

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

大澤 奈々穂, 佐川 立昌, 越後 富夫, 八木 康史
大阪大学 産業科学研究所

移動ロボットによる環境認識ではロボットの自己位置を推定すると同時に3次元環境モデルを作成する必要がある(SLAM問題).そこで,実時間レンジセンサから得られる距離画像を位置合わせすることにより,3次元環境モデリングとロボットの自己位置推定を同時に行う手法を提案する.本手法では,センサから得られる時系列距離画像を用いることで,外部センサや手動に頼ることなく実時間で距離画像の位置合わせを行う.位置合わせにはIterative Closest Point(ICP)法の派生法を用いるが,ここにセンサ精度を考慮した重み関数を導入し,精度による誤差を軽減する手法を提案する.実験では,センサの性能と位置推定の精度についての分析を行った.また,実際に移動ロボットにレンジセンサを搭載し,実時間環境モデリングとセンサ軌道の推定を行った.

Real Time 3D Environment Modeling for a Mobile Robot by Aligning Range Image Sequence

Nanaho Ohsawa, Ryusuke Sagawa, Tomio Echigo, Yasushi Yagi
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

This paper proposes real time 3D modeling of environment for a mobile robot by aligning range images. 3D modeling by mobile robot needs simultaneous localization and mapping (SLAM). We obtain range images by a real time laser range finder mounted on the robot and align them in real time for SLAM. Our method sequentially aligns range images by a variant of iterative closest point (ICP) method, therefore estimates the self-position of the robot without any external devices. Also we propose a new weighting scheme for an ICP method. In the experiment, we analyze the precision of the real time laser range finder and evaluate the accuracy of the estimation of robot's position. Finally we show the result of modeling and localization by the robot which mounts the real time range finder.

1 はじめに

ロボットが移動しながら環境モデリングを行うためには,自己位置と周囲の幾何形状とを同時に推定しなければならない.これはいわゆる simultaneous localization and mapping(SLAM)問題としてよく知られている[11].SLAMの達成のために,これまで移動量(オドメトリ),カメラ,レンジセンサ,慣性航法装置(INS),GPSといった様々なセンサが用いられてきた.

レーザレンジセンサを搭載して環境地図の作成を行うロボットや自動走行車は既に存在する[4][13]が,これらは自己位置の推定にINSやGPSといった外部センサを用いている.そこで本論文では,外部センサを用

いずレンジセンサから得られる距離画像のみを用いてSLAMを達成する手法を提案する.実時間レンジセンサを搭載したロボットを走行させて得られる周囲の距離画像一枚一枚からは部分的な情報しか得ることができない.そのため,周囲の環境全体のモデルを生成するには複数の観測点から計測を行う必要がある.本論文では,ロボットの位置に関する情報を外部センサから得られず,また距離画像同士の相対位置関係も未知であると仮定している.ゆえに,全体のモデルを生成するには距離画像間の相対位置を求め単一座標系に配置し直さなければならない.また,距離画像同士の相対位置を求めることはセンサの位置を推定していることと等し



図 1: カネスタ社 レーザレンジセンサ DP200

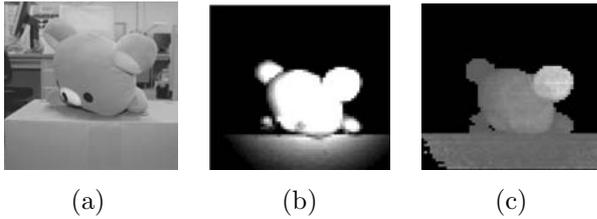


図 2: 距離画像の例: (a) 対象物体の写真 (b) 輝度値画像 (c) 距離画像

いので、全体の環境モデル生成とロボットの位置推定を同時に行うことができる。

計測で得られた距離画像同士は対応点探索と対応点間距離の最小化により位置合わせを行うが、本論文では iterative closest point (ICP) 法 [1][7][8] の派生法を用いる。ICP 法とは、距離画像間の最近傍頂点探索と対応点間距離を最小化するような変換行列の計算を交互に繰り返す方法である。本手法では [9][10] と同様に ICP 法を時系列距離画像に用いて逐次的に位置合わせを行い、実時間に環境モデリングを行う。

