

# 障害者とロボットの部屋間移動を支援する後付型ドア自動開閉装置

## A Supplementally Automatic Door Device for Hybrid Support of Humans and Robots

正 福井 類 (東京大学)      ○学 門脇 啓太 (東京大学)  
正 森 武俊 (東京大学)      正 佐藤 知正 (東京大学)

Rui FUKUI, Keita KADOWAKI, Taketoshi MORI and  
Tomomasa SATO. The University of Tokyo

This paper describes development of Automatic Door Device as a part of intelligent environment. This device, Robo-Door, can release home robots from door opening/closing task and serve for handicapped humans as well. The characteristics of the device are (a) easy installation by a wheel actuation, (b) compatibility of automatic motion and human manual handling by a clutch mechanism. It was shown by experiments that Robo-Door achieved open/close operation of a door on typical three kinds of floor materials and had enough safety against collision with humans and robots.

*Key Words* : Service robot, Automatic door, Intelligent environment, Ubiquitous robot

### 1 緒論

近年、人の生活環境におけるロボットの活躍が期待されており、その一つの戦略として環境構造にセンサやアクチュエータなどを埋め込んだ知的環境を実現しようとする取り組みが行われている [1, 2, 3, 4]。その一例として友国らは、家具等に容易に取り付け可能なキャスター型のアクチュエータ (Active casters) を開発している [5]。これらには、空間自体をロボット化することで生活者の支援を行うことの他に、従来のロボットのための環境インフラ整備という側面がある。ロボットにとって作業しやすい環境を提供することは、現在のロボットシステムを早急に人間生活に導入するための足がかりとして注目されている。

このようなアプローチの一環として、本研究では、室内ドアの自動開閉を実現する装置 (Robo-Door, Fig. 1) の開発を行う。ドアの開閉は、一般家庭に導入されるロボットが部屋間を移動して作業を行う際に解決すべき問題のひとつであり、これに取り組む研究も行われている [6, 7]。しかし、アームを持たないロボット、例えば Roomba のような単機能ロボットにとっては、ロボット自身による解決は現実的でない。ロボットがドアを操作するのではなく、ドアを自動開閉する装置を環境側に組み込んでおくことで、ロボットの作業遂行性を高めることができる。また、ドアを自動開閉する装置は、ロボットのみならず、例えば車椅子使用者など自力でのドア開閉が容易でない人への支援としても利用できる。

よって、本研究においては、直近の効果としては身体障害者の生活支援を、そして将来的に家庭内に導入されるであろうロボットのための環境整備を実現するドア自動開閉装置の開発を目的とする。

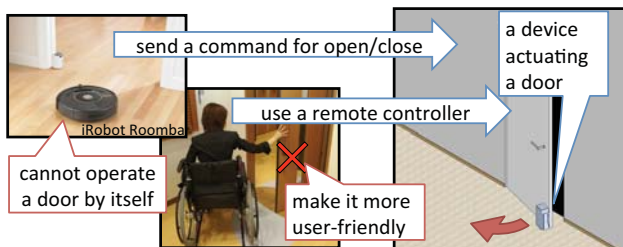


Fig. 1: Conceptual image of automatic door device

本論文の構成は次の通りである。第2章では、ドアの自動開閉を実現する手法について議論し、自動開閉に必要な性能・機能について検討する。第3章では各要求機能を実現するための具体的な機構の方式について述べる。開発した試作機の性能評価のために行った実験について第4章に記す。第5章は結論である。

### 2 要求仕様と実現方法

本章では、人およびロボットのために室内ドアを自動開閉する装置に求められる要求仕様について述べ、その実現方法について検討する。

#### 2.1 室内ドア自動開閉のための要求仕様

室内ドアを自動開閉する装置の要求仕様として、以下の3つが挙げられる。(1) 安定してドアの開閉を行うことができる、(2) 安全性が確保される、(3) 手動での開閉に支障が無い。まず、第一にドアの開閉が実現でき、人およびロボットの通行を可能にすることが必要である。また、自動での開閉中に、例えば人が挟まったら停止するような機能も安全上必須といえる。加えて、手動での操作性も確保されなければならない。なぜなら、停電等で装置が作動しない場合に手動での開閉ができなければ、緊急の避難を要する非常時に対応できないためである。また、人が自力でドアの開閉を行うのに問題が無い場合、あえて自動で開閉を行うのはストレスに感じてしまう。身体障害者の支援のみを考えた場合には常時自動での開閉で問題ないが、ロボットの支援としてみた場合、そこでの生活者が健常であることは十分あり得るため、装置取り付けによる手動開閉時の負担は極力減らすべきである。

