

距離センサの移動に基づく3次元環境地図の逐次的構築

平澤 宗伸[†] 杉本 晃宏^{††} 井宮 淳^{†††}

[†] 千葉大学 自然科学研究科 ^{††} 国立情報学研究所 ^{†††} 千葉大学総合メディア基盤センター

あらまし 本論文では、移動式距離センサを用いた3次元環境地図の構築について述べる。本研究で用いるセンサは、距離センサと回転雲台から構成されており、立体角 2π [sr] の空間を距離画像として一度に取得できる。広域な平面環境地図を構築するため、距離センサを移動する。移動前後の各距離画像から平面を抽出し、平面環境地図を構築する。続いて、各距離画像から抽出された平面の対応を用いて、距離センサの回転と並進による移動量を推定する。推定した移動量を用いて平面環境地図を重ね合わせ、対応付けのとれた平面を併合する。実験により平面環境地図を構築し、提案手法の有効性を確認する。

Incremental Modeling of 3D Environment using a Mobile 3D Scanner

Munenobu HIRASAWA[†], Akihiro SUGIMOTO^{††}, Atsushi IMIYA^{†††}

[†]School of Science and Technology, Chiba University ^{††}National Institute of Informatics

^{†††}Institute of Media and Information Technology, Chiba University

Abstract We develop a mobile 3D scanner, which is a laser scanner mounted on a turning table, for three-dimensionally measuring the surrounding environment. We then develop a method using this sensor for constructing 3D model of the environment. In addition, we propose a method for incrementally updating the environment model according to the motion of the sensor where the correspondence between planes before and after a motion of the sensor is established and then used for estimating the motion.

1 はじめに

距離センサやデジタルカメラなどから外界の情報を取得し、計算機内にその3次元形状を表す環境地図を構築する研究が盛んである。それらの研究は、屋外の広い範囲を対象とするもの [6, 1] から、比較的狭い屋外環境や屋内環境を対象とするもの [8, 4, 5, 7] まで様々である。このような研究によって構築された3次元環境地図は、ロボットのナビゲーションや物体の3次元形状の電子的保存などに利用可能である。また、実世界の環境に基づいた仮想空間を構築する上で必要不可欠な技術であり、今後ますますその重要性が増すと考えられる。

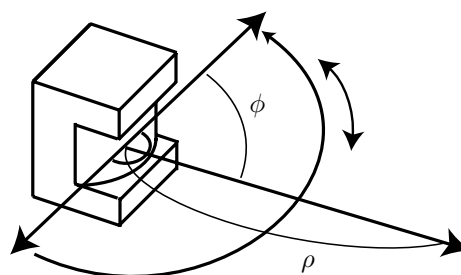
固定視点のセンサから獲得できる外界の情報は限られている。そのため、広範囲な3次元環境地図を構築しようとした場合、センサを移動させる必要がある。さらに、移動前後に計測された外界の情報を整合するように

統合しなければならない。そのためには、センサの移動量を推定し、その結果に基づいて移動前後の情報の位置合わせを行い、さらに、重複する情報を併合することが必要となる。

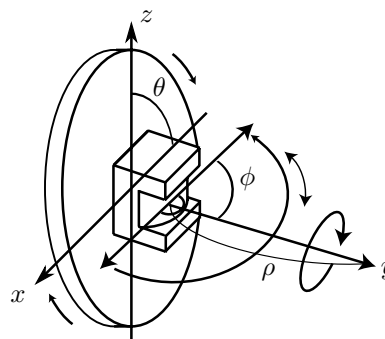
移動量の推定と環境地図の統合に関して、大澤ら [5] は、距離センサを用いて環境地図を構築する手法を提案している。そこでは、ICP法を用い、実時間でセンサの移動量を推定している。しかし、その手法はICP法が適用可能な範囲内でのセンサの移動量を前提としているため、移動量が大きくなった場合にその手法を適用することは難しい。Wolfら [8] は、GPSと走行情報から移動量を推定する手法を提案している。しかし、適用可能範囲がGPSが利用可能な範囲に限定され、地下の屋内などGPSが利用可能でない場所に対してこの手法をそのまま適用することはできない。一方、Nagataniら [4] は、距離画像の相関関係から移動量を推定する手法