本論文で用いる実時間レーザレンジセンサ [2] は、よく物体形状モデリングに用いられる距離画像取得に時間のかかるレンジセンサ [3][5] よりもノイズが多いため、はじめにレンジセンサの精度評価を行う必要がある。次に、計測距離精度に基づく重みを用いた位置合わせ法を提案する。最後に、距離画像の位置合わせ精度を評価し、ロボットが任意の経路を走行した場合の位置推定と環境モデリングの結果を示す。

2 計測距離精度評価

2.1 実時間レンジセンサの計測可能距離

本論文では図 1 に示すカネスタ社のレーザレンジセンサ DP200 を用いる。このレンジセンサは赤外線光源

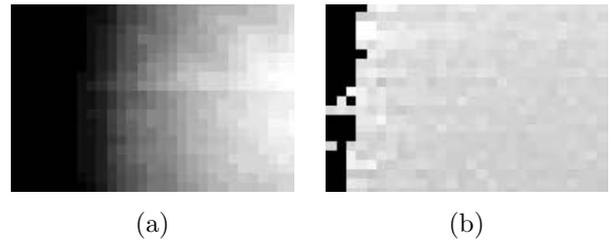


図 3: 黒から白へ徐々に色を変化させた平面を計測したときの輝度値画像と距離画像 (a) 輝度値画像 (b) 距離画像

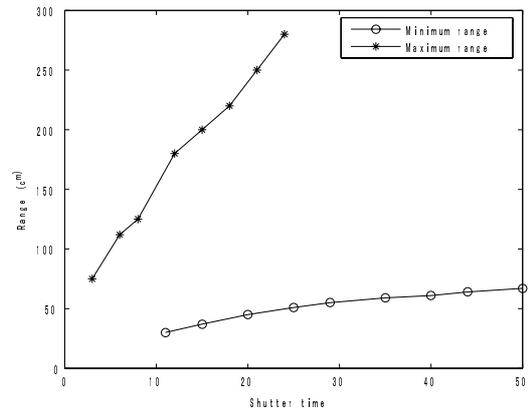


図 4: 露光時間と計測可能距離の関係

と対象物体に反射した赤外線を観測するカメラを持つ。センサからは対象物体までの距離データを格子状に並べた距離画像が得られるが、その各ピクセルの値は変調された発射光と物体に反射された入射光との位相差を計算して求められる。図 2 にセンサから得られる距離画像の例を示す。図 2(a) を対象物体として計測した場合、入射光の強さを表す輝度値画像を図 2(b) に、距離画像を図 2(c) に示す。図 2(c) 中のピクセルの明るさは距離を示し、明るいほど近距離であることを示す。黒色で表示されているのは計測不可能なピクセルである。

センサは入射光を用いて距離を計算するので、計測可能範囲はセンサの変調周波数や露光時間、また、対象物体の材質やセンサとの距離などにも依存する。そのうちの変調周波数は計測可能最大距離を決定する要素であり、変調周波数を f 、光の速度を C とすると、計測可能最大距離は $\frac{C}{f}$ 以下になる。

