情報処理学会関西支部大会
大阪，2002年11月

B-03

移動ロボットのための複雑かつ動的な環境の視覚認識

Visual Recognition of Complex and Dynamic Environments for a Mobile Robot

三浦　純† 子安大士† 根岸善朗† 白井良明†
Jun Miura Hiroshi Koyasu Yoshiro Negishi Yoshiaki Shirai

1 はじめに

ロボット技術の発展にともない，近い将来にオフィスや家庭で仕事をするロボットが日常的に利用されるようになることが期待されている．そのようなロボットには周囲のものに衝突せずに動く機能が必要であり，そのためには周囲環境の高信頼の認識が重要となる．

環境にセンサを埋め込むことによってロボットの動きを助けたり [1]，学習によって衝突回避行動を生成すること [2] もある程度は可能であるが，それだけでは複雑な環境に対しては限界がある．環境からの情報や学習を活用するためにも，ロボット個々の機能をあらかじめある程度与えておく方が望ましい．したがって，従来の研究の延長線上にある，自律ロボットの認識機能の充実は依然として重要な研究課題であると考えている．

移動ロボットでは周囲を広く見渡すことが重要である．そこで，全方位ステレオ視覚とレーザ距離センサを用いた高信頼の環境認識を研究している (図 1 参照)．本稿では，複雑かつ動的な環境で衝突することなく，しかも効率よく移動する，という移動ロボットの最も基本的な機能を実現するために筆者らが研究している手法を紹介する．

2 全方位ステレオ

広い視野を持ち高速に環境情報を入力できるセンサとして，全方位カメラを垂直方向に 2 台並べた全方位ステレオシステムを構築した [3]．各カメラへの入力画像をパノラマ画像に変換するとエピポーラ線が垂直になるので [4]，従来の高速ステレオ対応づけアルゴリズムがそのまま適用できる．画像サイズ 720×100，視差探索範囲 80 としたとき，PentiumIII 850MHz × 2 の PC で約 0.2 秒ごとに視差画像が得られる．図 2 に得られたパノラマ視差画像の例を示す．

3 視覚情報に基づく位置推定

視覚情報には不確かさが含まれるので認識の信頼性向上のためには複数情報の統合が不可欠である．移動ロボットの場合には，移動しながら多視点での視覚情報を統合することになるが，その際移動量の高信頼な推定が必要になる．シーン中の特徴の対応づけを基に位置推定を行う場合には [5]，環境からどのような特徴を取り出すかをあらかじめ環境に応じて決めておく必要があると同時に，正しい対応の探索に時間がかかる．そこで，明示的な特徴の対応づけを行わない方法が考えられている [6, 7]．従来の方法では前後 2 フレームのデータのみを使用していたのでノイズに弱く，また位置推定の誤差を評価していなかった．そこで，それらの問題を解決する手法を全方位ステレオを対象に開発した [8]．

† 大阪大学，Osaka University

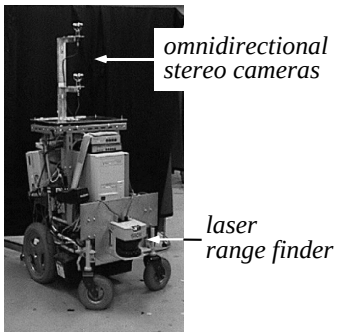


図 1: 移動ロボット

3.1 レンジプロファイルの抽出

周囲の物体までの距離を比較して位置推定を行うために，各フレームの距離データから，各方向ごとに最も近い物体までの距離を抽出したものを**レンジプロファイル**と呼ぶ [7]．図 3 は図 2(c) から抽出したレンジプロファイルである．

3.2 レンジプロファイルの比較

前回の位置推定とその誤差が与えられるとして，それに，移動ロボットの動きの不確かさのモデル (例えば [9]) から移動の誤差を加えて，現在位置の存在範囲を計算する．この範囲内に適当な間隔で候補点を設定し，それらを位置の候補とする．方向についても適当に離散化して候補を作る．ある候補位置・姿勢が与えられたとき，前回までに得られているレンジプロファイルがどのように見えるかを計算することができる．それと今回得られたレンジプロファイルを比較して，最も良く合う位置・姿勢を選ぶ (図 4 参照)．