を提案しているが、室内など平面領域が多い場所では、相関関係から得られる情報の信頼性が低下するため、屋内での適用は難しいと考えられる。

本研究では、まず、平面的に計測可能な距離センサを回転雲台に搭載し、立体角 2π の空間を 3 次元に計測可能な回転式距離センサを構築する。移動量を推定するためには移動前後での計測範囲に重複が必要であるが、広角な距離センサを構築することで、移動量が多い場合でも推定が可能となる。そして、この回転式距離センサを用いて広範囲な室内環境の 3 次元環境地図を構築する手法を提案する。ここでは、室内空間に多く存在する平面に着目し、平面で 3 次元環境地図を表現することを考える。測定誤差などを考慮して適応的に平面領域を抽出し、その領域を表現する平面パラメタを推定することによって、3 次元平面環境地図を構築する。そして、平面对応を利用してセンサの移動量を推定し、その結果に基づいて移動前後の 3 次元平面環境地図の位置合わせを行う。さらに、平面对応関係に基づいて平面を併合することにより 3 次元平面環境地図を更新する。このとき、少ない計測回数で広範囲な環境地図を構築するため、移動量推定の誤差蓄積を軽減することが期待できる。実データを用いた実験によって、提案手法の有効性を確認する。



(a) 距離センサによる測定



(b) 回転式距離センサによる測定

図 1: 距離センサの測定動作

2 回転式距離センサ

距離センサを回転雲台に取り付け、3 次元の測定を可能とした回転式距離センサを構築する。回転式距離センサは、図 1(b) の様に雲台により距離センサを回転するようにしたものである。また、これを移動可能な筐体に取り付け、任意の場所での測定を可能とする。構築した回転式距離センサの外観を図 2 に示す。

距離センサとして SICK 社の LMS200 を使用する。この距離センサは、レーザを使用した飛行時間法により距離を測定する。そのため、鏡面体、透明体、反射の無い物体などは計測できない。この距離センサは図 1(a) に示すように、平面内を走査して測定対象までの距離を測るセンサであり、レーザの発射角 ϕ と測定距離 ρ の 2 次元情報を得ることができる。距離センサの仕様を表 1 に示す。表中の ‘/’ は複数の測定モードがあることを示す。

回転式距離センサを構築するために用いた回転雲台の仕様を表 2 に示す。距離センサのレーザ発射角 θ は $0 \leq \theta \leq 180[\text{degree}]$ の値をとり、回転雲台の回転角 ϕ は $0 \leq \theta \leq 180[\text{degree}]$ の値をとるので、この回転雲台



(a) 距離センサ全体

(b) 距離センサ頭部

図 2: 構築した距離センサの外観

表 1: 距離センサの仕様

計測範囲 [degree]	180
計測距離 [m]	8/16/32/80
測定分解能 [mm]	10
角度分解能 [degree]	0.25/0.5/1
システム誤差 [mm]	± 15 (計測範囲 1 ~ 8[m]) ± 40 (計測範囲 1 ~ 20[m])
統計的誤差 [mm]	5 (mm モード)

表 2: 回転雲台の仕様

角度分解能 [degree]	0.01
絶対位置決め精度 [sec]	150



図 3: 測定風景

に距離センサを搭載することによって、立体角 2π [sr] の半球状の空間を測定することができる。

測定時に得られる θ と ϕ , 及び測定対象までの距離 ρ から, x, y, z から成る直交座標系での 3 次元座標を得ることができる。このときの直交座標系への変換式は

$$\begin{cases} x = -\rho \sin \theta \cos \phi, \\ y = \rho \sin \theta \sin \phi, \\ z = \rho \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

と表せる。また, 座標系の原点は, 距離センサのレーザーの発射中心と一致している。

雲台の回転角が θ , 雲台上の距離センサのレーザー発射角が ϕ のときの測定点を $p(\theta, \phi)$ とする。また, 雲台が 1 回の回転により角 δ だけ回転し, レーザの発射角が測定点ごとに角 ϵ 変化するものとする。ここで, $p(\theta \pm \delta, \phi)$, $p(\theta, \phi \pm \epsilon)$, $p(\theta \pm \delta, \phi \pm \epsilon)$ を $p(\theta, \phi)$ の 8 近傍とする。このようにして, 測定点間に近傍の概念を導入することができる。

図 3 の環境で測定を行った結果を図 4 に示す。図 4 は測定した点を描画したものである。

3 平面環境地図

室内空間には壁や床, 机など多数の平面が存在する。従って, 距離画像からこれらの平面を抽出し, 平面により環境地図を記述することで, 大局的な 3 次元環境を把握することができる。