計測対象物体の材質もまた受信光輝度値に影響する。図 3 は黒から白へ徐々に色を変化させた平面を計測したときの距離画像と、それに対応する輝度値画像であ

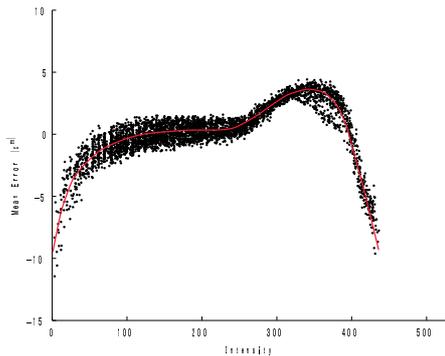


図 5: 入射光の輝度値と平均誤差の関係

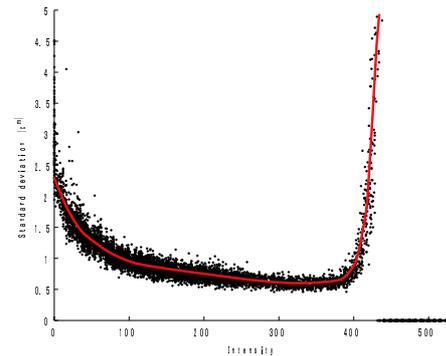


図 6: 入射光の輝度値と標準偏差の関係

る。この平面は視線方向と垂直になっているが、黒の濃い部分は入射光の輝度値が低く、計測不可能となる。このように、計測可能最大距離は物体の材質の影響を受ける。

露光時間を長くすると入射光の量が増加するため、センサの露光時間の調整によっても計測範囲は変化する。図 4 は様々な距離の物体を観測し、露光時間と計測可能最大距離・最小距離を求めた図である。計測可能最大距離よりも対象物体が遠い場合には入射光が観測されないため、距離を計測できない。逆に、計測可能最小距離よりも近い場合も、入射光が飽和してしまうために距離を計測できない。

2.2 輝度値と計測可能距離

前節ではレンジセンサの計測距離は入射光の輝度値の影響を受けることがわかった。そこで本節では、入射光の輝度値と計測距離の精度との関係を求める。そのために、センサの視線方向と垂直な平面を 100 回計測し、計測距離の平均誤差と標準偏差を計算した。物体までの距離の真値は手動で計測を行った。

図 5 は入射光の輝度値と計測距離の誤差の関係を、各ピクセルごとにプロットして示したものである。輝度値が 50 ~ 250 の間では平均誤差は 2cm 以下である。誤差は、輝度値が 50 以下のときに急激に減少し、輝度値 250 ~ 400 では 0 ~ 3cm ほど増大するが 400 以上になると再び急激に減少し、飽和してしまうために計測不可能となる。ここで、センサ誤差をスプライン曲線 (図 5 の線) によってモデル化すると、この曲線を用いて距離画像利用前に計測距離の訂正を行うことができる。

図 6 は輝度値と標準偏差の関係を示したものである。輝度値 0 ~ 350 の範囲では、輝度値の増加にともなって標準偏差は徐々に減少しているが、輝度値が 350 を超えると標準偏差は急激に増大する。標準偏差は計測距離の精度を表しているため、輝度値が低すぎるまたは高すぎる場合には、計測距離の信頼性が低いといえる。図中の線はスプライン曲線を求めた結果である。この曲線に基づいた関数を、距離画像の位置合わせの際に導入する。詳細は 3.2 節で述べる。

2.3 メディアンフィルタによるノイズ除去

距離画像からノイズを除去するために時空間にメディアンフィルタをかける。距離画像の横列方向に x 軸を、縦列方向に y 軸をとり、 x 軸方向に X ピクセル、 y 軸方向に Y ピクセル、 T 枚の距離画像にメディアンフィルタをかけるとし、以下の 3 種のメディアンフィルタの効果を比較した。

- $X = Y = 1, T = 3$
- $X = Y = 3, T = 1$
- $X = Y = 3, T = 3$

図 7 はセンサから距離約 60cm の平面を 100 回計測し、各ピクセルの標準偏差を示したものである。図 7(a) はフィルタを用いない場合である、図 7(b) は $X = Y = 1, T = 3$ メディアンフィルタ、図 7(c) は $X = Y = 3, T = 1$ メディアンフィルタ、図 7(d) は $X = Y = 3, T = 3$ メディアンフィルタをかけた場合のそれぞれ結果である。標準偏差の単位は cm である。メディア

