

カメラ・LRF 搭載移動ロボットによるHOG特徴量を利用した 人物追跡と生成地図を用いた自律帰還

○ 栗井 真志 (静岡大学), 清水 隆史 (静岡大学), 山下 淳 (東京大学),
金子 透 (静岡大学), 浅間 一 (東京大学)

HOG-Based Person Following and Autonomous Returning Using Generated Map by Mobile Robot Equipped with Camera and Laser Range Finder

○ Masashi AWAI (Shizuoka University), Takahito SHIMIZU (Shizuoka University),
Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), Toru KANEKO (Shizuoka University),
Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract: In recent years, with the development of technology, introduction of autonomous mobile robots to environments close to human life is expected. Examples are shopping cart robots automatically returning to the shopping cart shed after shopping, and guide robots directing the way back to the starting position from the current position in unknown environment. In this paper, we propose a mobile robot system which has functions of autonomous person following by using HOG features in acquired images and starting position returning by using a generated map. The robot realizes these functions by analyzing information obtained with camera and laser range finder. We verified the validity of the proposed method using a wheel mobile robot in indoor environment.

Key Words: Mobile Robots, Person Following, Laser Range Finder, Camera

1. 序論

近年のロボット産業の発展に伴い、身近な環境下における自律移動ロボットの導入が期待されている。自律移動ロボットの用途として、物を運んだ後に自動的に元の場所へ戻る荷物の運搬や、未知環境における現在地から出発した場所までの道案内などが挙げられる。これらの目的を果たすロボットには、人に同行しながら移動する機能と、設定された位置まで自律的に帰還する機能が必要となる⁽¹⁾⁽²⁾。

そこで、本研究では人を追跡しながら移動した後、自律的に元の位置まで帰還する移動ロボットシステムの構築を目的とする。

本研究において出発地点から目標地点まで向かう経路を往路、目標地点から出発地点まで向かう経路を復路と呼ぶことにする。

我々は往路を人に同行して移動し、復路は往路の情報を用いて自律帰還を行う移動ロボットシステムを提案している⁽³⁾。同システムにおいて、ロボットはレーザーレンジファインダ(以下LRFと表記)を用いた動物体検出と、単眼カメラにより取得した色情報を用いて人物

の追跡を行っている。しかし、この手法では動物体検出において人物の歩行速度によっては人物の追跡が困難になる場合があった。

そこで、本研究ではカメラとLRFを搭載した移動ロボットを用いて、LRFから得られたレンジデータの形状による人物の検出を行う。

更に、カメラで取得する画像からの人物検出手法として、画像上での人検出に有効な特徴量であるHOG特徴量⁽⁴⁾を利用した人物の検出と色情報による人物の検出をそれぞれ行う。そしてこれらの人物検出の結果を統合することでより頑健な人物の追跡を目指す。

また、追跡中にLRFにより2次元地図を生成し、復路では往路で生成した地図を用いて出発した位置へ帰還する移動ロボットシステムを構築する。

2. 提案手法の概要

本研究ではカメラ・LRF搭載車輪型移動ロボットを用いている。ここで使用するLRFとはレーザー光の伝播時間により距離を計測するセンサであり、距離情報を高速かつ正確に計測できる。LRFは人の足の高さに地面に水平に搭載する。これによりロボットは前方180度の各角度に

ついてレンジデータを得ることができる。また、カメラはLRFの真上に搭載し、ロボット正面の画像を得る。ロボットの動作環境は段差の無い平面とする。

往路では、ロボットはカメラとLRFによって人を検出・追跡しながら移動を行う。同時に、LRFから得られるレンジデータを用いて往路の周囲環境の2次元地図を生成する。

復路では、往路で生成した周囲環境の地図を用い、ポテンシャル法によりポテンシャル場を形成し、ロボットの経路を生成する。また、LRFを用いて周囲環境の計測を行い、ポテンシャル場の再形成を行うことで、往路で生成した地図に記されていない障害物（未知障害物）を回避する。

