

I-22 3次元レーザースキャナーの測定精度に関する基礎的実験

Study on the Measurement Accuracy of 3D Laser Scanner

福森秀晃¹・佐田達典²・大久保秀晃³・清水哲也⁴・村山盛行⁵

Fukumori Hideaki, Sada Tatsunori, Okubo Hideaki, Shimizu Tetsuya, and Murayama Shigeyuki

抄録：近年登場した3次元レーザースキャナーは広範囲に高密度かつ高速で地形計測が可能であるため、プラント配管計測や土木工事の出来形計測、路面形状計測などに利用されている。しかし、3次元レーザースキャナーの測定精度に関しては、測定条件や気象条件による影響がまだ十分に明らかにされていない。そこで、測定精度に関する基礎的な実験として、対象物と器械との角度、距離、対象物の色を変化させた場合の測定を行い精度を検証した。また、同じ実験を屋内と屋外でも実施し比較した。その結果、入射角度、距離、色が変化すると測定精度が変化することがわかった。また、屋内と屋外では日光の影響がない屋内の方が高精度となった。精度変化は標準偏差で最大4mmであり、通常の計測では問題とならないレベルであることを確認した。

Abstract: Laser scanner is capable of high speed topographic measurement with wide range and high density. Therefore, it is used in shape measurement of plant piping, cutting and embankment, road surface and so on. However it is not enough proved how the machine works under various condition such as incident angle, measurement range, color of the object, weather condition, and sun shine. The authors have executed basic experiment on the condition shown above, and it was confirmed that incident angle, measurement range and color of the object affect the measurement accuracy. Also, it was shown that indoor measurement is more accurate than outdoor measurement because of sun shine effect. The maximum difference of standard deviation was 4mm and it became so small that they do not make trouble in usual use.

キーワード：レーザースキャナー、測定精度、入射角度、測定距離、色、屋内、屋外

Keywords：Laser scanner, accuracy, incident angle, measurement range, color, indoor, outdoor

1. はじめに

近年、3次元レーザースキャナーが登場し、地形計測での適用が注目されている。この器械は、レーザーを連続して照射しながら対象物までの距離と角度を計測できるため、広範囲に高密度かつ高速で地形計測が可能である。また、計測対象範囲に人が立ち入ることなく計測ができるため、崖面や崩壊斜面などの危険箇所における計測では特に有効である。取得した計測データは、大量の点群によって図-1のように地形を詳細に表現することができる。詳細な3次元モデルとして表現できるため、プラントの配管形状計測¹⁾、土工事における出来形計測²⁾、城郭石垣形状計測³⁾など、土木・建設分野で幅広く利用されるようになってきた。筆者らも路面形状計測への適用の検討を行ってきた⁴⁾。

しかし、3次元レーザースキャナーの測定精度に関しては、測定条件による影響がまだ十分に明らかにされていない。レーザースキャナーは土木・建設分野の様々な場面での適用が考えられるため、測定条件、気象条件が変わった場合の測定精度の変化を把握する必要があると考えられる。

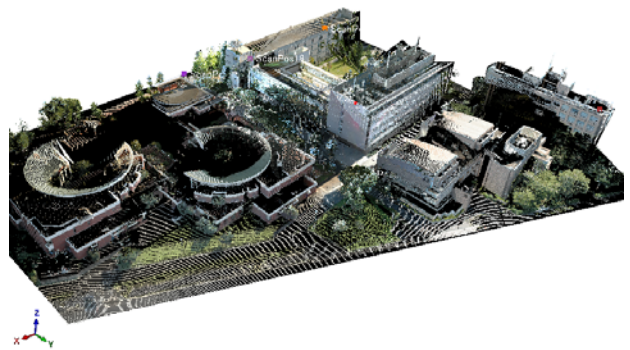


図-1 点群データによる地形表現例
(日本大学理工学部船橋キャンパス点群モデル)

そこで本研究では、基礎的な精度検証を行うこととした。色紙を計測対象物として、レーザースキャナーと計測対象物との角度、距離、計測対象物の色をそれぞれ変化させた場合に、レーザースキャナーの測定精度がどのように変化するか把握することを目的に実験を行った。また、屋内と屋外で同様の実験を行い、気象条件の違い、特に屋内と屋外の照度の差による測定精度の影響も検証した。

1：学生会員 日本大学大学院 理工学研究科社会交通工学専攻

(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1, Tel : 047-469-8147, E-mail : hideaki_fukumori@yahoo.co.jp)

2：正会員 博士(工) 日本大学教授 理工学部社会交通工学科 (E-mail : sada@trpt.cst.nihon-u.ac.jp)

