

天井ステレオカメラと移動ロボット搭載センサの統合処理による環境学習

外園宙 山田純一 山中隆 古賀由紀夫 渡邊睦
鹿児島大学大学院理工学研究科 〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40

あらし

移動ロボットが作成する地図として、従来トポロジカル地図とメトリック地図の2つの方法が研究されてきた。トポロジカル地図は環境から得られる情報を抽象化してノードとアークで表現するため環境の構造に対する知識を少ない情報量で表現するのに適しているが、観測結果との統合や不確実性の記述が困難である。また、ロボットの移動制御など正確性が要求される用途には適していない。本研究では、環境に設置されたステレオカメラを用いて作成する大局地図と、移動ロボットによる探索に基づく局所地図を統合することで、効率良く室内のメトリック地図作成を行う方式に関する手法について述べる。天井に設置したステレオカメラで画像領域内の3次元情報を取得し自由空間と机等高さを持つ物体、つまり天井カメラからでは遮蔽されている未識別の領域を検出する。この検出した遮蔽領域を移動ロボットに搭載されたカメラと超音波センサによって実験室を対象に実験を行い、本方式の有効性確認を行なった。

Environmental recognition by integrated processing of a ceiling stereo camera and a mobile robot loading sensor

Hiroshi HOKAZONO, Junichi YAMADA, Takashi YAMANAKA,
Yukio KOGA, and Mutsumi WATANABE
Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University
1-21-40 Korimoto Kagoshima, 890-0065, Japan

Abstract

The map which a mobile robot creates, two methods of topological map and the metric map have been studied conventionally. Since a topological map abstracts the information acquired from environment and expresses it with a node and an arc, it is suitable for expressing the knowledge over an environmental structure for the small amount of information, but integration with an observation result and description of uncertainty are difficult. In addition, movement control of a robot accuracy is not suitable for a demanded use.

This research describes the technique about the system which performs efficient indoor Metrick mapping by unifying the general situation map created using the stereo camera installed in environment, and the partial map based on search by a mobile robot. The three-dimensional information in a picture domain is acquired with the stereo camera installed in the ceiling, and the domain shaded from the ceiling camera is detected. By the camera and ultrasonic sensor in which this detected shaded domain was carried by the mobile robot, it experimented in the laboratory and the validity check of this system was performed.

1. はじめに

日本工業規格(JIS)では、移動ロボットを「自動的に移動できるベースを持つロボット」と定義している。自律・移動型ロボットの主な用途は、非製造業用およびパーソナル用で、社会参加支援、生活支援、教育・アミューズメント支援などが挙げられる。分野としては医療・福祉、オフィスサービス、消防・防災、土木・建築、原子力、宇宙、運輸・

倉庫、ゴミ処理・清掃、サービス、ライフラインメンテナンスなど多岐にわたる。

その中で移動ロボットが自律・移動を行うためには周囲の環境を把握する必要がある。本研究では、移動ロボット制御のための環境学習の一環として環境地図の作成を行う。

2. 従来研究と課題

移動ロボットによる環境学習の研究は活発に行われているが、その多くは移動ロボット単体で完結しているものである。その際の搭載センサは、カメラ、全方位カメラ[2]、レーザーレンジファインダ[3]、などが利用されている。しかし、ロボット単体では搭載できるセンサの数、多数のセンサの搭載に伴う大きさ、重量、電源の問題など制約がある。そこで、外界センサ情報である天井ステレオカメラを使用することでロボット単体では行えない広範囲の環境情報を取得出来ることに加え、ロボットとは異なる処理系であるため、協動的に処理を行うことも可能である。また、常に上方から観測していることで環境変化の素早い検知、学習の修正を行うことが出来る。ここに移動ロボット単体での環境学習と比較した利点がある。