3. 往路での動作

3.1 人への同行機能

本研究では、人を検出して追跡する機能により、ロボットは人に同行して移動する。

追跡する人物らしさの評価として、LRFにより得られるレンジデータの形状による評価とカメラから取得した画像によるHOG特徴量を用いた評価を行う。また、レンジデータの形状とHOG特徴量は複数の人物についての共通の特徴量の検出であり、追跡すべき人物と他の人物を識別できる特徴量ではないため、さらに色情報による追跡する人物らしさの評価も行い、これらの評価を統合し、パーティクルフィルタにより人物の追跡を行う。

パーティクルフィルタで追跡を行う際、各パーティクルの位置においてレンジデータの形状、HOG特徴量、色情報の評価を行ってパーティクルに重みをもたせる方法が考えられるが、これらの計算をパーティクルの数だけ計算するのは多くの計算コストがかかる。

そこで、本研究ではまずLRFにより計測を行い（図1(a)）、地面に水平なx-y平面上にレンジデータ（図1(b))を得る。次に各位置のレンジデータについて、レンジデータの形状、HOG特徴量、色情報により追跡する人物らしさの評価値 V を持たせる（図1(c)）。そして、レンジデータ近傍のパーティクルに V による重みを与えることによりパーティクルフィルタによる追跡を行う。

3.1.1 レンジデータ形状による人物検出

本研究では、LRFにより得られるレンジデータの形状からの人物検出手法として文献⁽⁵⁾の手法を参考にテンプレートマッチングによる人物検出手法を行う。

テンプレートマッチングによる人物検出を行うために、まずLRFにより極座標で取得されるレンジデータの距離以上の領域を黒、それ以外の領域を白とし、x-y平

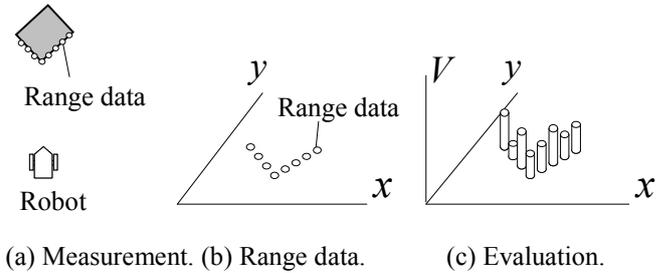


Fig.1 Data evaluation.

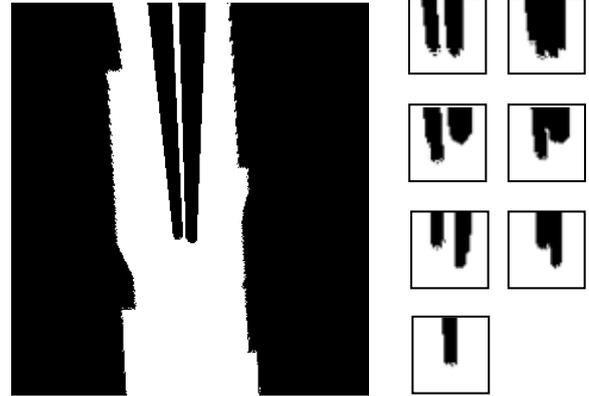


Fig.2 Range data.

Fig.3 Leg template.