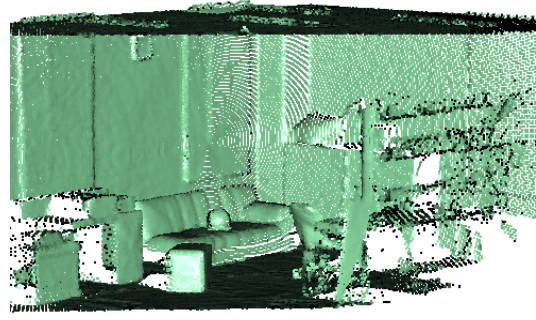


図 4: 測定結果

3.1 平面領域の抽出

平面で環境地図を記述するために, 距離画像から平面を抽出する。ここでいう平面とは, 同一平面上に存在する距離画像中の点群のことである。

3 次元空間中の平面は, $\mathbf{n} = (a, b, c)^T$ を用いて,

$$\mathbf{n}^T \mathbf{p} + d = 0 \quad (2)$$

満たす点 $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ の集合として表すことができる。この, 定数 a, b, c, d の値の組のことを平面パラメタとよぶ。

各測定点について局所的に平面パラメタを計算した場合, 同一平面上の点に対しては互いに等しい値になるはずである。そこで, 平面を抽出するため, 各点について局所的に平面パラメタを計算する。

各測定点における平面パラメタの計算にはその近傍点を利用する。ここで, 近傍を広くとると, 誤差の平均化により測定誤差の影響を減らすことができる。しかし, 近傍を広くとりすぎると, 同一平面上にない測定点まで計算に利用してしまう。そこで, 計算に利用する近傍に含まれる点を適切に選択する必要がある。

測定点は測定誤差を持ち, 距離画像は点の分布に偏りを持つため, 近傍を一様に与えることは好ましくない。測定誤差が多いときには近傍が広くとられ, 近傍での曲率が大きいときには, 局所的に平面パラメタを計算するために近傍が狭くとられる必要がある。そのため, Lalonde らの手法 [3] を利用し, 測定点 p_i に対して

$$r_i = \frac{1}{\kappa_i} \left(d_1 \frac{\sigma_i}{\sqrt{\epsilon \rho_i}} + d_2 \sigma_i^2 \right) \quad (3)$$

により与えられる r_i を近傍の半径として, 近傍を適応的に決定する。ここで, κ_i は p_i の近傍の曲率を表し, σ_i は計測誤差の偏差, ρ_i は近傍点の密度を表す。また, d_1, ϵ, d_2 はそれぞれ定数である。実際には次の手順により平面パラメタを計算する。

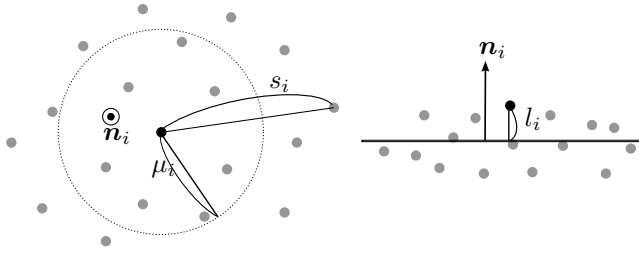


図 5: 近傍点の様子 (左図は法線方向から見た近傍点 . 右図は法線に垂直な方向から見た近傍点) .

1. 各測定点 $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T (i = 1, 2, \dots, n)$ について値 r_i を与え, p_i を中心とした半径 r_i の球内を p_i の近傍とする. ここで, n は測定点の数である.
2. すべての p_i について, p_i の近傍内にある測定点 $p_{ij} (j = 1, 2, \dots, m_i)$ を近傍点として選択する. ここで, m_i は p_i に対する近傍点の数である.
3. p_{ij} からモーメント列

$$M_i = \sum_{j=1}^{m_i} (p_{ij} - \bar{p}_i)(p_{ij} - \bar{p}_i)^T \quad (4)$$

を計算する. ここで,

$$\bar{p}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} \quad (5)$$

である.

