

Level Set Trackingを用いた複数レーザレンジファインダとカメラによる歩行者のトラッキング

九州大学 ○ 山田 弘幸 倉爪 亮 村上 剛司 長谷川 勉

Pedestrian Tracking Using Level Set Tracking by Multiple Cameras and Laser Range Finders

Kyushu University ○ Hiroyuki Yamada Ryo Kurazume Kouji Murakami Tsutomu Hasegawa

Abstract— This paper describes a tracking system of multiple moving objects using Level Set Tracking and multiple heterogonous laser range finders. Level Set Tracking is a method that enables to track multiple targets on 2D images robustly and simultaneously in real time even if the targets are overlapped each other. Meanwhile, multiple laser range finders can acquire precise 3D range data of moving objects. This paper proposes the combined system of these techniques using Condensation algorithm for tracking multiple targets precisely and robustly against occlusion.

Key Words: Target tracking, Laser range finder, Sensor fusion, Condensation, Level Set Method

1. はじめに

ロボットの活動の場が工場内から屋外環境へ移るにつれて、ロボットが処理すべき情報量は飛躍的に増加することが見込まれる。この膨大な情報処理を、センサによる情報獲得から認識、判断、動作計画、そして実行まで全てロボット単体で行わせるのは、ロボットの可搬計算機の処理能力から非現実的である。そこで環境側をあらかじめできる限り構造化することを考え、例えば何らかのマネジメントシステムが情報を一元管理し、ロボットは構造化された環境に対しては自らセンシングすることなく、マネジメントシステムから必要な情報を即座に得ることができれば、個々のロボットの能力はそれほど高機能でなくとも、実世界で利用できるシステムが構築できる。

我々はこの考えに立ち、現在「ロボットタウンの実証的研究」プロジェクトを推進している。これはロボットの使用環境に分散配置された様々なセンサにより、環境をあらかじめ計測、構造化し、タウンマネジメントシステムと呼ばれるデータベースで一元管理することで、ロボットの適切な行動を支援し、人間と共生できるロボットシステムを構築しようという試みである。

本プロジェクトの開発目標はセンサデバイスの開発からタウンマネジメントシステムの設計まで多岐に渡るが、中でも環境内の人間やロボットの動きを正確にトラッキングし、必要に応じて現在位置を通知するシステムの開発は重要な研究課題の一つである。そこで本論文では、このプロジェクトの一環として開発中の、複数レーザレンジファインダとビデオカメラを組み合わせた、重なりやノイズに頑健な複数移動体の同時追跡システムについて報告する。

これまで我々は、ビデオカメラを用いた Level Set Tracking による複数移動体の追跡システムを開発してきた¹⁾。しかし近年、平面スキャン型レーザレンジファインダが安価に市販され、環境中にセンサを分散配置するロボットタウンにおいても、レーザレンジファインダを環境固定センサの一つとして用いることが可能となってきた。そこで本論文では、これまで我々が開

発した Level Set Tracking¹⁾と、環境に置かれた異種複数のレーザレンジファインダからの距離情報を、Condensation の手法を用いて統合することで、複数移動体の位置関係を正確に推定しつつ、ノイズや重なりに頑健に対象追跡を行うシステムを提案する。

2. 関連研究

レーザレンジファインダを用いた移動体追跡は、環境に固定したレーザレンジファインダを用いたシステム^{2) 3) 4) 5) 6) 7)}と、移動ロボットに搭載したシステム^{8) 9) 10) 11) 12) 13)}に分類できる。

環境に固定したレーザレンジファインダによる歩行者の追跡には、中村らによる一連の研究^{2) 3)}がある。彼らはレーザレンジファインダ (Sick LMS200) を最大6台用いて足首位置を計測し、歩行動作の解析から作成された複数状態遷移を有するカルマンフィルタにより足断面上の点をクラスタリングすることで、通常時 100% (149人)、通勤ラッシュ時 80% の追跡成功率を達成している²⁾。またこの手法はカメラ画像と統合され、レーザ計測による追跡に失敗した時には Mean Shift 法によるカメラ画像上での追跡に切り替えることで、ロバストな歩行者追跡を実現している³⁾。この他にも、Occupancy Grid を用いた手法⁴⁾、腰位置をカルマンフィルタおよびパーティクルフィルタで追跡したもの⁵⁾、レーザで膝上を追跡し、カメラの肌色抽出と組み合わせで身長や位置をカルマンフィルタで推定する手法⁶⁾、あるいはレーザレンジファインダとカメラを用いた応接システム⁷⁾などが提案されている。

一方、移動体にレーザレンジファインダを搭載し、環境モデル構築や障害物回避、追跡を行ったものとしては、車椅子搭載レンジファインダによる障害物回避⁸⁾、パーティクルフィルタを用いた歩行者の追跡^{9) 10)}、全方位カメラとレーザレンジファインダによる歩行者の追跡¹²⁾など多数のシステムが提案されている。

このようにレーザレンジファインダを用いた移動体のトラッキングは多くの研究例があるが、カメラ画像上でのビデオトラッキングとレーザによるトラッキングを密に融合した例は少ない。そこで本論文では、環

境に固定された異種複数のレーザレンジファインダとカメラを利用し、Level Set Tracking と距離画像から得られる複数の移動体の追跡結果を Condensation アルゴリズムを用いて統合する手法を提案する。

