

自動追従ショッピングカートの制御システムの実装と評価<sup>†</sup>

小野里 太志\*

(2011年3月18日受理)

Implementation and Evaluation of Control System for a Robotic Shopping Cart

Taishi ONOZATO

(Received March 18, 2011)

## 1 はじめに

現在、スーパーマーケットやコンビニエンスストア等の小売店舗内で利用されているショッピングカートは、人が手で押して操作するものである。そのため、手足に不自由がある場合や、子供の手を引いている場合など、なんらかの理由で両手が使用不可能な場合、1人でショッピングカートを使用するの買い物は困難である。バリアフリーや利便性を考え、ショッピングカートが利用者の後を自動で追従するのならば、ショッピングカートの利用が困難な人でも、両手が使えるため商品を手にとることができ、自由に店内を回ることができる。また、一人で2台のショッピングカートが利用できるなど、多くの利用者の買い物の幅が広がり買い物を楽しむことができる。

そこで著者は、レーザレンジセンサ（以下 LRS と略す）を用いた利用者の後ろを自動追従するショッピングカート型ロボット (Fig.1) の研究<sup>2) 3) 4)</sup>を行った。このショッピングカート型ロボットは人物の追従動作は行えるものの、壁や机などの障害物、利用者以外の人の存在が認識できていないなどの問題点が残っていた。スーパーマーケットのような小売店舗内を自律移動体が動作するには、壁や棚などの固定された障害物や人や他のカートなどの移動する障害物に接触・衝突することなく追従動作を行う必要がある。



Fig. 1 Robotic Shopping Cart

## 2 関連研究

近年、様々な分野でロボットの研究がおこなわれ、工場やオフィスなどの屋内を自律移動するロボットの需要が高まり、多くの自律移動ロボットが開発されている。それに伴い、人物の自動追従に関する研究も行われている。ショッピングカート型ロボットの研究は、高梨等<sup>1)</sup>によって Web カメラを用いた追従手法が考案された。しかしカメラでは画角の狭さ等から人物を見失いやすい問題があり、本研究では LRS を用いた追従手法を考案した。奥迫等<sup>5)</sup>の研究では、本研究と同様 LRS を用いたロボットの人物追従手法についての手法を開発している。このロボットは、人間の足元の動きを LRS で読み取り、足の動きを予測して動作させるものである。しかしこの手法では両足という二つの検出物を追いかけるため、非常に複雑な処理が必要となるなど、小売店舗内での運用には適していない。小売店舗の場合は、多くの人が行き交い、商品の陳列が頻繁に変わることや、よく似た商品棚が規則的に並んでいるため、通常の方法では人物の自動追従は難しい。また、ロボットが正確に自律移動するために、田中等<sup>6)</sup>によれば、自律移動ロボットには、動作環境側にライントレースや RFIDなどを設備する方法と、ロボット側にすべての機能を搭載し、ロボットのみで動作する方法があるとされている。本研究では、ロボット側にすべての機能を搭載するロボットを開発する。こちらの方が開発は困難であるが、高い汎用性が期待できる。

## 3 目的

本研究は、一般的なスーパーマーケットやコンビニエンスストアなどの小売店舗内において利用可能な性能を備えた、自律移動型の利用者を自動追従するショッピングカート型ロボットの制御システムの開発、及び実装と評価である。本研究の目的は、主に次の3点にまとめられる。

- ①自動追従システムの開発
- ②障害物回避システムの開発
- ③仮想店舗を用いた制御システムの評価

ロボットの利用者追従機能には、LRS を利用した人物の自動追従システムを開発し、検証する。また、小売店舗内での利用を目指し、ショッピングカート型ロボットが自動で周囲の状況から商品棚や他の人物に対しての回避行動を取る障害物回避システムを開発する。これらをショッピ

<sup>†</sup> 本論文の一部は FIT2010 第 9 回情報科学技術フォーラム、及び The 2010 International Congress on Computer Applications and Computational Science (CACAS 2010)において発表

\* 日本工業大学大学院博士前期課程  
情報工学専攻 2011 年 3 月修了 (片山茂友研究室)

ングカート型ロボットに搭載することで、小売店舗内において、ショッピングカート型ロボットが自律動作し実際に買い物に利用出来るのかどうか、シミュレータを用いて検証する。

