

レーザ・超音波センサ搭載移動ロボットによる 透明物体を含む環境における2次元グリッド地図生成

岩科 進也[†] 山下 淳^{†‡} 金子 透[†]

[†] 静岡大学工学部機械工学科 〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

[‡] カリフォルニア工科大学 1200 E. California Blvd. MC 104-44, Pasadena, CA 91125 USA

E-mail: {f0730017,tayamas,tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし 本研究では、レーザレンジファインダ (LRF) と超音波ソナーを搭載したロボットを用い、透明物体を含む環境における地図生成手法の提案を目的とする。従来のレーザ単体を用いた計測では透明物体は計測できず、また、超音波単体を用いた計測では計測精度が低いため、十分な信頼性を持つ地図が生成しにくい。そこで、本研究では計測精度の高いレーザ計測データを用いて、不透明物体の計測と移動ロボットの自己位置推定を行い、超音波によって透明物体の計測を行うことで、計測精度が高く、かつ、透明物体の存在を反映した地図生成手法を実現する。

キーワード レーザレンジファインダ, 超音波ソナー, 地図生成

1. 序論

近年、ロボット技術の発展に伴い、警備ロボットや看護ロボットなどの自律移動ロボットの導入が期待されている。一般に、ロボットが自ら考えて行動するためには、周囲環境の地図が必要となる。しかし、環境の地図は必ずしも存在するとは限らない。そこで本研究では、移動ロボットによる地図生成を目的とする。

周囲環境の地図を生成する方法として、計測精度の高いレーザレンジファインダ (LRF) と計測情報量の多いカメラを同時に使用する手法[1]がある。この手法では、計測精度の高い LRF 計測データに基づいてロボットの自己位置を推定し、カメラにより周囲環境の3次元情報を取得する。しかし、LRF やカメラは光学センサであるため、光が透過するガラスなどの透明物体が環境に含まれる場合、正しく環境地図を取得できない場合がある。この問題の解決策には、触覚センサを用いた地図生成手法[2]がある。しかし、触覚センサによる直接接触計測では、環境中を隈無く走行する必要があるため、計測に多大な時間を要する。非接触によって、透明物体を含む環境における地図生成をする手法として、超音波ソナーを用いた地図生成手法[3]がある。超音波ソナーには、光学センサではないため透明物体を計測できるという利点がある。一方で、一般的に超音波は指向性が低いため角度分解能が低く、壁面のような平面では鏡面反射を起こすため計測精度が著しく低下するという問題点がある。この問題を解決する方法として、LRF と超音波ソナーを同時に運用することが重要となる[4][5]。

本研究では、計測精度の高い LRF と透明物体を計測できる超音波ソナーを同時運用することで、透明物体を含む環境での高精度な地図生成手法を提案する。

2. 原理

本研究では、測距センサである LRF と超音波ソナーを移動ロボットに搭載し環境中を走行させ、複数の位置から計測したデータをロボットの自己位置推定データに基づいて位置合わせし、これを統合して2次元地図を生成する。また、地図はレーザ計測データと超音波計測データそれぞれで作成し、生成した地図を標準化しグリッド地図として、計測された回数が少なくノイズである可能性の高い計測点の除去処理をする。最後に、レーザ生成

地図と超音波生成地図を重ね合わせる。基本はレーザ計測データを優先し、レーザにより障害物が存在しないと判定された領域において超音波計測データを使用することで、透明物体の計測データを地図に反映し、透明物体が計測可能で精度の高い地図生成を行う。

3. 複数位置の計測データの統合

計測データの統合には、計測時のロボットの自己位置情報が重要となる。ロボットの自己位置推定法として、車輪の回転数から走行距離や回転角度を推定するデッドレコニングがよく使用されるが、これのみでは車輪のスリップなどで誤差が蓄積し正しい自己位置推定はできない。よって本研究では、ロボットの自己位置推定に各位置の計測データの重なった部分を用いて位置合わせを行う ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム[6]を使用する。

本研究では、デッドレコニングの自己位置推定結果を、ICP アルゴリズムによる収束計算の開始位置として、収束計算を行う。ICP アルゴリズムの収束結果を自己位置推定結果として用い、LRF 計測データと超音波ソナー計測データを位置合わせし、複数位置で計測したデータを統合する。

4. レーザ地図生成

4.1. レーザ生成地図の標準化

透明物体を含む環境において LRF による計測を行うと、透明物体をレーザが通過する際の屈折や表面の汚れの影響により、透明物体の後方にノイズが計測される場合があるため、これを除去する必要がある。ノイズ除去の前処理として、生成地図の標準化を行う。

