複数の車載レーザレンジセンサによる移動物体追跡

Moving Target Tracking with In-vehicle Multi-Laser Range Sensors

○ 橋本 雅文 (同志社大学) 松井 洋介 (同志社大学大学院)
西村 博吏 (同志社大学大学院) 高橋 和彦 (同志社大学)

Masafumi HASHIMOTO, Doshisha University
Yosuke MATSUI, Graduate School, Doshisha University
Hiroshi NISHIMURA, Graduate School, Doshisha University
Kazuhiko TAKAHASHI, Doshisha University

This paper presents a method for detecting and tracking multiple moving objects with multiple 2D laser range sensors (LRS's). The coordinate systems of multiple LRS's are calibrated based on Kalman filter and Nearest Neighboring Standard Filter (NNSF). The moving objects are tracked based on Kalman filter, Covariance Intersection (CI) and the assignment algorithm. A rule based track management system is embedded into the tracking system in order to improve the tracking performance. The experimental result in indoor environments validates the proposed method.

Key word: Mobile robot, Multi-laser range sensors, Multi-target tracking, Kalman filter, Covariance intersection

1. はじめに

移動ロボット自らが周囲環境をセンサにより観測し、移動物体を認識してそれを追跡 (位置や速度を推定) するセンシングシステムは、ロボットの衝突回避や協調行動などを実現する上で不可欠な機能である。筆者らは煩雑な環境下においても車載レーザレンジセンサ (LRS) により複数の移動物体を検出・追跡する方法を提案してきた [1]。

LRSの視野は限られていることから、ロボットの全周囲に対して移動物体を検出・追跡するには複数のLRSを車載する必要がある。本研究は、車載した複数のLRSにより複数の移動物体を精度よく、また、効率的に検出・追跡するシステムを構築することを目的としている。

複数のLRSでは、それぞれのLRSに設けたローカル座標系 (LRS座標系) で観測値が得られることから、複数LRSの観測値を統合するには基準となる基準座標系を定め、各LRS座標系での観測値を基準座標系に変換する必要がある。これには基準座標系と各LRS座標系との相対位置・方位関係を知ること (座標系のキャリブレーション) が必要となる。

また、ロボットには多くのセンサが搭載されることから、センサ台数の増減に対しても対応が容易なモジュール性や拡張性の高いセンシングシステムの構築が望まれる。このことから、複数LRSによる移動物体検出・追跡システムにお

いても、各LRSにより算出した移動物体検出・追跡情報を分散的に統合して、精度よく移動物体の検出・追跡を行うことが重要となる。

本論文では、複数のLRSに関して、そのキャリブレーション法と移動物体検出・追跡法を提案する [2]。本論文の構成を以下に示す。2.では実験システムの構成を述べる。3.では座標系のキャリブレーション法を、4.では移動物体追跡法を述べる。5.では実験と提案手法の有効性を示し、6.では結論を述べる。

2. 実験システムの構成

図1にロボット (電動車椅子) の外観を示す。ロボットには、内界センサとして駆動輪には速度計測用レゾルバと車体旋回速度計測用のジャイロを設けている。また、外界センサとして、2次元LRSを車体前部と後部に計3台 (SICK社のLMS200を1台と北陽電機社のURG-X002Sを2台) 取り付けている。各LRSの仕様を表1に示す。LRSは方位分解能ごとに反時計方向にパルスレーザ光を発射し、Time-of-flight法により対象物までの距離を計測する。以後、図1に示すように、LMS200を L_0 、車体前部のURG-X002Sを L_1 、車体後部のURG-X002Sを L_2 と示す。

3. 座標系のキャリブレーション

3.1 概要

3台のLRSの座標系は図2に示す関係になっている。ただし、各LRSの座標系は、LRSのレーザ光の発射位置を原点とし、レーザ光の発射方位角が0[deg]の方向をX軸方向と

Fig.1 Overview of experimental wheelchair

Table1 Specification of LRS

Product	LMS200	URG-X002S
Measument range[m]	8.1	4.0
Scanning angle[deg]	180	240
Angular resolution[deg]	0.5	0.35
Scanning flequency[Hz]	75	10

Fig.2 Coordinate system of LRS

している。以後、 L_0 の座標系を $\Sigma_0(O_0; X_0Y_0)$ 、 L_1 の座標系を $\Sigma_1(O_1; X_1Y_1)$ 、 L_2 の座標系を $\Sigma_2(O_2; X_2Y_2)$ とする。

