

大規模環境に対する 3次元レーザ計測の効率化の検討

Effective technique of a three-dimensional laser measurement for a large-scale environment

南 承佑 (九大) 正 倉爪 亮 (九大)
岩下 友美 (九大) 鄭 好政 (九大)

Seungwoo NHAM, Kyushu University, nham@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Ryo KURAZUME, Kyushu University, Yumi IWASHITA, Kyushu University
Hojung JUNG, Kyushu University

This paper proposes an efficient technique for the measurement of large-scale three-dimensional environment using a laser scanner. The proposed technique consists of two parts, the optimum parameter setting of a laser scanner and the reduction of movement time of target markers. We conducted measurement experiments and verified the effectiveness of the proposed technique.

Key Words: Laser scanner, Three-dimensional measurement, Large environment measurement, Efficiency

1 はじめに

従来、高さ情報も含む 3次元環境地図は、移動ロボット用の地図やカーナビなどで利用されていた。しかし近年、高性能なレーザスキャナが開発され、高精度な 3次元環境地図が手軽に取得できるようになり [1], 土木工事や文化財保護 [2, 3] などの分野でも利用され始めている。しかし、大規模な 3次元地図をレーザスキャナで取得するには、複数の基準球を用いて多地点でレーザ計測を繰り返す必要があり、計測時間が長く、時間・場所の制約がある場合には地図データの取得が困難であった。

レーザスキャナにより大規模な 3次元地図を効率的に取得するには、計測精度や点群密度などの必要条件を慎重に検討し、それらの条件を満たすように、レーザスキャナの計測条件や、統合処理に必要な基準球の設置位置を決定する必要がある。しかし多くの場合、計測条件やレーザスキャナや基準球の設置位置はオペレータの経験に基づいて設定されており、必要以上に計測を繰り返して無駄な時間がかかるなど、効率的な計測が実現されているとは言い難い。

この問題を解決するために、本稿では、レーザスキャナの計測条件と、レーザスキャナと基準球の移動方法について検討する。まず前者では、レーザスキャナの計測条件と計測精度や点群密度の関係を調査し、計測目標に合った条件の設定方法について検討する。後者では、レーザスキャナを複数の位置に設置してレーザ計測を繰り返した際に、得られた点群を統合するのに必要な基準球の設置方法について検討する。その結果、2つの基準球を一体化した構造物を提案し、これにより計測精度をそれほど低下させず、かつ移動の省力化が実現できることを示す。また、それぞれについて実機実験を行い、提案手法により、大規模環境に対する効率的な 3次元レーザ計測システムが実現できることを示す。

2 レーザスキャナを用いた 3次元環境の計測

2.1 レーザスキャナ

レーザスキャナは、本体からレーザを照射し、ある点から反射され本体に戻る光を計測する。このときレーザの飛行時間で反射された点の位置が計算でき、これらの無数の点の位置情報を収集することで、3次元地図が完成する。本研究ではレーザスキャナとして FARO Focus3D(1, 以後 FARO と表記) を使用する。



Fig.1 FARO Focus 3D

2.2 点群の統合

FARO の設定によって異なるが、一般的には計測可能な点は直径約 40[m] の球状の範囲に限られる。建物、遺跡などは 100[m] 以上の場合があるので、これらの計測のためには 40[m] 間隔で FARO を設置して複数地点から計測を繰り返し、得られた複数の点群を 1つに統合する必要がある。統合の手法は様々なものがあるが、本研究で用いる方法は「Target-Based」と名称される方法である。「Target-Based」はその名の通りターゲットを設置し、そのターゲットを基準として点群の統合を行う。「Target-Based」の概要を図 2 に示す。

本研究に利用されるターゲットは反射率が高いスチロール材の基準球である。FARO は、この基準球を計測することで正確に基準球の中心位置を同定できる。これを複数の地点で繰り返すと、同一位置にあった基準球から他の FARO の位置が推定できる。