まず、正方形のグリッドに区切ったグリッド地図を作成する。そして、LRF 計測データに基づき各グリッドに対してラベル付けし領域判定をする。ラベルは障害物が存在する“障害物領域”、障害物の存在しない“空き領域”、1度も計測が行われていない“不明領域”の3種類を用意する。初期ラベルとしてすべてのグリッドに不明領域とラベル付けし、以後の処理で空き領域と障害物領域に更新していく。

移動ロボット搭載のLRFからレーザが発振された状況を図1の標準化モデルで表す。LRFが距離 r という計測データを取得したとする。しかし、距離 r には誤差が含まれ

ている可能性があるため、LRFの計測精度に基づいて誤差幅 Δr_L を設定し、同様に、角度方向の誤差幅として角度方向分解能 α_L を設定する。本研究で使用するLRFは角度方向を等分割にして計測するが、このときの分割数が角度方向分解能を規定する。 $r + \Delta r_L$ と $r - \Delta r_L$ 、角度方向分解能 α_L に囲まれた領域を障害物領域とし、LRFの原点と $r - \Delta r_L$ 、角度方向分解能に囲まれた領域を空き領域とする。このモデルによりグリッド地図を更新する。

グリッド中心が障害物領域内に入ったグリッドには、障害物領域とラベル付けするとともにグリッドに1ポイント加算する。1度障害物領域とラベル付けを行うと、それ以降空き領域のラベルには更新されない。また、グリッド中心が空き領域に入ったグリッドに対しては、空き領域とラベル付けし、ポイントは加算しない。空き領域のラベルは他の位置における計測によって障害物領域となった場合、障害物領域に更新される。

すべての計測データの標本化が終了した時点で、障害物領域とラベル付けされたグリッドに加算されたポイント数を調べる。ポイントが少ないグリッドは、グリッド内に障害物が計測された回数が少なく信頼性が低いため、ノイズである可能性がある。そこで、ポイントが設定した閾値 P_L 以下の障害物領域を“ノイズ可能性領域”として抽出する。

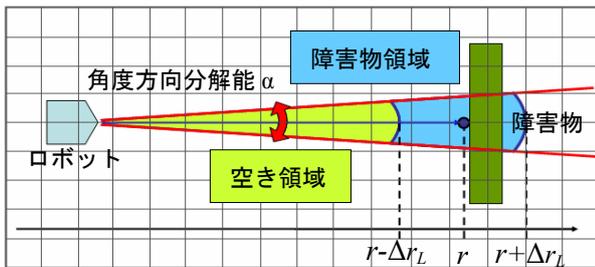


図1 レーザ標本化モデル

4.2. レーザ生成地図のノイズ除去処理

前節で抽出したノイズ可能性領域に対して、ノイズ除去処理を行う。ノイズ可能性領域にはノイズと共に、障害物を正確に計測したとしても、計測回数が不十分だったためポイントが閾値以下となり抽出された、本来は障害物領域であるはずの領域も含まれる。また、不明領域と空き領域の境界にはレーザを反射した障害物が必ず存在するはずである。そこで、不明領域と空き領域の境界領域にあたるノイズ可能性領域は、障害物領域と再度判定する。残りのノイズ可能性領域は、ノイズと判定して空き領域に変更する。

5. 超音波地図生成

超音波ソナーから超音波が発振された状況をLRFと同様に図2の標本化モデルで表し、誤差幅 $\pm \Delta r_S$ 、角度方向分解能 α_S を設定、 $r + \Delta r_S$ と $r - \Delta r_S$ 、角度方向分解能 α_S に囲まれた領域を障害物領域とし、このモデルによりグリッド地図にポイントを加算していく。

しかし、各計測点の標本化の段階では、超音波ではラベル付けはせず、領域判定は行わない。これは、超音波ソナーによる計測は、角度方向分解能が低く、平面では鏡面反射を起こして計測精度が著しく低下するという問題があり、LRFによる計測より精度が低いためである。そのため、1度障害物領域と判定されても他の計測データでは空き領域と判定される、という事態がたびたび生