3：非会員 東京都新宿区役所

4：非会員 (株)タクモ

5：正会員 (株)テクノバンガード

2. 測定精度に関する既存研究

(1) 既存研究

W.Boehler ら (2003)⁵⁾は、レーザースキャナーは対象物の角や縁など重要な箇所はノイズがあり正確に測定できるとは限らないという問題点を挙げ、代わりに別の過程で点データからモデル化する必要があることを述べている。そこで、平面の対象物と球体の対象物を計測し、角測定の精度、距離の精度、分解能、エッジの影響、面の反射率の影響、環境条件(気温、気圧、干渉物)、精度以外の仕様から評価、考察している。また、9種類のレーザースキャナーを利用しており、機種ごとのデータも取得している。

実験は、階段の両端に白い球体を設置して計測、正対した長方形の対象物の角に4つの球体を設置して計測、白(反射率80%)、灰色(反射率40%)、黒(反射率8%)の3色の表面を計測、30mm幅の縞模様がある箱の計測、白、灰、黒の光沢のないペイント、金属光沢のあるペイント、つやのあるアルミホイルの計測を行っている。

結論として、レーザースキャナーは一定の条件下では機種にもよるが最大で20mm程度(標準偏差)の誤差が生じたと述べている。また、表面をモデル化するか、高密度なデータを取得しなければ、隣接点間でゆがみが生じてしまうと指摘している。

一方、筆者らが昨年実施した3次元レーザースキャナーを使った路面形状計測の研究⁴⁾では、計測対象の路面に応じてレーザースキャナーの有効範囲を決定するためには、様々な路面形状に対応した検討が必要であることを示した。その際、問題となったのが、天候や昼夜の別、気温、湿度などの気象条件によって計測値にどのような影響が生じるのかという点である。

(2) 本実験との関連

こうした既存の研究における課題から、本研究では計測時の気象条件、特に屋内と屋外の照度の差による測定精度の変化を検証するため、照度の値が小さい体育館内で実験を行う屋内実験と、太陽光により照度の値が大きくなる屋外実験を行った。また、一定の条件下において誤差がどのように生じるのかを確認するため、レーザの対象物への入射角度、レーザースキャナーと対象物間の距離、対象物の色を変えてそれぞれ計測を行い、測定条件が変わった場合に測定精度がどのような影響を受けるのかを検証した。

3. 精度検証実験

(1) 実験目的

本実験は、色紙を計測対象物として、レーザースキ



図-2 LMS-Z420i

表-1 LMS-Z420iの基本仕様⁶⁾

計測範囲	2~1000m
測定精度	±10mm
測定レート	11000点/秒(低速スキャン) 8000点/秒(高速スキャン)
レーザの照射間隔	0.25mrad
スキャニング範囲	鉛直方向:0~80度 水平方向:0~360度

ャナーと計測対象物との角度、距離、計測対象物の色をそれぞれ変化させた場合、さらに、照度が大きく異なる屋内と屋外で同様の実験を行い、測定精度がどのように変化するか把握することを目的に実験を行った。

(2) 使用機器

地上型のレーザースキャナーは現在、数種類販売されており、機種ごとにその特徴は異なる。本実験では、実用時の計測条件を想定し、効率よく計測が実施できるように、短時間で計測可能で、計測精度10mm以内という条件から、土木建設で一般的に利用されている器械の一つである、Riegl社製LMS-Z420i(以下、本装置)を使用した。図-2に示す本装置は、1秒間に8000点の計測が可能で、装置周辺の地物形状を約3分間で計測し、標準で1周当たり約150万点の3次元座標データを取得することができる。また、計測精度は距離計測で10mm、角度分解能が0.1mradである。また、本装置は計測した座標データとカメラ画像の合成を簡単に行うことができ、3次元座標と色情報を持つ点群データとして活用が可能である。基本仕様を表-1に示す。なお、測定レートの仕様で高速スキャンは通常計測のモードであり、低速スキャンはターゲットなどを詳細計測する時のモードである。前者の場合はレー

表-2 実験時の気象条件

	天気	気温 (°C)	湿度 (%)	照度 (lx)	風速 (m/s)
屋内	晴れ	27.8	69	190~1394	0
屋外	晴れ	33.0	43	20000以上	0~2.0