3. Fast Level Set Method と Level Set Tracking

Kass の Snakes¹⁴⁾ に代表される動的輪郭モデル (Active Contour Model) は、ノイズに対して頑強な境界追跡法として現在広く用いられている。しかし Snakes は分離や結合など境界の位相変化への対応が困難であることが問題とされていた。これに対し、Osher, Sethian らにより本質的に位相変化が可能な動的輪郭モデルとして Level Set Method (LSM)^{15) 16)} が提案され、これまでに移動体追跡や 3 次元幾何モデルなどの応用分野が報告されている。しかし LSM は多くの計算量を必要とするため、リアルタイム性が要求されるアプリケーションには不向きであると考えられてきた。この問題に対し、我々は精度を低下させることなく LSM を高速に実現できる Fast Level Set Method (FLSM)^{1) 17)} を提案し、2 次元画像上での複数移動体の実時間同時追跡へ適用した。以下、これらの手法を簡単に紹介する。

3.1 Level Set Method とその高速化手法

Level Set Method では、対象としている空間に対して、1 つ次元の高い空間を設定し、検出する境界をその高次元空間で定義された関数 (補助関数) の断面と考える。例えば、Fig.1(a) に示すように、2 次元空間上で時刻 t において境界 C で囲まれた領域 Ω を考える。このとき、Level Set Method ではこの領域を、Fig.1(c) に示すような 3 次元空間で定義された補助関数 ϕ のゼロ等高面 (zero level set) $\phi = 0$ と考える。また通常、補助関数 ϕ の初期値には、境界 C からの符号付距離 (境界の内側が負、外側が正) を与えておく。次に、次時刻 $t + \Delta t$ において、この補助関数 ϕ の形状を保ったまま ϕ の正方向へ移動させ、同様にゼロ等高面 $\phi = 0$ を切り出す。補助関数 ϕ が Fig.1(c) のように双峰である場合、Fig.1(d) のように、時刻 $t + \Delta t$ でのゼロ等高面は 2 つの領域 Ω_1, Ω_2 からなり、その結果、境界も Fig.1(b) のように C_1, C_2 となる。このように、補助関数の形状を領域の特徴に応じて適切に設計し、制御することで、補助関数 (すなわち境界) に対して滑らかな形状を保ちつつ、自然な形で境界の分離、結合が表現できる。

次に 2 次元 xy 平面上での LSM を用いた境界追跡の具体的な実装法を示す。まず、平面上の各点 (x, y) において、時刻 t における補助関数 $\phi_t(x, y)$ を導入し、境界位置を $\phi_t(x, y) = 0$ を満たす (x, y) で表す。次に、 ϕ についての差分方程式を以下のように定義する。

$$\phi_{t+1}(x, y) = \phi_t(x, y) - F(\kappa)|\nabla\phi_t(x, y)|\Delta t \quad (1)$$

ここで、 κ は ϕ の曲率、 Δt は時間ステップ幅である。また、 F は ϕ の成長速度であり、単位時間あたりに ϕ が法線方向に移動する量を示す。補助関数値が 0 のセル (zero level set)、つまり $\phi = 0$ として連続的に境界を抽出することで、位相変化に対応した境界追跡が可能となる。

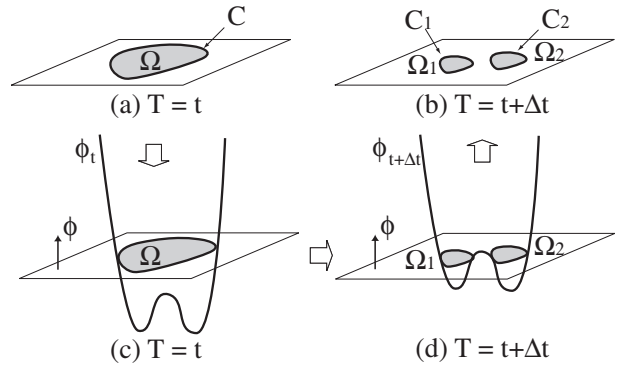


Fig.1 Level Set Method

式 1 を更新するには、2 次元画像上の全てのセルにおいて成長速度を決定する必要がある。拡張成長速度場¹⁸⁾を用いた LSM では、各セルの成長速度を決定するために、まず zero level set での成長速度を決定し、その他のボクセルでは最も近い zero level set のボクセルの成長速度をコピーして成長速度場を構築する。また、補助関数を更新する場合、更新とともに積分誤差も蓄積されるため、安定な解を得るには一定回数更新後に各セル毎に補助関数の値 (一般には zero level set からの距離) を再計算し、以降の計算の初期値として設定する「再初期化」の処理が必要となる。しかし、拡張成長速度場の構築処理や再初期化処理において、各セルで現在の zero level set からの距離を得る際、各セルからの最近傍 zero level set の探索処理を行わなくてはならない。この計算コストは非常に高く、これが LSM の大きな問題となっている。

LSM の計算コストを削減するために、これまでに様々な手法が提案されており、その代表的な手法として Narrow Band Method (以下、NB) が挙げられる¹⁹⁾。一般に境界領域の追跡において、空間全体に対して補助関数を計算する必要はないことから、この手法では zero level set に近い領域 (Narrow Band) だけに処理を限定することで処理の効率化を図っている。

3.2 Fast Level Set Method

NB は LSM と比べて高速な手法であるが、依然として計算コストは高い。この問題に対し、LSM の高速化手法として Fast Level Set Method (FLSM)^{1) 17)} が提案されている。