じ、領域判定を行っても信頼性が低い。そこで、グリッドに対するポイント加算により、すべての計測データを総合し、領域判定の信頼性を高める。

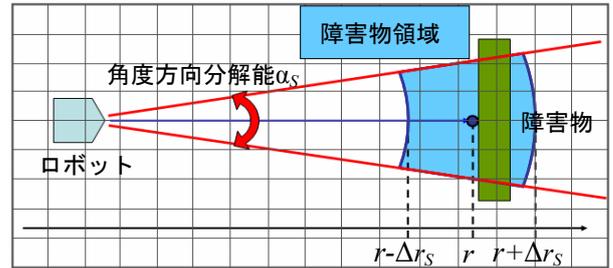


図2 超音波標本化モデル

レーザ光の飛行時間を用いて計測を行うため、基本的に角度分解能が高く計測距離に関係なく高精度な計測ができるLRFと異なり、超音波計測では、図2より距離 r が大きくなるほど低い角度分解能の影響で障害物領域が広くなり、また、鏡面反射の影響で発生する誤計測点は距離 r が本来より大きく計測される等、計測距離が長くなるほど精度が低下する傾向にある。そこで、障害物領域内に入ったグリッドに対し、距離 r が大きいほど信頼性が低いとして、便宜的に距離 r の2乗に反比例した値のポイント(G)を式(1)により加算する。

$$G = \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

すべての計測データの標本化が終了した時点で、ポイントの合計値が高いグリッドほど障害物計測の信頼性が高いとする。これにより、ノイズの可能性が高い孤立点や鏡面反射によって本来より距離 r が大きく計測されてしまった点は、障害物計測の信頼性が低い点として標本化される。その後、閾値 P_S を設定し、グリッドに加算されたポイントが閾値 P_S 以上の領域を障害物領域と判定する。

6. 生成地図の重ね合わせ

生成されたレーザ標本化地図と超音波標本化地図の重ね合わせを行う。不透明物体は計測精度の高いレーザによる計測データを採用するのが望ましく、透明物体は超音波の計測データを採用するのが望ましい。そこで、レーザ標本化地図における、空き領域では超音波標本化地図のデータを用い、その他の領域についてはレーザ標本化地図のデータを用いる。これにより、不透明物体はLRFにより計測され、LRFによって障害物が存在しないと判定された領域にある透明物体は超音波ソナーによって計測される。

7. 実環境における検証

7.1. 実験1

7.1.1 実験環境1

実験はL字型の廊下に透明な壁(アクリル板)を設置した環境で行った。概略図を図3に示す。この廊下をLRFと超音波ソナーを搭載した移動ロボットを、物陰に隠れて計測できない領域を減らすため、往復走行させ、環境の計測を行った。

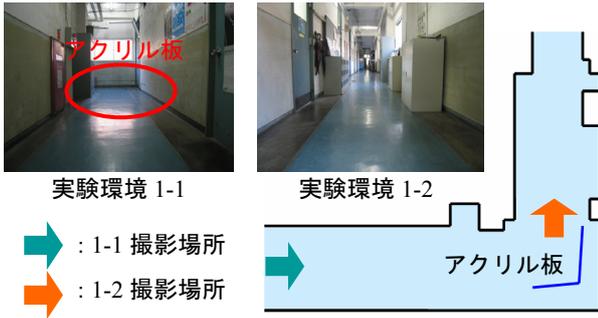
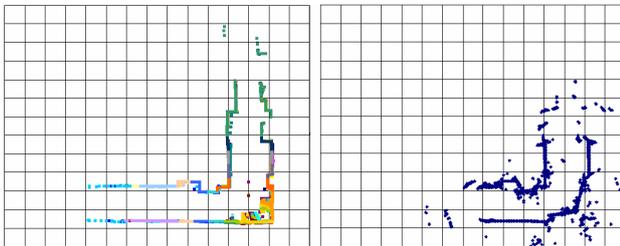


図3 実験環境

7.1.2. 実験結果 1

ICP アルゴリズムによるロボットの自己位置推定結果に基づいた位置合わせによる、複数位置からの計測データの統合結果を図4に示す。図4(a)において、アクリル板後方の位置にレーザーによってノイズが計測されているのがわかる。また図4(b)において、本来障害物が存在しない位置に、超音波により離散的にノイズが計測されている。

今回の実験ではLRFによる計測を7.5sサイクルで合計26回行い、ICP アルゴリズムによる自己位置推定は25回行った。使用 CPU : Pentium4-2.8GHz において、ICP アルゴリズム収束計算の所要時間は平均1.045sであった。また、最長所要時間は1.906sであった。これは、LRFによる計測を行う毎に自己位置推定と地図生成を行う場合、リアルタイムでロボットの自己位置推定と地図生成を同時に行うSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [7]の実現が可能な計算速度であると考えられる。