## 4 自動追従システムの開発

### 4.1 使用する LRS

ショッピングカートが実機の周りに存在する追従対象者や障害物など、周囲の状況を正確に把握するために、LRS「URG-04LX(北陽電機株式会社製)」(Fig.2)を使用する。



Fig. 2 LRS 「URG-04LX」

このセンサは、クラス1 赤外線レーザー光（波長 785nm）によりおよそ半径 3m、240 度の水平面上空間に存在する物体との距離と方位をほぼリアルタイムで検出することができる。計測イメージを Fig.3 に示す。



Fig. 3 Sample of LRS

### 4.2 追従対象者判別手法

追従対象者の位置を判断するための手法として、LRS から取得したデータを解析し、対象者の両脇の境界角度を求め、その中心角度を追従対象者位置とする手法を考案した。追従対象者の位置は、順次計測が行われる LRS のデータをもとに更新していくため、追従対象者以外に検出物が複数存在していても、それらに影響されることなくリアルタイムに追従対象者を追従することが可能である。本手法のイメージを Fig.4 に示す。この手法を用い、追従対象者判定を行った結果を Fig.5 に示す。

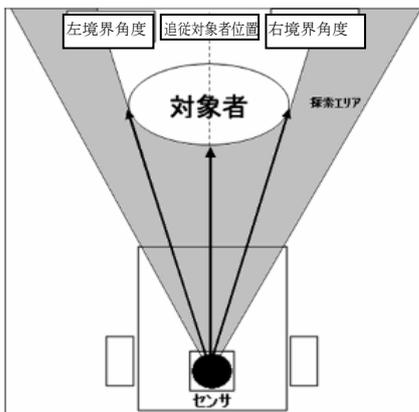


Fig. 4 Detection of target person

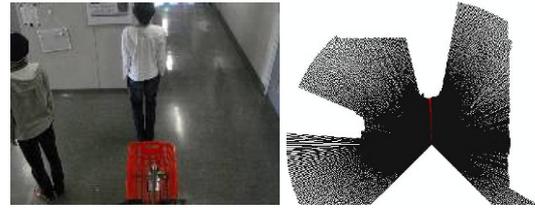


Fig. 5 Result of detection

本手法を用いて実店舗内で運用する場合、他の人物と接近した場合、対象者をご認識してしまうケースが想定される。しかしそれらは時系列を考慮したアルゴリズムを導入することで解決することが可能であると考えられるが、今回の研究では実装していない。

### 4.3 モータ動作量算出

判定した追従対象者の距離を元に、ショッピングカート型ロボットが追従対象者から常に1メートルの距離を保つよう、モータ速度を算出し、動作させる。モータはマイコンにて PWM 制御されており、算出したモータ速度をマイコンに送信することでモータを回転させる。モータ速度の算出には P（比例）制御の式1を用いることで、モータの緩やかな加減速を可能にした。モータ回転速度を  $R(t)$  とし、目的値  $V_{des}(t)$  を目的速度、 $V_{act}(t)$  を現在のモータの速度とし、 $K_p$  は比例制御ゲインとする。目的速度は追従対象者判定にて判定した追従対象者までの距離とショッピングカートから対象者までの保つべき距離1メートルの差である。その差を1メートルに保とうとすることで、ショッピングカートは前後進の動作をする。

$$R(t) = K_p \cdot (V_{des}(t) - V_{act}(t)) \quad (式1)$$

左右のモータは個別に制御可能であり、ロボットのカーブや方向転換には、左右のモータに回転数の差を与えることで対応する。モータ速度をマイナスに設定することでモータは後転する。追従対象者位置の左右のずれから左右モータの回転数の差分を計算するために、LRS の正面角度から追従対象者までの角度と、距離から、余弦定理にて追従対象者の中心角からの距離を算出し、式の P 制御にてカーブ分を求める。この時の  $V_{des}(t)$  は 0、 $V_{act}(t)$  は、求めた追従対象者から中心角までの距離である。求めた差分を2で割り、左右それぞれのモータ速度に加減することでロボットをカーブさせる。(Fig.6)