3. 処理の流れ

3.1. システム構成

本システムの構成は天井に設置されたステレオカメラおよびPC、移動ロボット&搭載センサ(単眼カメラ&超音波センサ)およびノートPCによって構成される。

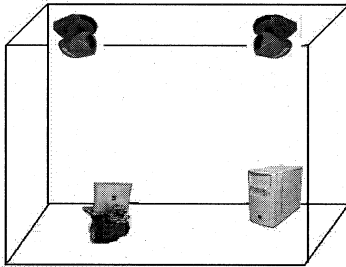


図 3.1 システム構成

3.2. 処理全体のフローチャート

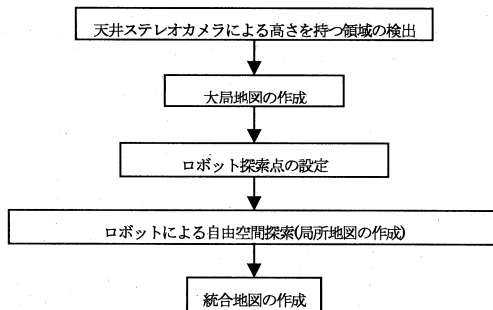


図 3.2 処理全体フローチャート

まず、天井ステレオカメラによって室内 3 次元情報を取得することで自由空間と遮蔽領域を検出し、自由空間と遮蔽領域を表現した大局地図を作成する。そして、天井ステレオカメラからでは未識別の領域である遮蔽領域の探索には、移動ロボットに搭載されたカメラと超音波センサの情報を用いることで自由空間を検出する。この移動ロボットによって検出された自由空間は局所地図とし、局所地図を天井ステレオカメラによって作成された大局地図と合成することで、大局地図の更新を行う。

3.3. 天井ステレオカメラ処理

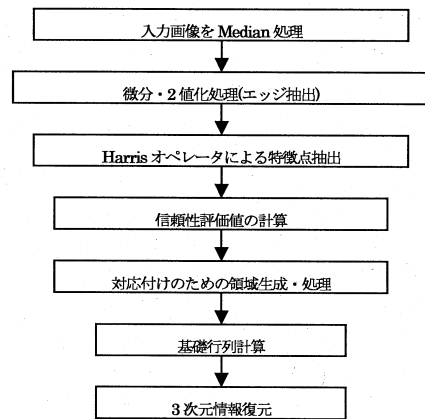


図 3.3 天井カメラ処理フローチャート

天井カメラ接続 PC による処理のフローチャートを図 3.3 に示す。

まず、天井に設置したステレオカメラによって得られた入力画像にメディアンフィルタを適用し、平滑化処理を行う。入力画像 I 内の各画素 (i, j) の近傍の中間地を出力画像の画素 (i, j) の値 g とすると

$$g(i, j) = \text{med}_{(k, l) \in N(i, j)} I(k, l)$$

と表すことが出来る。ただし

$N(i, j)$ は注目画素 (i, j) を含む近傍の局所領域を表す。次に平滑化処理を行った画像に対し、明度の急激に変化している場所をエッジとして抽出する。その抽出には明度変化の微分値を利用する手法を用いた。ここでの微分とは、 x および y 座標によって画像の明度変化を微分する空間微分を指す。

座標 (i, j) の明度を I(i, j) とすると、次式となる

$$I_x(i, j) = (-1) \cdot I(i+1, j) + 0 \cdot I(i, j) + 1 \cdot I(i-1, j)$$

$$I_y(i, j) = (-1) \cdot I(i, j+1) + 0 \cdot I(i, j) + 1 \cdot I(i, j-1)$$

処理後 2 値化処理によりエッジを抽出する。

特徴点抽出には Harris オペレータを使用した[4]。

Harris オペレータとは、画像信号の相関性に基づいて特徴点を導出する手法で、エッジやコーナー等の特徴点において相関出力値が大きくなるオペレータである

原画像の明度を I(x,y), 横方向(x 方向), 縦方向(y 方向)のそれぞれの差分値

$\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}, \frac{\partial I(x,y)}{\partial y}$ を基に 2x2 の行列 M を各画素に対して考える。

$$M = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$$

ここで、行列 M の各要素 A, B, C は、

$$A = \left(\frac{\partial I(x,y)}{\partial x} \right)^2 \cdot e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}}$$

$$B = \left(\frac{\partial I(x,y)}{\partial y} \right)^2 \cdot e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}}$$

$$C = \left(\frac{\partial I(x,y)}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{\partial I(x,y)}{\partial y} \right) \cdot e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}}$$