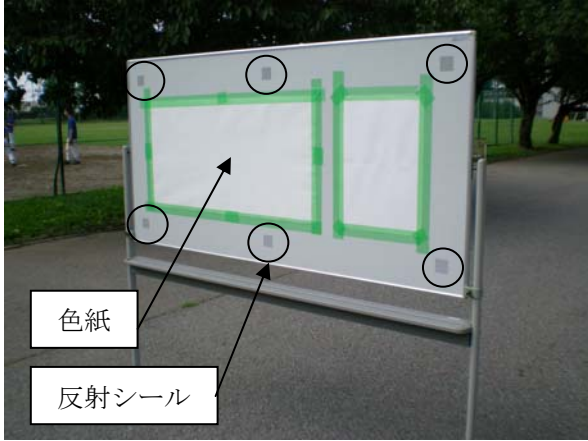


図-3 計測対象物と反射シール

ザー送受信部のポリゴンミラーが回転するが、後者の場合はポリゴンミラーは回転せず、回転軸を中心に微小に上下に振れる（揺動）動きをする。

(3) 実験内容

実験は2008年8月26, 27日に日本大学理工学部船橋キャンパス内の屋内と屋外で、両日も同じ時間帯に行った。実験時の気象条件を表-2に示す。

検証実験は、色紙を計測対象物とし、色紙をホワイトボードに貼り付け、移動と回転ができるように設置した。また、図-3のようにターゲットとして反射シールもホワイトボードに貼り付けた。測定条件を1つずつ変化させ、それぞれの計測データから平均値と標準偏差（4章にて記述）を求めることで測定精度を比較した。比較するために、基準となる測定条件を以下のように定めた。

- ・計測対象物の角度：本装置に対して正対
- ・本装置と対象物の距離：10m
- ・対象物の色：白

また、状況図を図-4に示す。この状態での計測を最初に行い、比較基準となる計測を10回行った。次に、以下の3種類の実験を行った。各実験の条件を表-3にまとめる。表中の色つき部分については、比較基準の計測条件と同じであることを示す。

a) 計測対象物の角度

本装置と計測対象物との距離を10m、対象物の色を白に固定し、ホワイトボードを回転させる。角度は、正対した状態を0°として、15°、30°、45°、60°、75°の順に15°ピッチで水平に近づく方向に回転させる。図

表-3 各実験の計測条件

	計測対象物の角度	本装置と対象物の距離	計測対象物の色
比較基準となる計測	0°	10m	白
	0°	10m	白
角度の変化	15°	10m	白
	30°	10m	白
	45°	10m	白
	60°	10m	白
	75°	10m	白
	0°	2m	白
距離の変化	0°	5m	白
	0°	10m	白
	0°	20m	白
	0°	30m	白
	0°	40m	白
	0°	50m	白
色の変化	0°	10m	白
	0°	10m	黒
	0°	10m	赤
	0°	10m	青
	0°	10m	緑

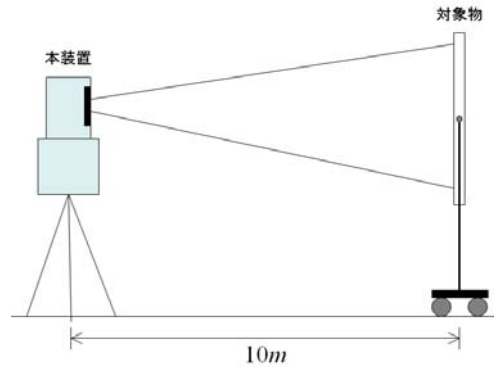


図-4 比較基準の計測の状況

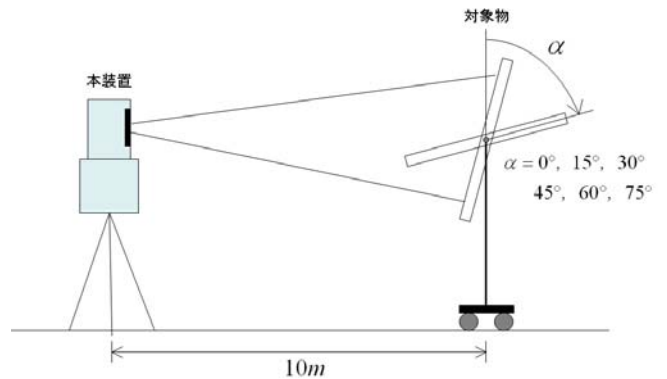


図-5 角度を変える場合の状況

-5に状況図を示す。

b) 本装置と対象物の距離

対象物の角度は正対状態、対象物の色は白に固定し、本装置と対象物の距離を変化させる。距離は、本装置の最短計測範囲である2mを最短距離として、5m、10m、20m、30m、40m、50mの順に遠ざける。図-6に状況図を示す。

