

# 屋外環境における三次元環境計測システムの計測位置計画

Sensing Point Planning for 3-dimensional Scanning System to Obtain Outdoor Information

正 吉田 和哉 (東北大院), 正 永谷 圭司 (東北大院), 松澤 敬之 (東北大院)

{yoshida,keiji,matsuzawa}@astro.mech.tohoku.ac.jp

Kazuya YOSHIDA, Keiji NAGATANI, Takayuki MATSUZAWA (Tohoku University)

This paper reports a sensing point planning for mobile robots to obtain 3-dimensional environment information which includes range and visual data. Generally, to avoid an occlusion problem and a low resolution problem, it is necessary for robots to sense in different places. Therefore, a suitable sensing point planning is required to reduce redundant sensing. This problem is called “Art Gallery and Illumination Problems” in 3-dimensional environment, and our approach is to solve the problem with consideration of both valid-sensing-area and partially-unknown environment. In this paper, we explain our planning-approach and introduce some initial experimental results.

Key Words : 3-dimensional environment, Sensing point planning

## 1 はじめに

未知環境における地図構築は、移動ロボットの主要なタスクの一つである。特に、屋外環境において、その三次元形状を迅速に、かつ自動で構築することは、震災などの災害現場、火山噴火における地形情報把握といった非常時の情報収集 [1][2] だけでなく、日常の屋外巡回警備等にも有用であることが期待できる [3]。さらに、近年、三次元形状だけでなく、画像情報を付加した三次元環境地図の構築技術に関する研究開発も進められており、小型のレーザ距離センサと CCD カメラで、三次元環境情報を獲得することも可能となりつつある [4]。

このような背景の下、筆者らの研究が所属する研究グループでも、レーザレンジセンサで取得した距離情報と、カメラで取得した画像情報を融合し、距離画像情報の提示を行う研究を進めてきた [5]。この種の計測システムでは、特に対象とする領域が広大な屋外の場合、遠方の対象物の画像解像度が低くなるという問題が生ずる。さらに、一地点からの計測では、対象物の反対側が見えなくなるというオクルージョン問題も生ずる。これらの問題に対処するためには、複数地点で計測を行い、情報を融合する必要がある。この融合で問題となるのが、計測地点の計画と計測地点の正確な位置計測である。

本研究では、主に、前者の計測地点の計画について考察する。屋外環境で、できるだけ無駄のない計測を行うためには、可能な限り、視野範囲内に対象物を捕えることができる位置で計測することが望ましい。この問題は、アートギャラリー問題と呼ばれ、人工知能分野で議論が行われてきた [6]。本研究では、対象が三次元かつ未知環境であり、さらに解像度を一定に保つために有効計測領域が比較的狭いという制限の中で、このアートギャラリー問題を考えることとなる。ただし、完全性については、大きく要求されないものとする。

なお、後者の位置計測については、スキャンマッチングによる三次元形状の重ね合わせ手法が一般的である [7] が、複数台移動ロボットとレーザ距離測距器を組み合わせた屋外三次元環境計測のための位置推定手法 [8] なども提案されている。本研究では、屋外環境において、位置情報が精度良く獲得できる RTK-GPS (Trimble 社製) ならびに、姿勢や方位角が精度良く獲得できる三次元角度計測装置 TruePoint を利用することで、位置計測の問題に対処することとした。

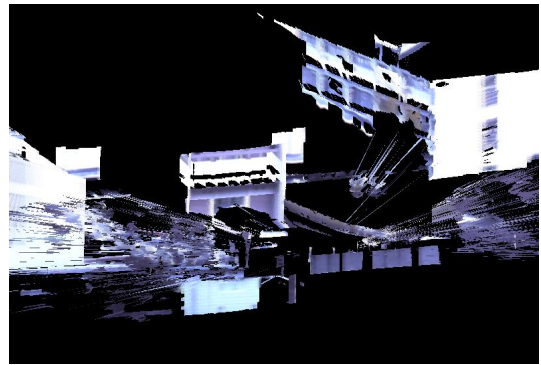


Fig. 1 一観測地点で獲得した三次元地図の例

## 2 一観測地点で獲得する三次元地図の生成

まず、一観測地点で獲得する三次元地図の生成手法について述べる。なお、本研究では、三次元距離情報に画像情報がテクスチャマッピングされたものを「三次元地図」と定義する。この三次元地図の一例を図 1 に示す。