である。この行列 M の固有値をそれぞれ α, β とすると、固有値の大きさによって、次の 3 条件を満たす。

- (1) α, β が共に大きい場合、角点を表す。
- (2) α, β のうちの一方が大きく他方が小さい場合、エッジを表す。
- (3) α, β が共に小さい場合、面を表す。

Harris オペレータによって抽出した両特徴点の対応付けに対する信頼性評価値計算だが、両特徴点を中心としたマスク画像の画素平均および分散を画素の密度をとする評価関数はひとつの特徴点に対し右画像の全ての特徴点において算出し、その評価が高いもの (E(a,b) の値が一番低い数値のものを対応点とする) さらに全ての対応点が決定した段階で予め定めた閾値と比較し、閾値以下の対応点については以後の処理から除外する。

$$E(a,b) = w_1 \{1 - C(i,j)\} + w_2 D(i,j)$$

$$D(a,b) = \sum_{m,n=-M/2}^{M/2} |I_L(i+m, j+n) - I_R(k+m, l+n)|$$

$$C(a,b) = \frac{\sum_{m,n=-M/2}^{M/2} \{I_L(i+m, j+n) - A_L\} \{I_R(k+m, l+n) - A_R\}}{M^2 \cdot D_L D_R}$$

基礎行列 F は 2 台のカメラの結像特性と相対的な位置関係で決定される。基礎行列の算出法には、対応付けのなされた複数の対応点対から最小二乗法で求める方法の他にロバスト推定[5]を用いて求める手法、くりこみ法[6]などが提案されている。

対応する画像上の 2 点を

$$m_1 = (x_1, y_1, 1), m_2 = (x_2, y_2, 1)$$

とすると、基礎行列 F は

$$u^T f = 0$$

と表すことが出来る。

基礎行列は以下の連立方程式より求められる

$$u^T = (x_1 x_2, y_1 x_2, x_2, x_1 y_2, y_1 y_2, y_2, x_1, y_1, 1)$$

$$f = (F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{31}, F_{32}, F_{33})$$

そして、求めた基礎行列 F を用いて 3 次元情報復元を行う。

画像中の点の斉次座標を $m=(u,v,1)$, 空間の点の斉次座標を $M=(X,Y,Z,1)$ とすると

$$m \approx PM$$

(\approx は定数倍をして等しいことを表す)

となる。P は透視投影行列 (3x4)

基礎行列 F を特異値分解する。任意の $m \times n$, ランクが k の行列 F は、それぞれ $m \times n$ の直交行列 U, V と k 個の対角成分のみが 0 でない対角行列の D の積として、 $F = UDV^T$ と分解できる。

$$D^{-1} = \begin{pmatrix} 1/r & 0 & 0 \\ 0 & 1/s & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \text{ とおくと}$$

$$E = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$P_1 = (I | 0),$$

$$P_2 = (UD^{-1}EV^{-T} | U(0,0,\gamma)^T)$$

を得る。この P_1, P_2 がそれぞれのカメラの透視投影行列である。

3.5 ロボットによる局所地図作成

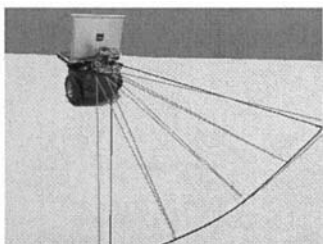


図 3.5 ロボット搭載センサによる自由空間検出の模式図

3.5.1 単眼カメラによる自由空間検出

障害物の検出に用いるエッジ抽出法には Canny Edge Detector を用いた。室内環境において障害となる壁・机・椅子・コードなどには繋がった長いエッジが検出されることが期待できる。また、均質でない床（カーペット）や床面上の小さな物体（塵、ネジ程度の大きさ）のように移動の妨げにならないエッジが検出される。これらのエッジと区別するためにエッジの長さを利用し、エッジの長さが閾値以下であれば削除する。図 3.5.1.1 の白線で示すようなエッジが得られた場合、白い矢印で示すように画像の最下端から上方向に走査する。最初にエッジと衝突する点を障害物の検出された点とし、衝突するまでを自由空間とする。エッジ抽出画像を図 3.5.1.2 に、エッジ処理による自由空間検出を図 3.5.1.3 に示す。自由空間は白色で表している。