c) 対象物の色

本装置と対象物との距離を10m、対象物の角度は正対状態に固定し、対象物の色を変化させる。色紙の色は、白、黒、赤、青、緑の順に張り替える。

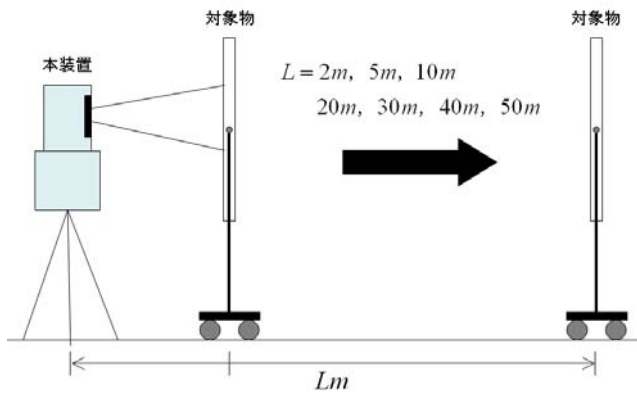


図-6 距離を変える場合の状況

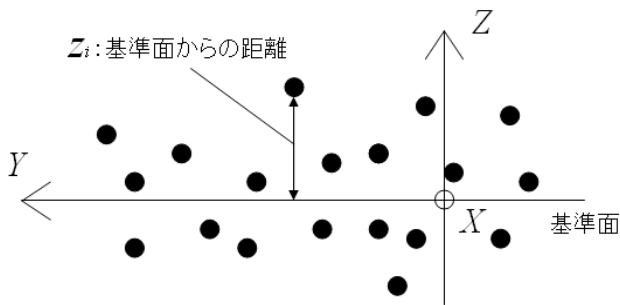


図-7 X軸方向から見た現地座標系

4. 測定精度の評価

(1) 座標変換

レーザースキャナーは、器械中心を原点とした3次元直交座標（以下、レーザース座標系）を持っており、計測された点群データはすべてその座標系で表示される。本実験では、面を対象とした測定精度の評価を行うため、計測面を中心とした3次元直交座標系（以下、現地座標系）に座標変換を行った。

図-3のように、対象物とともにホワイトボードに貼り付けた6点のターゲット(反射シール)を計測し、取得した座標データを用いて座標変換時の回転量、移動量を求めた。

(2) 測定精度の評価指標

測定精度の評価を行うため、計測対象とした面を基準として、実験で取得した点群データの精度を基準面からの距離で評価した。図-7のように、基準面からの距離 z_i の平均値と標準偏差で評価した。

基準面からの距離 z_i の平均値は、実験で取得した点群データの真値からの乖離度を示す指標であり、標準偏差はデータのばらつきを表す指標である。

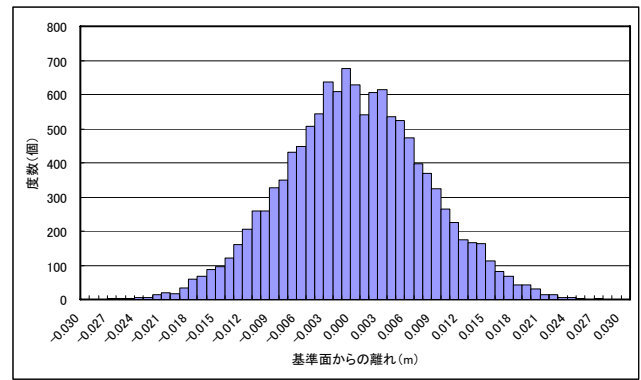


図-8 屋内での基準計測結果 (1回目)

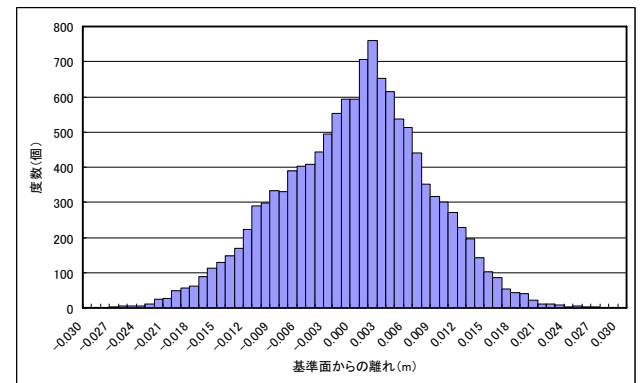


図-9 屋外での基準計測結果 (1回目)

5. 実験結果

(1) 基準計測

対象物の角度は正対状態、本装置と対象物間の距離は10m、色は白の比較基準状態での計測結果を示す。図-8には屋内での1回目の計測結果のヒストグラムを示す。同様に、図-9には屋外での1回目の計測結果のヒストグラムを示す。

表-4に基準計測の計測結果を示す。屋内の10回の計測では、平均値の平均は-3.11mm、標準偏差の平均は7.82mmとなった。屋外の計測10回では、平均値の平均は1.76mm、標準偏差の平均は8.09mmとなった。