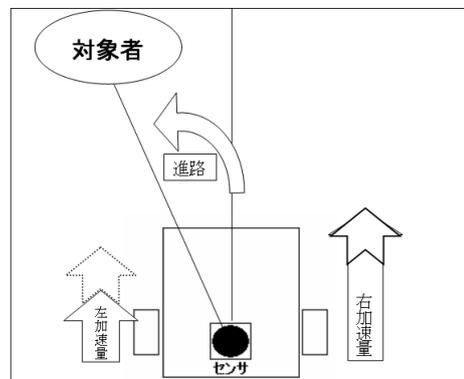


Fig. 6 Control of motors

### 4.4 走行テスト

Fig7 のように利用者がクランク型に移動したときの軌跡を記録した。利用者の歩行動作に合わせ、ショッピングカートが追従動作をしていることが見て取れる。U字歩行

同様、歩行者が左右に方向転換をすると、ショッピングカートは歩行者との最短ルートを通ろうとするため、歩行者の軌道より多少内側に切れこんで旋回動作をしている。

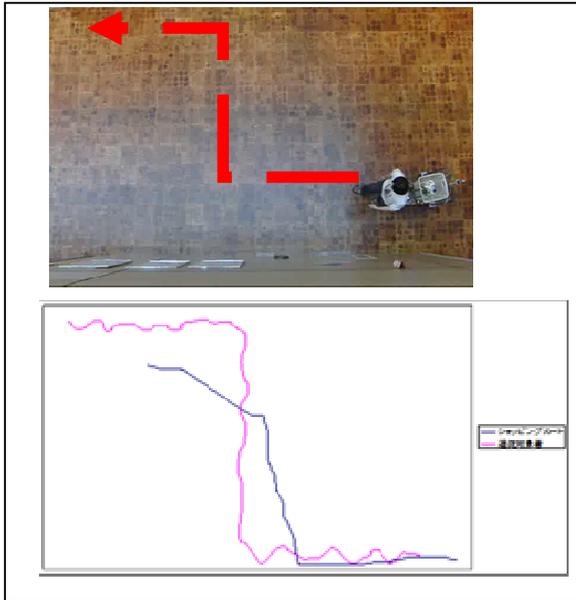


Fig. 7 Running test

## 5 障害物回避システム

人物追従システムを店舗内で利用する場合に人物追従システムのみで動作させると、Fig.8のように商品棚の曲がり角などでショッピングカート型ロボットが棚等の障害物と衝突・接触してしまう場合が発生する。ショッピングカートが店舗内の棚や人物等に衝突してしまうと、安全面の問題で自律移動ロボットの仕様は不可能となってしまう。この現象を回避するために障害物回避システムを開発する。障害物回避システムはショッピングカートの進路上にある障害物を回避するために、ショッピングカートの近辺を接触危険エリアとし、そのエリアを進行方向上に延長し、エリア内に追従対象者以外の検出体が入り込んだときに、その検出体を回避すべき障害物と判断し、回避行動を取る方式を開発した。

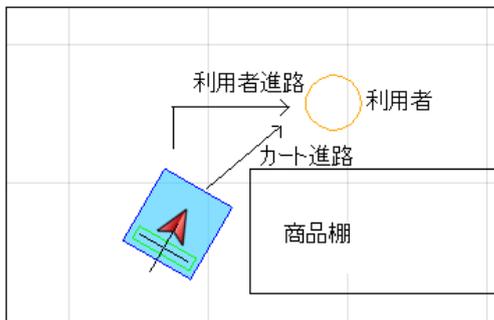


Fig. 8 Colliding case

### 5.1 障害物回避手法

(1) Fig.9 の様に、衝突警戒エリアの障害物が侵入してきた場合、侵入してきた障害物の避けるべき点は障害物が衝突危険エリアの有効範囲内に最も入り込んだ点である。有効範囲は対象者までの距離の半径とする。そこで、LRSの計測角  $\theta$  を  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで順番に  $|x'|$  の値を式 2 より求める。  $\theta$  を変化させながら  $|x'|$  を比較し、有効範囲