### 2.1 計測装置

三次元距離情報ならびにパノラマ画像情報を獲得するため、本研究では、三次元地図構築システムを構築した。レーザ距離センサには、SICK 社の LD-LRS2100 を使用した。このセンサは、単独で、平面空間を、角度分解能最大 0.125[deg] で、最大 250[m] まで計測する能力を有する。また、画像取得を行うための CCD カメラには、アルゴ社の CCD-Camera Lu160c を用いた。このカメラの画角は、垂直画角が約 24[deg]、フレームレートが 15[fps] である。三次元距離情報を取得するため、これらセンサは、回転テーブル上に設置されている。この回転テーブルには、中央精機社製 ARS-936 を用いた。

また、複数の三次元地図を統合するための姿勢情報の検知には、方位角と傾斜角を取得可能なシリコンセンシングシステムズ社製の三次元角度計測ユニット TruePoint を利用した。自己位置の計測には、Trimble 社製 RTK-GPS (MS750) を利用した。この装置のセンサヘッド部分を図 2 に示す。

本研究は、計測地点の計画を目指しているため、現在、この装置には、移動機構が取り付けられていない。ただし、この装置は、移動ロボットに搭載することが十分に可能となるサイズである。

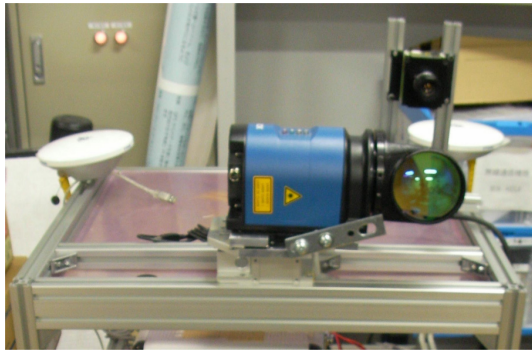


Fig. 2 三次元地図構築システム

## 2.2 三次元距離情報と画像情報の取得

本研究では、三次元距離情報の取得を、二次元平面が計測可能なレーザ距離センサを回転ステージで回転させることで実現する。レーザ距離センサからは、センサの計測平面における計測点の回転角  $\theta$  ならびに計測地点までの距離情報  $r$  が取得可能である。また、回転ステージの回転角  $\phi$  は、回転ステージから直接取得できる。これらの情報により、三次元空間中の物体は、二つの角度と距離の組  $(r, \theta, \phi)$  で表された点の集合として表現することができる。

また、三次元距離情報に貼る視覚情報については、まず、カメラの画像中心の縦ラインが、レーザ距離センサのスキャン面と一致するように、カメラを設置する。次に、回転ステージの回転と同期させてこの縦ラインを連続的に格納し、つなげていくことで、全方位のパノラマ画像を生成する。

## 2.3 テクスチャマッピング

次に、取得した画像情報と距離情報の縦ラインを同期させることで、ポリゴン表示させた三次元距離情報の上に、画像情報をマッピングすることが可能となる。本研究では、単純に、点  $(r_{(m,n)}, \theta_m, \phi_n)$  について、隣接する点  $(r_{(m+1,n)}, \theta_{m+1}, \phi_n)$  と  $(r_{(m,n+1)}, \theta_m, \phi_{n+1})$  との間に作られる三角形を考える。この三角形の頂点間の距離が十分に小さい場合、そこに面が存在するものとしてポリゴン面を構成する。全ての点に対してこの処理を行うことで、点群データからポリゴンモデルを生成できる。このポリゴンモデルの座標に相当する画像情報を切り出し、これをポリゴンに貼ることで、テクスチャマッピングを行う。