また、図-10に基準計測の計測結果をグラフ化して示す。表-4と図-10から、屋内計測では全ての計測で平均値がマイナスの値をとった。これは距離が真値よりも短く計測され、計測値が基準面より手前に分布していることを示している。一方、屋外計測では全ての計測で平均値がプラスの値をとった。これは距離が真値よりも長く計測され、計測値が基準面より奥に分布していることを示している。

平均値の絶対値でみると屋外計測より屋内計測の方が大きく、真値からの乖離が大きいか結果となった。ただし、標準偏差で比較すると、若干ではあるが屋外計測よりも屋内計測の方が小さくなった。

表-4 基準計測の計測結果

計測回	屋内		屋外	
	標準偏差 (mm)	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	平均値 (mm)
1	7.89	-4.00	8.17	1.98
2	7.92	-3.04	8.16	1.27
3	7.75	-2.94	8.05	1.50
4	7.84	-2.96	8.01	0.95
5	7.82	-3.04	8.14	1.16
6	7.79	-2.98	7.98	0.74
7	7.81	-2.97	7.97	2.47
8	7.77	-3.00	8.11	2.44
9	7.80	-3.02	8.13	2.55
10	7.84	-3.18	8.13	2.55
平均	7.82	-3.11	8.08	1.76

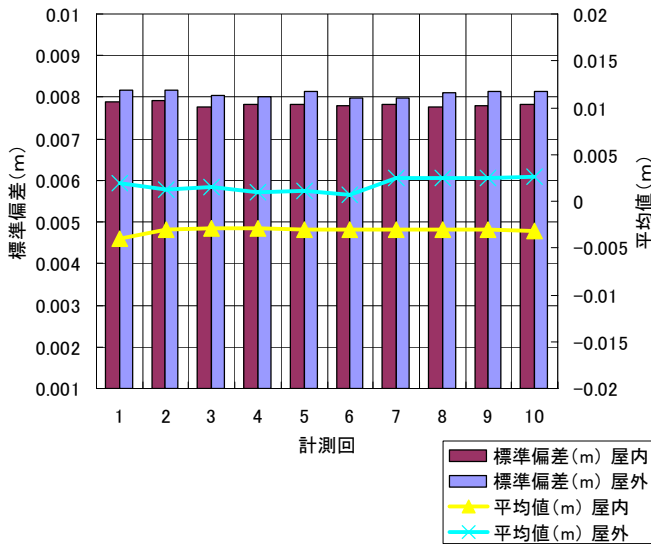


図-10 基準計測の計測結果

(2) 対象物の角度

対象物の角度を変化させた場合の計測結果を示す。まず、屋内実験での点群の分布状況を、各角度のデータを1つのヒストグラムにまとめて図-11に示す。同様に、図-12には屋外実験での結果を示す表-4と図-12には、角度ごとの計測結果を屋内・屋外別に比較した結果を示す。

屋内と屋外ともに角度を変え、対象物が正対から水平に近づくほど標準偏差が小さくなり、みかけの測定精度が向上することが確認できた。これは、レーザーの入射角が大きくなると、面に垂直な距離成分が小さくなるためである。今回使用した本装置は、レーザーのビーム径が0.25mradと極小なため、距離の精度に依存している。機種によっては、ビーム径が大きいものもあり、入射角が鋭角になると精度が劣化する場合も考えられるので、機種ごとに考慮しなくてはならない。