面に変換した周囲の2次元地図を作成する（図2）。また、追跡開始前に複数の足の位置のパターンのテンプレート群を用意しておく（図3）。

そして追跡中に図2中の各レンジデータの位置においてマッチングを行い、マッチングスコアにより各位置のレンジデータについて人物らしさの評価を行う。

マッチングスコアの計算についてはSAD（Sum of Absolute Difference）を用いる。SADによるマッチングスコア R は式(1)により求める。

$$R = \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^M |I(i, j) - T(i, j)| \quad (1)$$

ただし、 $T(i, j)$ は $M \times M$ のテンプレート画像中の座標 (i, j) における画素の値、 $I(i, j)$ は2次元地図中から切り出したマッチングを行う $M \times M$ の画像中の座標 (i, j) における画素の値である。

式(1)より、ロボット正面からの角度 θ のレンジデータにおけるマッチングスコアを $R(\theta)$ とすると、レンジデータの形状による人物らしさのスコア $P_L(\theta)$ は以下の式(2)で与える。

$$P_L(\theta) = 1 - aR(\theta) \quad (2)$$

ただし、 a は $P_L(\theta)$ を0~1に正規化するための調整パラメータである。

最終的なLRFの形状による人物らしさの評価値 $V_L(\theta)$ は $P_L(\theta)$ を正規化した値として式(3)で与える。

$$V_L(\theta) = \frac{P_L(\theta)}{\sum_{\theta}^N P_L(\theta)} \quad (3)$$

ただし、 N は計測範囲内のレンジデータの数である。

3.1.2 HOG 特徴量による人物検出

カメラから得られる画像を用いてHOG特徴量による人の検出を行う。HOG特徴量とは局所領域の輝度の勾配方向と強度をヒストグラム化したものであり、人などのテクスチャの多様な物体に有効な特徴量である⁽⁴⁾。人の検出にはこのHOG特徴量とReal Adaboostを用いて生成した人物検出器を用いる。

HOG特徴量による人物の検出は、LRFによって計測された各レンジデータそれぞれについてHOGによる人物らしさの評価値をそれぞれ求める。

手順としては、まずLRFによって得られる各レンジデータの位置に応じた領域を画像中から切り出す。そして切り出した画像に対してHOG特徴量とReal Adaboostにより生成した人物検出器を用いて各レンジデータの位置について人物らしさの評価値を求める。

LRFで計測されたロボット正面からの角度 θ のレンジデータにおけるHOG特徴量の評価値を得るため、まず人物検出器の出力値を基にHOGによる人物らしさのスコアとして $P_H(\theta)$ を式(4)のように定める。

$$P_H(\theta) = bH(\theta) + c \quad (4)$$

ただし、 $H(\theta)$ は人物検出器のReal Adaboostによる強識別器の値であり、 b 、 c は正負の値をとる $H(\theta)$ を0~1の値に正規化するための調整パラメータである。

最終的なHOGによる人物らしさの評価値 $V_H(\theta)$ は $P_H(\theta)$ を正規化した値として以下の式(5)により与える。

$$V_H(\theta) = \frac{P_H(\theta)}{\sum_{\theta}^N P_H(\theta)} \quad (5)$$

3.1.3 色情報による人物検出

色情報による人物の検出を行う。まず追跡開始前に追跡する人物の色情報を取得しておき、その色ヒストグラムを作成しておく。色ヒストグラムは明るさの影響を軽減するためにHSV色空間における色相と彩度について図4に示すような2次元の色ヒストグラムで作成を行う。

そして追跡開始後にLRFにより得られた各レンジデータの位置に応じた領域を画像中より切り出して色相、彩度について2次元の色ヒストグラムの作成を行い、追跡開始前に作成した追跡する人物の色ヒストグラムとの類似度をBhattacharyya係数により求める⁽⁶⁾。

ロボットからの角度 θ のレンジデータにおける

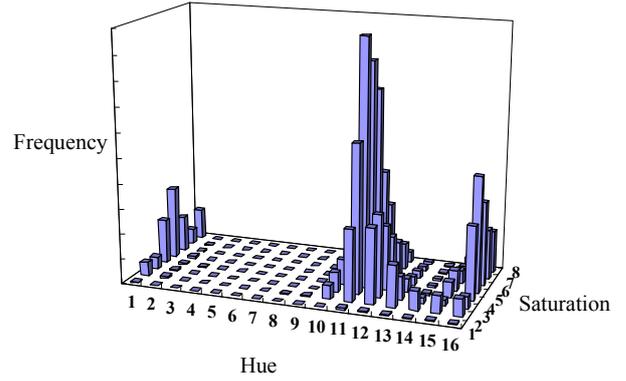


Fig. 4 Color histogram.