Σ_0 を基準座標系とし、 Σ_0 と Σ_1 、 Σ_0 と Σ_2 の相対位置・方位を求めることで、 L_1 、 L_2 の観測値を Σ_0 に変換する。なお、 Σ_2 のキャリブレーション法は同様のため、以後、 Σ_1 のキャリブレーション法のみ述べる。

3.2 カルマンフィルタ (KF) によるキャリブレーション

Σ_1 のキャリブレーションを行うためには、 L_0 と L_1 で観測した同一の特徴量を対応付ける必要がある。床に対して垂直な平面を設置し、LRSでこれらの平面を観測すると、LRSの走査平面と周囲環境の平面との交線は直線となる。そこで、図3に示すように周囲環境に2枚の平面を設置し、その平面を L_0 と L_1 により観測することで4本の直線を抽出する[3]。そして、これらの直線がいずれの平面に属するものか対応付けることで Σ_1 のキャリブレーションを行う。本節では、 L_0 と L_1 で抽出された直線の対応付けができていたものとして、 Σ_1 のキャリブレーション法を述べ、直線の対応付けについては次節で述べる。

$d_1 = (d_{x_1}, d_{y_1}, d_{\phi_1})^T$ を Σ_0 における Σ_1 の相対位置・方位とする。 d_1 は一定値のため、式(1)に示す状態方程式が得られる。

$$d_1(t) = d_1(t-1) + \Delta d_1(t-1) \quad (1)$$

ただし、 t 、 $t-1$ はLRSの第 t スキャン目、第 $t-1$ スキャン目を示し、 $\Delta d_1(t-1)$ は平均値0、共分散 $Q_d(t-1)$ の正規性白色雑音であるとする。

図3をもとに観測方程式を考えると式(2)となる。 $\rho_i^j(t-1) = (r_i^j(t-1), \theta_i^j(t-1))^T$ は L_i が平面 $j(B_j)$ を観測することで得られる直線に対する法線距離・角度である。ただし、 $i=0, 1$ 、 $j=1, 2$ である。

$$\begin{cases} \rho_1^1(t) = h_{c0}^1(t) + \Delta \rho_1^1(t) \\ \rho_1^2(t) = h_{c0}^2(t) + \Delta \rho_1^2(t) \end{cases} \quad (2)$$

$$h_{c0}^j(t) = \begin{pmatrix} r_0^j(t-1) - d_{x_1}(t) \cos \theta_0^j(t-1) - d_{y_1}(t) \sin \theta_0^j(t-1) \\ \theta_0^j(t-1) - d_{\phi_1}(t) \end{pmatrix}$$

ただし、 $\Delta \rho_1^1(t)$ 、 $\Delta \rho_1^2(t)$ は対応付けされた直線の法線距離・角度の誤差であり、平均値0、共分散 $R_c(t)$ の正規性白色雑音とする。

式(1)(2)をもとにKFを構成し、 $\hat{d}_1(t)$ を推定する。そして、これをもとに、次式により L_1 で得た観測値を Σ_0 へ座標変換する。

$$\begin{pmatrix} z_{x_1}^1(t) \\ z_{y_1}^1(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \hat{d}_{\phi_1}(t) & -\sin \hat{d}_{\phi_1}(t) \\ \sin \hat{d}_{\phi_1}(t) & \cos \hat{d}_{\phi_1}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{x_1}^1(t) \\ z_{y_1}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{d}_{x_1}(t) \\ \hat{d}_{y_1}(t) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Fig.3 Notation related to calibration of coordinate system

ただし、 $(z_{x_1}^1(t), z_{y_1}^1(t))^T$ は L_1 で取得した Σ_1 における観測値で、 $(z_{x_1}^0(t), z_{y_1}^0(t))^T$ はそれらを Σ_0 に変換後の観測値である。

3.3 直線部の対応付け

座標系のキャリブレーションをするために、 L_0 と L_1 で観測した各直線をNNSF(Nearest Neighboring Standard Filter)[4]を用いて対応付ける。