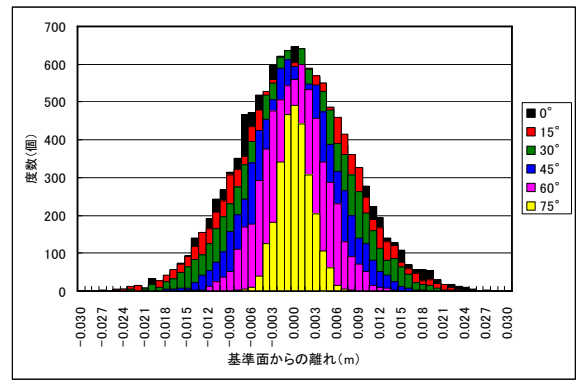


図-11 屋内実験での各角度の分布状況

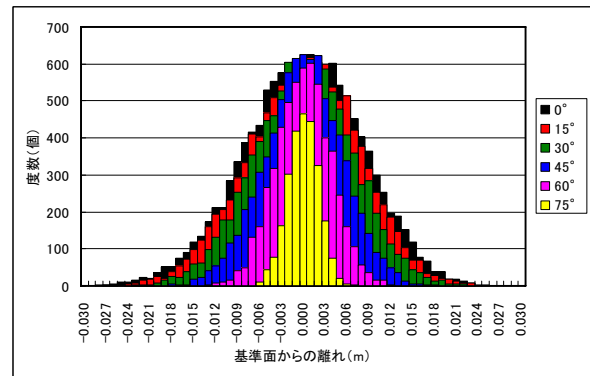


図-12 屋外実験での各角度の分布状況

表-5 角度ごとの計測結果

入射角度 (°)	屋内		屋外	
	標準偏差 (mm)	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	平均値 (mm)
0	7.82	-3.04	8.08	3.07
15	7.59	1.26	7.61	3.07
30	6.84	1.20	6.69	3.33
45	5.42	2.96	5.31	3.57
60	4.23	-0.52	3.80	2.81
75	2.29	0.52	2.07	0.80

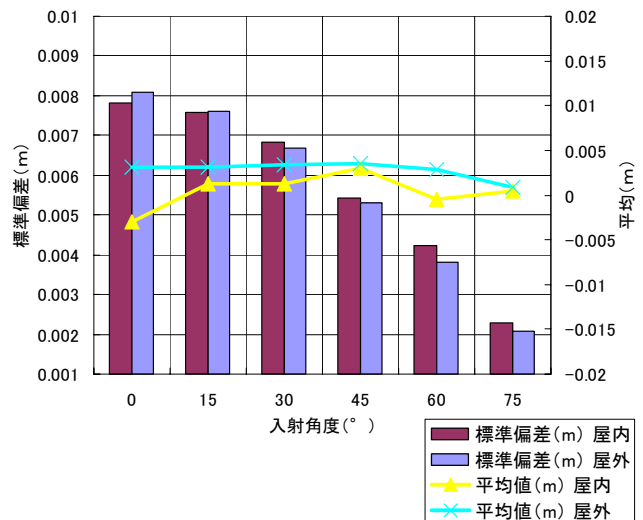


図-13 角度ごとの計測結果

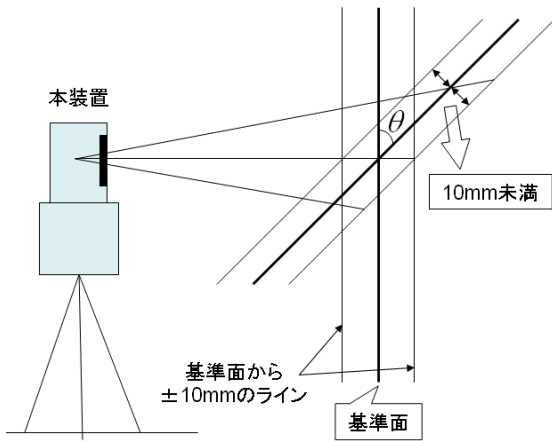


図-14 角度がある場合のレーザーの照射範囲

図-14には、角度がある場合とない場合のレーザーの照射範囲を示す。正対しているときは基準面からの距離が±10mmであるのに対して、入射角度を変化させたときは基準面からの距離は±10mmよりも小さくなり、面に垂直な距離成分が小さくなるのが要因として考えられる。また、この角度に依存する変動は、以下のような余弦関数式となる。

$$\text{理論値(mm)} = 10\text{mm(測定精度)} \times \cos \theta$$

一方、表-5と図-15から、屋内計測では平均値がマイナスとプラスの両方の値をとった。これに対して屋外計測では全ての計測で平均値がプラスの値をとった。これは距離が真値よりも長く計測され、計測値が基準面より奥に分布していることを示している。

平均値の絶対値で見ると屋外計測より屋内計測の方が小さくなった。ただし、標準偏差で比較すると、若干ではあるが屋外計測よりも屋内計測の方が大きい。

(3) 本装置と対象物との距離

本装置と対象物の距離を変化させた場合の計測結果を表-6と図-15に示す。距離30mまでは距離が長くなるとともに標準偏差が屋内・屋外ともに大きくなるが、距離40m、50mでは標準偏差が小さくなる。これは実験時に30m以遠の計測では自動的に低速スキャン(揺動ミラー)モードに切り替わったため、通常のスキャン方式よりも精密に測定できたためと推察される。

一方、表-6と図-15から、屋内計測では平均値がマイナスの値をとる場合が多い。これは距離が真値よりも短く計測され、計測値が基準面より手前に分布していることを示している。一方、屋外計測では距離5m以外の計測で平均値がプラスの値をとった。これは距離が真値よりも長く計測され、計測値が基準面より奥に分布していることを示している。