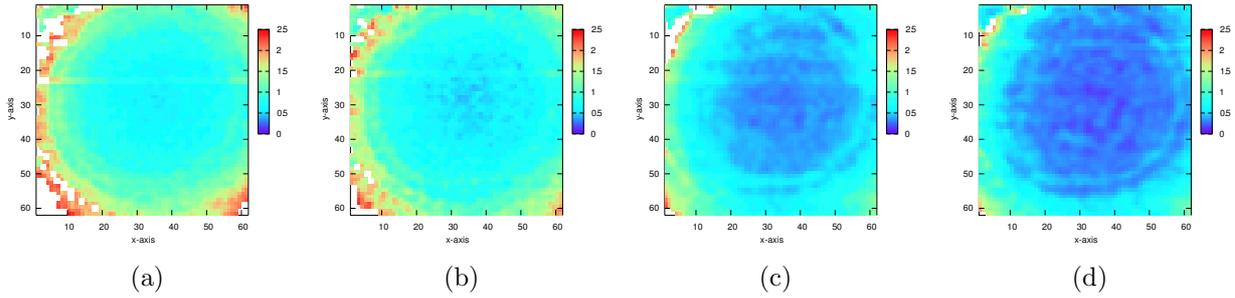


図 7: 距離画像 100 枚の標準偏差 (a): フィルタなし (b): $X = Y = 1, T = 3$. (c): $X = Y = 3, T = 1$. (d): $X = Y = 3, T = 3$.

ンフィルタによって標準偏差の値を小さくすることに成功した. ロボットの動きがレンジセンサのフレームレートに比べて非常に遅い場合には時系列方向にもメディアンフィルタを適応でき, 効果を発揮することが分かった.

3 距離画像の位置合わせ

実時間レンジセンサを用いて得られた距離画像の位置合わせ法について述べる. 新しく距離画像を得る度に直前のフレームの距離画像との位置合わせを行い, センサ位置を実時間に計算する.

3.1 ICP 法による 2 枚の距離画像位置合わせ

本節では, まず, 本手法で用いた ICP 法の派生法による位置合わせ手法 [7][8] を説明する. その概要を以下に示す.

1. 全距離画像間の全頂点において対応点探索を行う.
2. 対応点間の誤差を計算する.
3. 誤差を最小化する変換行列を計算する.
4. 条件が満たされるまで 1-3 を繰り返す.

元の ICP 法は最近傍点を対応点として用いるが, この手法では視線方向に沿って対応点探索を行う. 基準となる距離画像をモデルイメージ, 対応点を探す距離画像をシーンイメージと呼ぶと, 対応点はモデルイメージの各頂点をシーンイメージの視線方向に延ばしてシーンイメージのメッシュと交差する点である. 図 8 に

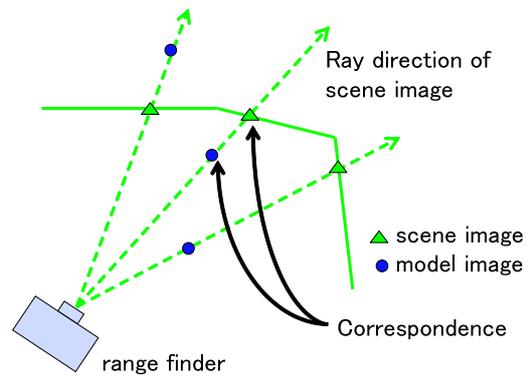


図 8: 対応点探索: モデルイメージの頂点をシーンイメージの視線方向に延長し, シーンイメージのメッシュと交差する点を対応点とする.

いて, モデルイメージは点でシーンイメージはメッシュモデルで表されている. (メッシュモデルの生成法については [12] 参照) ただし, 対応点間の距離や視線方向の角度が閾値以上である場合は誤対応として除去される.

対応点間の誤差は頂点とメッシュとの距離であり. モデルイメージの頂点を x その対応点を y とすると, 対応点間の距離は以下のように表せる.

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{x}) \quad (1)$$

\mathbf{n} は頂点 x の法線ベクトルであり, このベクトルは位置合わせ前に計算済みである.