Bhattacharyya係数による類似度 $L(\theta)$ は、追跡開始前に取得した人物の色ヒストグラムについて、色相 h 、彩度 s の属するビンの頻度を $H_i(h, s)$ 、追跡中に取得した角度 θ のレンジデータにおける色ヒストグラムの頻度を $H(h, s, \theta)$ として式(6)により求める。

$$L(\theta) = \sum_h^{h_n} \sum_s^{s_n} \sqrt{H_i(h, s) \times H(h, s, \theta)} \quad (6)$$

ただし、 h_n 、 s_n はそれぞれ色相、彩度についてのビン数であり、本研究では $h_n=16$ 、 $s_n=8$ とした。

最終的な色情報による追跡する人物らしさの評価値 $V_C(\theta)$ は類似度 $L(\theta)$ を正規化した値として式(7)により求める。

$$V_C(\theta) = \frac{L(\theta)}{\sum_{\theta}^N L(\theta)} \quad (7)$$

3.1.4 人物らしさの評価値の統合

式(3)、(5)、(7)により求めた $V_L(\theta)$ 、 $V_H(\theta)$ 、 $V_C(\theta)$ を以下の式(8)で統合して角度 θ のレンジデータの人物らしさの評価値 $V(\theta)$ を求める。

$$V(\theta) = \alpha V_L(\theta) + \beta V_H(\theta) + (1 - \alpha - \beta) V_C(\theta) \quad (8)$$

ただし、 α (≥ 0)、 β (≥ 0) は重み係数である。

3.1.5 パーティクルフィルタによる追跡

式(8)により求めた $V(\theta)$ を用いてパーティクルフィルタによる人物の追跡を行う。本研究でのパーティクルフィルタの処理手順を以下に示す。

- (i) 初期パーティクルを追跡人物の周辺に発生させる。
- (ii) システムモデルによって各パーティクルを遷移させる。システムモデルには式(9)を用いる。

$$x_{t|t-1} = x_{t-1} + v_{t-1}T \quad (9)$$

ただし、 x_t は時刻 t における位置、 v_t は時刻 t における速度ベクトルである。 T はパーティクルフィルタを更新する周期である。

- (iii) 各パーティクルに対する重みづけを行う。パー

ティクルに対する重みづけは角度 θ のレンジデータ近傍のパーティクルに対して $V(\theta)$ による値を持たせることで重みづけを行う。

(iv) リサンプリング処理により重みに応じてパーティクルを復元抽出し、ランダムなノイズを加えて新たなパーティクルを発生させる。

(i)の処理を行った後、(ii)~(iv)の処理を繰り返すことにより人物の追跡を行う。

3.2 地図生成

本研究では往路の移動中に周囲環境の地図を生成する。地図生成のための周囲環境の計測にはLRFを用いる。ロボットの移動中に複数回計測を行い、異なる時刻で得られた各レンジデータを統合することで周囲環境の地図を生成する。

レンジデータの統合には、正確なロボットの自己位置推定が重要になる。本研究ではロボットの自己位置推定のためにLRFの各レンジデータに対してICPアルゴリズムによる位置合わせを行う⁽⁷⁾。

生成する地図は静止物体のみを対象とし、移動物体は地図上から除去する必要がある。そこで、異なる時刻において得られたレンジデータの差分を取ることにより動物体検出を行い⁽⁸⁾、動物体を地図上から検出し、削除を行う。

4. 復路での動作

復路の移動はラプラスポテンシャル法を用いる⁽⁹⁾。この手法は、ラプラス微分方程式の解が局所最小点を持たないことを利用し、停留点が存在しないポテンシャル場を形成してロボットの経路を生成するものである。