FLSM は Fig.2 (a) に示す参照マップを用いて、最近傍探索処理をあるルールに基づく単純な数値の上書き処理に置き換えることで、高速に拡張成長速度場を構築する。この参照マップは、原点周辺にあるセルを原点からの距離に応じて分類したものである。例えば、リスト R_r は原点からの 2 乗距離が r であるセルの集合とする。

次に、作成した参照マップを用いて拡張成長速度場を構築する。ただし、zero level set での成長速度は予め決定されているとする。まず、リスト $R_{\delta(\delta+1)}$ を用いて、ある zero level set からの 2 乗距離が $\delta(\delta+1)$ であるセルを選択し、その zero level set に格納されている成長速度の値を選択されたセルに仮登録する (Fig.2 (c1))。この処理をすべての zero level set に対して行う (Fig.2

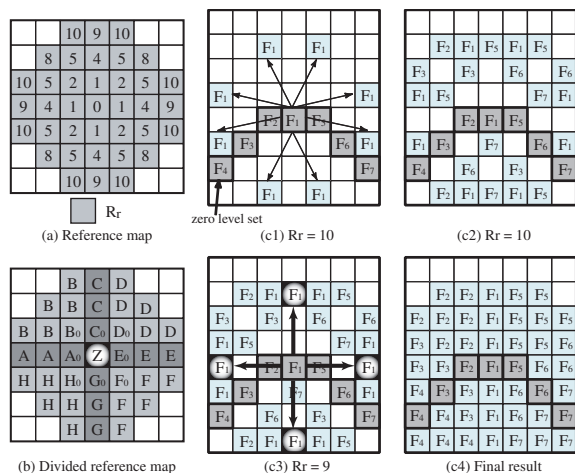


Fig.2 参照マップと拡張成長速度場の構築

(c2)). 次に、添字の値を1小さくして同じ処理を行い (Fig.2 (c3)), これを添字の値が0になるまで繰り返す。ただし、仮登録の際、異なる値がすでに仮登録されていた場合には、新たな値を上書きすることにする。これにより全ての処理が終了した時には、各セルには最も近い zero level set における成長速度の値が登録されている (Fig.2 (c4))。このように、参照マップ球の距離に応じたリストを利用することで、距離比較を行うことなく代入処理だけで拡張成長速度場を構築する。また、拡張成長速度場の構築処理の過程において、同時に距離も上書きすることで、各セルに zero level set からの距離を簡単に設定できる。この際、追加される処理は単なるメモリアクセスだけであり、全体の計算量はほとんど変化しない。

さらに FLSM では Fig.2 (b) に示すように分割した参照マップを用いることで、拡張成長速度場の構築処理において書き込む領域を限定し、さらなる効率化を実現している。例えば、ある zero level set Z の左側に zero level set A_0 が隣接している場合、 Z の左側の領域 (A , B , H) には、 A_0 よりも Z に近い点は存在しない。このように、隣接するグリッドが zero level set かどうかを調べ、その位置関係によって、書き込みのオーバーラップを減らし、拡張成長速度場を高速に構築している。

3.3 Level Set Tracking

Level Set Tracking とは、背景差分等によって切り出された追跡対象領域に対して、上述した Fast Level Set Method を適用し、ノイズや重なりに頑健に実時間で領域を追跡する手法である。

Fig.3 に Level Set Tracking により複数歩行者を追跡している様子を示す。画像のサイズ、入力速度がそれぞれ 320x240pixel, 30Hz、使用した計算機が Pentium IV, 2GHz の時、FLSM の処理は約 60Hz で実行されている。この例では、当初2つの閉曲面で表されていた移動体の境界が、移動体が交差したことで1つの閉曲面に統合され、次の時刻で再度2つの閉曲面に分離しており、境界の位相変化に柔軟に対応できていることがわかる。

