

店舗応用を目指した搬送ロボット

Transfer Robot Aimed at Use in Retail Stores

佐野 雅仁

高野瀬 剛

沼田 亜紀子

■ SANO Masahito

■ TAKANOSE Tsuyoshi

■ NUMATA Akiko

人と共存して有用なサービスを提供するサービスロボットが盛んに開発されているが、実際に不特定多数の人が自由に移動する環境での安全な自律移動技術ははまだ確立されていない。

東芝テック(株)は、一般店舗内で誰もが安全に利用できることを目指したショッピングカートロボットを、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」として、独立行政法人産業技術総合研究所(産総研)及び東芝との連名で受託し、開発している。その中で、店舗環境に配慮したセンサシステムや構造を持ち、買い物で想定する重量物を載せて安全に走行する搬送ロボットを試作した。将来は、開発した要素技術を店舗に応用していくことで、多岐にわたる新たなサービスを考えていく。

A variety of service robots operating in human-robot coexistence environments have been developed in recent years. However, safe autonomous mobile technology in environments where many people are moving freely has not yet been established.

Toshiba TEC Corporation, in cooperation with Toshiba and the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), has been participating in the Project for Strategic Development of Advanced Robotics Elemental Technologies being implemented by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). In this project, we have been developing a shopping cart for carrying loads and moving safely in a retail store. Toshiba TEC Corporation has manufactured an experimental transfer robot featuring a sensing system and structure that have been carefully designed to match the store environment. As a result of this development, we are making efforts to offer many leading-edge applications of transfer robots in stores.

1 まえがき

東芝テック(株)は、主に流通小売店舗向けに、POS(Point of Sales)システムを中心としたシステムや機器を“TEC”ブランドで販売している。当社の顧客である小売業界では、商品配送の流通面などでいっそうの合理化が進んでいる一方、少子高齢化などの社会的背景による労働力不足や、それに伴うサービスの低下などの懸念が顕在化しつつある。

一方、企業向けサービスロボットの分野では、2015年には国内市場規模が1,064億円になるという試算⁽¹⁾などがあり、政府指導の下、国を挙げて市場の立上げを推進している。

当社は、一般の人が自由に動き回る環境で、ロボット専用通路などの確保なしで安全に移動や搬送をすることを旨としたロボットの開発を行っている。東芝が開発し発展させてきたロボットプラットフォームをベースに、追従や搬送に特化したアレンジを独自に加え、センサシステムについても店舗という環境を考えた構成に基づいて研究・開発した。

この研究は、NEDOの「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト—ロボット搬送システム」として、産総研と東芝と連名で受託し、実施しているものである。

2 搬送ロボットの概要

試作した搬送ロボットの外観を図1に示す。店舗で利用する搬送ロボットとしていろいろなものが考えられるが、われわれは買い物客に追従するショッピングカートロボットを提案した。ショッピングカートロボットを開発するにあたり、最初から一体のロボットに着手せず、機能と要素技術を分割して、案内



図1. 搬送ロボット — 当社の店舗環境試験室での評価走行中の写真で、外装には超音波センサやレーザーレンジファインダ(LRF)など特徴的な形状が見られる。

Transfer robot

や動的安全などの高機能部分を、人追従のための画像処理技術や走行制御技術を持つ東芝で、店舗環境で安全に搬送をする基本技術を当社で分担し、並行開発することで効率を上げた。

具体的には、東芝は重量物搬送機能を持たない案内ロボットを、当社は重量物を載せ案内ロボットに追従する搬送ロボットを試作した。搬送ロボットが案内ロボットに追従する姿はあくまでも暫定である。以下に、当社で担当した搬送ロボットを中心に述べる。

2.1 搬送ロボットプラットフォーム

プラットフォームは、東芝が従来から開発し改良してきたアーキテクチャを可能なかぎり流用した(図2)。

運動制御にはLinux^(注1)の制御パソコン(PC)を用い、専用インタフェース(IF)を介して、正確に1ms間隔でハードウェア制御(モータ出力、デジタル入出力、及び一部のセンサ入力)を行う。障害物検知デバイスはUSB2.0(Universal Serial Bus 2.0)を介して、100~150ms間隔でデータを入力し、軌道を生産する。