平均値の絶対値で見ると屋内・屋外計測とも10mmを超える値をとる場合があることがわかる。ただし、

表-6 距離別の計測結果

距離(m)	屋内		屋外	
	標準偏差(mm)	平均値(mm)	標準偏差(mm)	平均値(mm)
2	7.29	-6.34	7.70	13.30
5	8.10	-3.09	8.29	-2.37
10	7.67	-2.19	7.81	3.37
20	10.28	0.72	10.28	3.37
30	10.21	-12.98	11.94	11.87
40	7.86	17.33	9.53	9.26
50	9.64	-15.75	9.63	4.30

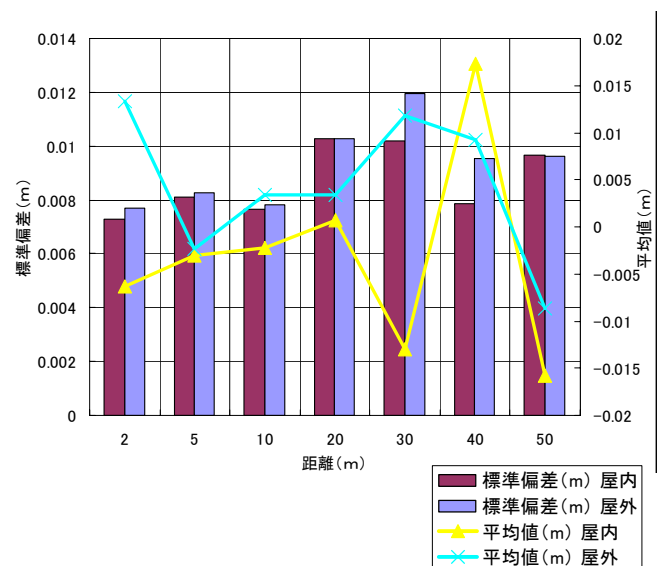


図-15 距離別の計測結果

標準偏差で比較すると、若干ではあるが屋外計測よりも屋内計測の方が小さくなった。

(4) 対象物の色

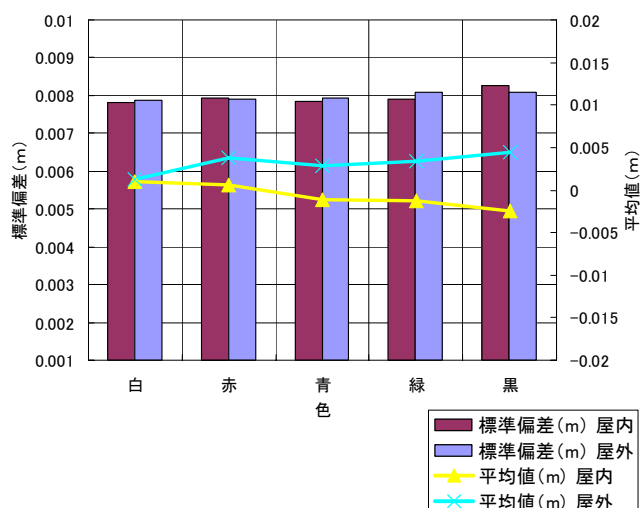
計測対象物の色を変化させた場合の結果を表-7、図-16に示す。屋内と屋外ともに黒と緑では、標準偏差が他の色よりわずかに大きくなった。これは、暗い色はレーザーの反射率が低いためと考えられる。図-17に色別の反射強度を示すが、確かに白、赤、青に比べて、黒、緑の反射強度が小さくなっている。

また、反射強度は屋内と屋外を比べると、2~5%程度、屋外より屋内が高い値をとっている。これは、屋内では照度が小さく太陽光によるノイズが小さいためと考えられる。

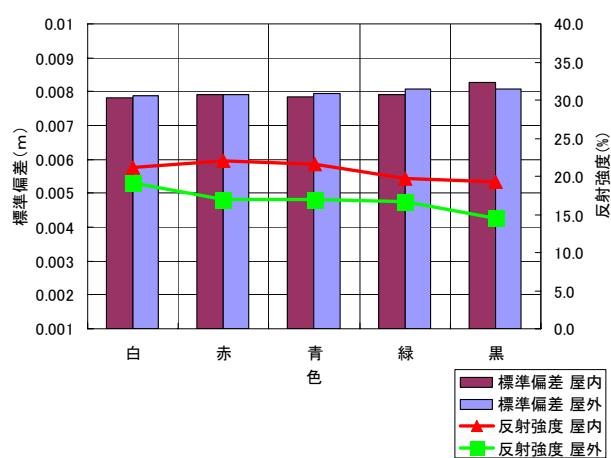
一方、平均値をみると屋内計測では反射強度が低いほど値が小さくなり、計測距離が短くなることを示している。屋外計測では平均値はすべてプラスであり、反射強度が小さいほど平均値が大きくなっている。これらの結果は、反射強度が小さくなるほど真値から乖離することを示していると考えられる。