## 2.4 計測地点からの距離と計測精度の関係

上述の計測装置を利用することで獲得した図 1 を見ると、全体として、画像が綺麗にマッピングされた三次元地図を獲得できたことがわかる。しかしながら、センシング位置から遠方にある物体については、その精度に大きな問題が存在する。例として、計測地点から約 30[m] の物体を表示したものと約 70[m] の物体を拡大表示したものを、それぞれ図 3、図 4 に示す。

図 4 については、本来ならば窓枠が表示されるべきところであるが、この図からも分かる通り、計測地点から遠方に存在する物体については、(1) 距離情報が疎であること、ならびに、(2) 画像の解像度が低いこと、といった理由により、意味のある画像がマッピングできていないことが分かる。この問題は、目標とする画像解像度とレーザ距離

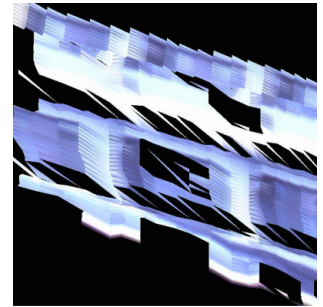
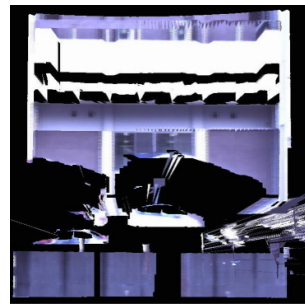


Fig. 3 近距離対象物の表示 Fig. 4 遠距離対象物の表示

センサの角度分解能、対象物が持つ面とカメラとの相対角度に大きく依存する。本研究で利用するセンサの構成では、CCD カメラの解像度と比較し、レーザ距離センサの最大到達距離が十分に長い。そこで、本研究では、暫定的に、計測地点からの距離が 30[m] 以内の距離情報ならびに画像情報を、センサ情報の有効範囲と仮定した。

## 3 計測位置計画

### 3.1 Digital Elevation Map の構築

計測位置計画を行うに当たり、本研究では、まず獲得した三次元地図を Digital Elevation Map (以下 DEM と略す) で表現する。この DEM は、環境を二次元の格子で区切り、各格子の高さ情報を格納することで、地面の凹凸を表現するものである。この DEM 表現を用いることで、三次元の計測位置計画を二次元格子上で実行することができる反面、各格子に格納される高さ情報は、その位置における対象物の上端位置を表しているため、樹木の下などの自由空間を表現ができないという欠点もある。本研究では、計測システムが移動できる空間は、地面上であるという拘束があることから、計測位置計画に DEM を利用することは、適当であると考え、暫定的にこれを採用した。

### 3.2 移動可能領域の設定

構築した DEM では、各格子間の高さ情報の変化が、勾配の大きさ(または段差の高さ)に相当する。測定システムを移動させる場合、その勾配の高さは、一定以下である必要がある。そこで、本研究では、測定システムの移動可能領域を、各格子間の高さ情報の変化の小さいエリア、言い換えれば、平らなエリアに限定することとした。具体的には、DEM の各格子において、隣接する格子の高さ情報の差の総和が一定値以下となる領域で、計測地点を含むものを移動可能領域と設定する。

### 3.3 距離に応じた領域分割

次に、DEM で表現した環境について、領域分割を行う。前章で示した通り、計測地点からの距離が一定値を越える物体(本研究の場合は 30[m])の対象物のテクスチャマッピングは、その精度が問題となる。したがって、センサ情報として有効な範囲は、獲得可能な三次元距離情報の部分集合となる。本研究では、計測地点からの距離が 30[m] 以内の測定を行うことができた領域を「測定完了領域(C)」, 30[m] 以上だが距離情報が獲得できた領域(つまり、距離情報はあがるが、画像情報の解像度が低くなるため計測完了と