$\rho_0^j(t)$ の観測予測値 $\hat{\rho}_0^j(t/t-1)$ を次式により予測する。

$$\hat{\rho}_0^j(t/t-1) = \begin{pmatrix} r_0^j(t-1) - \hat{d}_{x_1}(t) \cos(\theta_0^j(t-1)) - \hat{d}_{y_1}(t) \sin(\theta_0^j(t-1)) \\ \theta_0^j(t-1) - \hat{d}_{\phi_1}(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$\hat{\rho}_0^j(t/t-1)$ と L_1 が平面 B_k を観測することで得られる $\rho_1^k(t)$ より、観測予測誤差 $\tilde{\rho}(t/t-1)$ と χ^2 値が式(5)(6)より得られる。

$$\tilde{\rho}(t/t-1) = \rho_1^k(t) - \hat{\rho}_0^j(t/t-1) \quad (5)$$

$$\chi^2 = \tilde{\rho}(t/t-1)^T S_c(t)^{-1} \tilde{\rho}(t/t-1) \quad (6)$$

ただし、 $j=k=1, 2$ 、 $S_c(t) = H_{c0}^j(t) P_d(t/t-1) H_{c0}^{jT}(t) + R_c(t)$ である。また、 $P_d(t/t-1)$ はKFで用いる予測誤差共分散、 $R_c(t)$ は対応付けされた直線の法線距離・角度の誤差に関する共分散、 $H_{c0}^j(t)$ は $h_{c0}^j(t)$ のヤコビ行列である。

そこで、 $\chi^2 < a$ (閾値)を満たし、かつ χ^2 値を最小とする直線同士を対応付ける。これにより、 $\rho_1^1(t)$ と $\rho_0^1(t-1)$ 、 $\rho_1^2(t)$ と $\rho_0^2(t-1)$ を対応付けることができる。

4. 移動物体追跡法

複数LRSによる歩行者追跡に関して、文献[5]では各LRSからの情報をネットワークを介して1台のコンピュータに集め、集中処理を行うセンシングシステムを提案している。本研究では、センサ台数の増減に対しても対応が容易なモジュール性や拡張性の高いセンシングシステムで移動物体追跡を行うことを目指している。そのため、図4に示すように、各LRSにコンピュータを1台割り当て、コンピュータ間をネットワークで接続するセンシングシステムを構成する。本章では、各LRS単独での移動物体追跡法を述べ、次に、複数のLRSの視野の重複領域で行う複数LRSの協調による移動物体追跡法を述べる。移動物体検出に関しては文献[1]の方法を用いる。

Fig.4 Network topology of LRS system

Fig.5 Tracking condition

4.1 LRS 単独での移動物体追跡

L_0 単独による移動物体追跡を以下に述べる。なお、 L_1 と L_2 による移動物体追跡は L_0 と同様である。

(1) カルマンフィルタによる移動物体追跡

ロボット代表点の初期位置を原点とした地上固定座標系 $\Sigma_w(O; XY)$ における移動物体の位置を (x_0, y_0) とすると、以下の状態方程式が得られる。

$$x_0(t) = \begin{pmatrix} 1 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} x_0(t-1) + \begin{pmatrix} \tau^2/2 & 0 \\ \tau & 0 \\ 0 & \tau^2/2 \\ 0 & \tau \end{pmatrix} \Delta x_0(t-1) \quad (7)$$

ただし、 $x_0(t) = (x_0(t), \dot{x}_0(t), y_0(t), \dot{y}_0(t))^T$ 、 $\Delta x_0(t) = (\Delta \ddot{x}_0(t), \Delta \ddot{y}_0(t))^T$ は微小な加速度外乱である。また、 τ はスキャン周期である。

移動物体検出において Σ_w における移動物体に関する観測値 $z_0(t) = (z_{x_0}(t), z_{y_0}(t))^T$ が得られたとすると、以下の観測方程式が成立する。

$$z_0(t) = \begin{pmatrix} \cos \psi(t) & 0 & -\sin \psi(t) & 0 \\ \sin \psi(t) & 0 & \cos \psi(t) & 0 \end{pmatrix} x_0(t) - \begin{pmatrix} \cos \psi(t) & -\sin \psi(t) \\ \sin \psi(t) & \cos \psi(t) \end{pmatrix} p(t) + \Delta z_0(t) \quad (8)$$

ここで、 $z_0(t)$ は L_0 における移動物体の観測値であり、 $\Delta z_0(t)$ は観測雑音である。また、 $p(t)$ と $\psi(t)$ はそれぞれ Σ_w における L_0 の位置と方位である。

式(7)(8)をもとに KF を構成し、追跡物体の位置・速度を推定する。すなわち、各スキャンにおける追跡物体の予測位置まわりに半径 0.5[m] の有効領域 (VG) を設け、その VG 内で得られたひとつの観測値が追跡中の物体からのものとする、追跡物体の位置・速度が求まる。