3.3 評価値の分布に基づく位置推定

位置推定の精度は周囲の物体の配置に依存する．例えば，廊下のような環境では廊下に垂直な方向の推定精度

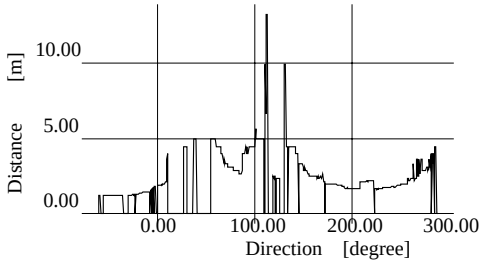


図 3: レンジプロファイルの例

(a) 入力画像 (下カメラ)

(b) (a) から作ったパノラマ画像

(c) (b) から作ったパノラマ視差画像．近いほど明るい

図 2: 全方位ステレオの処理結果

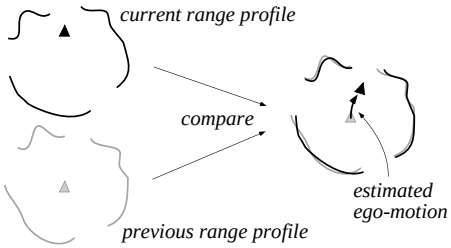
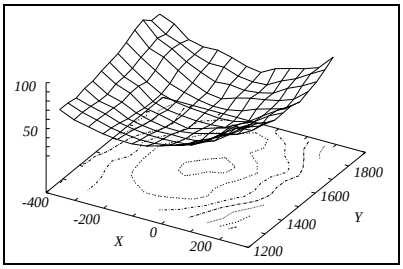
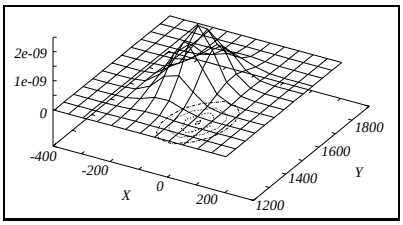


図 4: レンジプロファイルの比較による位置推定



(a) 評価値の分布



(b) 推定された誤差分布

図 5: 位置決め誤差の推定

はよいが，廊下に沿った方向の推定精度は悪い．このような精度の違いを考慮せずにレンジプロファイルの差を計算すると誤った位置推定を行う可能性がある．そこで，レンジプロファイルの差の評価値の分布から位置推定誤差を計算する．図 5(a) は評価値の分布，(b) は誤差推定のために 2 次元正規分布を当てはめた [10] ものである．

4　全方位ステレオとレーザ距離センサの統合

全方位ステレオは全周の 3 次元距離情報を得ることができるが，データの精度や信頼性があまり高くなく，また計算量が多い，特徴のない対象物の距離が得られない，といった欠点がある．レーザ距離センサは角度，距離ともに高い解像度と測定精度を持っているが，その多くは特定の平面上をスキャンするものであるため，その平面

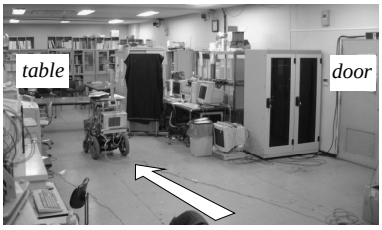
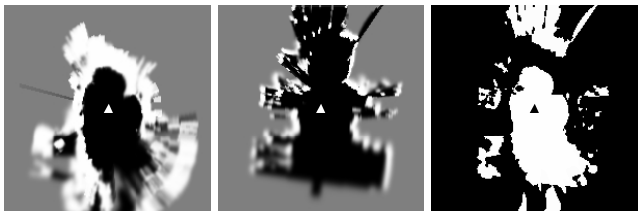


図 6: 実験環境



stereo probabilistic map　*LRF probabilistic map*　*integrated free space map*

図 7: 2 つの確率障害物地図と統合後の自由空間地図

上の障害物しか検知できない．そこで，全方位ステレオとレーザ距離センサを相補的に統合することにより，複雑な環境において信頼性の高い地図を作成する手法を開発した [11, 12].