次に, この対応点間の誤差を最小化するような変換行列を求める. 誤差の評価関数は以下ようになる.

$$\epsilon^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{R}_M \mathbf{n} \cdot \{(\mathbf{R}_S \mathbf{y} + \mathbf{t}_S) - (\mathbf{R}_M \mathbf{x} + \mathbf{t}_M)\})^2 \quad (2)$$

\mathbf{R}_M と \mathbf{t}_M はそれぞれモデルイメージの回転行列と平行移動ベクトルを, \mathbf{R}_S と \mathbf{t}_S は同様にシーンイメージ

の回転行列と平行移動ベクトルを表している。以上から、モデルイメージとシーンイメージの対応点間の距離の最小化は各頂点 k を用いると次のように表せる。

$$\min_{\mathbf{R}_M, \mathbf{t}_M} \sum_k \epsilon^2(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) \quad (3)$$

各反芻において回転角度は微小であるという仮定の元で式 (3) を線形化し、最小二乗法を用いて最終的な解を得る。(詳細は [7][8] 参照.)

3.2 重みつき ICP 法による距離画像位置合わせ

DP200 を用いて距離画像を得る場合、信頼性の低い頂点は位置合わせの際に用いるべきではない。2.2 節で輝度値と標準偏差の関係を推定済みであるため、頂点 \mathbf{x} の信頼値 $\rho(\mathbf{x})$ は次式で与えられる。

$$\rho(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma(\mathbf{I}(\mathbf{x}))} \quad (4)$$

$\mathbf{I}(\mathbf{x})$ は頂点 \mathbf{x} の入射光の輝度値であり、 $\sigma(\mathbf{I})$ は 2.2 節で求めた輝度値による標準偏差の推定結果である。

[9][14] のように ICP 法に重みをつけることを提案している位置合わせ法もある。これら是对応点間の距離と平面の法線を基準としているが、我々は直接輝度値から信頼性を得ている。重みをつけた場合の評価関数は以下ようになる。

$$\epsilon_w^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \rho(\mathbf{x})\epsilon^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (5)$$

ICP 法は非線形最小化法を含むので、回転行列と平行移動ベクトルの初期値設定が必要となる。時系列距離画像を用いると隣接フレームで得られる距離画像同士の差が少ないため、ICP 法を距離画像に適応する際に直前のフレームの回転行列と平行移動ベクトルを初期値として用いることができる [10]。この方法を、シーンイメージを $(i-1)$ 番目の距離画像、モデルイメージを i 番目の距離画像とするような時系列距離画像に適応すると以下ようになる。

1. $(i-1)$ 番目の距離画像の変換行列 $\mathbf{R}_{i-1}, \mathbf{t}_{i-1}$ は既知であるとする。
2. i 番目の距離画像を計測する。
3. i 番目の距離画像の変換行列の初期値を設定する。

$$\mathbf{R}_i \leftarrow \mathbf{R}_{i-1}, \mathbf{t}_i \leftarrow \mathbf{t}_{i-1}$$

表 1: 静止時, 推定位置の二乗平均誤差 (cm)

	Distance	X-axis	Y-axis	Z-axis
Without weighting	0.828	0.304	0.753	0.160
With weighting	0.508	0.165	0.462	0.134

4. $(i-1)$ 番目の距離画像と i 番目の距離画像との対応点を求める。

5. 以下を最小化するような $\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i$ を求める。

$$\min_{\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i} \sum_k \epsilon_w^2(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) \quad (6)$$

6. 4. と 5. を終了条件を満たすまで繰り返す。

$(i-1)$ 番目と i 番目の距離画像の差が大きすぎるときには位置合わせは成功しない。解が真値の十分近くまで収束するかどうかは、センサの移動やセンサの計測誤差、対象物体の形状などに依存する。次節では、実時間位置合わせが成功するときの計測条件とロボットの移動速度制限を求める。

\mathbf{p}_1 を最初の距離画像のセンサ位置であるとすると i 番目の距離画像のセンサ位置 \mathbf{p}_i は次の式によって求められる。

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{R}_i \mathbf{p}_1 + \mathbf{t}_i \quad (7)$$

同様に、 \mathbf{v}_1 を最初の距離画像の視線方向であるとすると i 番目の距離画像の視線方向は次式で求められる。

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{R}_i \mathbf{v}_1 \quad (8)$$