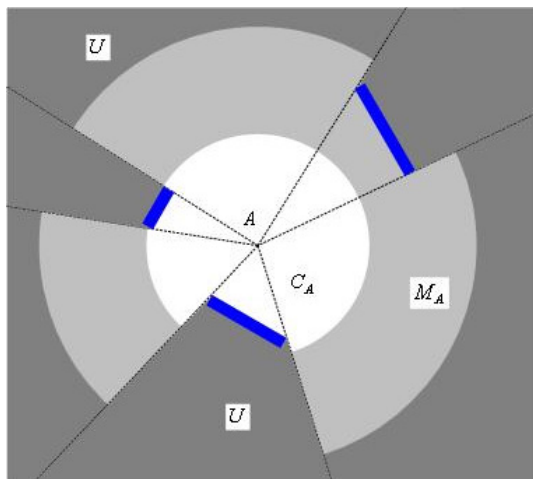


Fig. 5 領域分割手法

はならない領域)を「測定中領域 ( $M$ )」と定義する。また、一つの計測地点から三次元地図を獲得する際、観測した物体の裏側の環境(オクルージョンエリア)や、距離センサの最大到達距離を越えるエリアについては、その計測地点から計測を行うことが不可能である。このような、距離データが存在しない領域を「測定未了領域 ( $U$ )」と定義する。

上述の領域に関する概念を二次元平面において表現した例を図5に示す。この図において、中心のA点が観測地点、白い部分が測定完了領域 ( $C_A$ )、薄い灰色の部分が測定中領域 ( $M_A$ )、濃い灰色の部分が測定未了領域 ( $U$ )、青い部分が障害物領域である。

### 3.4 評価関数の提案

できるだけ少ない測定回数で、一定の地図精度を確保するためには、次の測定地点において、可能な限り、視野範囲内に未計測または、計測中の対象物を捕えることができることが望ましい。言い換えれば、できるだけ測定未了領域  $U$  や測定中領域  $M$  が、測定完了領域  $C$  に変化することが期待されることを評価する評価関数が必要であるといえる。そこで、本研究では、以下に示す評価関数を定義することとした。

$$F_X = \frac{\text{area}((U \cap C_B) \cup (U \cap M_B))}{\text{area}(M_A \cap C_B)} \cdot \alpha + (1 - \alpha) \quad (1)$$

ここで、 $\text{area}()$  は、カッコ内に示される領域の面積、 $C_B$  は、移動可能領域内のある計測地点  $B$  で測定した場合に、計測完了領域となると期待できる領域、 $M_B$  は、計測地点  $B$  で測定した場合に、計測中領域となると期待できる領域、 $\alpha$  は、重み係数である。既に距離情報が得られている計測中領域を、できるだけ計測完了としたい場合、 $\alpha$  を1に近づけ、計測未了領域をできるだけ減らしたい場合には、 $\alpha$  を0に近づけることとなる。

上述の評価概念を二次元環境において表現したものを図6に示す。この図では、図5の例で示した環境内において、次の観測点  $B$  における計測で、どの程度、環境が明らかになるか、ということを示している。濃い黄色の部分が、測定完了領域となると期待できる領域、薄い黄色の部分が計測中領域となると期待できる領域である。なお、測定未了領域内においては、その領域内に何が存在するか分からないため、 $\alpha$  が0に近い方が、期待通りにならないリスクが大きい。