観測データには不確かさやあいまいさが含まれるため，それらを考慮したデータ統合が必要となる．ここではセンサデータの不確かさの確率モデルを用いて統合を行う．全方位ステレオとレーザ距離センサでは，ロボットから見て同じ方位のデータを取得しても，同じ物体の異なる部分を観測する可能性があるため，そのままでは確率的に統合することはできない [12]．そこで，まずセンサごとに時系列データを確率的に統合して障害物の存在確率地図を 2 つ生成し，それらから各々のセンサによる各位置の解釈を組み合わせて，最終的な障害物領域を生成する手法を用いた．

図 6 の環境でロボットが移動しながら得たデータを基に作成した地図を図 7 に示す．左の 2 つは障害物の存在確率を示す地図であり，白が確率 1.0，黒が 0.0 を表す．ロボット前方にテーブルがあるが，レーザ距離センサでは脚しか観測できないが，全方位ステレオで確実にテーブルの上面を認識している．右は統合によって得られた自由空間地図であり，ロボットの移動可能範囲を正しく認識している．

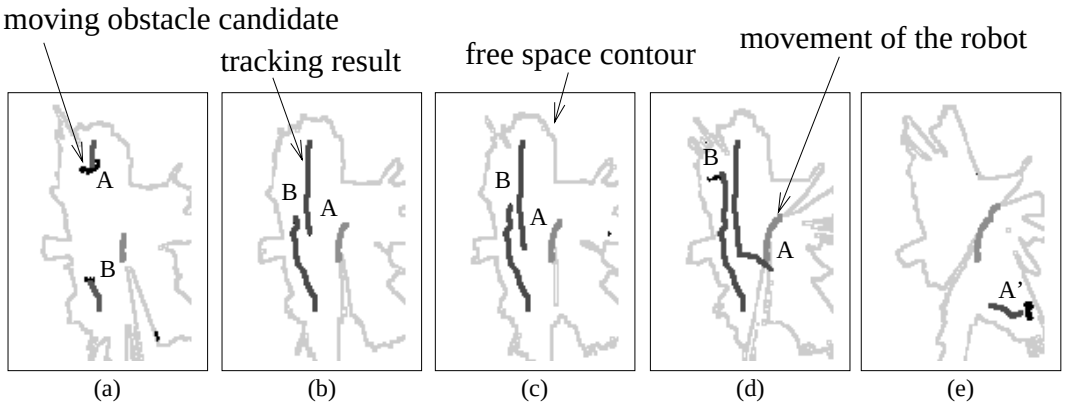


図 8: 移動物体の追跡結果

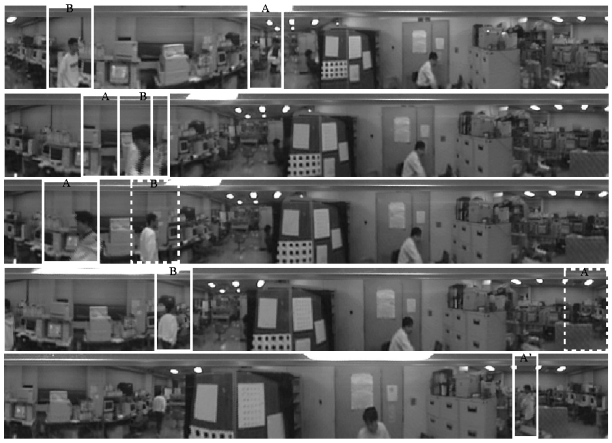


図 9: 追跡結果のパノラマ画像上への投影

上から順に図 8 の (a)〜(e) に対応している．実線のウインドウは現フレームで対応する観測が得られていることを，破線のウインドウは，現フレームでは観測は得られていないが，カルマンフィルタにより追跡が続けられていることを示す．

5　移動障害物認識

移動物体の発見と追跡は安全な移動のために重要である．ロボット自身の移動量が正確に推定できれば，それを考慮して観測データの時間差分を取ることにより，静止物体と動物体を区別することができる．しかし，第 3 節で述べたようにロボットの移動量推定には不確かさが含まれるため，単純な時間差分法は適用できない．そこで，まず移動しながら静止障害物に囲まれた自由空間を認識し，その中に入っている物体を移動物体の候補とする方法を考えた [3].