4 実験

4.1 静止時の位置推定精度

はじめに、センサ静止時の位置推定精度を評価する。センサを移動させずに対象物体を計測し位置合わせを行うと、ノイズの影響を受けて推定位置は移動してしまい、誤差が生じる。表 1 に静止状態で対象物体を 50 回計測したときの二乗平均誤差を示す。対象物体として、ノイズがなければセンサ位置を特定できるような形状のものを用いる。Distance の列は位置合わせ後のモデルイメージとシーンイメージのセンサ移動距離を表す。実際にはセンサは静止しているため、真値は移動距離 0cm である。X-axis 列、Y-axis 列はそれぞれ x 軸、 y 軸

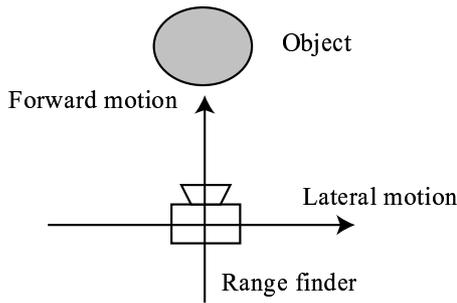


図 9: 前進および横方向移動

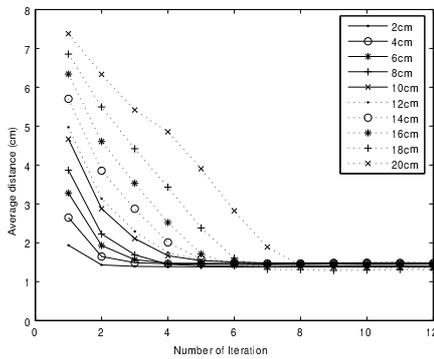


図 10: 横方向移動時, 計算反復回数と対応点間の平均距離

に方向の二乗平均誤差であり, この 2 方向は距離画像と平行な方向である. Z - z axis 列は視線方向と平行である z 軸方向の二乗平均誤差である. 上段には重み関数を導入しない場合を, 下段には重み関数を導入した場合を示す.

推定位置の二乗平均誤差は約 0.8cm である. この結果は図 6 に示す標準偏差とほぼ一致する. 位置合わせの際に重み付き ICP 法を適応した場合, 導入しない場合に比べて, 二乗平均誤差を 61%まで減らすことができた. また, 二乗平均誤差は x 軸, y 軸方向より, z 軸方向, すなわち視線方向の方が小さいということが分かった.

4.2 前進・横方向移動時の位置推定

次に, 前進と横方向移動 (図 9 参照) 時の位置推定について調べる. ここでは, フレーム間のセンサ移動距離を変えて, 対応点間誤差の平均値が収束するために必要な計算反復回数と計算時間を調べた.