以上に挙げた他に、解決すべき問題としてドアノブの扱いがある。これに関しては、装置が直接ドアノブを回すのではなく、例えば一定の圧力が加わるとロックが外れるようなものを導入すればよい。本論文においては、そのようなドアノブが導入済みであるとして議論を進める。また、本装置は無線通信による指示を受けてドアの開閉を行うため、人が使用する場合はコントローラを携帯することを想定している。

#### 2.2 家庭内ドア自動開閉の実現方法

先に挙げた要求仕様を満たす方法はいくつか考えられる。ここでは、(1) 新たな環境に組み込むのではなく、既存の生活環境への導入であること、そして、(2) 人とロボットが共存

する環境への導入であることの2つを念頭に置きながら、その実現方法について検討する。

**2.2.1 ドア自動化方法の検討** 室内ドアの自動開閉を実現するに当たって、まず大きく分けて (a) 既存のドアに装置を取り付ける、(b) 既存のドアを、自動での開閉が容易な構造のもの (スライド式、折り戸式、ロール式) に取り替えるという2通りの方法が挙げられる。それぞれの方式の利点・欠点を Table 1 に示す。

まず、既存のドアに装置を取り付ける場合、当然ながらドアそのものを取替える必要が無い。既存の生活環境への導入という観点から、これは大きな利点である。欠点としては、特に開き戸式の場合、ドア開閉による物体や人との干渉が起りうる点が挙げられる。

次に、ドアそのものを取り替える方式について考察する。

スライド式のドアは最も容易に自動化が可能な形式であり、現在日常的に使用されている自動ドアで最も多いのもこのスライド式である。ドア開閉による物体との干渉も無く、人が手動で操作する際にも問題は無い。しかし、ドアを収納するスペースが必要であり、設置場所の構造上、採用することが不可能なケースも多々ある。

折り戸式ならば、スライド式に見られるような設置場所の制約が無く、現在設置されている開き戸式ドアとは取替え可能である。しかし、このような形式のドアは手動での操作性が悪く、要求仕様のひとつに挙げた「手動開閉時における負担の低減」を満たしているとは言い難い。

ロールカーテン式についても、物体との干渉や省スペースという利点はあるものの、手動操作時の変位が大きいという問題がある。また、ドアに本来望まれる機能である断熱性、遮音性が損なわれてしまう。

加えて、ドアそのものを取り替える方式に関しては、先に上げた個々の短所の他に共通の欠点として、取替えコストが大きいということが挙げられる。ロボット導入に適した住宅など、新たに建設される場合にはあらかじめ組み込んでおけば問題は無い。しかし、既に出来上がっている環境に手を加える場合、それが如何に便利であろうと導入コストが高ければ受け入れられない。

このように、ドアを取り替える方法では、欠点とコストを考慮すると装置取り付けに勝るほどの利点が無い。そこで本研究では、既存のドアに付加的に装置を取り付けることでドアの自動開閉を実現する。

**2.2.2 駆動方式の検討** 既存のドアに取り付けるタイプの自動開閉装置は、リンク機構を採用したドア上端取り付け型のものがいくつか製品化されている (Fig. 2) [8, 9]。この



Fig. 2: Commercial products which opens a door automatically by mechanical links

方式のメリットとしては、人の生活空間と干渉しないこと、モータの回転とドアの開閉度が一致するため制御が容易であることなどが挙げられる。しかし、このような製品の多くが、構造上大出力のモータを必要としたり、取り付けのために壁やドアに穴加工を施すことが必要といった欠点を有する。

リンク機構を用いる他に、物体を目標位置まで移動させるための駆動方法としてはワイヤ、車輪、磁力 (リニアモータ方式) などが挙げられる。

この中から、本研究では Robo-Door の駆動方式として車輪を選択する。車輪を用いた方式の大きな利点として、機構のシンプルさが挙げられる。また、本研究においては開き戸を取り上げているが、装置の取り付け方向を変えるだけで開き戸・引き戸の両方に対応することも可能であり、車輪方式は汎用性が高いといえる。また、後述するが、導入が簡易に実現できるよう、装置の取り付け方法についても工夫している。人の生活環境に新たな装置を導入する場合、その導入のしやすさは非常に重要である。

**2.2.3 車輪駆動によるドア自動開閉のための機能分析**

本装置には、次の5つの機能が必要であると考えられる。(1) 衝突の検知および停止、(2) 手動開閉時の負荷低減、(3) 簡易取り付けの実現、(4) 十分な駆動力の獲得、(5) ドア開閉状態の特定機能。