4. M_i の最小固有値に対応する固有ベクトルを正規化し, p_i における平面パラメタの法線 $n_i = (a_i, b_i, c_i)^T$ とする. また, $n_i^T \bar{p}_i + d_i = 0$ を満たす d_i を計算する. ただし, $d_i \geq 0$ となるように n_i の向きを定める. ここで計算した a_i, b_i, c_i, d_i が p_i における局所的な平面パラメタとなる.
5. 全ての p_i について p_{ij} から,

$$\rho_i = \frac{m_i}{\pi s_i^2} \quad (6)$$

$$\kappa_i = \frac{2l_i}{\mu^2} \quad (7)$$

を計算する. ここで, $s_i = \max_j |p_i - p_{ij}|$, $l_i = |n_i^T p_i + d_i|$, $\mu_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} |n_i^T p_{ij} + d_i|$, である. 各値に関する説明を図 5 に示す. ここで, ρ_i は p_i の近傍における測定点の密度, κ_i は曲率と考えることができる.

6. p_i からランダムに k 点選択し, p_i に対して計算された値から,

$$\sum \left| r_i - \frac{1}{\kappa_i} \left(d_1 \frac{\sigma_i}{\sqrt{\epsilon \rho_i}} + d_2 \sigma_i^2 \right) \right|^2 \quad (8)$$

が最小となるような d_1, d_2 を計算する.

7. 選択した k 点のうち, 閾値 α に対して

$$\left| r_i - \frac{1}{\kappa_i} \left(d_1 \frac{\sigma_i}{\sqrt{\epsilon \rho_i}} + d_2 \sigma_i^2 \right) \right| \leq \alpha \quad (9)$$

である点の数を数え, k' とする.

8. 6, 7 を数回繰り返す, k' が最大のときの d_1, d_2 を利用する. 全ての p_i に対して式 (3) により r_i を与え直し, 2 に戻り計算を繰り返す.

9. 2~8 を繰り返した結果, 4 において計算された平面パラメタを測定点 p_i に対する局所的な平面パラメタとする.

以上により, 各測定点 p_i に対する平面パラメタを求めることができる.

次に, 求めた平面パラメタと測定点の隣接関係を利用して, 同一の平面に含まれる点群を抽出する. 回転式距離センサの特徴から, 距離画像中の各点の近傍系が既知である. よって, 平面パラメタが等しく, 隣接関係にある点群を, 1 つの平面として抽出する. その手順を次に示す.

1. p_i に対する法線 n_i を $a_i = \sin \theta_i \cos \phi_i$, $b_i = \sin \theta_i \sin \phi_i$, $c_i = \cos \theta_i$ として極座標で表し, 定数 A, B, C を用いて $a'_i = [\theta_i/A]$, $b'_i = [\phi_i/B]$, $c'_i = [d_i/C]$ として離散化する.
2. a'_i, b'_i, c'_i が等しく, 8 近傍により接続されている測定点を, 同一平面上にある点としてグルーピングする.
3. グループに含まれる点の数が閾値以上の点群を平面領域とし, グループ内の各点と, その最近傍点の 2 乗の和が大きい順に出力する.

3.2 抽出した平面の平面パラメタの計算

抽出した平面領域に対して平面を当てはめる. ここでは, 最小二乗法を用いて平面パラメタを計算する. しかし, 例外値が含まれる可能性があるため, そのまま最小二乗法を用いることは適当ではない. そこで, LMedS 法を用いて例外値を除去する.

LMedS 推定は誤差や例外値に大きく左右されないロバストな手法であり, 岩田 [2] においてもその有効性が確認されている. そこで, まず LMedS 推定を用いて平面パラメタを計算する.

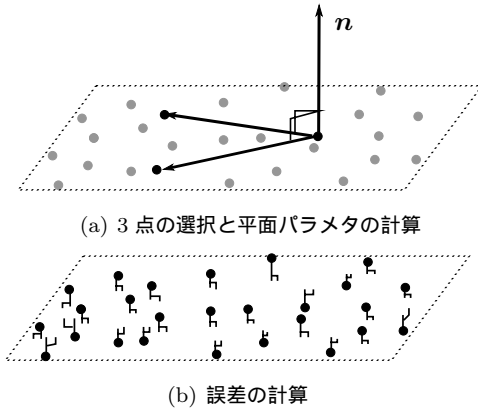


図 6: 平面パラメタの推定 ((a) は、3 点を選択して外積から平面の法線 n を計算する様子 . (b) は、点群と平面との距離を計算する様子 . (b) 中の短い棒が平面との距離).

LMedS 推定では、図 6(a) に示すように平面領域として抽出された点群からランダムに 3 点を選択して、選択した 3 点から外積を計算する . ここで得られたベクトルを平面パラメタの n として平面パラメタを計算して、図 6(b) に示すように点群と平面との距離を計算する . その距離を誤差として誤差の中央値を求め、誤差の中央値が最小の平面パラメタを推定結果とする .