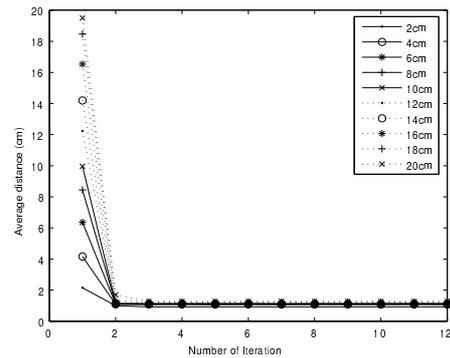


図 11: 前進時, 計算反復回数と対応点間の平均距離

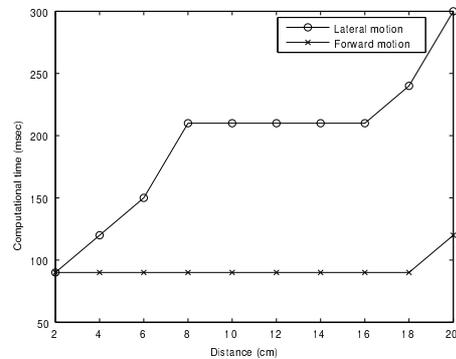


図 12: 横方向移動, 前進時のそれぞれに必要な計算時間

図 10, 図 11 は, フレーム間の移動距離を変えたときの, 計算反復回数と対応点間の平均誤差の関係を示している. 図 10 は横方向移動時の, 図 11 は前進時の結果である. 横方向移動では, フレーム間の距離が長くなるに従って平均誤差の収束に必要な計算反復回数は増加する. 一方, 前進時には平均誤差の収束に必要な計算反復回数はフレーム間の距離によって変わらない. また, Pentium4 3.2GHz PC を用いて各反復計算に要する時間を計測したところ, 平均は 30ms であった. 以上より, フレーム間の距離と ICP 法を適応したときに必要な時間の関係は図 12 のようになる. 時間別に移動距離を見ると, この図から実時間位置推定と環境モデリングをしながらロボットが移動可能な最大速度を計算することができる. 例えば, サンプル間隔が 150ms であるとき, 横方向移動時には 30cm/s, 前進の場合には 140cm/s の速さで移動しながら実時間で距離画像を位置合わせすることが可能である.(図 13 参照)

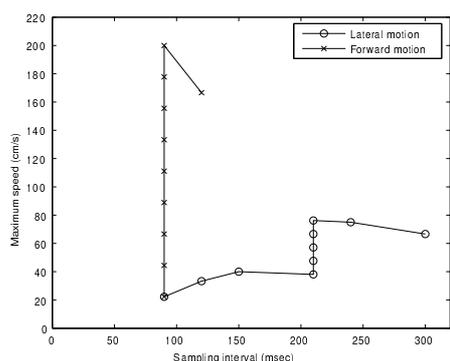


図 13: サンプリング間隔と最大速度の関係



図 14: DP200 を搭載したロボット ER1

4.3 環境モデリング

任意の経路を移動させるために、実時間レンジセンサを移動ロボット,ER1[6](図 14 参照) に搭載し、実時間環境モデリングと自己位置推定を行う。ロボットは図 15 に示すような経路で走行する。走行距離の合計は約 200cm で、ロボットは約 15/ms の速さで移動した。その間、150 枚の距離画像を 3Hz で取得した。図 16 に環境モデリングと推定位置の結果を示す。環境の形状は位置合わせ済みのメッシュモデルで表され、センサ位置推定の軌跡は線で表されている。結果より、ロボットの回転運動時には位置推定結果が不安定であることがわかる。その理由として距離画像中の物体形状がセンサ位置が一意的に定まらないような形状であるということが考えられる。