各フレームで検出された移動物体候補は時系列の対応づけを行い，カルマンフィルタにより，その位置・速度を推定する．位置推定の誤差などの影響により，静止障害物の一部が移動物体候補として検出されたり，同一物体が複数の領域に分かれたりすることがある．そこで，可能な対応の候補をすべて考慮して可能な追跡の木を構成し，一定以上のフレームにわたって追跡されたものを移動物体とする track-splitting フィルタ [13] を適用する．図 8 に 2 人の人間の動きを移動しながら同時に追跡した結果を示す．図中に自由空間の境界，ロボットの軌跡，移動物体の軌跡を示す．また図 9 は，人間の追跡結果をパノラマ画像上に投影したものである．ロボットが移動しながら，正しく追跡を行っていることが分かる．

6　速度制御

自由空間や移動障害物を認識後，目的地が与えられればロボットの移動経路を計算することができる [14]．従来の経路計画はいかに最短経路を生成するかに主眼がおかれ，経路上をどのような速度で移動するかはあまり考慮されてこなかった．そこで，経路が与えられときにどのように速度を制御すべきかという問題を考える [9].

内界センサだけではロボットの移動につれて位置の推定誤差は増大するので，視覚などの外界センサによる位置推定が重要である．このとき，速く移動すると早く目的地へ到達できる可能性は高まるが，移動距離あたりの観測回数が減り，移動の誤差をあまり減らすことはできないため，衝突の危険性が増す．一方，頻繁に観測するためにゆっくり動くと安全性は高まるが，移動効率は悪い．そこで，周囲の状況に応じて速度を制御することが必要となる (図 10 参照).

そこで，現時点である速度による移動が安全かどうかを判断する基準を定義し，それを満たす限り最大速度で移動する，という手法を提案した [9]．具体的には，移動ロボットの動きの不確かさをモデル化し，現在の観測位置から次の観測位置候補まで移動したときに，どのような誤差が生じ得るかを計算する．その誤差の最大になる点から，本来の目標軌道に復帰するための軌道が障害物に衝突しない場合に，その観測位置候補は安全であるとする．そして，次の観測開始時間までにその観測位置候

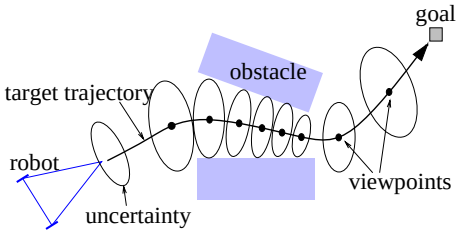
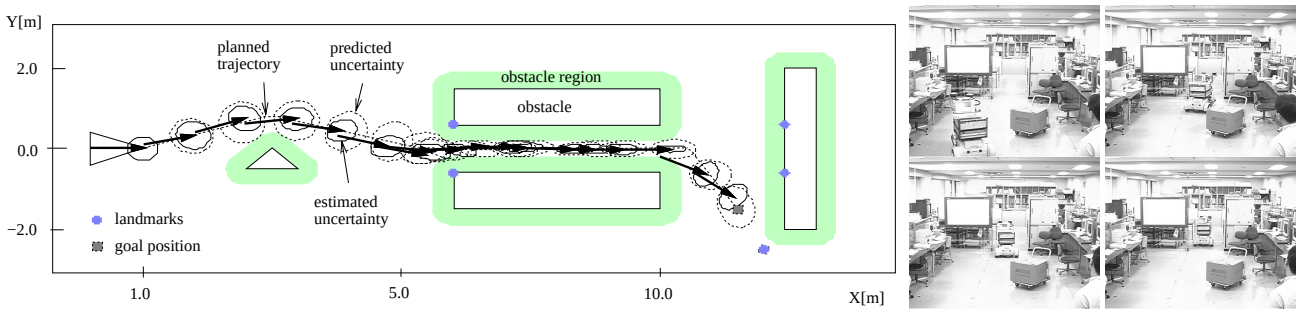


図 10: 周囲の状況に応じた速度制御



(a) 移動軌跡　　(b) 移動結果

図 12: 速度制御実験

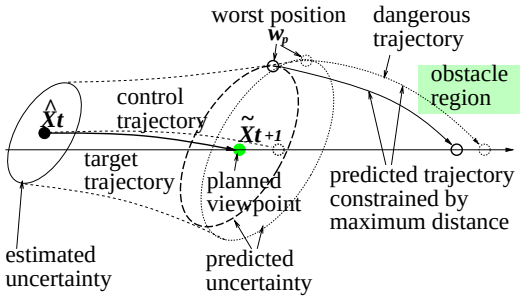


図 11: 動きの不確かさに基づく速度制御

補まで進むための速度は安全であるとする．具体的な判断の例を図 11 に示す．図中，$\hat{\boldsymbol{X}}_t$ は現在の位置，$\tilde{\boldsymbol{X}}_{t+1}$ は次の観測位置候補を示す．各位置の楕円は不確かさを表し，w_p は誤差最大の位置を表す．w_p から安全な復帰軌道が生成できるとき，それに対応する次の観測位置は安全であるとする．

