユーザの期待に応えることが可能となる。

さらに、ユーザがロボットを呼出すことはロボットにとっても大きな効果をもたらす。本手法では、マップマッチングの概念を取り入れることで、ユーザがロボットを呼出すという行動をロボットの自己位置認識に関連付けている。そのため、仮に、何らかの理由で、ロボットが呼出したユーザと連絡が取れない状況に陥っても、ロボットにとってはタスクが達成されなかったわけではなく、自己位置補正というロボットにとって非常に重要なタスクを達成する事ができるわけである。つまり、カーナビゲーションシステムで、

車が角を何度も曲がる事によって自己位置を補正していくように、本手法のロボットもユーザに呼び出されることによって、自己位置認識の精度を向上する事が可能となる。

8. おわりに

本稿では、近年注目されてきている人間と共存する環境でのサービス提供型ロボットについて、まず初めに、必要となる 2 つの要素技術について取り上げた。

1 つ目は、従来なかなか提案されていなかった同一環境内でロボットを自分の位置まで呼出すための手法である。これについては従来手法のように呼出しのための専用端末を用いるのではなく、一般的に普及している携帯電話を用いて、その中の QR コード読み取り機能を利用することで、環境構築やユーザの操作性の簡便さを向上させることができた。また、個体識別番号を用いることで、ユーザ認証も行うことができ、今後のセキュリティ面での安全性の向上にも発展させることが可能である。

2 つ目は、ロボットの呼出し機能に、自然のうちに組み込まれた自己位置認識手法である。この自己位置認識については赤外線スリット光センサとバーコードと言う、とても簡便なシステム構成でありながら、屋内環境を移動するロボットに必要な自己位置認識機能を付与することができた。これによって、従来手法に比べても、環境構築のコストや簡便さ、アルゴリズムの単純さ、汎用性の高さなどにおいて優れた手法を提案する事ができた。

そして、これら 2 つの技術を、カーナビゲーションシステムでも利用されているマップマッチングという概念を取り入れることで融合し、ユーザによるロボット呼出しとロボットの自己位置認識という 2 つの技術を関連付けた。これによって、必要最低限のランドマークで正確な走行を行うことができ、実機実験によりシステムの有用性と実用性を確認する事ができた。合わせて、ロボットを呼出したユーザの行動について検討し、本システムがユーザの不慮の行動に対しても柔軟に対応しながら、かつ、ロボットの自己位置認識タスクが実現されている事を示した。

今後は、外部のユーザからのアクセスに対して、呼出し目的の確認を行えるような機能を追加し、セキュリティや個人認証の面でも安全性を追加したり、また、指定した

時間に指定した場所に呼出せる時間指定機能などを追加することで、用途に応じた拡張が可能である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「私立大学社会連携研究推進事業」(平成18年度～平成22年度):研究課題「測位/光神経複合センサノードによるユビキタス・モニタリング・ネットワークの開発とその産業応用への展開」の一環として実施したものである。記して、厚く御礼申し上げます。

(平成18年4月11日受付, 平成18年10月24日再受付)