いま、平面領域として抽出された点群のうち $e\%$ の点が例外値であると仮定する . このとき、点群から 3 点を選択したときに例外値が 1 つも無い確率は $(1-e)^3$ であるので、 n 回の繰り返しにより推定をしたとき、選択した 3 点の組に少なくとも 1 つは例外値が含まれない . つまり、正しい値が計算できる組が存在する確率 $P(e)$ は次の式で与えられる .

$$P(e) = 1 - \{1 - (1 - e)^3\}^n . \quad (10)$$

次に、LMedS 推定により計算した平面から閾値以上離れている点を例外値として除去する . 最後に、最小二乗法により平面パラメタを計算して平面を当てはめる .

4 平面環境地図の更新

広範囲な平面環境地図を構築するため、回転式距離センサを移動し、移動に伴い逐次的に平面環境地図を更新する . そのためには、センサの移動量を推定し、移動にあわせて平面環境地図を座標変換する必要がある . ここでは、回転式距離センサが移動する前後の平面環境地図中の、平面の対応関係を求めることで移動量を推定する .

4.1 回転式距離センサの移動量の推定

4.1.1 3 平面の対応付けによる移動量の推定

回転式距離センサの移動に伴う座標変換は、回転行列 R と並進ベクトル t を用いて

$$p' = Rp + t \quad (11)$$

と書くことができる . ここで、 p はセンサが移動する前の環境地図中の点であり、 p' が座標変換後の値である . このとき、センサが移動する前の環境地図中の、ある平面の平面パラメタ a, b, c, d に対して、座標変換された平面パラメタは、

$$n' = Rn \quad (12)$$

$$d' = d - n'^T t \quad (13)$$

となる . ここで、 $n' = (a', b', c')^T$ とする .

回転式距離センサが移動する前の平面環境地図と移動後の平面環境地図からそれぞれ 3 平面を選択する . その法線をそれぞれ $n_i (i = 1, 2, 3)$, $n'_i (i = 1, 2, 3)$ としたとき、

$$[n'_1, n'_2, n'_3] = R'[n_1, n_2, n_3] \quad (14)$$

を満たす行列 R' が計算できる . このとき、選択した 3 平面がそれぞれ対応関係にあり、互いに並行でなければ、 R' はセンサの移動を表す回転行列となる . また、3 平面は 1 点で交わることから、移動前の平面環境地図から選択した 3 平面の交点を q 、移動後の平面環境地図から選択した 3 平面の交点を q' とすると、

$$q' = R'q + t' \quad (15)$$

を満たす並進ベクトル t' が計算できる .

計算誤差などを考慮しなければ、全ての対応する平面について、 $R := R', t := t'$ として式 (12),(13) が成り立つ . よって、以下の手順により、平面の対応関係を求め、移動量を推定することができる .

1. 回転式距離センサが移動する前後の平面環境地図からそれぞれ 3 平面を選択する .
2. 選択した 3 平面がそれぞれ対応関係にあると仮定して回転行列 R' と並進ベクトル t' を式 (14)(15) から計算する .
3. R' と t' を用いて回転式距離センサが移動する前の平面環境地図を変換した結果、移動後の平面環境地図中の平面と平面パラメタが一致するものがある平面の数を数える .

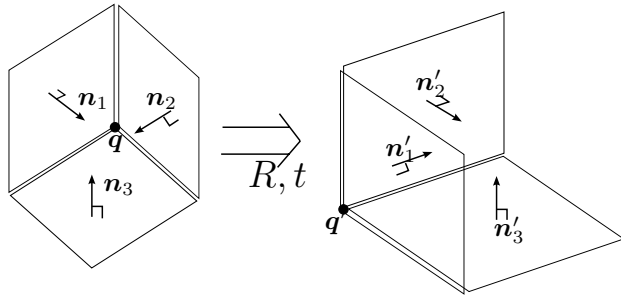


図 7: 回転式距離センサ移動前後の平面環境地図

4. 1~3 を繰り返し，平面の一致した数が最多のときの R', t' を，推定結果とする．

ここで述べた平面と回転行列 R ，並進ベクトル t との関係を図 7 に示す．

4.1.2 推定移動量の修正

4.1.1 では 3 平面の対応関係に基づいて移動量の推定を行った．しかし，平面環境域中にはより多くの対応する平面が存在する．そこで，4.1.1 において対応関係の認められた全ての平面から回転行列と並進ベクトルを計算する．このことで，より整合性のある移動量が求められる．