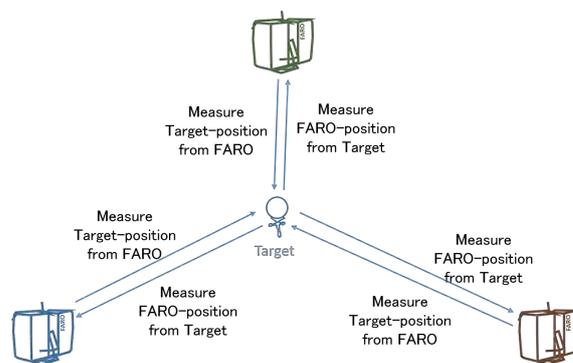


Fig.2 Self-position estimation method by the target-based method

3 レーザスキャナ計測条件の検討

本項では、レーザスキャナを用いた3次元レーザ計測に対する計測の基準として、以下を設定する。

- 基準球までの距離 20[m] 以上
- 移動時間約 10 分以内

以下では、上記の基準を満たすレーザスキャナの計測条件について検討する。

3.1 Resolution

Resolution は、FARO による全周計測 1 回あたりのレーザ計測点数を表し、FARO では 1/1 から 1/32 まで 9 種類設定できる。Resolution の説明を図 3 に示す。FARO は本体が水平、垂直方向に 360° 回転しデータを収集する。1 回のデータ取得時の総点数は Resolution の値によって変更できる。Resolution と計測時間は Trade-off の関係であり、目標に合った最適な設定が要求される。

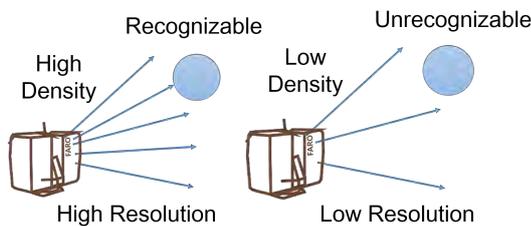


Fig.3 Target recognition performance with respect to resolution changes

前述したように屋外の膨大な点群データ取得のためには点群の統合が必要となる。基準球を 2, 3.5, 5, 8, 10, 12, 14, 17, 20, 25.5, 31[m] の間隔に置き、それぞれの Resolution に対する認識距離と計測時間を計測した。その結果から、最適な Resolution は、表 1 の 3 つが考えられる。

Table 1 Resolution configuration that satisfies the set criteria

Resolution	Quality	Recognizable Distance[m]	Measuring time[sec]
1/5	2X	20	199
1/4	1X	25.5	184
1/2	1X	31	345

3.2 Quality

Quality は、1 点の計測に対して FARO 本体から照射するレーザの計測回数であり、FARO では 1X から 8X まで 6 種類に設定できる。Quality の特徴を図 4 に示す。通常、同一の点に対しても、誤差の低減や計測失敗の可能性を考慮し、複数回の計測を行う。FARO は Quality の値によって一点あたりの計測回数が増える。Quality と計測時間は Trade-off の関係であり、目標に合った最適な条件が要求される。

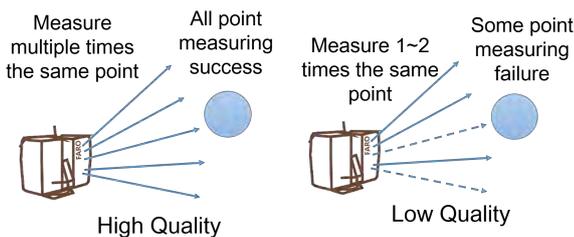


Fig.4 Success rate of measurement with respect to quality changes

図 5 のようにドアの右上の部分に対し、距離値 0 の場合を計測失敗による損失と考えたとき、Quality による損失率の変化を表 2 に示す。また、同じ部分から平面のノイズ (最小固有値の平方根) を計算した結果を、図 6 に示す。Quality5X と 7X は FARO 本体が提供していない設定である。