Windows^{®(注2)}XPのインタフェースPCでは、GUI(Graphical User Interface)と、外部PCを含めた全体システム間の通信を担当している。この機能は産総研が開発し配布しているRT(Robot Technology)ミドルウェア⁽²⁾のOpenRTM-aist-0.4.1を実装することで、RTコンポーネント(RTC)となっている。案内ロボットと、環境情報を受け持つRTサーバにもそれぞれ通

信できるRTCが実装されており、位置座標や周辺地図、動作状態などの情報を共有し、協調して動作する。

搬送ロボットの走行の主体となるアプリケーションソフトウェアは制御PC内にあるが、RTC互換の分散オブジェクトを組み込むことで、通信RTC越しの間接通信を外部とできるようになっている。このような構成により、外部で開発した新しい機能の移植、分散、及び統合が容易にできる、フレキシブルで発展性のあるプラットフォームとなっている。

2.2 駆動系

駆動系についても案内ロボットと共通の1軸2輪独立差動方式を採用し、モータの付いた固定車輪二つ(2自由度)でx,y座標と向き θ の3自由度を扱う、拘束下での走行制御を行う。モータ及びドライバは案内ロボットと共通のものを使用しているが、減速機の最終段は、掃除ロボットの開発⁽³⁾で実績のあるインホイールギア式として、独自のレイアウトで省スペースと耐塵(じん)化を実現している。

2.3 ボディ構成と形状

案内ロボットをはじめ、車輪移動ロボットのほとんどは駆動輪軸を中心とした円筒形で、最小占有面積でその場回転ができる構成になっている。これに対し、カートは買い物かごを載せるための荷台を持つことから、円筒形の構成は非効率であると判断し、車輪幅に対し前後に長い構成とした。更に、追従対象を捕らえやすいように回転中心を前方にし、後方を延長してキャスト(自由方向車輪)で支えることで、回頭性を重視し、追従や搬送に適した構成とした。

2.4 障害物センサ

障害物センサには、超音波センサを基本にレーザレンジファインダ(LRF)を使用している。店舗という環境を考えた場合、走行する環境は壁で囲まれた空間ではなく、各種の店舗什器(じゅうき)を障害物として3次元的に認識する必要がある。

2.4.1 LRF LRFはレーザビームを回転走査し、障害物に当たり散乱光として返ってくるまでの時間を連続的に計測することで、障害物までの方向と距離がわかるセンサである。近年小型のものが開発され、いろいろな移動ロボットに搭載されている。搬送ロボットには、前方地上100mmと600mmの高さに二つ、後方100mmの高さに一つ、合計三つのLRFを搭載している。前方600mmのものは案内ロボットへの追従を主用途としている。

しかしLRFは、店舗環境を走行するための主センサとしては次の2点で最適とは言えない。

- (1) 原理的に鏡状の反射面や黒色の物など、計測できないものがある。
- (2) 走査する2次元断面のエリアでしか計測できない。

食品スーパーなどでは、冷蔵ショーケースは足もとの部分がつま先を入れられるよう奥まっている一方で、通常の陳列棚では最下段の棚板がもっとも突き出している。また、陳列用の