回転式距離センサが移動する前後の平面環境地図において，対応付けのとれた平面の平面パラメタをそれぞれ， n_i, n'_i および $d_i, d'_i (i = 1, 2, \dots, k)$ とする．ここで， k は対応付けのとれた平面の数である．

回転行列は並進ベクトルの計算に影響を及ぼすため，こちらを先に計算する．回転行列は

$$\sum_{i=1}^k \left| n'_i - \hat{R} n_i \right|^2 \quad (16)$$

が最小となるような \hat{R} を計算することで得られる．次に，式 (13) の関係から，先に計算した回転行列 \hat{R} を用いて

$$\sum_{i=1}^k \left| d'_i - (d_i - \hat{t}^T \hat{R} n_i) \right|^2 \quad (17)$$

が最小となる並進ベクトル \hat{t} を計算する．

この \hat{R}, \hat{t} を最終的な移動量の推定結果とする．複数の平面の対応付けから回転行列 R と並進ベクトル t を計算する過程を図 8 に示す．

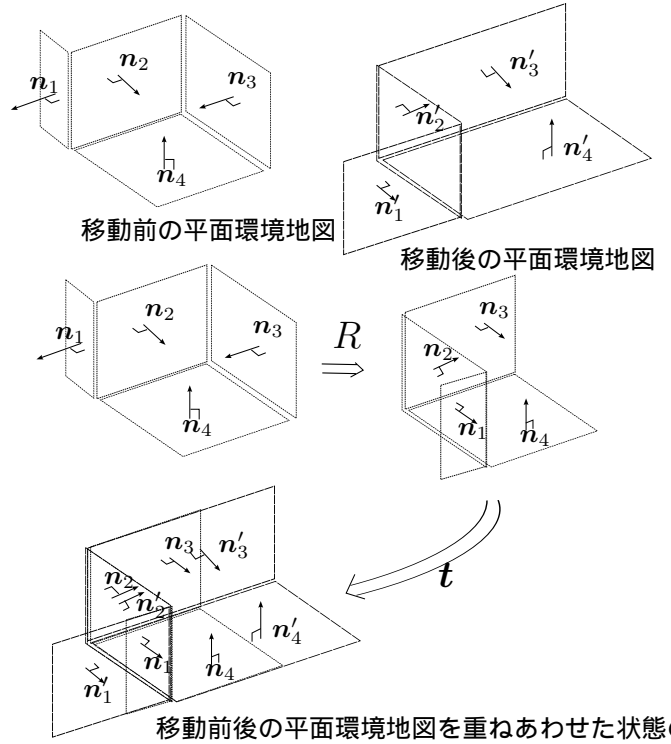


図 8: 推定移動量の修正

4.2 平面の併合

前節において，回転式距離センサの移動量を推定した．これを用いて，センサの移動前の平面環境地図を座標変換し，移動後の平面環境地図に重ねあわせることができる．

ここで，回転式距離センサの移動前後の平面環境地図には計測領域の重複が存在する．そこで，座標変換後，センサの移動量の推定の際に対応付けがなされた平面の組に対して，最小二乗法により平面パラメタを計算し直すことで，1 つの平面として記述する．

5 実験

構築した回転式距離センサにより距離画像を取得し，平面環境地図を逐次統合していくことにより，実際に広範囲な平面環境地図を構築する実験を行った．

実験環境は屋内であり，図 9 に示すような配置で行った．この中には，廊下と 2 つの部屋が含まれている．図中の番号は回転式距離センサによる測定位置の順番を表しており，矢印の向きがセンサの向きとなっている．各測定位置では，図 10 に示すような距離画像が得られた．この図は，距離画像を天井方向から見たものであ

る．図 9 中の①～④の番号がそれぞれ，図 9 中の番号と対応している．

回転式距離センサによる測定では回転雲台を $0.5[\text{degree}]$ ずつ回転させ，距離センサの角度分解能を $0.5[\text{degree}]$ として測定をした．また，距離センサの測定距離は最大で $8[\text{m}]$ とした．測定の結果，距離画像中には $(179.5/0.5 + 1) \times (180/0.5 + 1) = 129960$ の測定点が存在するはずである．しかし，計測範囲から外れた空間や，反射の無い物体等があるため，測定エラーが存在する．その結果，実際に得られる測定点の数は $300 \sim 500$ ほど少なくなった．