往路で作成した地図を基に、ラプラスポテンシャル法を用いて出発地点から目標地点までのポテンシャル場を作成する。そしてポテンシャル場の勾配方向に沿って移動することで、復路を移動する。

また、未知障害物を回避するため復路移動中もLRFによる周囲環境の計測を行い、ポテンシャル場の部分的な再形成を行う。これにより往路の地図上に存在しなかった未知障害物の回避を行う。

5. 実験

5.1 実験装置

カメラとLRFを車輪型移動ロボットに搭載し、実験を行った(図5)。車輪移動ロボットはMobileRobots社製のPioneer3を用いた。

カメラはLogicool社製のHD Pro Webcam C910を用いた。LRFはSICK社製のLMS200-30106を用いた。また、ロボットにはCPUがIntel Core 2Duo T93002.5GHz、メモリが4GBのノートパソコンを搭載し、センサやロボット

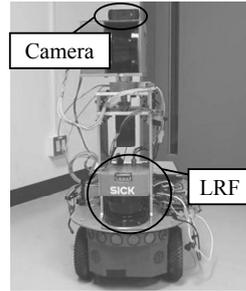


Fig.5 Mobile robot.



Fig.6 Environment.

の制御を行った。

5.2 実験条件

往路では人を追跡しながら移動し、復路では自動的に出発地点まで戻る実験を行う。

実験環境は図6に示すような床面に段差の無い屋内環境で行った。また、往路では追跡する人物以外の人物も存在するものとし、復路には往路では存在しなかった障害物が存在した。

なお、追跡する人物らしさを算出する式(8)の重み計数は $\alpha = \beta = 0.35$ と設定した。

5.3 実験結果

往路において追跡中に得られた画像を図7に、その時計測されたレンジデータの形状を図8にそれぞれ示す。図7では画像の中心が角度0度の方向であり、左側の角度が負、右側の角度が正であるとする。また、画像中の左側の人物が追跡対象である。

このとき得られたロボット正面からの角度 θ におけるレンジデータの評価値 $V_L(\theta)$ を図9に示す。人物の存在する角度において高い値が得られていることがわかる。

HOGのみによる人物検出を行った画像と $V_H(\theta)$ の値を図10、図11に示す。図10中の矩形で囲まれた領域が図11において $V_H(\theta)$ が一定値以上となった領域であり、人物の存在する角度において高い $V_H(\theta)$ の値が得られていることが確認できる。

ただし前述の通り、 $V_L(\theta)$ と $V_H(\theta)$ により人物が存在する領域を高精度に検出することはできるが、 $V_L(\theta)$ と $V_H(\theta)$ のみでは、複数人物が存在する環境において追跡すべき人物と他の人物を区別することが困難になる場合がある。

そこで、色情報を用いることで追跡すべき人物を抽出した結果として $V_C(\theta)$ の値を図12に示す。追跡すべき左側の人物の存在する角度でのみ高い値が得られていることがわかる。

最終的に、 $V_L(\theta)$ 、 $V_H(\theta)$ 、 $V_C(\theta)$ を統合した評価値 $V(\theta)$ を図13に示す。追跡すべき左側の人物の角度において最も高い値が得られている。この $V(\theta)$ の値でパーティク

ルに重み付けをすることにより、複数の人物が存在する環境下においても、特定の人物の追跡を行うことができた。

次に往路で生成した地図とロボットの人物追跡結果を図14に示す。ロボットは図14に示す灰色の点で示された経路で人物を追跡することができた。また、追跡すべき人物やそれ以外の人物などすべての動物体を自動的に検出して削除することにより、静止物体のみの周囲の地図を生成することができた。