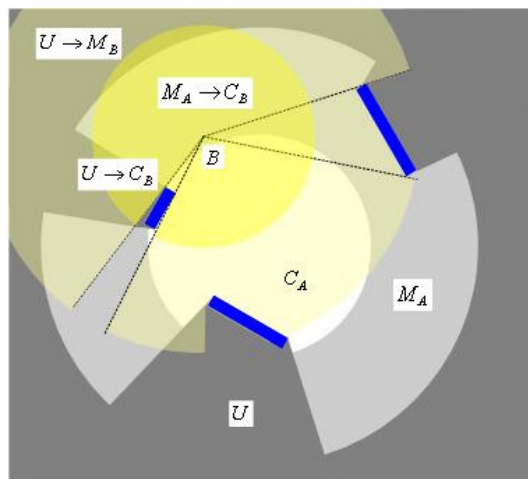


Fig. 6 ある計測地点候補において期待される観測領域

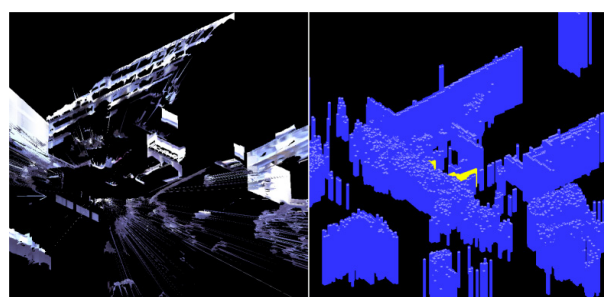


Fig. 7 三次元地図(左)のDEM化(右)

## 4 計測位置計画の適用例

前章において示した計測位置計画の流れを、図1に示す環境に適用した。まず、DEMの構築を行い、移動可能領域の設定を行った。この環境をDEMに変換し、移動可能領域を黄色で示したものを図7に示す。図左は、ある計測地点から獲得した三次元地図、図右は、これをDEMで表現したものである。

次に、このDEM情報から初期計測位置からの距離に応じた領域分割を行った。これを上方から表示したものを図8に示す。ここで、黄色い部分が移動可能領域、薄い青色の部分が測定完了領域、濃い青色の部分が測定中領域、黒色の部分が測定未了領域である。

以上の情報から、移動可能領域内(黄色い部分)の全ての点において、前章で提案した評価関数を適用し、計測位置計画を行った。この計画の結果は、 $\alpha$  に大きく依存する。そこで、ここでは、 $\alpha = 0$  の場合と  $\alpha = 1$  の2つの場合について計画を行い、結果をそれぞれ、図9と図10に表示した。各図中の赤い点が、計画した次の計測地点である。 $\alpha = 0$  とした場合、未知領域をできるだけ減らしたいというインセンティブが最も大きく働くが、計測位置を右手の方に持っていくことで、計測未了部分をできるだけ減らすような計画となっていることが分かる。一方、 $\alpha = 1$  の場合、既に距離情報が得られている計測中領域をできるだけ計測したいというインセンティブが働くため、図左側の計測中領域を、できるだけ計測完了とするような計画となっていることが分かる。以上より、次計測地点の計画が、実環境で計測したデータの中で、正しく実行されていることが見て取れる。

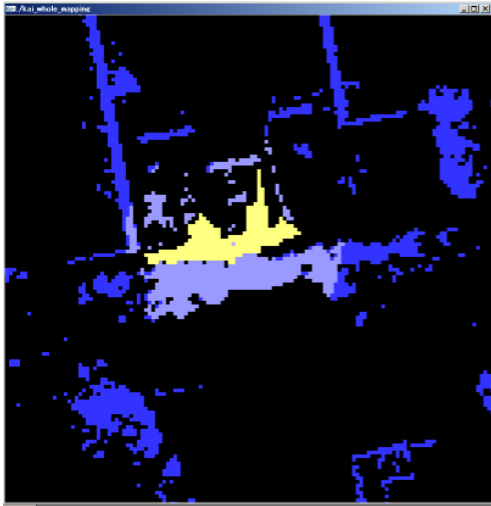


Fig. 8 計測初期位置における領域分割

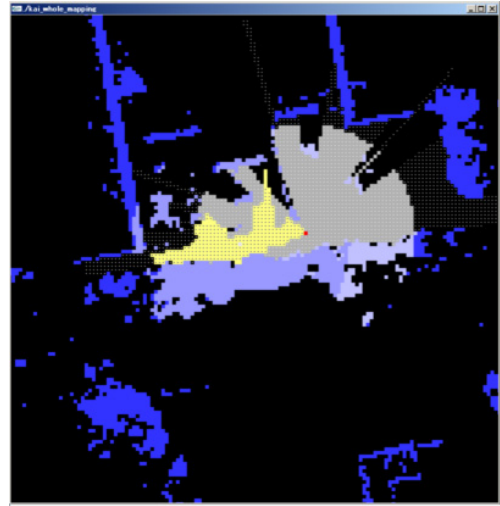


Fig. 9 次の計測位置計画の結果 : ( $\alpha = 0$  の場合)