次に，距離画像から平面を抽出した．近傍点の選択の際に必要な測定点の誤差の偏差は， $(0.597 + 8.89 \times 10^{-4} \times \text{原点と測定点の距離})$ で与え，計算した値が 3.0 より小さい場合には 3.0 とした．距離画像中の点を平面としてグルーピングするときの平面パラメタの分散化は，角度については $\pi/9$ ，平面パラメタ d については 50 で分割した．平面として認識するために必要な点の数は 100 以上とした．

抽出した平面に対して平面パラメタを計算した．LMedS 推定における繰り返し回数は，式 (10) において例外値の割合 p を 0.3 としたときに式 (10) の値が 0.999 以上となるよう 17 回とした．また， 17 回の繰り返しを終えた後，推定結果を用いて実際の例外値を計算し，例外値の割合が 0.3 より大きいときには，不足回数分だけ繰り返し推定を行った．

3 平面から移動量を推定する際には，出力された順に 16 平面を選択し，その中から 3 平面を選択した．また，2 つの平面が等しいとみなすための条件は，2 つの平面の平面パラメタを n, n' と d, d' で表したとき， $n^T n' > \cos 1^\circ$ であり $|d - d'| < 10$ であるとした．

測定結果から平面環境地図を構築し，逐次的に統合した結果を図 11 に示す．2 部屋と廊下にまたがる，広範囲な平面環境地図が構築されていることが確認できる．また，平面部分から成る環境地図を構築することで，天井や壁，床など屋内の主要な 3 次元環境が把握可能であることが確認できた．

移動量推定の際の問題として，平面の対応付けが正しくなされない場合があった．これは，平面の抽出や平面パラメタの計算結果の不正確さと，計測領域により抽出される平面数が偏ることが主な原因だと考えられる．また，平面で表現できない部分の構築手法も課題となっている．

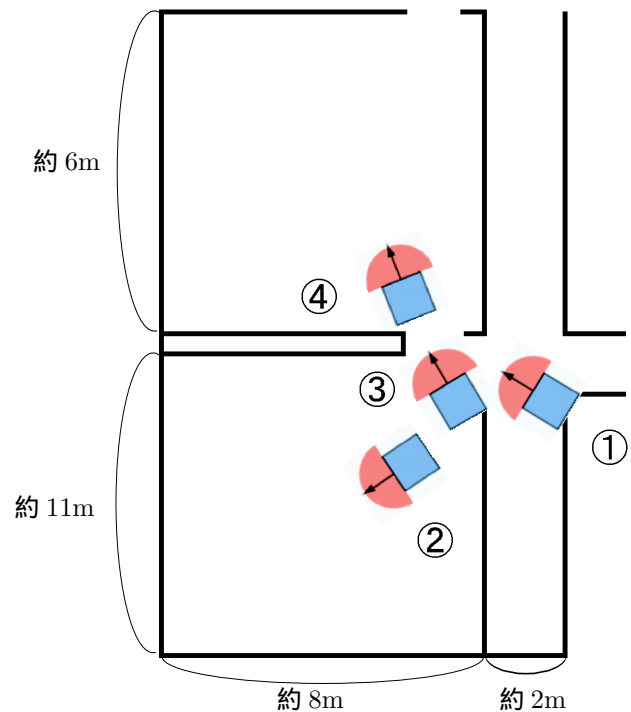


図 9: 実験環境

6 まとめ

立体角 $2\pi[\text{sr}]$ の空間を 3 次元的に測定できる回転式距離センサを構築した．このセンサを移動させ，平面对応を用いて移動量を推定できることを実験により確認し，実際に広範囲な平面環境地図を構築できることを確認した．

謝辞

本稿を執筆するにあたり，鳥居秋彦博士に多くの助言をいただいた．本研究費の一部は，科学研究費補助金 18049046 の補助を受けて行った．

参考文献

- [1] M. Fiocco, G. Boström, J. Gonçalves and V. Sequiera: “Multisensor fusion for volumetric reconstruction of large outdoor areas”, *Proc. of the Fifth Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 47–54 (2005).
- [2] 岩田城亮: “移動型距離センサを用いた 3 次元環境地図の構築”，千葉大学情報画像工学科 2004 年度卒業論文 (2005).