完全既知の環境でランドマークを認識して位置推定を行いながら移動するロボットを用いて速度制御手法の実験を行った結果を図 12 に示す．図中，各観測位置ごとに予測誤差と推定誤差が描かれている．物体の間の狭い領域に進入する際に速度を緩めて位置推定の不確かさを減らしていることが分かる．

上で述べた手法は環境が完全既知である場合を扱っている．しかし，実世界では物体の背後など未知領域が存在する．われわれは通常見えない領域やよく分からない領域に進入する際には，速度を緩めよく観測しようとする．このような動作を自然に実現するための手法も，本節で述べた手法と同様に，ある移動速度が安全である基準を定義し，その基準を満たす限り最大の速度で移動する，という考え方で実現可能である [15].

7　おわりに

本稿では，複雑かつ動的な環境で移動するロボットのための視覚認識機能について述べた．全方位ステレオとレーザ距離センサを用い，データ統合により複雑な環境を認識し，動物体を検出・追跡している．現時点では，周囲の環境すべてを認識しているため計算時間が長い．タスクや状況に応じて重要なところだけを処理する (情報を得たりモデリングしたりする) [16] ことにより，より効率的かつ信頼性の高い認識機能の実現を目指している．

参考文献

[1] 十河, 木元, 石黒, 石田. 分散視覚システムによる移動ロボットの誘導. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 7, pp. 1009–1016, 1999.

[2] 中村, 浅田. ステレオスケッチ: ステレオ視覚を持つ移動ロボットの行動獲得. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 4, pp. 533–541, 1997.

[3] H. Koyasu, J. Miura, and Y. Shirai. Recognizing Moving Obstacles for Robot Navigation Using Real-Time Omnidirectional Stereo Vision. *J. of Robotics and Mechatronics*, Vol. 14, No. 2, pp. 147–156, 2002.

[4] J. Gluckman, S.K. Nayar, and K.J. Thoresz. Real-Time Omnidirectional and Panoramic Stereo. In *Proceedings of 1998 DARPA Image Understanding Workshop*, 1998.

[5] G. Dissanayake, H. Durrant-Whyte, and T. Bailey. A Computationally Efficient Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1009–1014, 2000.

[6] F. Lu and E. Milios. Robot Pose Estimation in Unknown Environments by matching 2D Range Scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 18, pp. 249–275, 1997.

[7] 城殿, 三浦, 白井. 誘導による移動経験に基づく視覚移動ロボットの自律走行. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 8, pp. 1003–1009, 2001.

[8] 子安, 三浦, 白井. 全方位ステレオ視覚を用いた移動ロボットの自己位置とその誤差の推定. 第 20 回日本ロボット学会学術講演会, 2002.

[9] 文, 三浦, 白井. 不確かさを考慮した観測位置と移動のオンライン計画手法. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 8, pp. 1107–1113, 1999.

[10] K. Nickels and S. Hutchinson. Estimating uncertainty in SSD-based feature tracking. *Image and Vision Computing*, Vol. 20, pp. 47–58, 2002.

[11] 根岸, 三浦, 白井. 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. 2002 年ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2002.

[12] J. Miura, Y. Negishi, and Y. Shirai. Mobile Robot Map Generation by Integrating Omnidirectional Stereo and Laser Range Finder. In *Proceedings of 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2002.

[13] I.J. Cox. A Review of Statistical Data Association Techniques for Motion Correspondence. *Int. J. of Computer Vision*, Vol. 10, No. 1, pp. 53–66, 1993.

[14] J. Latombe. Motion Planning: A Journey of Robots, Molecules, Digital Actors, and Other Artifacts. *Int. J. Robotics Research, Special Issue on Robotics at the Millennium – Part I*, Vol. 18, No. 11, pp. 1119–1128, 1999.

[15] 根岸, 三浦, 白井. 確率的障害物地図に基づく視覚移動ロボットの行動制御. 計測自動制御学会 第 3 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2002), 2002. (発表予定).

[16] 三浦 純. センサ情報に基づく行動決定のための環境モデリング. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 3, pp. 325–330, 2000.