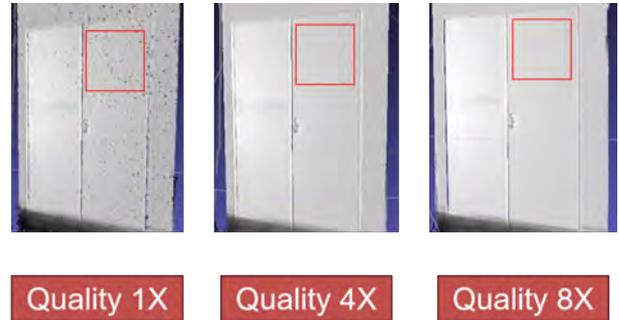


Fig.5 Examples of wall measurement with respect to quality changes

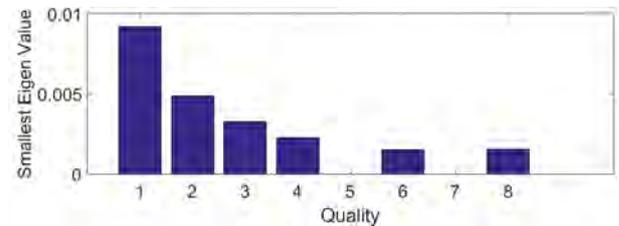


Fig.6 Noise of FARO scanner with respect to quality changes

Table 2 Loss rates with respect to quality changes

Quality	Loss rate[%]
1X	1.76
2X	0.09
3X	0.02
4X	0.00
6X	0.00
8X	0.00

表 2 と図 6 から考えると、損失率 0、またノイズがほぼ一定の値となる 4X 以上の Quality が必要であると考えられる。本研究では移動時間を含めた計測時間で 10 分以内を目標としているため、最適な Resolution と Quality は表 3 である。

Table 3 Optimized configuration of FARO

Resolution	Quality	Measuring time[sec]
1/5	4X	405

4 基準球の設置方法の検討

レーザスキャナで計測された複数の点群データを統合するのに、本研究では基準点を用いる。FARO が推薦する基準球は反射率が高い滑らかな表面の基準球である。3次元の点群の統合は基準球が 3 つ必要となる、しかし本研究で用いるシステムでは水準器を用いるため、基準球 2 つで安定した結果が得られる。屋外計測は時間、場所の制限があり、複数の基準球を個別に移動させる

と、時間の損失が大きい。よって、基準球を同一の構造物に取り付け、複数の基準球を一度に移動させる方法について検討する。本章では最適な構造物の形状について述べる。

4.1 基準球数, 間隔

まず、人手や車両による移動を考慮し、基準球の最大間隔を1.5[m]とし、四角形の構造物を製作した。基準球は1.5[m]間隔の四角、また0.75[m]間隔の小さな四角の各頂点部分に取り付けた。よって、1.5[m]間隔で四角に配置した4つの基準球、1.5[m]間隔で直線状に配置した2つの基準球、0.75[m]間隔で四角に配置した4つの基準球、0.75[m]間隔で直線状に配置した2つの基準球の4つの場合において実験を行った。実験に使用した構造物を図7に示す。

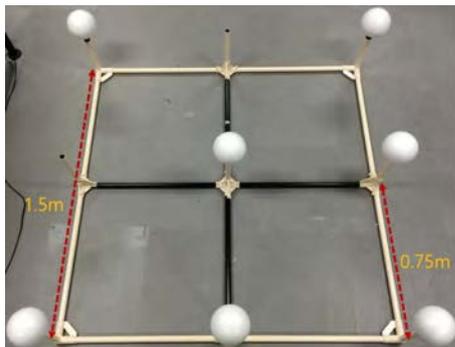


Fig.7 A square structure for keeping reference spheres side length is 1.5m

FARO から構造物を 20[m] 離して設置し、まず FARO で一度基準球を計測して基準球の位置を決定し、その後再度 FARO で基準球を計測して、FARO 自身の位置を求めた。これを 10 回繰り返した結果、0.75m の間隔は一部統合不可、また不安定であったが、1.5m の間隔はすべて安定した結果が得られた。結果を表4に示す。