L_0 は L_1 と L_2 の視野を認識している。 L_0 が追跡する物体が L_1 (L_2) の視野内に存在する場合は、追跡物体の推定値と推定誤差共分散 $I_0(t) = \{\hat{x}_0(t), P_0(t)\}$ を L_1 (L_2) に送信する。

(2) データアソシエーションと追跡管理

(1) では VG 内で得られる観測値はひとつであり、しかもその観測値は追跡物体と対応すると仮定した。しかし、その観測値はいま注目している物体以外の物体かもしれないし、外乱かもしれない。また、複数の物体が移動する環境下では、図 5(a)(b) に例を示すように、ひとつの VG 内に複数の観測値が得られたり、複数の VG の重複領域で観測値が得られる場合もある。このような多様な状況下で物体を正確に追跡するためには、複数の物体と複数の観測値をうまく対応付けることが必要である。そこで、結合尤度関数を評価規範としたデータアソシエーション手法 [1] を基礎に複数の移動物体と観測値を対応付ける。

L_0 の視野内に新しい物体が出現したり、追跡物体が視野から出たり、他の物体による隠蔽など様々な状況が一般には発

生する。そのため、データアソシエーション手法によって対応付けられなかった追跡物体や観測値が存在する状況が発生する。このような状況に対応するための追跡管理法を以下に示す。

図 5(a)(c) に示すように、追跡物体と対応付けられない観測値は新規物体と考え、KF により追跡を開始する。ただし、追跡開始後 15 スキャン以内に観測値が得られなくなった場合は外乱として追跡を終了する。図 5(b)(d) のように観測値が得られないことは、追跡物体が隠蔽された際に生じる。観測値が得られなくなると KF の予測アルゴリズムのみで物体を追跡し続け、30 スキャン過ぎても観測値が得られない場合は追跡を終了する。

4.2 複数 LRS の協調による移動物体追跡

L_0 と L_1 を例に、複数 LRS の協調による移動物体追跡法を述べる。

(1) CI (Covariance Intersection) による移動物体追跡

同一の追跡物体が複数の LRS の視野の重複領域に存在する場合、各 LRS が算出する追跡物体の情報を CI [6] を用いて融合する。 L_0 と L_1 で追跡している物体の情報を L_0 で融合する処理を以下に示す。

a) L_0 による追跡物体の予測値と予測誤差共分散を $I_0(t/t-1) = \{\hat{x}_0(t/t-1), P_0(t/t-1)\}$ 、 L_1 による追跡物体の推定値と推定誤差共分散を $I_1(t) = \{\hat{x}_1(t), P_1(t)\}$ とする。 $I_0(t/t-1)$ と $I_1(t)$ を式 (9) に示す CI アルゴリズムにより融合し、 $I_0^+(t) = \{\hat{x}_0^+(t), P_0^+(t)\}$ を得る。

$$\begin{cases} P_0^{+1}(t) = \omega_1 P_0^{-1}(t/t-1) + \omega_2 P_1^{-1}(t) \\ P_0^{+1}(t) \hat{x}_0^+(t) = \omega_1 P_0^{-1}(t/t-1) \hat{x}_0(t/t-1) + \omega_2 P_1^{-1}(t) \hat{x}_1(t) \end{cases} \quad (9)$$

ただし、 ω_1 、 ω_2 は $P_0^+(t)$ の行列式を最小とするもので、 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ である。

b) a) で得た $I_0^+(t)$ と観測値 $z_0(t)$ よりカルマンフィルタの観測更新アルゴリズムをもとに、追跡物体の位置・速度の推定値と推定誤差共分散 $I_0^*(t) = \{\hat{x}_0^*(t), P_0^*(t)\}$ を得る。

以上の処理は、追跡物体が L_0 、 L_1 の両方で観測できる場合の処理であるが、追跡物体が観測できない場合は、以下のように対応する。

- 追跡物体が L_0 で観測でき、 L_1 で観測できない場合: L_0 は $I_0(t)$ を追跡物体の情報とする。
- 追跡物体が L_0 で観測できず、 L_1 で観測できる場合: L_0 は L_1 から送信された $I_1(t)$ を追跡物体の情報とする。
- 追跡物体が L_0 、 L_1 の両方で観測できなかった場合: L_0 は $I_0(t/t-1)$ を追跡物体の情報とする。

(2) 複数 LRS の協調によるデータアソシエーションと追跡管理

Fig.6 Condition of cooperative tracking

前項で述べた移動物体追跡を実現するためには、他のLRSから送られてきた追跡物体の情報が、現在追跡しているいずれの追跡物体に対するものであるかを対応付ける必要がある。