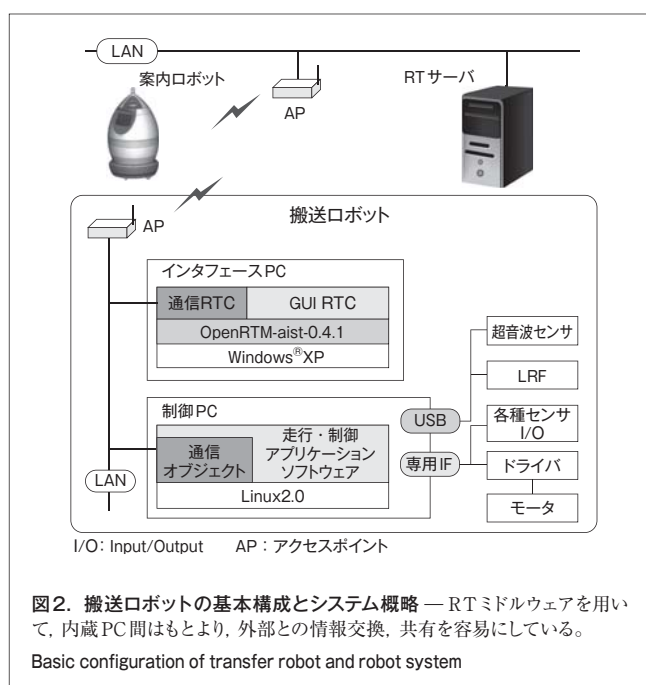


図2. 搬送ロボットの基本構成とシステム概略 — RTミドルウェアを用いて、内蔵PC間をもとより、外部との情報交換、共有を容易にしている。

Basic configuration of transfer robot and robot system

(注1) Linuxは、Linus Torvalds氏の米国及びその他の国における登録商標。

(注2) Windowsは、米国Microsoft Corporationの米国及びその他の国における商標又は登録商標。

可動ワゴンなどは足の部分が様々な形状で、100 mmの高さのLRFで店舗内の障害物をすべて検知することは不可能と言える。

搬送ロボットのセンサ検知エリアの一部を図3に示す。ロボットを上から見た平面図(a)に、高さ100 mmに配置したLRFの前後の検出エリアを示した。前方は左右201°、後方は190°の範囲が測定できる。図示していないが、前方上部のLRFは214°の走査角を持っている。

2.4.2 超音波センサ LRFがその走査面の2次元断面でしか障害物を検出できないため、搬送ロボットでは主センサとして超音波センサを使用する。超音波センサはソナーとも呼ばれ、人の可聴域を超えた周波数の音波を出す専用のスピーカとマイクから成り、出した音波が障害物に当たり戻ってくるまでの時間から距離を計測することができる。搬送ロボットでは32セットの超音波センサを備えており、これらを前方、側方、及び後方に配置している。

図3(a)に超音波センサの検出エリアの一例として、最下段の超音波センサの射出エリアを示す。直径150 mmの円筒を検出できるエリアのデータを基に幾何学的に図示したもので、ターゲットの面積や相対角度などによって、必ずしもすべてのものが検出できるわけではない。同様に、(b)には前方側面の超音波センサの検出エリアの一例を示す。これらは前方と側

方を検出するために、超音波射出エリアを30°前方に傾けて配置されている。

また、センサの位置によって短距離(～50 cm)と長距離(～200 cm)の2種類のエリアをカバーするように、センサの組合せを変えている。具体的には進行方向など、遠くから障害物の有無を知りたいところには長距離タイプを用いている。また、制御PCからUSB2.0を介して接続するサブシステムとすることで、CPUの負担を増やすことなく送受信の条件を動的にできるように構成されている。

前述のように、回転中心が前方にオフセットした構成であることから、回転時は後方が横方向に大きく振れる。そのため、後方側面にも上下に4組の超音波センサを配置し、これらを10°前方に傾けることで、後端の回転する方向を検出して側面の衝突を予防するよう配慮した。

3 搬送ロボットの運動性能と安全設計

試作した搬送ロボットの基本的な運動能力と安全設計について述べる。

3.1 運動性能

今回の試作機が、以下の性能を備えていることを確認した(カッコ内は2008年度までのNEDO要求仕様)。

- (1) 最高速度：1.2 (0.6) m/s
- (2) 乗越え可能段差：2 (1) cm
- (3) 最大積載量：10 kg
- (4) 自重：45 kg

なお、(1)、(2)については最大積載量で確認している。

3.2 リスクアセスメント

リスク低減は広く用いられている3ステップメソッドに基づいて行った。

第1ステップでは、本質安全設計として、バッテリーやPCなどの重量物を駆動輪とキャスタとの間の最下部に搭載することで低重心化を図っている。これは前後に長いという特徴を利用したもので、円筒形のロボットでは多層構造になって重心が高くなる場所を最下層1層だけで、前方に駆動系、その後方にバッテリーとPCを並べて配置している。その結果、実験室のビニルタイル上で最大積載量(一部試験では15 kg)のとき、緊急停止や急旋回時でも転倒することなく走行できた。そのほか、突起をなくし、LRFの出入射口となるスリット幅は15 mmとした。スリットには指を入れることができるが挟みこみにくく、動作中であれば検知もできる。