Table 4 Error of position according to distance between reference spheres and numbers of reference spheres

Distance[m]	The number of spheres	Standrd deviation position error[m]
0.75	2	failure
	4	0.0059
1.5	2	0.0030
	4	0.0022

4.2 基準球数, サイズ

基準球の大きさが変化すると基準球の認識距離も変わる。そこで、基準球サイズの変化による基準球の位置の計測精度の変化を計測した。基準球は直径 150, 200, 300[mm] の3つであり、図7に示す1.5[m]間隔で2個ないし4個を用いた場合について計測を行った。今回の計測に用いた基準球を図8に示す。10回の計測を繰り返した結果、直径200[mm]の2つの基準球でも高い計測精度が得られることが分かった。結果を表5に示す。

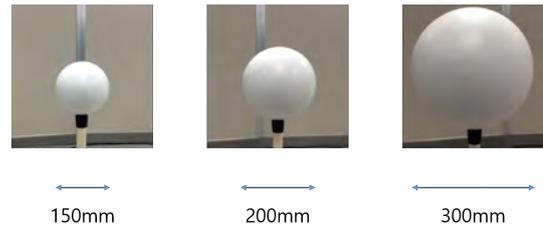


Fig.8 Sizes of reference spheres

Table 5 Error of position according to size of reference spheres and numbers of reference spheres

Diameter[mm]	The number of spheres	Standrd deviation of position error[m]
150	2	0.0040
	4	0.0026
200	2	0.0021
	4	0.0019
300	2	0.0025

最終的に得られた効率的な移動構造物を図9に示す。

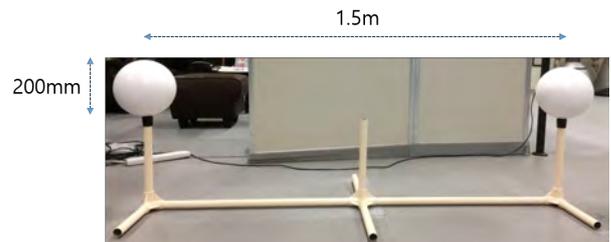


Fig.9 Optimized structure for measurement

5 評価実験

本章では、前章までに得られた最適な計測条件(表3)、基準球の設置方法(図9)を用い、実際の屋外環境を計測して性能評価を行う。

5.1 理想的な条件での計測実験

図9に示す構造物と、2つの基準球を相対角度が90度になる位置に設置した場合の2種類の基準球の設置方法について、それぞれを図10のように設定した基準距離20[m]に置いたときの位置精度を、実験により検討した。

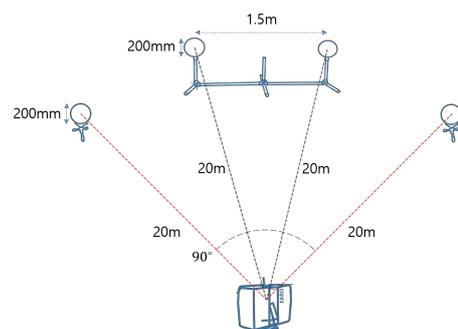


Fig.10 Comparison of two methods for placing reference spheres

まず、1回目の計測で FARO から基準球の位置を決定し、2回目の計測で基準球の位置から FARO の位置を求める実験を行った。これを5セット繰り返し、FARO の位置の標準偏差を求めた。計測の結果を表6に示す。相対角度が90°の基準球の方が安定した精度を示しているが、構造物による計測も高い精度を示している。

Table 6 Position errors by measuring from FARO to reference spheres and from reference spheres to FARO

	Standrd deviation of position error[m]
Reference spheres attached to the structure	0.0018
Two independent reference spheres	0.0010