付加的な装置により既存のドアを自動開閉する際に必要となる機能としてまず挙げられるのが、人や物品の衝突を検知して停止するといった安全の確保である。加えて、手動開閉への支障を回避する機能も求められる。また、取り付けを簡易にしコストを低減するために、穴あけ等の工事が不要な取り付け方法が望まれる。車輪方式を採用することによって生じる問題も解決する必要がある。まず、車輪で駆動する場合、駆動のために十分な摩擦力を得るための工夫が必要である。床面の種類、例えばカーペットかフローリングかによって摩擦係数は異なり、また、一般家庭の床面は必ずしも平坦ではなく、なだらかな凹凸が存在し得る。車輪を床面に押し付けなくては、摩擦が不十分であったり、床に車輪が接していな





	(a) installing a device to a static door	(b) replacing to full automatic door		
types of door	a hinged door and slide door 	slide type 	folding type 	roller blind type 
advantages	•no need of door's exchange	•no interference •easy manual open/close	•installation compatible with a hinged door	•no interference •small space to install
disadvantages	•interference by opening /closing	•large space for door	•Low usability for manual open/close	•Low usability for hand motion •Low sound/heat insulation

Table 1: Comparison of two methods, installing a special device or exchange of a door

い状態に陥り、駆動できない事態になりかねない。また、ドアの開閉状態の特定にも注意が必要である。単純にモータや車輪の回転を測定するだけでは床面と車輪の滑りにより誤差が生じ、また、開閉を繰り返すことでその誤差が蓄積されてしまう。

### 3 機構の設計と実装

前章までの検討に基づき、要求機能を実現する機構を実装した Robo-Door の具体的な設計について述べる。まず Fig. 3 上に開発した Robo-Door 試作機の概要を、Fig. 3 下にブロック図を示す。本装置は (1) 駆動ユニット、(2) 固定ユニット、(3) スライダガイドユニットの3つで構成される。以下、実装の詳細について述べる。

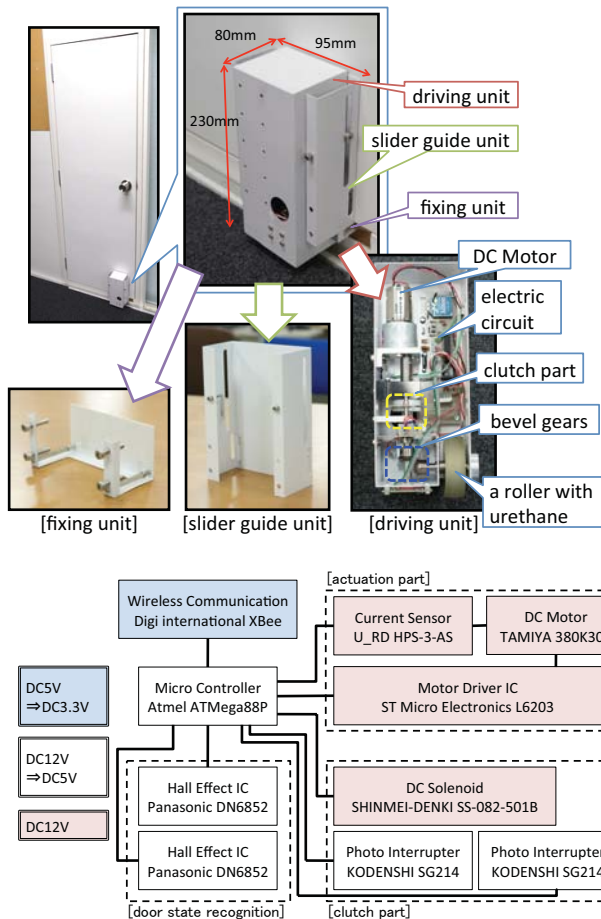


Fig. 3: Whole construction and block diagram of Robo-Door

#### 3.1 電流センサを用いた衝突検知機能

ドアの自動開閉中に人やロボットなどがドアに衝突した際には、Robo-Door は直ちにドアの駆動を停止することが望まれる。そこで、負荷増大時にモータに流れる電流が増加することを利用し、モータへの電流量を測ることで衝突検知を行う。使用した電流センサは U\_RD 社製 HPS-3-AS である。

#### 3.2 クラッチ機構を用いた手動開閉時の負荷低減機能

手動での開閉時における負荷低減を実現するために、Robo-Door にピンを用いたクラッチ機構を搭載した (Fig. 4)。ドア駆動時には上側のピンが DC ソレノイドにより引き下げられ、2つのピンの噛み合いによってモータから車輪へと動力が伝えられる。非自動開閉時には上側のピンはバネによって押し上げられており、車輪とモータを切り離すことで手動開閉時の抵抗を低減している。クラッチ連結時には、上下の