文 献

- (1) Y. Shimosasa: "Business of Guard Robot", RSJ, Vol.20, No.7, pp.692-695 (2002-10) (in Japanese)
下笹洋一:「警備ロボットビジネス」, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.7, pp.692-695 (2002-10)
- (2) Y. Fujita: "Personal Robot Development in NEC", RSJ, Vol.20, No.7, pp.676-679 (2002-10) (in Japanese)
藤田善弘:「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 (2002-10)
- (3) M. Iwata, H. Takahashi, K. Sasaki, and M. Takano: "Positioning System for Mobile Robot using LED Marks", JSPE, Vol.61, No.11, pp.1579-1583 (1995-11) (in Japanese)
岩田宗之・高橋英男・佐々木健・高野政晴:「LED灯台を用いた移動ロボット用位置姿勢検出システム」, 精密工学会誌, Vol.61, No.11, pp.1579-1583 (1995-11)
- (4) H. Seki, Y. Tanaka, M. Takano, and K. Sasaki: "Positioning System for a Mobile Robot Using Ultrasonic Lighthouses", 14th Conf. of RSJ, Vol.2, pp.511-512 (1996-11) (in Japanese)
関 啓明・田中康夫・高野政晴・佐々木健:「超音波灯台を用いた移動ロボットの位置検出システムの開発」, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.2, pp.511-512 (1996-11)
- (5) H. Kami, Y. Matsumoto, M. Imai, and T. Ogasawara: "Indoor Navigation Based on Ceiling Images", 18th Conf. of RSJ, Vol.1, pp.331-332 (2000-9) (in Japanese)
紙 弘和・松本吉央・今井正和・小笠原司:「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 (2000-9)
- (6) 「東芝プレスリリース」, http://www.toshiba.co.jp/about/press/2003_03/pr_j2001.htm
- (7) 「CNET Japan」, <http://japan.cnet.com/news/tech/story/0,2000047674,20064628,00.htm>
- (8) 「SANYO ニュースリリース」, <http://www.sanyo.co.jp/koho/hypertext4/0404news-j/0405-1.html>
- (9) 辻本優一:「携帯電話バーコードリーダーの現状と可能性」, 月刊自動認識, Vol.17, No.12, pp.48-51, 日本工業出版 (2004-10)
- (10) Y. Choi, H. Morinaga, Y. Kubota, and K. Watanabe: "Laser Sheet Beam Projector to Recognize the Complex Surfaces of Curvature and Plane", Review of LE, Vol.27, No.6, pp.421-425 (1999-6) (in Japanese)
崔 龍雲・森永裕之・久保田譲・渡辺一弘:「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 (1999-6)
- (11) M. Morishima, Y. Saito, Y. Choi, T. Iyota, K. Watanabe, and Y. Kubota: "Navigation for mobile robot considering obstacle shape using slit-ray sensor", 2001 JSME conf. on Robotics and Mechatronics, 1A1-N5 (2001-6) (in Japanese)
森島三恵・斎藤康夫・崔 龍雲, 伊与田健敏・渡辺一弘・久保田譲:「スリット光センサを用いた障害物の外形認識による移動ロボットの走行制御」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01講演論文集, 1A1-N5 (2001-6)

斎藤 康夫 (学生会員) 1975年3月3日生。1997年創価大学工学部情報システム学科卒業。現在, 同大学院工学研究科情報システム学専攻博士課程在学中。日本ロボット学会会員。

崔 龍雲 (非会員) 1961年2月25日生。1983年韓国中央大学工学部電子計算学科卒業。95年神戸大学大学院自然科学研究科博士課程システム科学専攻修了。現在, 創価大学工学部助教授。ロボットビジョン, 自律移動ロボットの研究に従事。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 電子情報通信学会等の会員。(工学博士)

伊与田 健敏 (非会員) 1964年3月4日生。1986年東北大学工学部応用物理学学科卒業。92年同大学院工学研究科応用物理学専攻修了。現在, 創価大学工学部講師。画像による環境認識, 超音波による距離計測と測位システム等の研究に従事。日本物理学会, 電子情報通信学会各会員。(工学博士)

渡辺 一弘 (正員) 1953年8月13日生。1976年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。81年同大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在, 創価大学工学部教授。レーザの光情報装置への応用, 光ファイバセンサ, 自律移動ロボットの自己位置認識システム等の研究に従事。計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 応用物理学会, 可視化情報学会等会員。(工学博士)

久保田 譲 (非会員) 1939年7月11日生。1963年室蘭工業大学工学部機械工学科卒業。68年北海道大学大学院工学研究科精密工学専攻博士課程単位取得退学, 同年室蘭工業大学講師。現在, 創価大学工学部教授。制御, ロボット挙動等の研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会, 日本ロボット学会等会員。(工学博士)