5.2 実環境での計測実験

図9に示す構造物と、2つの基準球をそれぞれ独立に三脚に設置した場合の2種類の基準球の設置方法を用いて、屋外の実環境で計測実験を行った。初期位置から計測を繰り返すと、FARO の誤差は蓄積される。よって、最終位置では、蓄積された誤差の分、点群のズレが発生する。

構造物による実際の誤差を検証、評価するため、最終計測位置が初期位置に戻るループ状の経路を移動して、計測を行った。実験では、初期計測位置の近傍に位置が特定できる静止した基準球を置き、10回の計測後に初期計測位置に戻り、静止基準球の誤差を計測した。得られた3次元地図を図11に、実験手順を図12に示す。本実験で移動した距離は約330[m]である。



Fig.11 The resulting three-dimensional map

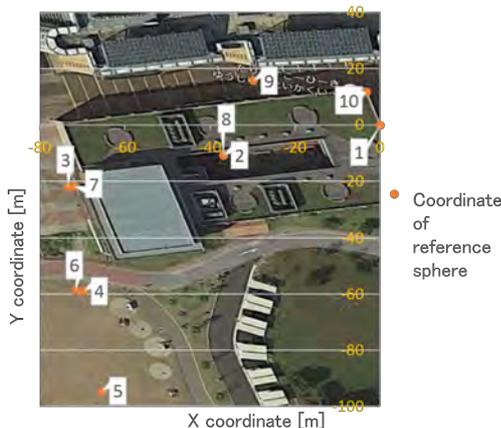


Fig.12 Positions for measurement and its order

計測の結果を図13、表7に示す。誤差率から考えると、2つの基準球を用いた方が約2倍の精度を示しているが、構造物を用いた場合も誤差は移動距離の0.026%で、高い精度が得られている。

また、比較のため、独立した5個の基準球を用いた結果を表7に示す。5個の基準球を用いた場合は、非常に高い精度が得られていることが分かる。しかし、1回あたりの計測・移動時間は20分であり、5つの基準球をそれぞれ独立して動かすため、大きな手間が必要であった。

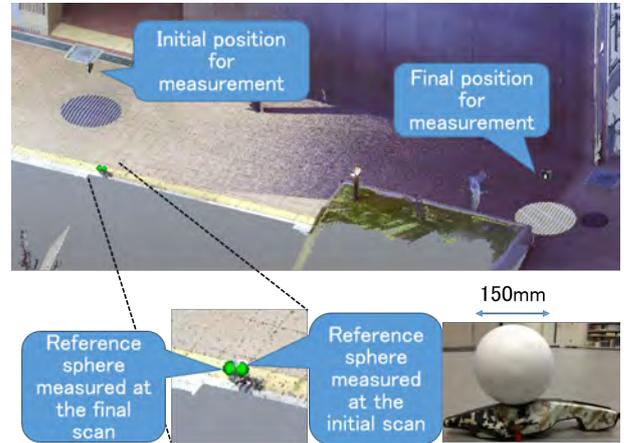


Fig.13 Measurement accuracy with a stationary reference sphere

Table 7 Position errors of the stationary reference sphere

	Error rate[%]
Reference spheres attached to the structure	0.026
Two independent reference spheres	0.013
Five independent reference spheres	0.00027

6 まとめ

本研究では、レーザスキャナにより大規模な3次元地図を効率的に取得することを目標に、レーザスキャナの最適な計測条件、および複数点群データの統合のための基準球の設置方法について検討した。

今後は実際の屋外環境で計測を行い、3次元地図を効率的に獲得できるか検証する予定である。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(課題番号26249029)の支援を受けた。

References

- [1] Frueh, C., Jain, S., & Zakhor, A. "Data processing algorithms for generating textured 3D building facade meshes from laser scans and camera images", International Journal of Computer Vision, 61(2), pp.159-184. 2005.
- [2] Sansoni, G., Trebeschi, M., & Docchio, F. "State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation", Sensors, 9(1), pp. 568-601. 2009.
- [3] LEVOY, Marc, et al. "The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues", Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. pp. 131-144. 2000.