ピンが衝突しないよう、フォトインタラプタを用いたピン位置検出を行っている。

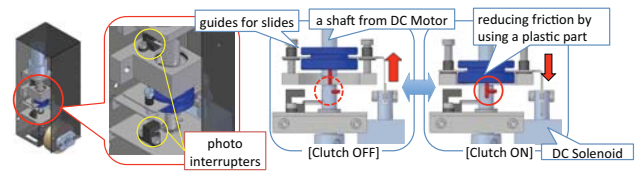


Fig. 4: Detailed description of the clutch mechanism

#### 3.3 磁石とホール素子センサによるドア位置特定機能

駆動ユニット下部に取り付けたホール素子センサと床面に設置した磁石を用いて、ドア開閉状態の特定を行っている (Fig. 5)。使用したホール素子センサは Panasonic 社製 DN6852 であり、S 極側の磁束密度の増減に応じて出力の High・Low が切り替わる。床に設置した磁石とセンサ間距離は約 2[mm] である。Fig. 5 に示すように、2つのホール素子センサが進行方向に対して横 2 列に設置されている。これは、特定したい状態が開・閉・磁石上の通過点とその中間の 4 状態であり、回転中心からの距離が異なるように磁石を配置すれば、2個のセンサ出力の組合せで特定可能なためである。本研究における試作機では、床に設置する磁石として 10 × 20 × 1[mm] のネオジム磁石を使用している。



Fig. 5: Magnets and Hall-effect ICs for detection of the door position

#### 3.4 分割構造の採用によるドアへの簡易取り付け機能

装置のドアへの取り付けを可能な限り簡易に実現できるように、穴をあける等のドアに対する加工が必要ない取り付け方法を採用した (Fig. 6 左)。図に示すように、(1) ドアの下端を固定ユニットとスライダガイドで挟み込む、(2) スライダガイドをボルトによって押し付けてドアに固定する、(3) 駆動ユニットをスライダガイドに取り付けるという手順でドアへ取り付ける。

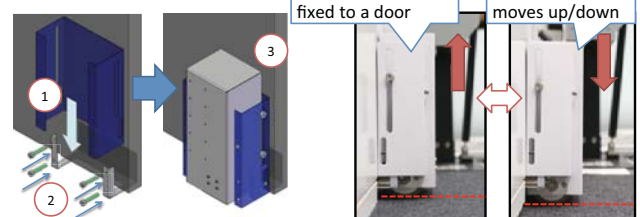


Fig. 6: (Left) Fixing the unit to the door without a punch, (Right) Slide mechanism for driving force optimization

#### 3.5 スライド機構を用いた駆動力獲得機能

2.2 節で述べたように、車輪での駆動を実現する際に問題になるのが床面の状態である。床面のなだらかな凹凸による車輪の空転を防ぐために、駆動ユニットは床面の高さに応じてスライダガイドユニットの溝に沿って上下動可能となっている。また、ドアを駆動するのに十分な摩擦力を得るために、スライダガイドユニットとの間に取り付けられたバネによ



て駆動ユニットは床面へと押し付けられる (Fig. 6 右). この機能には, 様々な床面への対応が可能となるだけでなく, 場所によって異なるドアと床との隙間についても設置位置の微調整が不要であるという利点がある.

#### 4 実験

Robo-Door の性能を評価するために, 試作機を用いて以下の 2 つの実験を行った. (1) ドアの自動開閉実験, (2) 衝突検知および停止実験. その詳細を以下に述べる.

##### 4.1 ドアの自動開閉実験

**[実験の設定]** Robo-Door の試作機を室内ドアに取り付け, 無線通信デバイス (Digi international, XBee) からの指示により開閉を行う. また, 床面の種類として木, カーペット, クッションフロアの 3 種類を用い, それぞれの床について自動開閉を行った. なお, 本実験においてドア開閉状態特定のための磁石は, 木の床での動作中のみ設置している.

**[結果]** 木の床でのドア開閉動作の様子を Fig. 7 (上) に, 床の種類をカーペットとクッションフロアに変えた際の結果を Fig. 7 (下) に示す. これら 3 種類の床について, Robo-Door が問題なくドアの開閉を行えることを確認した.



Fig. 7: Snapshots of automatic door operation experiment

**[考察]** 室内で使用される代表的な床の種類について車輪によるドアの自動開閉が問題なく行えており, 本装置の実現可能性が確認できた. ドア開閉状態特定用の磁石の設置に関して, 本実験における木の床の場合は簡易的にテープで床に固定しているが, 安定した動作のためには磁石の位置決め方法の修正が必要である. また, カーペットなど, 直接貼り付けするのが困難な床面に対する取り付け用部品 (たとえば差込型など) も必要である.