3.5.2 超音波センサによる自由空間検出

超音波センサは超音波を発振して対象から反射した超音波を受信することで、その経過時間から距離を算出する。そのため、単眼カメラによる自由空間検出の弱点である床面上の誤ったエッジに影響を受けない。画像情報による自由空間検出を補完する情報源として有効である。

超音波センサは移動ロボット前方に 20 度間隔で 4 つ装備している。単眼カメラの水平画角は 69.5 度。そのため、1 つの超音波センサと対応した画像中に占めるピクセル数は $20/(69.5/640) \approx 194\text{pixel}$ 。よって入力画像を 0-124,125-319,320-514,515-639pixel と 4 分割することで、入力画像と超音波センサを対応させた。

図 3.5.4 の座標系変換を使用して、超音波センサで取得した距離情報を画像情報に変換し、画像中に表示する。超音波センサによる自由空間検出を図 3.5.2.1 に示す。

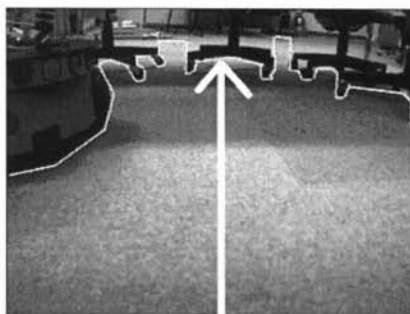


図 3.5.1.1 自由空間検出方法

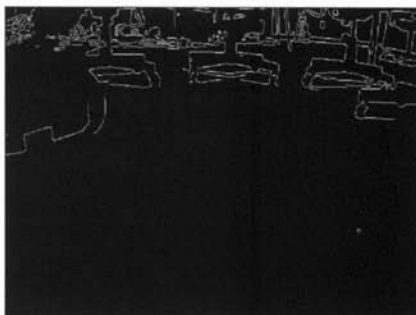


図 3.5.1.2 エッジ抽出画像



図 3.5.1.3 単眼カメラによる自由空間検出



図 3.5.2.1 超音波センサによる自由空間検出
(黒線はソナー領域の分割を表現している)

3.5.3 ロボット搭載センサの統合による自由空間検出

ロボットによる自由空間領域判定は、単眼カメラによる自由空間検出結果と超音波センサによる自由空間検出結果を重ね合わせ、AND 処理を行い、抽出した結果を最終的にロボットが判定した自由空間領域とした。

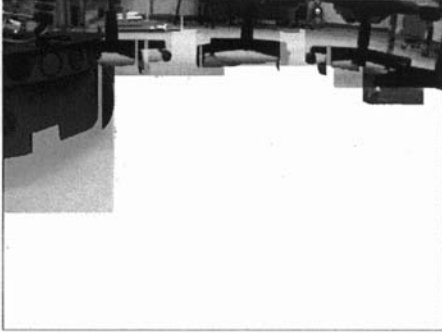


図 3.5.3 ロボットによる自由空間判定領域

3.6 局所地図の作成

ロボットから得られた観測データをもとに変換を行い局所地図を作成する。その結果を図 3.6 に示す。観測された自由領域を白色として表示している。

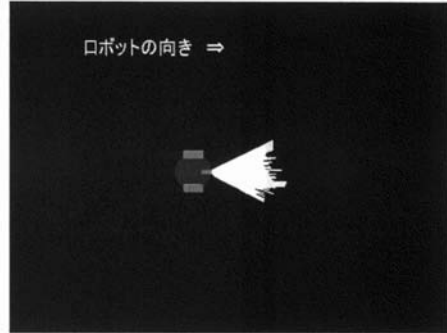


図 3.6 局所地図作成結果

3.5.4 カメラ座標系から実空間座標系への変換

3.5.3 で得られた座標データから座標変換することにより一つの視点における地図が作成できる。単眼カメラを用いているため $Y=0$ (ロボット搭載カメラにおいて観測される点は床面上に存在する) という拘束のもとに座標変換を行う。変換式は以下のとおりである。