第2ステップでは、2章で述べた各種障害物センサを効果的に用いることに加え、最終的な接触センサとして、バンパを前面上部に左右に分けて二つ、下部に一つ、後面荷台部に一つ、下部に一つの合計五つ設けている。バンパのストロークは5 mmで、緊急停止状況下において速度0.3 m/sで衝突したと

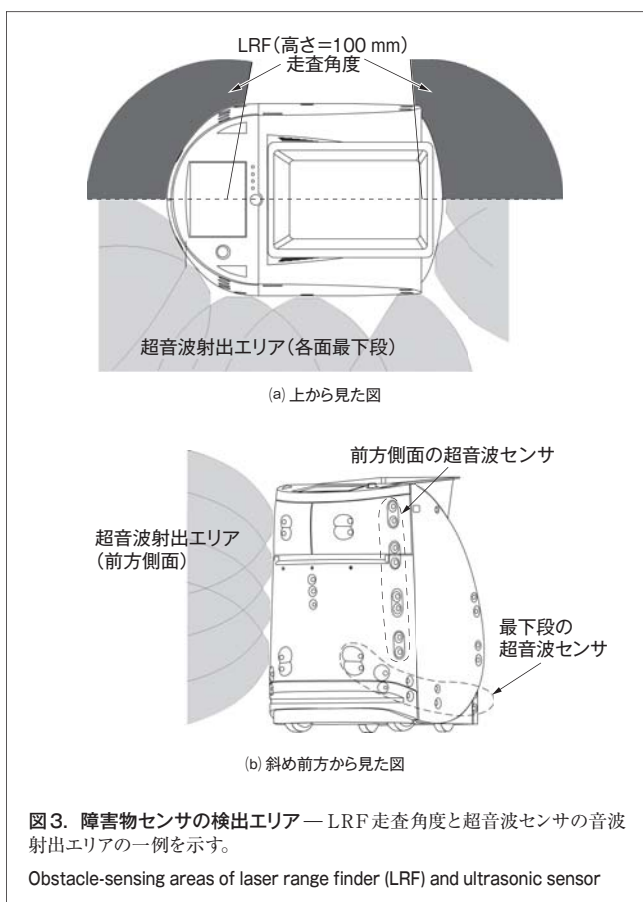


図3. 障害物センサの検出エリア — LRF 走査角度と超音波センサの音波射出エリアの一例を示す。

Obstacle-sensing areas of laser range finder (LRF) and ultrasonic sensor

表1. R-mapによるリスクアセスメント結果

Results of risk assessment based on risk minimization action plan (R-map)

判定領域	危険許容度	説明	初期リスク項目 (設計前)	今回試作時評価項目
A3		Intolerable region 受け入れられないリスク領域 (耐えられない) ハザードがもたらす危害の程度やその発生頻度を減少することが求められる。死亡や重傷あるいは後遺症の生ずる危害を発生させる確率が社会的に受け入れられないレベルであり、リスクが低減できない場合は、製品化を断念すべき領域。	0	0
A2			12	12
A1			21	21
B3		ALARP region 危険 / 効用基準あるいはコストを含めてリスク低減策の実現性を考慮しながらも、最小限のリスクまで低減すべき領域。	38	34
B2			10	10
B1			10	10
C		Broadly acceptable region 他の受け入れられているハザードから生じるリスクと比較しても、危害の程度や発生頻度は低いと考えられ、無視できると考えられるリスクの領域。	6	10