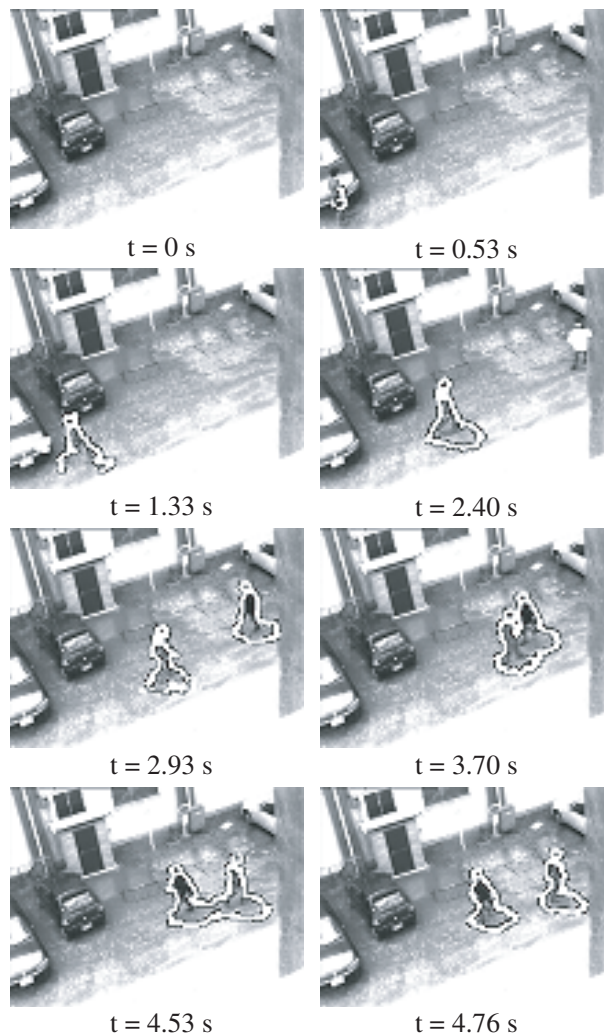


Fig.3 Level Set Tracking

4. 移動体追跡システム

上述した Level Set Tracking により、2次元画像上では移動体領域をノイズや重なりに頑健に追跡できる。しかし、2次元画像から移動体の3次元位置を正確に推定したり、重なった移動体領域を正確に切り分けることは、単一のカメラでは困難である。これに対し、本システムで用いる平面スキャン型レーザレンジファインダは、2次元平面上での対象物体までの正確な距離情報が容易に得られる。ここで平面スキャン型レーザレンジファインダとは、一軸の回転ミラーによりレーザ光を照射しながらスキャンし、一般にはレーザ光の伝播時間から距離を計測するものである。例えば、水平方向をスキャンするレーザレンジファインダからは、2次元平面内の対象物体までの距離情報が得られる。そこで、上述した Level Set Tracking と環境におかれた複数のレーザレンジファインダからの距離情報を統合することで、交差時の位置関係を正確に推定しつつ頑健に対象追跡を行うシステムを構築する。以下、提案する移動体追跡システムについて述べる。

4.1 システム構成

Fig.4 に Level Set Tracking とレーザレンジファインダの情報を統合し移動体追跡を行うシステムの構成を

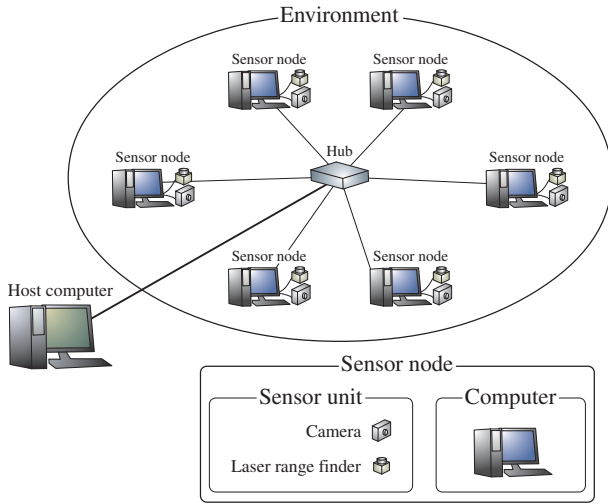


Fig.4 移動体追跡システム

示す。カメラとレーザレンジファインダの組を1つのセンサユニットとし、これが1台のコンピュータに接続されてセンサ端末を構成する。環境中に分散配置されたセンサ端末は、1つのホストコンピュータへ接続され、そこで各端末からの情報が統合される。端末・ホスト間の通信は Ethernet を介して行われる。

4.2 Condensation を用いた移動体追跡手法

本システムで用いる移動体追跡手法は、各センサ端末から得られた情報をホストコンピュータで統合し、移動体の位置を Condensation によって得られた確率密度分布から推定するものである。以下、移動体追跡の流れをセンサ端末、ホストコンピュータに分けて述べる。

4.2.1 センサ端末での流れ

まず初期状態として、各センサ端末で移動体が環境中に存在しない静的環境の情報を取得する。このとき、センサ端末 i で得られる静的環境情報は、カメラから得られた静的環境画像 $I_s^i(u, v)$ 、レーザレンジファインダから、ミラー回転軸を原点とし、放射状にあるステップ角度で離散的に得られる距離情報 $Z_s^i = \{z_{s1}, \dots, z_{sM}\}$ である。ただし、各センサ端末は世界座標系での自身のセンサ位置・姿勢情報を保持しており、 Z_s^i は世界座標系での距離情報である。

静的環境情報を取得後、移動体検出を行う。移動体検出は次の2つの方法で行われる。

- 時刻 t におけるカメラ画像 $I_t^i(u, v)$ を取得し、 $I_s^i(u, v)$ との差分から切り出された対象領域に対して、Level Set Tracking により移動体領域を抽出する。領域の左端、右端の u 座標 u_l, u_r から、カメラ焦点での方位角である移動体の存在範囲 $\theta_t = \{\theta_l, \theta_r\}$ を求める (Fig.5)。ただしカメラ v 軸とレーザレンジファインダのミラー回転軸 (垂直方向) は同方向であるとする。また、複数の領域を追跡している場合を考慮し、複数の移動体存在範囲の集合を $\Theta_t^i = \{\theta_{t1}, \theta_{t2}, \dots\}$ とする。
- 時刻 t におけるレーザレンジファインダからの距離情報 Z_t^i を取得し、 Z_s^i から一定距離 T_r 離れた点