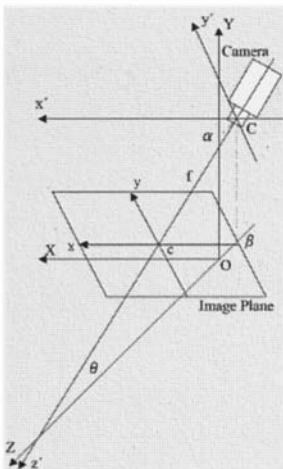
$$X = \frac{\alpha x}{y \cos \theta - f \sin \theta}$$

$$Z = \alpha \frac{y \sin \theta + f \cos \theta}{y \cos \theta - f \sin \theta} + \beta$$

X, Z : ロボット座標系

x, y : デジタル画像座標系

α は高さ, f は焦点距離, θ は角度



4. 実験結果

4.1 実験条件

前章で述べた方式に基づき天井ステレオカメラと移動ロボット搭載センサによる環境学習システムを汎用パソコン上のソフトウェアとして試作し、提案手法の有効性を確認する実験を行った。

開発言語は Microsoft Visual Studio C++ 2005 を使用した。

天井ステレオカメラ接続 PC については、OS は WindowsXP Professional, CPU は Pentium4 3.8GHz Memory は 1.0GByte, パソコンへの動画の取り込みには Matrox 社製 MeteorII キャプチャボードを用い、処理画像の解像度は VGA(640×480)。カメラは Canon 社製の VC-C50iR を使用した。

移動ロボット接続 PC については OS は WindowsXP Professional, CPU は Core2Duo T7600 2.33GHz×2 Memory は 2.0GByte。

移動ロボット本体は ActiveMedia 社製 Pioneer3-DX8, 画像の取り込みには IEEE1394 接続カメラを用い、処理画像の解像度は VGA(640×480)。カメラは PointGreyResearch 社製の Flea を使用した。

4.2 実験場所

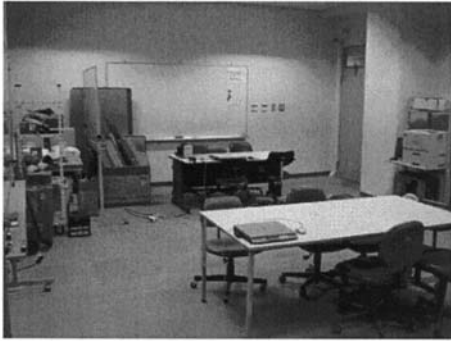


図 4.2 実験場所 (2 階実験室 3)

4.3 大局地図の作成

実験時の天井ステレオカメラ入力画像を図 4.3 に示す。

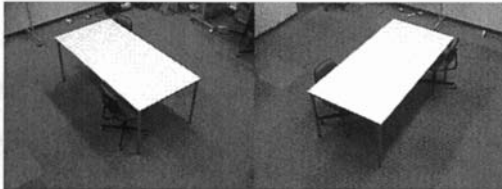


図 4.3 天井ステレオカメラ画像

4.4 天井ステレオカメラによる大局地図

3.3 の手順に従って

天井ステレオカメラからの観測データをもとに 3 次元情報を取得、座標変換を行い大局地図を作成する。

図 4.4 では自由空間を白、遮蔽空間を黒として表示している。この遮蔽空間は図 4.3 画像中の机である。

大局地図内の実環境を模式的に表現した図が図 4.4 の模式図である。模式図中の円と四角形はそれぞれロボットの障害物となりうる机の脚と椅子を表現している。

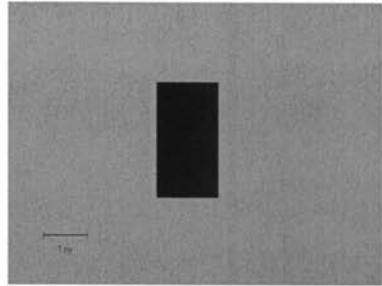
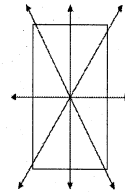