復路でのロボットの移動経路について図15に示す。復路では往路における目標地点を出発地点、往路における出発地点を目標地点として図15に示すような経路で自律帰還を行った。黒丸で囲った部分が往路に存在しなかった未知障害物であるが、ポテンシャル場を再形成することにより、障害物を回避しながら出発地点まで移動できたことがわかる。

以上、提案手法により、複数人物が存在する環境における人物の追跡と、往路に存在しなかった障害物がある場合でも安全に自律帰還ができることが示された。

6. 結論

本研究では、往路ではカメラとLRFから計測されたデータを用いてパーティクルフィルタの枠組みにより人物の追跡を行い、復路では往路で生成した地図データを用いて出発地点へ自律帰還を行う移動ロボットシステムの構築を行った。

往路ではHOG特徴量と、レンジデータの形状、色情報で人物の検出を行い、パーティクルフィルタを用いて追跡することにより、人物が複数存在する環境下でも追跡すべき人物を追跡することができた。

また、ICP アルゴリズムによる自己位置推定により往路における周囲環境の地図を生成することができた。

復路では往路で生成した地図を利用してラプラスポテンシャル法により経路生成を行うことで出発地点への帰還を行うことができた。

今後の課題としては、追跡中のパーティクルの遷移の際の自己位置推定の誤差の考慮を考慮すること等が挙げられる。



Fig.7 Acquired image.

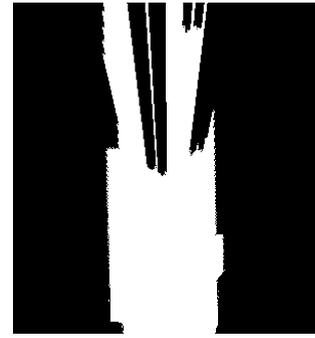


Fig.8 Acquired range data.

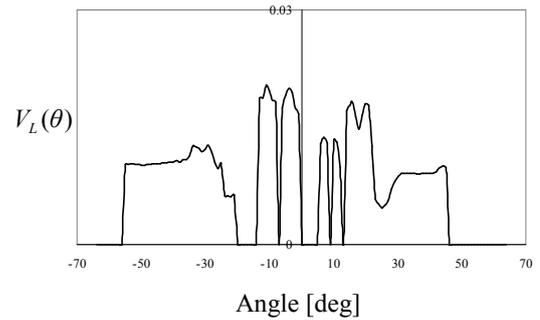


Fig.9 Evaluation value of LRF $V_L(\theta)$.



Fig.10 HOG detection.

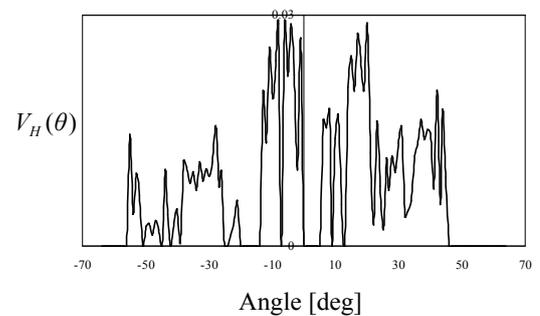


Fig.11 Evaluation value of HOG $V_H(\theta)$.

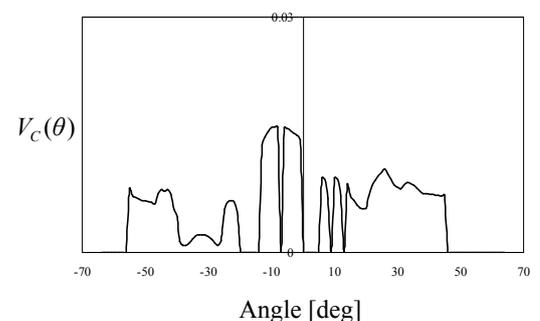


Fig.12 Evaluation value of color histogram $V_C(\theta)$.