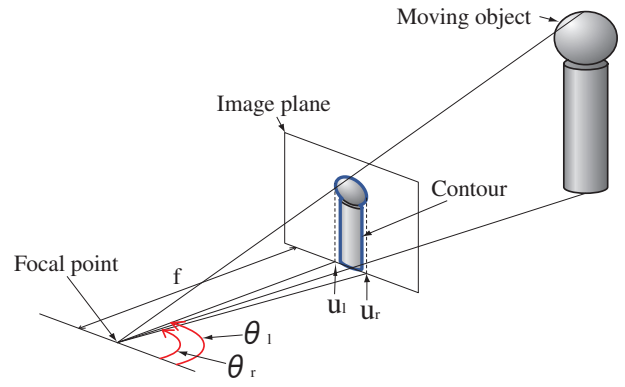


Fig.5 移動体の存在範囲

のみを抽出した $\tilde{Z}_t^i$ を計算する。

$$\tilde{Z}_t^i = Z_t^i, (\|z_{sj} - z_{tj}\| > T_r; j = 1 \sim M) \quad (2)$$

上記の2つのタスクは各センサ端末で独立に繰り返して実行され、ホストコンピュータからの要求に対してはその時点で最新の情報を提供する。

4.2.2 ホストコンピュータでの流れ

ホストコンピュータでは、センサ端末から提供される情報を統合し、移動体の位置推定を行う。以下、その詳細を示す。

- 各センサ端末 i へ情報提供の要求コマンドを送信し、 $\Theta_t^i, \tilde{Z}_t^i$ を取得する。次に各センサ端末からの情報を統合し、全センサ端末情報の集合 $\Theta_t = \{\Theta_t^i\}$ 、 $\tilde{Z}_t = \{\tilde{Z}_t^i\}$ を求める。
- $\Theta_t, \tilde{Z}_t$ を Condensation により統合し、移動体の位置を推定する。

Condensation による移動体の位置推定については、次節で詳しく述べる。

4.3 Condensation による移動体位置推定

本節では、異種複数センサから得られた情報を Condensation により統合し、移動体の位置推定を行う手法について述べる。Condensation は、対象の状態をセンサによる観測値に対する事後確率分布として推定する手法である。時刻 t での移動体の位置が x_t である事象を X_t とすると、観測値 $\Theta_t, \tilde{Z}_t$ を得た時の移動体の位置に関する事後確率 $p(X_t | \Theta_t, \tilde{Z}_t)$ は、状態と重みを持つ仮説群によって再帰的に推定される。ただし $\Theta, \tilde{Z}$ はそれぞれ観測値 $\Theta_t, \tilde{Z}_t$ が得られる事象である。このとき、Condensation では多数の仮説の分布によって確率分布を近似することから、非ガウスである任意の分布を表現することが可能となる。このため、多峰性を持つ確率分布によって複数の移動体の位置を推定できる。以下、Condensation による移動体位置推定の手順について述べる。

- 初期仮説発生: N 個の初期仮説 $s_0^{(n)} = \{x_0^{(n)}, v_0^{(n)}, w_0^{(n)}, l_0^{(n)}\}$ を発生させる。ただし、 $x_t^{(n)}$ は位置ベクトル、 $v_t^{(n)}$ は速度ベクトル、 $w_t^{(n)}$ は重み、 $l_t^{(n)}$ は追跡対象のラベル値を表す。
- 仮説遷移: N 個の仮説に対して動作モデル $p(X_t | X_{t-1})$ を適用し、仮説を遷移させる。動作

モデルには、次式を用いる。

$$\mathbf{x}_t^{(n)} = \mathbf{x}_{t-1}^{(n)} + \mathbf{v}_{t-1}^{(n)} T_s \quad (3)$$

ただし、 T_s はサンプリング周期である。

3. 尤度計算： N 個の仮説それぞれに対して、尤度 $p(\Theta, \tilde{Z}|X_t)$ を次式にて計算する。

$$p(\Theta, \tilde{Z}|X_t) = p(\Theta|X_t)p(\tilde{Z}|X_t) \quad (4)$$

ただし、

$$p(\Theta|X_t) = f(\mathbf{x}_t^{(n)}) \quad (5)$$

$$p(\tilde{Z}|X_t) = \exp(-d^2/2\sigma_s^2)/\sqrt{2\pi}\sigma_s \quad (6)$$

とした。ここで、 σ_s は位置誤差、 d は $\mathbf{x}_t^{(n)}$ と $\tilde{Z}_t$ との最小ユークリッド距離、

$$d(\tilde{Z}_t) = \min_i \|\mathbf{x}_t^{(n)} - \mathbf{z}_{ti}\| \quad (7)$$

である、また $f(\mathbf{x}_t^{(n)})$ は $\mathbf{x}_t^{(n)}$ への方位角が Θ_t のいずれかの範囲内に存在する場合は定数値 S , ($0 \leq S \leq 1$) を、存在しない場合には $1-S$ を与える関数である。

4. 重み計算： N 個の仮説に対して、重み $w_t^{(n)}$ を次式にて計算する。

$$w_t^{(n)} = p(\Theta, \tilde{Z}|X_t) \quad (8)$$

また、全ての仮説の重みの和 $w_t^{(all)} = \sum_{n=0}^N w_t^{(n)}$ を求める。

5. リサンプリング： NP 個 ($0 < P < 1$) の仮説 $s_t^{(n)}$ に対して、 $w_t^{(n)}/w_t^{(all)}$ の確率で復元抽出し、ランダムノイズを加えた新たな仮説 $s_{t+1}^{(n)}$ を発生させる。 $N(1-P)$ 個の仮説は初期仮説と同じようにランダムに発生させる。これは、新たな移動体の検出を可能にするためである。
6. 移動体位置推定：仮説群により近似的に得られる確率分布から、移動体の位置を推定する。
- 移動体がどの位置にも推定されていない（全仮説のラベル値が初期値である）場合、重みが閾値以上の範囲にある仮説 $s_{t+1}^{(n)}$ の重み付き平均をとることで、移動体位置 $\mathbf{x}_{t+1}$ を推定する。また、これらの仮説に対してラベル値を与える。
 - 移動体がある位置に推定されている（仮説中に初期値以外のラベル値が存在する）場合、同じラベル値を持つ仮説の重み付き平均を求め、移動体位置 $\mathbf{x}_{t+1}$ を推定する。また、ラベル値が初期値である仮説のうち、重みが閾値以上の範囲にある仮説には新たなラベル値を与え、移動体位置 $\mathbf{x}_{t+1}$ を推定する。
 - 全ての仮説において閾値以上の重みを持たない場合、全てのラベル値を初期値に戻す。