内でセンサの距離から最小の極大値の位置を  $\theta x'$  とし障害物と判定する。

$$|x'| = |r \times \cos(\theta)| \quad (\text{式 2})$$

(2)  $\theta x'$  を避けるために追従目標角度を傾ける。そこで Fig.9 のように求めるべき  $\theta''$  を回転角度として定め、進行目標である対象者角に加減することで、対象者角を保持したまま進行方向を傾け障害物を避ける動作が可能となる。 $\theta''$  は式 3 によって導き出す。 $\theta''$  を求めるために、まず検出点までの距離  $r$  と衝突警戒半径  $x$  にて形作られる直角三角形の  $\theta'$  を求め、(1) で求めた  $\theta$  から引くことで  $\theta''$  が算出される。算出された結果は、避けるべき点が実機に近づくほど大きな値を返すため、遠くにあれば緩やかに避け、近くにあれば大きく回避行動をとる。式の性質上、避けるべき点が衝突警戒半径内に入り込んでしまった場合、計算不可能になってしまう。この場合は  $\theta'$  で求められる値を 0 に置き換え、 $\theta$  の値のみを避けるべきとして使用する。

$$\theta'' = \theta - \cos^{-1}(x/r) \quad (\text{式 3})$$

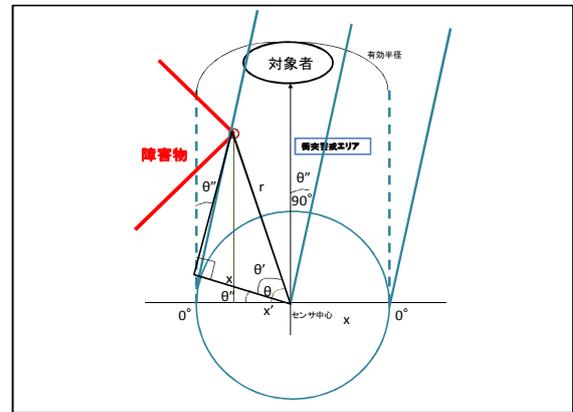


Fig. 9 Calculation of avoided angle

## 6 制御システムの動作実験

自動追従システム及び障害物回避システムの動作実験・検証・評価を、自動追従ショッピングカートの挙動を視覚的に再現できる自動追従ショッピングカートシミュレータを用いて行った。シミュレータ上で LRS の仕様や、ショッピングカートのサイズ、駆動輪、モータ・ギヤ等のパラメータを設定することで、実際に用いる自動追従ショッピングカートの挙動を 2次元上でほぼ正確に再現することができる。

### 6.1 実験条件

自動追従システム及び障害物回避システムをシミュレータ上にて実験を行い、システムの有効性を評価する。実験の条件は次のとおり行う。シミュレータを用いることでモデルとして理想的なデータを得ることができる。

- ① 車輪の滑りや、突発的なノイズは存在しない。
- ② 移動エリアには足元付近など LRS の計測不可能な位置に障害物などが無い。
- ③ 追従対象者オブジェクトの移動はマウスによる操作で行い、ショッピングカートが安定した速度で追従できる速度で追従対象者は移動する。

## 6.2 店舗モデルを用いた動作実験

日本工業大学のサービスセンターをシミュレータ上で店舗モデルとして再現し、買い物する目的の商品の位置を3箇所定め、そこを通過しレジに到達するまでの追従をシミュレートする。利用者はショッピングカートの挙動に最低限気を配りながらの歩行を行い、店舗内での買い物を行うこととする。

## 6.3 実験結果

初めに曲がり角などのシチュエーションをいくつか想定し、検証したところ、障害物を避けながらの追従動作が可能であることが確認でき、障害物回避システムの有効性が実証された。しかし、狭い通路への侵入、通過時に運用不能になる場合があり、検証の結果、ショッピングカートの接触警戒エリアより狭い通路幅が120cm以下に狭くなったとき、走行可能率が急激に低下する結果となった。そこでショッピングカート運用には安全を考慮し、道幅150cm以上の環境での運用を条件付ける。

それを踏まえ、店舗モデルでのシミュレータでの実験の結果、Fig10のような軌跡を描き、想定したルートを追従することに成功した。追従の軌跡より、商品棚や壁面に接触することなく追従が成功している様子を確認できる。しかし、道幅の狭い通路では、ショッピングカートが対象者を見失う確率が上がるため、通路の幅が警戒エリアの幅である150cm以上となる状況での運用を推奨する。実用に至る場合はそれらの条件を店舗で満たす必要がある。