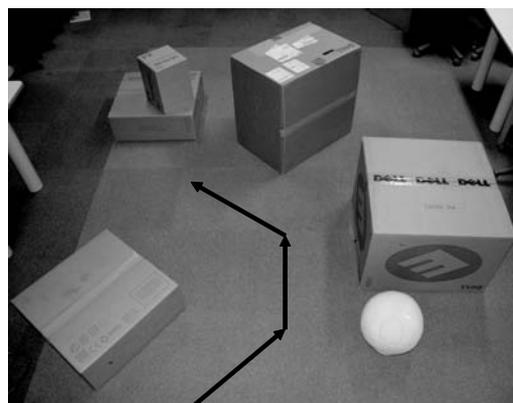


図 15: 走行経路とその周辺環境

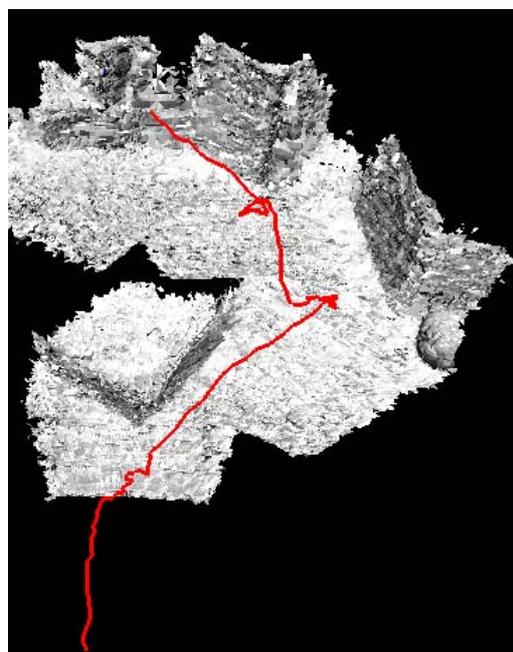


図 16: 三次元モデリングと位置推定結果。位置合わせされたメッシュモデルによって形状が、線でセンサ位置の軌跡が表されている。

5 おわりに

本論文では、実時間レンジセンサから得られる距離画像の位置合わせを行い、それによってSLAM問題を解決する手法を提案した。距離画像取得間隔に比べてロボットの移動距離が小さく各フレーム間の距離画像の差が小さいような時系列距離画像にICP法を適応して位置合わせを行った。このような場合には、直前の距離画像の回転行列と平行移動ベクトルを新しく取得した距離画像の初期値として反復計算を行うことができる。また、計測距離の精度は受信光の輝度値によるので、ICP法に新たに重み関数を導入することを提案した。

また、距離画像の位置合わせ精度を評価した結果、距離計測精度とほぼ同じであることが分かった。収束するまでに必要な計算反復回数と計算時間を求めることにより、提案手法が成功する状況とロボットの動きの制約条件を得ることができた。最後に、ロボットが任意の経路を走行した場合の環境モデリングと位置推定の結果を示した。

実際の距離画像の位置合わせは、距離画像中の観測物体の形状に依存する。そのため、他のセンサから得られる情報と組み合わせることよりセンサ位置推定の曖昧性をなくすことを今後の目標として考えている。

参考文献

- [1] P.J. Besl and N.D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., 14(2):239-256, Feb 1992.
- [2] Canesta, Inc. CanestaVision EP Development Kit. <http://www.canesta.com/devkit.htm>.
- [3] Cyra Technologies, Inc. Cyrax 2500. <http://www.cyra.com>.
- [4] A. Howard, D.F. Wolf, and G.S. Sukhatme. Towards 3d mapping in large urban environments. In Proc. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, volume 1, pages 419-424, Sep. 2004.
- [5] Konica Minolta Photo Imaging U.S.A., Inc. Vivid 9i non-contact digitizer. <http://www.minoltausa.com/vivid/>. Figure 15: The environment around a path.
- [6] Bandai Robot Laboratory. ER1. <http://www.roboken.channel.or.jp/er1/>.
- [7] P. Neugebauer. Geometrical cloning of 3d objects via simultaneous registration of multiple range images. In Proc. Int. Conf. on Shape Modeling and Application, pages 130-139, Mar 1997.
- [8] Takeshi Oishi, Ryusuke Sagawa, Atsushi Nakazawa, Ryo Kurazume, and Katsushi Ikeuchi. Parallel alignment of a large number of range images. In Proc. 3DIM 2003, pages 195-202, 2003.
- [9] S. Rusinkiewicz and M. Levoy. Efficient variant of the ICP algorithm. In Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pages 145-152, 2001.
- [10] D. Simon, M. Hebert, and T. Kanade. Real-time 3-d pose estimation using a high-speed range sensor. In Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation, volume 3, pages 2235-2241, 1994.
- [11] S. Thrun. Robotic mapping: A survey. In Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium. Morgan Kaufmann, 2002.
- [12] G. Turk and M. Levoy. Zippered polygon meshes from range images. In Proc. SIGGRAPH '94, pages 311- 318, Jul 1994.
- [13] C. Urmson, J. Anhalt, M. Clark, T. Galatali, J.P. Gonzalez, J. Gowdy, A. Gutierrez, S. Harbaugh, M. Johnson-Roberson, H. Kato, P. Koon, K. Peterson, B. Smith, S. Spiker, E. Tryzelaar, and W. Whittaker. High speed navigation of unrehearsed terrain: Red team technology for grand challenge 2004. Technical report, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2004. CMU-RI-TR-04-37.
- [14] Mark D. Wheeler. Automatic Modeling and Localization for Object Recognition. PhD thesis, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1996.