Fig.6 実証実験用住宅

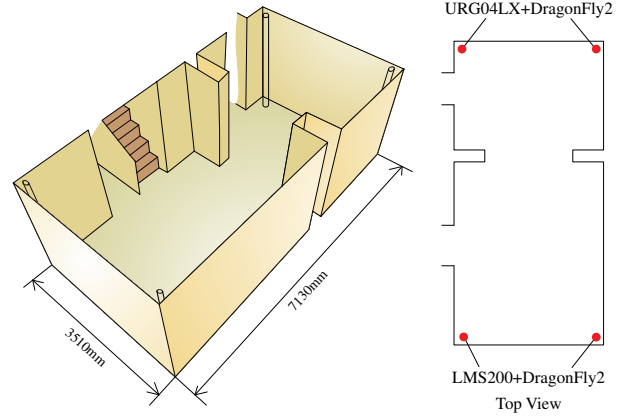


Fig.7 実験環境

4.4 本システムの特徴

本システムの特徴を以下に示す。

まず、複数のセンサ端末を用いることで、オクルージョンに頑健に追跡でき、複数人物の正確な位置推定が可能である。また、異種センサ（カメラ、レーザレンジファインダ）を用いることにより、各センサ特有のノイズに対して頑健なノイズ除去が行える。例えば、レーザレンジファインダのノイズによる単発的な移動体の誤検出は、Level Set Tracking により得られた存在範囲に含まれないものをキャンセルすることによって除去できる。

さらに本システムでは、レーザレンジファインダでの移動体検出において移動体が発見されない場合、つまり、ホストコンピュータにおいて $\tilde{Z}_t = \emptyset$ である場合、 $I_t(x, y) \rightarrow I_s(x, y)$ により Level Set Tracking における背景画像を順次更新する。これにより、日照変化の影響を受けずに長時間の連続動作が可能である。

5. 実験

本章では、提案する移動体追跡システムに対する実証実験の結果を示す。実験は、(1) 異種複数センサ統合によるロバスト性向上の確認、(2) 複数歩行者の追跡実験の2種類を行い、(1)は「ロボットタウンの実証的研究」プロジェクトで用いる実証実験用住宅 (Fig.6) で行った。センサ端末に用いたコンピュータは PentiumD 3.0GHz、ホストコンピュータは Core2 2.4GHz、実験に用いたセンサは以下の通りである。

ビデオカメラ	Dragonfly2 (Point Grey)	4 台
レーザレンジ	LMS200 (Sick)	2 台
ファインダ	URG04LX (北陽電機)	2 台

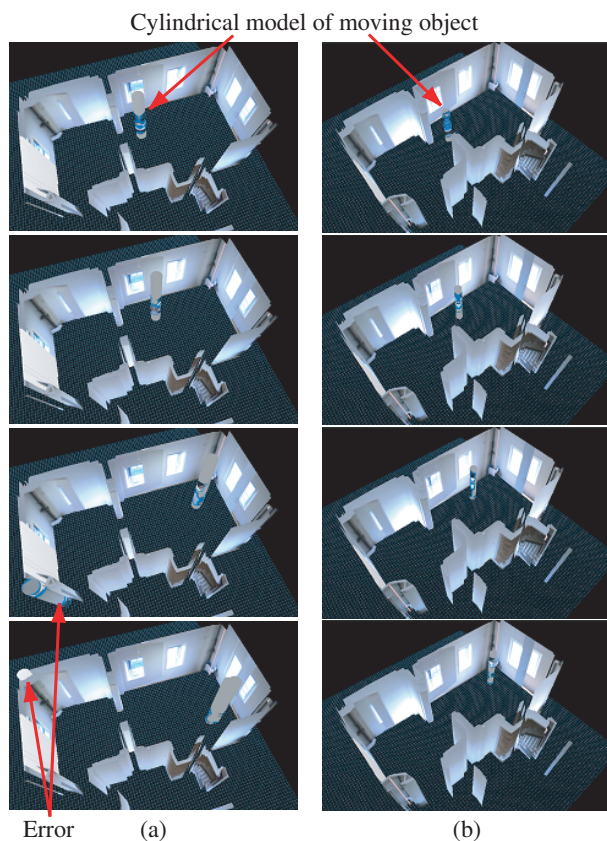


Fig.8 実験結果

5.1 異種複数センサ統合によるロバスト性向上の確認

本実験では、異種複数センサ統合によりノイズに頑健に移動体追跡が可能であることを確認する。Fig.7に実験環境を示す。

実験では、目視により容易に確認できるように、Fig.8のような3次元モデルによる表示を行った。これは、まず静的環境距離情報に一定の高さを与えて静的環境モデルを作成し、そこに静的環境画像をテクスチャマッピングした。また、移動体は円柱モデルで近似し、Level Set Tracking によって得られた領域内の画像を円柱にテクスチャマッピングし、推定位置に表示した。