(a)レーザー (b)超音波

図4 ICPアルゴリズムによる地図

ICPアルゴリズムによる自己位置推定結果に基づいたレーザー・超音波生成地図に、標準化処理を行った結果を図5に示す。標準化地図のグリッドサイズは5cm四方とした。LRFの誤差幅は $\Delta r_L=5\text{cm}$ 、角度方向分解能 $\alpha_L=0.5^\circ$ と設定し、超音波の誤差幅 Δr_S は、鏡面反射による計測誤差がない限りレーザーと同程度の測距精度が期待できるので、レーザーとの重ね合わせを考慮して、レーザーと同じ値に設定した。また、超音波の角度方向分解能 $\alpha_S=20^\circ$ とした。図5(a)において、アクリル板後方にレーザー計測ノイズ領域が生じているのがわかる。さらに、図5(b)において、離散的に計測されていた超音波ノイズが加算ポイントの低い点として標準化されている。

レーザー標準化地図に対してノイズ処理を行い、超音波標準化地図に対して障害物領域の判定を行った結果を図6に示す。

今回の実験では、1箇所につき概ね5回以上の計測が行われている。そこで、レーザー標準化処理において加算されたポイントが閾値 $P_L=4$ 以下の障害物領域をノイズ

可能性領域として抽出し、ノイズ除去処理をした。また、式(1)により超音波標準化に際してポイントを加算し、加算されたポイント $P_S=0.0000045$ 以上のグリッドを障害物領域と判定した。

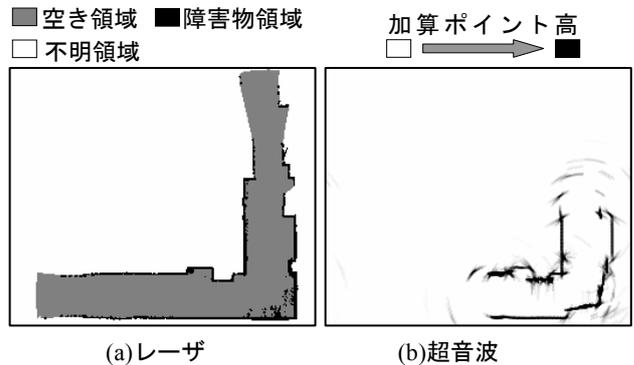


図5 標準化地図

レーザー標準化地図のノイズ処理によって透明物体後方に検出されていたレーザーノイズが除去されている。超音波標準化地図の障害物領域判定により、離散していた超音波ノイズは、グリッドに加算されていたポイントが低かったため障害物領域とは判定されず、ポイント数が十分に高い領域のみ障害物領域と判定されている。

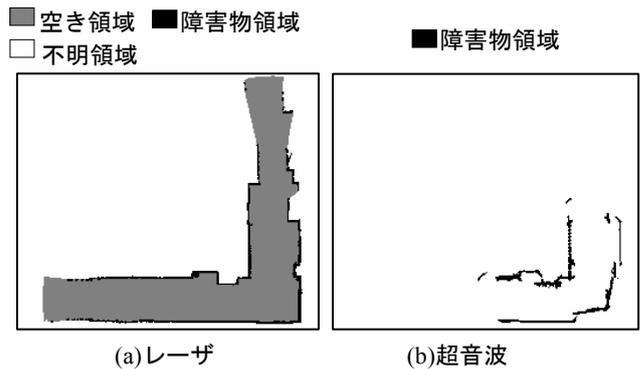


図6 標準化地図 (ノイズ処理)

レーザー標準化地図と超音波標準化地図を重ね合わせた結果を図7に示す。レーザーでは計測できなかったアクリル板が超音波により計測されている。また、超音波では正確に計測できなかった壁面形状がレーザーにより正確に計測されている。

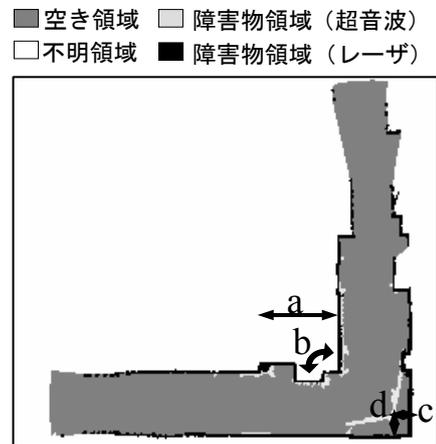


図7 レーザ・超音波合成地図

また、生成地図の精度を評価するため、図7中のa, b, c, dの値を実測値と生成地図より算出した計測結果とで比較し、結果を表1にまとめた。

表1 生成地図の評価

	実測値	計測結果
a	254cm	250cm
b	90deg	90deg
c	62cm	65cm
d	53cm	50cm

7.2. 実験2

7.2.1. 実験環境2

次に、より一般的な環境における地図生成実験を行った。実験環境を図8に示す。実験環境には、支柱が等間隔に入ったガラスの壁が存在した。この環境において移動ロボットを往復走行させ地図を生成した。