物体追跡環境下では、図6(a)~(c)に示すように、 L_0 におけるひとつのVG内に L_1 の追跡物体が複数存在したり、 L_0 における複数のVG内に L_1 の追跡物体が存在する場合もある。また、図6(e)(f)に示すように、追跡物体が L_1 の視野から L_0 と L_1 の視野の重複領域(OA)へ移行したり、 L_0 の視野からOAへ移行する場合の対応も必要である。

このような状況に対応するため、以下に示すような複数LRSの協調によるデータアソシエーションと追跡管理を行う。

- OAに追跡物体が存在する場合(図6(a)~(d)): L_0 における追跡物体のVG内に L_1 の追跡物体が存在すれば、 L_0 はそれらの物体を4.1(2)のデータアソシエーション手法により同一の物体として対応付ける。対応付けられない場合、 L_0 、 L_1 では単独で物体追跡を継続する。
- 追跡物体が L_0 の視野からOAに移行する場合(図6(e)): L_0 における追跡物体のVG内に L_1 による観測値が入れば、 L_1 はこの観測値を L_0 より送られてくる $I_{0(t)}$ に対するものと対応付け、 $I_{0(t)}$ をもとに追跡を開始する。対応付けられない場合は、 L_0 は単独で物体追跡を継続し、 L_1 は新規物体として単独で追跡を開始する。
- 追跡物体が L_1 の視野からOAに移行する場合(図6(f)): L_1 における追跡物体のVG内に L_0 による観測値が入れば、 L_0 はこの観測値を L_1 より送られてくる $I_{1(t)}$ に対するものと対応付け、 $I_{1(t)}$ をもとに追跡を開始する。対応付けられない場合は、 L_1 は単独で物体追跡を継続し、 L_0 は新規物体として単独で追跡を開始する。

5. 移動物体追跡実験

図7に示す室内環境で、0.1~1.5[m/s]の速度で歩行する3人の歩行者を追跡する。ロボットは図7の $(X,Y)=(0.0[m],0.0[m])$ から、最大0.3[m/s]の速度で破線で示した経路を走行した。また、歩行者は交差を繰り返しながらロボットの周囲を歩行した。

図8(a)に移動物体検出結果、(b)に追跡結果を示す。図8(a)に示すように複数の静止物体を移動物体と誤認している。これは、ロボットと静止物体、歩行者との位置関係により、静止物体がLRSにより常時観測できないことから移動物体

Fig.7 Experimental setup

Fig.8 Experimental result

と誤認する。しかし、静止物体からの観測値は出現と消失を繰り返しており、追跡管理法によって外乱として処理され、図8(b)に示すように歩行者のみを追跡する。

6. おわりに

本論文では、複数の車載LRSに関するキャリブレーション法と移動物体を検出・追跡する方法を提案した。そして、室内環境で複数の歩行者を追跡する実験を行い、提案手法の有効性を示した。今後、LRSを搭載した複数のロボットが協調して移動物体の検出・追跡を行うシステムに対して、提案手法を適用する予定である。

文献

- [1] 橋本雅文, 緒方聡, 大場史憲, 岡田三郎, 車載レーザレンジセンサによる複数移動物体の検出・追跡法, 日本機械学会論文集, C 編, 72 巻, 717 号, pp.162-170 (2006).
- [2] 松井洋介, 橋本雅文, 高橋和彦, 複数レーザレンジセンサによる移動物体検出・追跡法, 第 49 回自動制御連合講演会論文集, CD-ROM (2006).
- [3] 劉煥軍, 橋本雅文, 又平知也, 大場史憲, レーザレンジファインダによる屋内移動ロボットの自己位置推定に関する研究, 第 10 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp.62-63 (2001).
- [4] Y.Bar-Shalom and T.E.Fortmann, Tracking and Data Association, Academic Press, Inc. (1988).
- [5] 中村克行, 趙青菁, 柴崎亮介, 坂本主司, 大鋸朋生, 鈴川尚毅, 複数のレーザレンジスキャナを用いた歩行者トラッキングとその信頼性評価, 電子情報通信学会論文集, D-II 編, J88-D-II 巻, 7 号, pp.1143-1152 (2005).
- [6] S. Julier and J.K.Uhlmann, General Decentralized Data Fusion with Covariance Intersection (CI), Handbook of Multisensor Data Fusion (D.L.Hall and J.Llinas, Eds.), CRC Press (2001).