Fig.8(a)は、レーザレンジファインダの情報のみを用いた場合の例、Fig.8(b)は、レーザレンジファインダとLevel Set Tracking の情報を融合した場合の例である。Fig.8(a)に示される通り、レーザレンジファインダの情報のみでは、時折、測定ノイズによって誤った移動体円柱モデルが表示されている。これに対しFig.8(b)に示す例では、真の移動体の位置のみに円柱モデルが表示され、誤認識が低減していることがわかる。

5.2 複数歩行者の追跡実験

次に複数移動体の同時追跡実験を行った。本実験では4人の歩行者を対象とし、約45秒間の追跡を行った。Fig.9に追跡時の歩行者の様子をセンサ端末2,3から撮影したカメラ画像により示す。また、Fig.10に追跡結果、Fig.11に3次元モデルで表した追跡の様子を示す。Fig.11では移動体の推定位置を円柱で、Level Set Tracking によって得られた存在範囲をカメラ位置から伸びた2本の線で、仮説を点でそれぞれ表している。

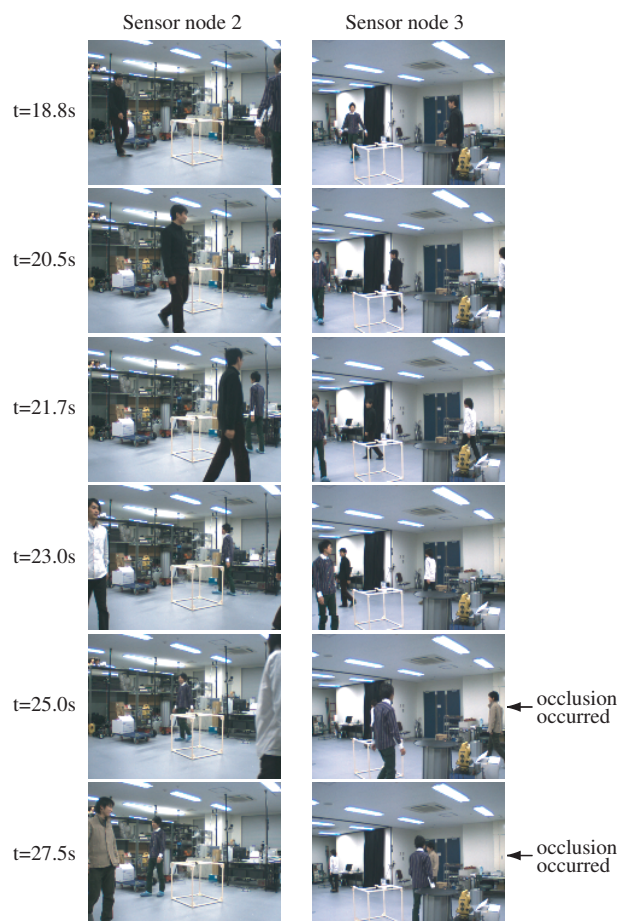


Fig.9 歩行者の様子

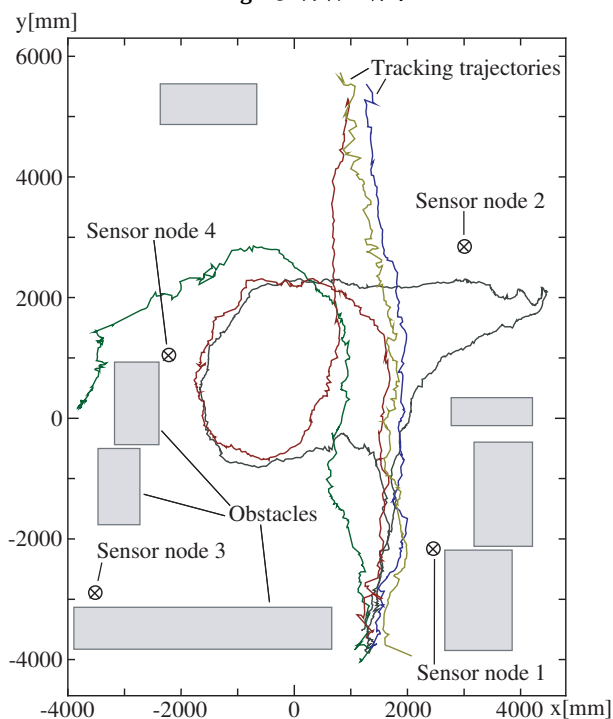


Fig.10 歩行軌跡

t=25.0s 付近でセンサ端末3においてオクルージョンが発生しているように、他の歩行者によるオクルージョンが頻繁に発生しているが、異なるセンサ端末から得

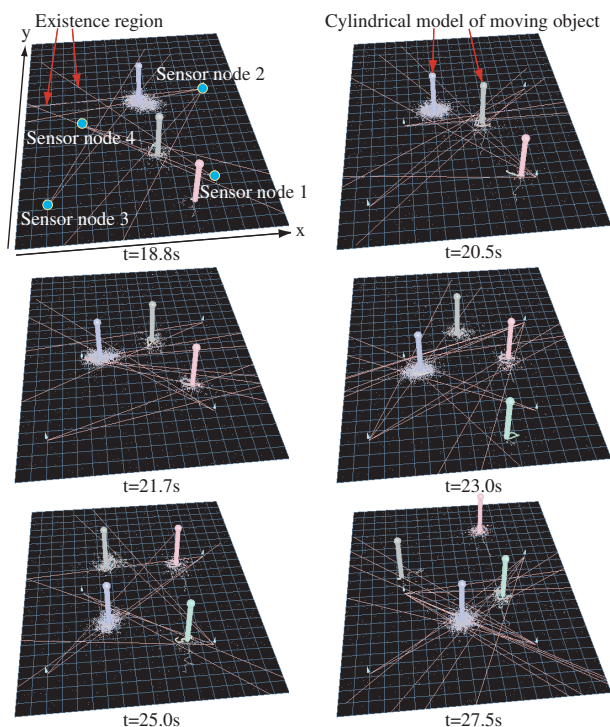


Fig.11 3次元モデル表示

られた情報を統合することで正確な追跡が継続できている。このことから、提案手法はオクルージョンにも頑健に追跡可能であることがわかる。

6. まとめ

「ロボットタウンの実証的研究」の一環として、これまでに我々が開発した Level Set Tracking と、環境におかれた複数のレーザレンジファインダからの距離情報を Codensation 法を用いて統合することで、複数の移動体の位置関係を正確に推定しつつ、ノイズや重なりにも頑健に追跡を行うシステムを提案した。また、提案した移動体追跡システムについての有効性を実験的に確認した。

謝辞

本研究は、文部科学省の平成 17 年度科学技術振興調整費による「科学技術連携施策群の効果的・効率的な推進」の一環として実施したものです。また本研究の一部は、文部科学省科研費補助金基盤 B「ロボット群と環境固定センサ群の相互支援による人間・ロボット共生環境の情報構造化 (18360124)」の助成を受けて行われました。

参考文献

- 倉爪亮, 由井俊太郎, 辻徳生, 岩下友美, 原健二, 長谷川勉. Fast level set method の提案とビデオ画像の移動物体のリアルタイム追跡. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 8, pp. 2244–2254, 2003.
- 中村克行, 趙卉菁, 柴崎亮介, 坂本圭司, 大鋸朋生, 鈴木尚毅. 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誌 D-II, Vol. J88-D-II, No. 7, pp. 1143–1152, 2005.
- 中村克行, 趙卉菁, 柴崎亮介. レーザスキャナと画像センサの融合による歩行者追跡. 第 11 回画像センシングシンポジウム 講演論文集, pp. 177–180, 2005.
- E. Prassler, J. Scholz, and A. Elfes. Tracking people in a railway station during rush hour. In H.I.Christensen, editor, Proc. Computer Vision Systems, First International Conference, ICVS '99, pp. 162–179, 1999.
- Ajo Fod, Andrew Howard, and Maja J Mataric. A laser-based people tracker. In Proc. International Conference on Robotics and Automation 2002, pp. 3024–3029, 2002.
- Alex Brooks and Stefan Williams. Tracking people with networks of heterogeneous sensors. In Proc. Australasian Conference on Robotics and Automation 2003, 2003.
- Marek P. Michalowski and Reid Simmons. Multimodal person tracking and attention classification. Proc. HRI '06, 2006.
- Boris Kluge, Christian Kohler, and Erwin Prassler. Fast and robust tracking of multiple moving objects with a laser range finder. In Proc. International Conference on Robotics and Automation 2001, pp. 1683–1688, 2001.