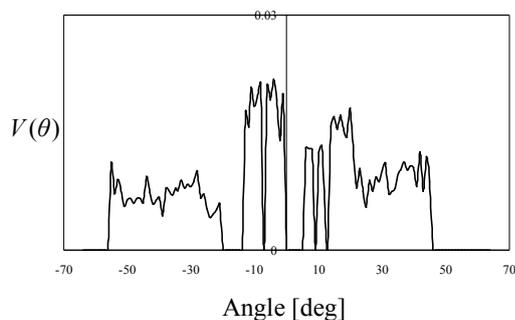


Fig.13 Integrated evaluation value $V(\theta)$.

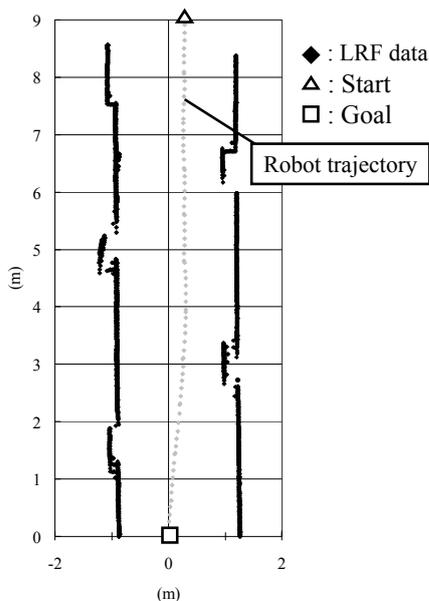


Fig.14 Generated map and trajectory of mobile robot on the outward way.

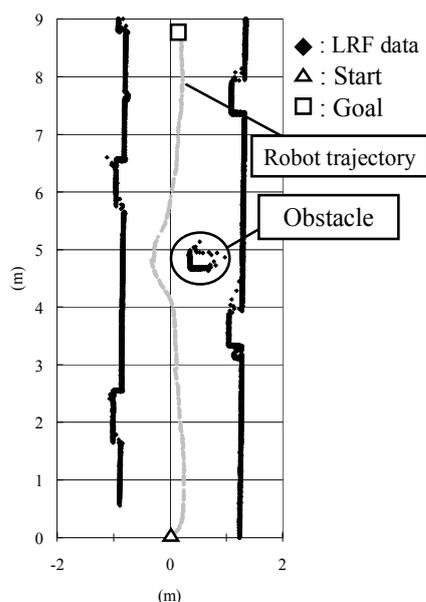


Fig.15 Generated map and trajectory of mobile robot on the return way.

謝辞

本研究の一部は、科研費若手研究(A)22680017の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) 三澤正志, 吉田智章, 油田信一: “自律的帰還機能を持つ荷物運搬用電動台車の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.8, pp.1199–1206, 2007.
- (2) 唐立信, 油田信一: “全方位画像列と移動量の記録による移動ロボットの教示再生ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.8, pp.883–892, 2003.
- (3) 清水隆史, 粟井真志, 山下淳, 金子透: “人に同行する機能と自律帰還機能を有するカメラ・LRF 搭載移動ロボットシステムの開発”, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.147–148, 2011.
- (4) N. Dalal and B. Triggs: “Histograms of Oriented Gradients for Human Detection”, *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.886–893, 2005.
- (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, Vol.24, No.5, pp.605–613, 2006.
- (6) T. Kailath: “The Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection,” *IEEE Transactions on Communication Technology*, Vol.COM-15, No.1, pp.52–60, 1967.
- (7) P. J. Besl and N. D. McKay: “A Method for Registration of 3-D Shapes”, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239–256, 1992.
- (8) 岩科進也, 山下淳, 金子透: “レンジセンサ搭載移動ロボットによる動的環境における3次元地図生成”, 第14回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.300–305, 2009.
- (9) 佐藤圭祐: “極小点のないポテンシャル法を用いたロボットの動作計画”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.5, pp.702–709, 1993.