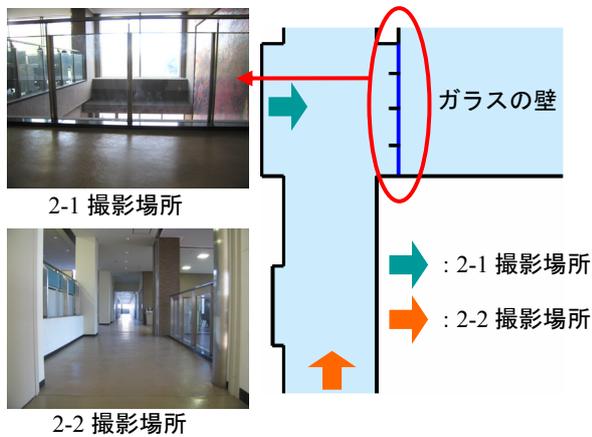


図8 実験環境

7.2.2. 実験結果2

生成されたレーザ・超音波統合地図を図9に示す。レーザでは計測できないガラスの壁が超音波により計測でき、支柱がレーザにより計測されている。不透明な壁面の形状はレーザにより正確に計測できた。また、生成地図の精度を評価するため図9中のa, b, cの値を実測値と生成地図より算出した計測結果とで比較し、結果を表2にまとめた。

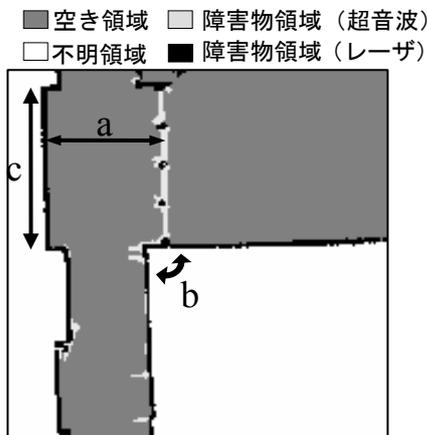


図9 レーザ・超音波統合地図

表2 生成地図の評価

	実測値	計測結果
a	251cm	255cm
b	90deg	90deg
c	363cm	360cm

7.3. 考察

不透明物体はレーザにより正確な地図生成に成功した。また、レーザでは計測できなかった透明物体は、LRFによる正確な自己位置推定と、ポイント加算式の超音波地図生成手法により、地図生成に成功した。生成地図の誤差幅は5cm以内に収まり、ロボットが自律移動に使用する地図としては十分な精度であると考えられる。

8. 結論

本研究ではレーザにより不透明物体の正確な計測とICPアルゴリズムによる自己位置推定を行い、超音波により透明物体の計測を行うことで、レーザ・超音波のセンサフュージョンにより、透明物体を含む環境においての高精度な地図生成の手法を提案した。

今後の課題として、レーザ計測データに基づいた超音波計測ノイズの除去や、ベイズ推定を用いた時系列統合手法の導入による、より信頼性の高い地図生成手法の研究が挙げられる。

参考文献

- [1] 根岸善朗,三浦純,白井良明：“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”，日本ロボット学会誌，24，6，pp.690-696(2003)
- [2] 倉爪亮,広瀬茂男,岩崎倫三,長田茂美：“協調ポジショニングシステムの研究－CPSアクティブタッチ融合型地図生成法－”，日本ロボット学会誌，17，1，pp.84-90(1999)
- [3] A. Elfes：“Sonar-Based Real-World Mapping Navigation”，IEEE Journal Robotics and Automation，RA-3，.3，pp.249-265(1987)
- [4] A. Diosi, and L. Kleeman：“Advanced Sonar and Laser Range Finder Fusion for Simultaneous Localization and Mapping”，Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1854-1859(2004)
- [5] A. Abosshoaha and A. Zell：“Robust Mapping and Path Planning for Indoor Robots based on Sensor Integration of Sonar and a 2D Laser Range Finder”，Proceedings of the 2003 IEEE 7th International Conference on Intelligent Engineering Systems(2003)
- [6] P.J. Besl and N.D. McKay：“A Method for Registration of 3-D Shapes”，IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，14，2，pp.239-256(1992)
- [7] J.J. Leonard and H.F. Durrant-Whyte：“Simultaneous Map Building and Localization for an Autonomous Mobile Robot”，Proceedings of the 1991 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.1442-1447(1991)