- Dirk Schulz, Wolfram Burgard, Dieter Fox, and Armin B. Cremers. Tracking multiple moving targets with a mobile robot using particle filters and statistical data association. In Proc. International Conference on Robotics and Automation 2001, pp. 1665–1670, 2001.
- Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, and William Whitaker. Conditional particle filters for simultaneous mobile robot localization and people-tracking. In Proc. International Conference on Robotics and Automation 2002, pp. 695–701, 2002.
- M. Lindstom and J.-O. Eklundh. Detecting and tracking moving objects from a mobile platform using a laser range scanner. In In. Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2001.
- Marin Kobilarov, Jeff Hyams, Parag Batavia, and Gaurav S. Sukhatme. People tracking and following with mobile robot using an omnidirectional camera and a laser. In Proc. International Conference on Robotics and Automation 2006, 2006.
- Allison Bruce, Illah Nourbakhsh, and Reid Simmons. The role of expressiveness and attention in human-robot interaction. In Proc. International Conference on Robotics and Automation 2002, pp. 4138–4142, 2002.
- M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos. Snakes, active contour models. International Journal of Computer Vision, Vol. 1, No. 4, pp. 321–331, 1988.
- J. Sethian. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. In Proceedings of the National Academy of Science, Vol. 93, pp. 1591–1595, 1996.
- J. Sethian. Level Set Methods and Fast Marching Methods second ed. Cambridge University Press, UK, 1999.
- Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, Kenji Hara, and Tsutomu Hasegawa. Robust motion capture system against target occlusion using fast level set method. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 168–174, 2006.
- D. Adalsteinsson and J. Sethian. The fast construction of extension velocities in level set methods. Journal of Computational Physics, Vol. 148, pp. 2–22, 1999.
- D. Chop. Computing minimal surfaces via level set curvature flow. Journal of Computational Physics, Vol. 106, pp. 77–91, 1993.
- 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, Vol.24, No.5, pp.43–51, 2006.
- 塩見昌裕, 宮下敬宏, 石黒浩. ロボットの能動的コミュニケーションのための MCMC に基づいた異種センサ統合による人間追跡. 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.2, pp.74–82, 2005.