## 5 まとめと今後の課題

本稿では、三次元距離情報と画像情報によって構成される広域三次元地図の構築に関する研究について述べた。まず、一点から獲得可能な三次元地図の獲得手法について述べ、筆者らが構築したセンサシステムと、それによって獲得した三次元地図を紹介した。次に、広域三次元地図を獲得するための、測定位置計画手法について述べた。この手法では、センサシステムが移動可能な範囲内において、できる限り計測未了領域を減らす評価を採用した。さらに、この評価手法を用いた二点目の測定と、その情報の融合結果について、実環境内で行った実験を紹介した。

現状の手法では、対象物と測定地点の位置関係しか考慮していない。しかしながら、綺麗なテクスチャを三次元距離情報に貼り合わせるためには、その面の向きを考慮する必要がある。そこで、今後の課題として、向きの評価を含めた評価手法の考案が考えられる。一方、測定位置計画における環境の表現には、DEMを利用したが、本文中でも述べた通り、DEMは、天井等の存在する空間を表現することができない。そこで、今後の課題として、この問題に対処する必要がある。以上の問題を解決し、屋外環境における広域の環境情報を獲得することが、本研究の大きな課題である。

## 文献

- [1] 田所 諭他. 特集 大都市大震災軽減化特別プロジェクト レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 5, pp. 1-44, 2004.
- [2] 永谷圭司, 吉田和哉. 火山探査移動観測ステーション move の遠隔操作性能の向上にむけて-伊豆大島三原山における三次元環境情報取得実験-. 第7回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 論文集, pp. 664-665, 2006.
- [3] 下笹洋一, 菅原雄介, 若林潔, 杉浦正則, 小椎 尾文夫, 木村明博, 森口拓雄, 藤瀬弘樹, 末富大剛. 屋外警備ロボット『ガードロボi』の紹介. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 1P2-N-036 (1)-(2), 2005.
- [4] 大野和則, 田所諭. 三次元スキャナーの開発と三次元地図の構築. 第6回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 論文集, pp. 583-584, 2005.
- [5] Keiji Nagatani et. al. Development of a networked robotic system for disaster mitigation -system description of multi-robot system and report of performance tests-. In *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Field and Service Robotics*, pp. 333-342, 2007.
- [6] Joseph O'Rourke. *Art Gallery Theorems and Algorithms*. Oxford Univ Press, 1978.
- [7] Andreas Nuchter, Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Joachim Hertzberg, and Sebastian Thrun. 6d slam with an application in autonomous mine mapping. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1998-2003, 2004.
- [8] 戸畑享大, 倉爪亮, 村上剛司, 長谷川勉. 群ロボットによる3次元環境計測と地図生成. 第13回 ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 159-165, 2008.

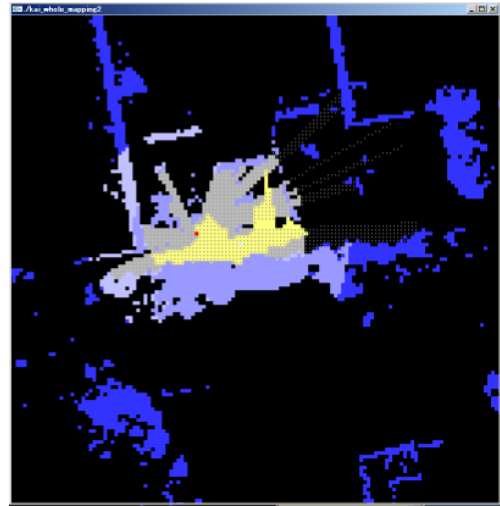


Fig. 10 次の計測位置計画の結果 : ( $\alpha = 1$  の場合)