図 4.4 大局地図作成結果と模式図



4.5 ロボット観測データによる自由空間検出と局所地図

遮蔽領域である机は四角形である。そこで、環境地図作成のターゲットとして四角形を検出する。(Intel 社 Open Source Computer Vision Library : OpenCV のサンプルプログラムを利用)。検出された四角形の重心から各頂点方向に 4 点の観測点を設定し、さらにその 4 点で構成する

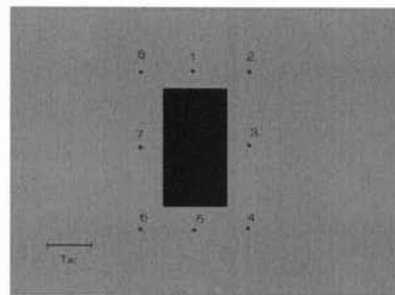


図 4.5.1 探索点設定

四角形の辺の中点を観測点とした。8 点の観測点が設定される。

ロボットを設定した観測点へ移動させ、領域の重心方向に向き直り自由空間検出を行い、局所地図を作成する。

8 つの視点それぞれのロボット搭載センサの統合による自由空間検出結果およびそのときの局所地図を図 4.5.1 に示

す。

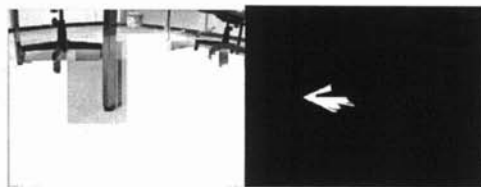
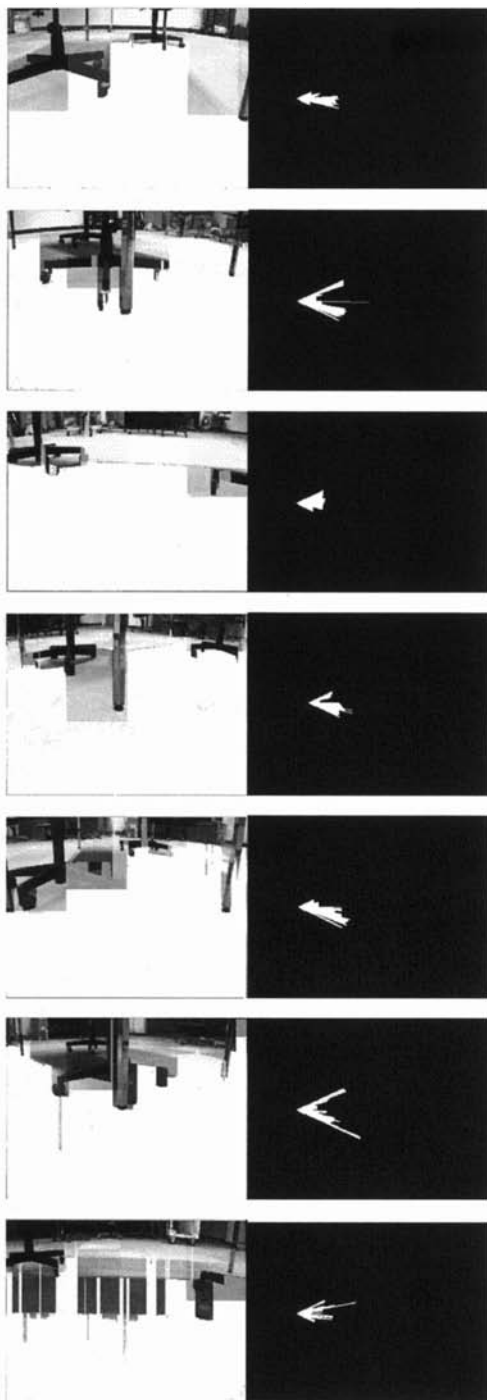


図 4.5.2 観測点1～8における自由空間検出結果及び局所地図

結果の有効性を検証するため

画像下側から見て障害物が観測されるべき画素で、障害物と認識していない割合を False Reject Ratio(FRR), 画像下側から見て障害物が観測されるべきでない画素で、障害物と認識した割合を False Accept Ratio(FAR)と定義し求めた。

表 4.4. エッジ処理のみの自由空間

観測点	1	2	3	4	5	6	7	8
FRR(%)	6.6	13.0	10.8	25.8	23.6	18.9	14.2	13.6
FAR(%)	10.2	0.2	47.0	17.5	1.3	34.4	73.4	38.6