##### 4.2 衝突検知・停止実験

**[実験の設定]** Robo-Door の試作機を用いてドアを駆動し, 動作中に物体と衝突させ, 衝突から停止に至るまでに加わる力を測定した (Fig. 8). 測定に使用したロードセルは共和電業製 LM10KA, 測定機器は KEYENCE 製 NR600 である. 衝突に至るまでのドア駆動距離を約 200[mm] と約 400[mm] の 2 通りとし, 各距離について 3 回ずつ測定を行った.



Fig. 8: Snapshot of collision detection experiment

**[結果]** 衝突検知・停止実験の結果を Fig. 9 に示す. Fig. 9 左の表は, 各計測における最大負荷の値と, 10[N] 以上の負荷が加わった時間を示したものである. Fig. 9 右のグラフは, 衝突までの駆動距離 400[mm] における 2 回目の計測結果であり, 横軸が時間, 縦軸が加わった力の大きさである.

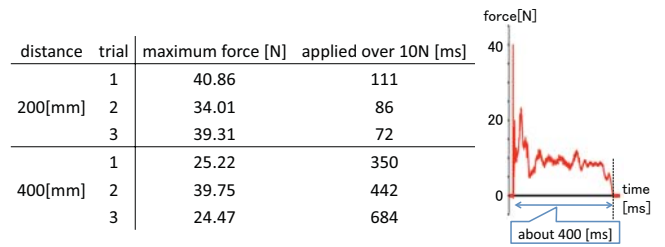


Fig. 9: the experimental result of collision detection

**[考察]** 実験結果より, 衝突の瞬間に物体に加わる負荷は約 40[N] となる. しかし, グラフから明らかなように, 最大の負荷が加わるのは一瞬だけであり, 以後, 20[N] 弱の負荷が数百ミリ秒持続した後, Robo-Door は衝突を検知して停止する. 衝撃力の大きさは力とそれが作用する時間の積であり, 最大負荷はごく微小な時間にもみ作用しているため, 衝突による衝撃は小さく抑えられている. 従って, 電流センサを用いた本装置の衝突検知・停止機能は安全を確保する上で十分な性能を有しているといえる.

#### 5 結論

本研究では, 身体障害者の生活支援とロボットの家庭環境導入のための環境整備を目的とした室内ドアの自動開閉装置, Robo-Door を開発した. Robo-Door は車輪を用いてドアを駆動し, 電流センサを利用してドア自動駆動中の衝突を検知・停止する機能, クラッチ機構による手動開閉時の負荷低減機能, 磁石とホール素子センサを用いたドア開閉状態特定機能, 分割構造を利用した簡易取り付け機能, そして, スライド機構による駆動力獲得機能を備える. 開発した試作機を用いて評価実験を行い, 本装置が多様な床面に対しても問題なくドアの開閉が実現できること, および衝突に対する安全性を有することを確認した.

将来課題として, 安定した動作のためにはドア位置特定機能に用いる磁石の適切な床への設置方法の確立が挙げられる. また, 現在本装置は開き戸にのみ取り付け可能であるため, スライド式のドアにも対応できるように追加の設計が必要である.

#### 参考文献

- [1] Taketoshi Mori and Tomomasa Sato. Robotic room. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 28, No. 2, pp. 141–148, 1999.
- [2] G.M. Yongblood et al. Managing adaptive versatile environments. In *Proc. of Third IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications*, pp. 351–360, March 2005.
- [3] S.Helal et al. The gator tech smart house: a programmable pervasive space. *Computer*, Vol. 38, No. 3, pp. 50–60, March 2005.
- [4] K. Murakami et al. A structured environment with sensor networks for intelligent robots. In *IEEE Sensors*, pp. 705–708, October 2008.
- [5] N. Tomokuni et al. Multi-functional active caster module for distributed actuation devices. In *Proc. of SICE-ICASE International Joint Conference*, pp. 2649–2652, October 2006.
- [6] R.B. Rusu et al. Laser-based perception for door and handle identification. In *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics*, Munich, Germany, June 2009.
- [7] K. Shono et al. Development of the indoor mobile robot based on recs -opening and closing a door and charge-. In *Proc. of JSPE Spring Meeting*, I35, pp. 831–832, Tokyo, Japan, March 2004.
- [8] DORMA GmbH. CD80. <http://www.dorma.com>.
- [9] I.S.T Corp. Kaiheikun3. <http://www.kaiheikun.com>.