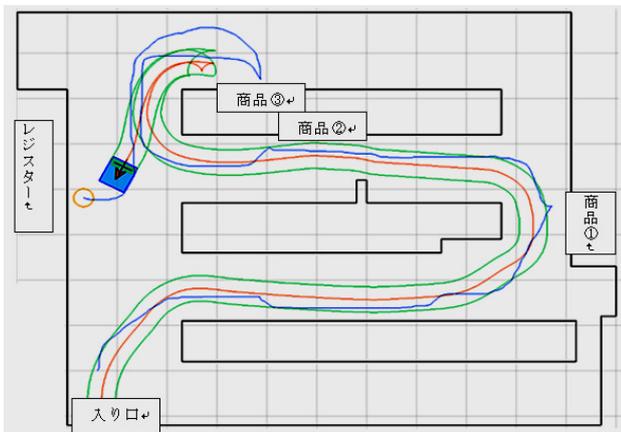


Fig. 10 Trace of the shopping cart in a model store

## 7 まとめ

本研究では、小売店舗内で運用する自動追従ショッピングカートの制御システムのシミュレータ上での実装と評価を行った。制御システムは人物追従システムと障害物回避システムからなり、実験の結果、障害物に接触することなく追従が可能であることが確認できた。今後はこのシステムを実機に導入し、実店舗での運用を目指す。

## 8 今後の課題

本研究において開発したシステムを用いることで、ショッピングカートの人物の追従が可能であることが明らかとなった。今後はショッピングカートが追従対象者を見失ってしまった場合などに、店舗内を自動で走行するモード等

の新たなシステムの開発を行うことが望ましいと考える。自動走行を行う場合、動作環境のマップ情報や自己位置の推定が必要である。LRSを用いた自動マッピング<sup>7)</sup>や自己位置推定手法<sup>8) 9)</sup>の研究はされているが、これらの研究は小売店舗を想定したものではない。そのため、小売店舗内で利用可能な動作環境の自動マッピングや、マップ上での自己位置推定などの新たな手法を考案中である。今後はこれらの機能を搭載し、ショッピングカートの複数台使用や、店舗内自動走行システムなど、新たなシステムの開発を行い、実店舗での運用を目指す。

審査委員 主査 教授 片山 茂友  
審査委員 副査 准教授 神林 靖

## 参考文献

- 1) 高梨陽一, 早川洋一, 深井越, 田村仁, "搭載カメラによる自動追従ショッピングカートの設計と製作", 第70回情報処理学会全国大会講演論文集(分冊2), pp.379-380, 2008.
- 2) 小野里 太志, 比志 秀一郎, 田村 仁 "レーザ式測位センサを用いた自動追従ショッピングカートの設計と製作", 第71回情報処理学会全国大会講演論文集(分冊2), pp.371-372(2009).
- 3) 小野里太志, 田村仁, 片山茂友:"自動追従ショッピングカートロボットの設計と製作—自己位置推定とマッピングシステム—", 第9回情報科学技術フォーラム講演論文集 第3分冊(FIT2010), pp.535-538 (2010)
- 4) Taishi Onozato, Hitosh Tamura, Yasushi Kambayashi, Shigetomo Katayama: "A Control System for the Robot Shopping Cart", Proceedings of The 2010 IRAST International Congress on Computer Applications and Computational Science (CACAS 2010), pp.907-910. (2010)
- 5) 奥迫 伸一, 坂根 茂幸, "レーザレンジファインダを用いた移動ロボットによる人の追跡", 日本ロボット学会誌 Vol24 No.5, pp.605-613, 2006.
- 6) 田中 莞爾, 木室 義彦, 山野 健太郎, 満 平山, 近藤 英二, 松本 三千人, "RFID システムによる自己位置推定とタグ配置作業", 電子情報通信学会論文誌, 2005/9 Vol.J88-D-II No.9.
- 7) 根岸 善郎, 三浦 純, 白井 良明, "全方位ステレオとレーザレンジファインダの統合による移動ロボットの地図生成", 大阪大学大学院 工学研究科日本ロボット学会誌, Vol.21 No.6, pp.690~696(2003).
- 8) 王 彩華, 棚橋 英樹, 佐藤 雄隆, 平湯 秀和, 丹羽 義典, 山本和彦, "全周囲エッジヒストグラムを用いたセンサの位置・姿勢推定" 電子情報通信学会論文誌, D Vol.J86-D2 No.10 pp.1400-1410.
- 9) 前田 宏樹, 秋元 俊成, 松元 明弘, "レーザレンジセンサを用いた移動ロボットの自己位置推定", 日本機械学会埼玉ブロック大会(講演会)講演論文集 2006(2), pp.45-46 (2006).