表 4.4.1 統合情報自由空間

観測点	1	2	3	4	5	6	7	8
FRR(%)	1.9	8.1	2.8	9.4	8.6	18.0	0.4	11.6
FAR(%)	40.0	26.1	50.3	30.8	26.4	32.3	87.0	46.6

4.6 統合結果

各観測点における局所地図(自由空間検出結果)を大局地図と統合し地図を更新した結果を図 4.4.2 に示す(白色が統合した結果自由空間と判定された領域)。

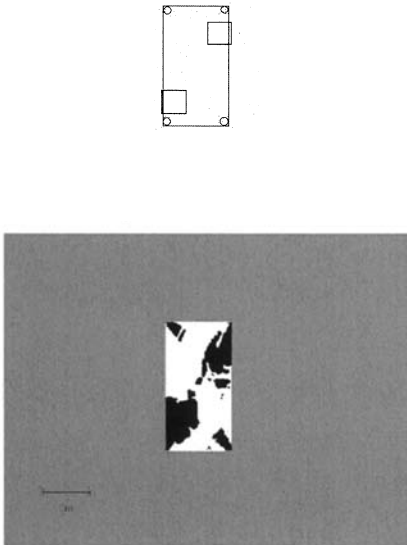


図 4.4.2 実験環境の模式図と地図更新結果

5. 考察

実験結果より、単眼カメラと超音波センサの統合によって FRR の値が単眼カメラのみの自由空間検出と比較して全体的に向上した。このことから、ロボットの障害物認識の信頼性は向上したといえる。

しかし本手法では単眼カメラのみの自由空間検出と比較して FAR の値が全体的に大きくなった。

これは、入力画像に対する単眼カメラによる走査は 640 であるのに対し、超音波センサの走査は 4 つであることに加え情報の統合に AND 処理を使用しているためと考えられる。

このことは、地図更新結果を模式図と比較して椅子によって検出されるはずの遮蔽領域が大きく検出されていることが統合地図からも見て取れる。

AND 処理を行うことで切り捨てられる情報を有効に利用するには、それぞれのセンサに対する障害物の存在確率を利用して障害物判定を行う考え方であるベイズの定理

を使用した処理を使用する方法が考えられる。

6. おわりに

天井ステレオカメラと移動ロボット搭載センサを併用し、大局地図と局所地図の統合による環境学習の枠組みを作成することが出来た。また、移動ロボット搭載センサの統合により自由空間探索の信頼性の向上が実現できた。

今回はオフライン処理だが環境の変化を検出し、移動ロボットによる自由空間探索、環境地図の更新の一連の流れを自動で処理するシステムを構築することで実用的なシステムになると考えられる。

謝辞

研究の遂行にあたりご指導を頂いた渡邊研究室のスタッフの皆様へ感謝致します。下脇克友氏には、本研究の一部は、科学研究費補助金 18500137 の助成を受けて行った。

参考文献

- [1]経済産業省総務部技術調査課,「ロボットに関する特許出願技術動向調査」, 2002
- [2]三浦純, 白井良明「不確かを考慮した移動ロボットのための視覚とそのプランニング」, 情報処理学会論文誌, コンピュータビジョンとイメージメディア, vol.44, No. SIG-17(CVIM 8), pp.37-50, 2003
- [3]大澤奈々穂, 佐川立昌, 越後富夫, 八木康史, 「移動ロボットによる環境認識のための実時間距離画像位置合わせ」, 情報処理学会研究報告, 情報処理学会, no.2005-CVIM-149, pp.111-118, 2005
- [4]Harris, C. and Stephens, M.: 「A COMBINED CORNER AND EDGE DETECTOR」, In 4th Alvey Vision Conference, pp.147-151, 1988.
- [5]Zhang, 「A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the knownepipolar geometry」, Artificial Intelligence Journal, 78, pp.87-119, 1995
- [6]三島等, 金谷健一, 「基礎行列の最適計算とその信頼性評価」研究報告「コンピュータビジョンとイメージメディア」 No.118, 1999