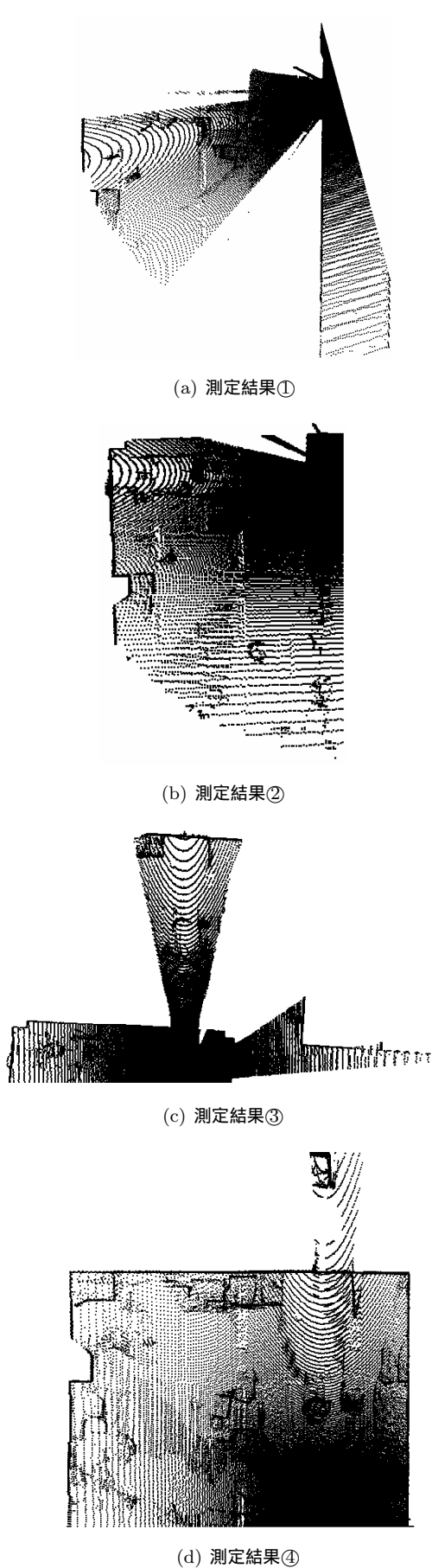


図 10: 回転式距離センサによる測定結果

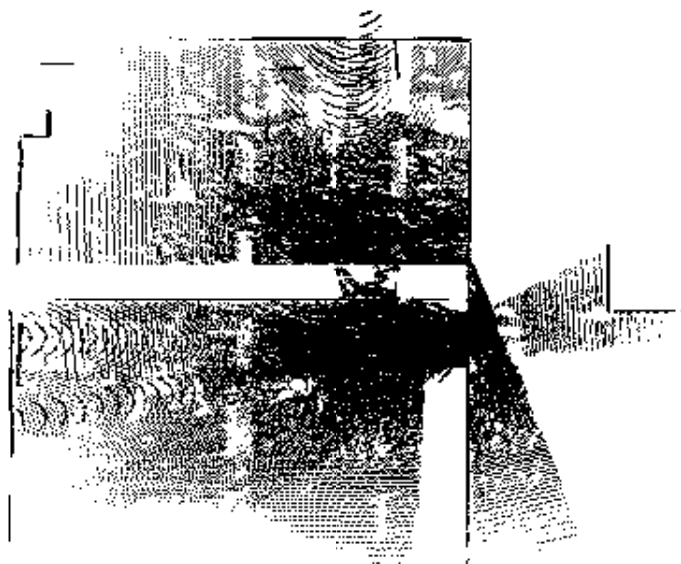


図 11: 実験結果

- [3] J. Lalonde, R. Unnikrishnan, N. Vandapel and M. Herbert: *Scale selection for classification of point-sampled 3-d surfaces*, CMU-RI-TR-05-01 (2004).
- [4] K. Nagatani, H. Ishida, S. Yamada and Y. Tanaka: “Localization and mapping for mobile robot in disaster environments”, *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3112–3117 (2003).
- [5] 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”, *情報処理学会研究会報告*, Vol. 2005, No. 38, pp. 111–118 (2005).
- [6] J. Overby, L. Bodum, E. Kjems and P. M. Ilsoe: “Automatic 3d building reconstruction from airborne laser scanning and cadastral data using hough transform”, *XXth ISPRS Congress*, B3-284 (2004).
- [7] Y. Sun, J. Paik, A. Koschan and M. Abidi: “3d reconstruction of indoor and outdoor scenes using a mobile range scanner”, *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*, Vol. 3, pp. 653–656 (2002).
- [8] D. F. Wolf, A. Howard and G. S. Shukhatme: “Towards geometric 3d mapping of outdoor environments using mobile robots”, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1258–1263 (2005).