表一七 色別の計測結果

色	屋内			屋外		
	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	反射強度 (%)	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	反射強度 (%)
白	1.03	7.82	21.1	1.22	7.87	19.2
赤	0.54	7.93	22.0	3.77	7.92	17.0
青	-1.11	7.85	21.6	2.91	7.95	16.9
緑	-1.29	7.92	19.7	3.42	8.09	16.6
黒	-2.52	8.27	19.3	4.44	8.08	14.5



図一六 色別の計測結果（標準偏差と平均値）



図一七 色別の計測結果（標準偏差と反射強度）

6. 結論

(1) 本研究の成果

本実験は、3次元レーザースキャナーの有効な活用方法の基盤となる基礎的な測定精度を検証することを目的として、本装置と計測対象物との角度、距離、計測対象物の色を変化させて検証実験を行った。また、照度に大きな差がある屋内と屋外で同様の計測実験を行い、照度による測定精度の影響も検討した。

最初に行った比較基準となる計測では、屋内と屋外

において、平均値に正と負の違いがあり、真値に対して屋内では手前（本装置側）に、屋外では奥にデータが分布する傾向が確認できた。

本装置と計測対象物との角度を変化させた場合では、本装置のレーザーのビーム径が極小であることから、対象物が正対から水平に近づくほど標準偏差が小さくなり、みかけの測定精度が向上する結果となった。

距離を変化させた場合は、40m以遠において計測方式が通常の方式から揺動ミラー方式に切り替わったことで、標準偏差の値が小さくなる結果となった。

計測対象物の色を変えた場合では、色と反射強度の関係から、暗い色は反射強度が小さく、標準偏差の値が大きくなることが確認できた。また、反射強度の数値を屋内と屋外で比較すると、屋外は反射強度が小さく、照度の影響を受けていることが確認できた。

今回はこれらの実験から、以下の事項を確認することができた。

- 屋内と屋外の計測において平均値を比較すると、基準面に対して屋内では手前側に、屋外では奥にデータが分布する傾向がある。屋内では距離が短く、屋外では距離が長く計測されることを示している。これは、照度の差による影響と考えられる。屋内と屋外で比較すると、距離を変化させた場合に標準偏差で最大約4mm、平均値で最大約20mmの差が生じることがわかった。通常の計測には問題ないが、この程度の差が生じることを認識しておく必要があると考えられる。
- 今回使用した装置では、レーザーのビーム径が極小なため、対象物の角度が正対より水平に近い傾いた状態のほうが、計測対象面から垂直方向のばらつきが小さくなる。
- 計測対象物の色を変えた場合では、色と反射強度の関係から、暗い色は反射強度が小さく、標準偏差の値が大きくなることが確認できた。

(2) 今後の課題

今後の課題としては、数種類の装置を用いて同じ条件下で実験を行い、装置ごとの測定精度の違いを検証すること、装置と対象物間の距離を50m以遠に設定した場合の測定精度の変動、さらには測定対象物の材質による影響も検証することが必要であると考えられる。これらの検証を進めてレーザースキャナーのデータ特性を把握することにより、計測対象物や気象条件の状況に応じた最適な計測計画、器械選定等の補助データが取得でき、今後のレーザースキャナーの有効利用に繋がると考えられる。

謝辞：本実験を行うにあたり，ご協力をいただいたリーグルジャパン株式会社の松田重雄氏に心よりの謝意を表す。

参考文献

- 1) 大津慎一，佐田達典，村山盛行：三次元レーザースキャナーを用いたプラント配管現状図作成システム，第 27 回情報システムシンポジウム講演集，pp.61-64，2002 年
- 2) 佐田達典，大津慎一：地上型三次元レーザースキャナーを用いた地形計測システム，建設の機械化，No.625，pp.35-41，2002 年
- 3) 大津慎一，佐田達典，水本雅夫：三次元レーザープロファイラを用いた城郭石垣計測システムの開発，土木情報利用技術論文集，Vol.13，pp.165-172，2004 年
- 4) 福森秀晃，佐田達典，石塚隆，清水哲也，村山盛行：3次元レーザースキャナーを用いた路面形状計測に関する研究，土木情報利用技術論文集，Vol.17，pp.225-232，2008 年
- 5) Boehler,W. & Marbs,A., Investigating Laser Scanner Accuracy, i3mainz Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences, Mainz, Germany, 2003
- 6) リーグルジャパン (株) HP:
< <http://www.riegl-japan.co.jp/>>, (入手 2008.08)
- 7) 村井俊治：空間情報工学，社団法人日本測量協会，pp.175-177，2002 年