ALARP : As Low as Reasonably Practicable

きに、オイル封入ショックアブソーバによって、バンパ1か所につき (前方上バンパは左右合わせて) 最大65 kgまでの質量の衝撃を吸収できる。

上記の実施を踏まえて (財) 日本科学技術連盟のリスクマップ (R-map) 手法による評価を行った結果を表1に示す。97項目について評価した結果、第三者による誤用など、本体システムだけの対応では困難な項目を中心に33項目でA領域 (受け入れられないリスクの存在) と評価された。

このように現時点では、一般の人が公的な空間で利用するには潜在的な危険源が少なくなく、第3ステップである利用者に注意を求める必要がある項目も残っている。これは今後の課題としており、開発の段階を経て安全のレベルを上げていき、最終的にはA領域の評価が0になることを目指している。初期はコストとの折合いの点で利用者の限定 (会員制、従業員向け) などが必要かもしれないが、社会や業界の求めに応じて法整備や保険制度の確立の動きが活発になっており、サービスロボットの利用シーンも明確になっていくと考えている。

4 ショッピングカートロボットの店舗応用シーン考察

最後に、搬送ロボットをショッピングカートとして店舗応用する場合について考える。カートロボットが荷物を運んで人に追従することで、買い物客は手ぶらでショッピングを楽しむことができる。また、欲しい商品のありかを尋ねれば先導して案内したり、タイムセールスなどの特売情報、食材情報やレシピなどを、位置情報と合わせたタイムリーな情報として提供するなど、満足度の高い買い物シーンを提供できる。

店舗側にとってもサービスと集客力の向上になると同時に、個別の商品売場に合わせてロボットから客の好みに合った情報を提供し、計画外の商品購入を誘導することで客単価を向

上させる効果も得られる。また、追従動作の記録から、立ち止まりや徘徊 (はいかい) などの行動分析を行い、買い物客の購買行動を詳しく把握して、その結果を効果的な店舗レイアウトや、商品配置の見直しなどへ活用することも考えられる。

更に、盗難対策を施してレジから駐車場までの荷物運びをロボットに任せ、その間にほかの売り場を見て歩いたり休憩したりという使い方や、その後の駐車場からの自動帰巢など、難しい技術ではあるが将来の発展性は広い。

また、アンケートやインタビューを実施した結果、カートあるいは業務用でバックヤードと売場間の自動搬送などの要望が得られている。これに応えるには、今後安全性などの問題を解決した具体的な商品像を描かなくてはならない。机上検討だけで解決を図るのではなく、試作したロボットを店舗に持ち込んで、買い物客や店員の声をフィードバックしながら時間をかけてブラッシュアップしていく必要がある。

5 あとがき

店舗内で対象物に追従するためのセンサ構成やボディ形状を検討して搬送ロボットを試作し、評価した。今回は静止物や障害物を回避しながら追従する技術に絞って開発し、ひととおりの動作を検証した。今後は更に多様な障害物の回避と、第三者の行動にも対応できるような動的障害物回避を取り入れた技術開発を進めていくとともに、真のニーズに基づいた応用について探っていく。

文献

- 2008年版企業向けサービスロボットの導入ユーザーの評価と今後の市場。(株) シード・プランニング。東京、2008、238p。
- Ando, N., et al. "RT-Middleware:Distributed Component Middleware for RT(Robot Technology)". IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, 2005, p.3555 - 3560.
- 飯坂仁志, ほか, 第3世代携帯電話と連携する掃除ロボット, 東芝レビュー, 59, 9, 2004, p.53 - 55.



佐野 雅仁 SANO Masahito

東芝テック(株) 技術企画部 コア技術開発センター専門主査。店舗応用ロボットの開発に従事。計測自動制御学会会員。Toshiba TEC Corp.



高野瀬 剛 TAKANOSE Tsuyoshi

東芝テック(株) 技術企画部 コア技術開発センター主務。店舗応用ロボットの開発に従事。Toshiba TEC Corp.



沼田 亜紀子 NUMATA Akiko

東芝テック(株) 技術企画部 コア技術開発センター。店舗応用ロボットの開発に従事。Toshiba TEC Corp.