

構造物の3D計測とその利活用に関する研究

伊勢田幹太*・松田浩**・古賀掲維***・松原健治****・田添智宏****

Study on 3D measurement of structures and its utilization

by

Mikihiro ISEDA* , Hiroshi MATUDA** , Aoi KOGA***
Kenzi MATSUBARA**** , Tomohiro TAZOE ****

The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism introduced a new standard "i-Construction" from the year 2016 on the premise of computerization in all processes from surveying and design to construction and management, in order to improve the productivity of construction sites. In this research, focusing on the performance of the 3D laser scanner, we will consider how to use 3D data more effectively, such as establishing a new inspection method for bridge inspection, establishing an efficient dimension measurement method, etc. The purpose is to verify.

Key words : laser scanner, 3D, bridge inspection

1. はじめに

機械設計, 製造分野では1970年代からCAD(Computer Aided Design)とCAM(Computer Aided Manufacturing), CAE(Computer Aided Engineering)を統合化したCIM(Computer Integrated Manufacturing)が推進され, その中で3D-CADも利活用されていった。その後, 建築分野でも, CIMなどの情報化技術によって建築生産の合理化に取り組んできた。さらに, BIM(Building Information Modeling), が普及してきており, 意匠や構造, 設備などの設計からFM(Facility Management)などの維持管理まで幅広く利活用されている。一方, 土木インフラ分野に目を転じてみると, ICTを活用した建築生産システムの構築を目指して3Dモデルの利活用が押し進められたものの十分に浸透せず, 今もなお2Dモデルの利用が多い状況にある。また, 国土交通省では, 調査, 測量から設計, 施工, 維持管理まで

のあらゆるプロセスでICT等を活用して建設現場の生産性向上を図る「i-Construction」を進めている。以上のことから, 本研究では, 建築, 土木分野における3D計測の利活用を行い, その精度, 効率性の検証を目的とする。

2. 3Dモデル作製概要

2.1 計測

計測はFARO®Laser Scanner Focus3D X 330(Fig. 1参照)を用いて行う。計測方法は「計測地点に三脚を立て本体を固定する, 本体の電源を入れる, 画面上で分解能, 品質, 計測範囲の設定を行う, スキャンを開始する」といった手順で行うため, 複雑な操作はなく1人でも計測が行える。分解能の設定では, 単位面積あたりに取得する点数を選択し, 品質の設定では, 定点の繰り返し数を選択し, 繰り返し測定した点を一点に

平成**年**月**日受理

* 長崎大学大学院工学研究科総合工学専攻 (Graduate Student, Department of Advanced Engineering)

** 長崎大学大学院工学研究科 (Division of System Science)

*** 長崎大学 ICT 基盤センター (Center for Information and Communication Technology)

**** 公共財団法人長崎県建設技術センター (Nagasaki civil Engineering Research Center)

平均化するものである。品質を高めると、同じポイントへの照射時間を長くしノイズの影響を低減することが可能である。本研究では、計測時間と精度を考慮し、分解能 1/4、品質×8 の設定で行う。計測範囲は、垂直方向 $0^{\circ} \sim 300^{\circ}$ 、水平方向 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ の範囲内で計測が行える。計測箇所は 10~15m 間隔でおこない、対象物の周囲を囲むように配置する。計測時間は 1 箇所あたり、約 10 分程度で行える。

測定範囲	0.6m~330m	
測定速度	最大 976,000 点/秒	
範囲誤差	最大±2mm	
内蔵カメラ	最大解像度 70Mpixel	

Fig. 1 レーザースキャナの性能

2.2 点群処理

点群処理は、SCENE というソフトウェアを用いる。点群処理方法は「SD カードにてレーザースキャナから PC に点群データを送る、点群データの位置合わせを行う、ノイズ等の除去を行う」といった手順で行う。ノイズとは、計測の際に人物や動くもの、浮遊物など意図しないものが映り込んでしまったものである。

(1) 位置合わせ

スキャンポイントは、スキャナを基準とした座標系に記録され保存される。このスキャン座標系の原点は、レーザーとミラーが交わる位置である。この点の座標系は $x=0, y=0, z=0$ である。異なる場所で 2 つ以上の場所スキャンを実行すると、実行直後の各スキャンでは、それぞれの座標系しか認識できない。各スキャン座標系の原点は異なる位置にあるため、各座標系共通の空間関係を決定(位置合わせ)する必要がある。

位置合わせとは、3D スキャナで複数個所から計測した点群データの相対的な位置関係を決定する作業である。

位置合わせの手法には以下の 2 通りがある。

手法 1: ターゲットマーカーを用いる方法。マーカーを測量した XYZ 座標がある場合は、外部座標として適用する。

手法 2: ターゲットマーカーを用いず、オーバーラップを利用する方法。測量座標がない場合は、複数の点群データ間の相対的な位置合わせをした後に全体の座標を定義する。

本研究では、主に手法 2 を用いる。手法 2 では、複数の計測データ中の対応する床面・壁の順に平面を見つけ、位置関係を自動判定するものであり、位置合わせ成功するか否かの要点は以下の 2 点である。

- ・合わせる点群どうしに共通する床面があること
- ・共通する床面に鉛直な平面が 2 枚以上共通していること。

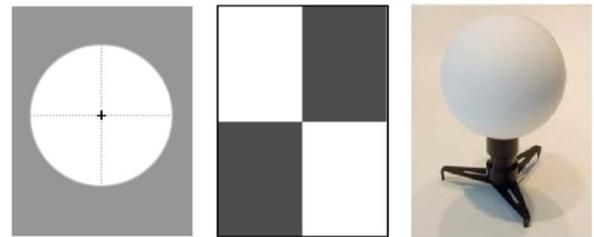


Fig. 2 人工ターゲット

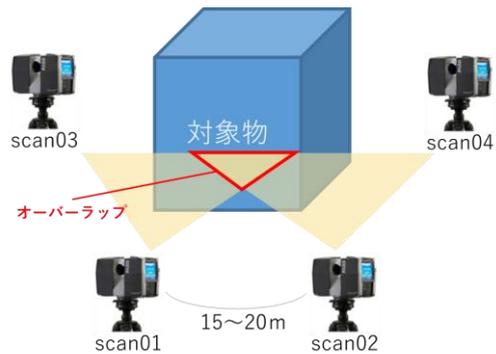


Fig. 3 計測の概略図

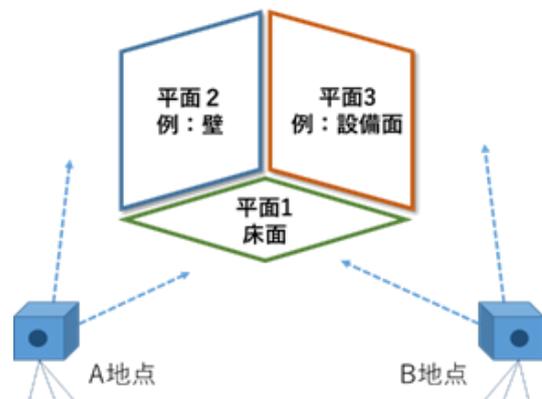


Fig. 4 マーカーなしの計測

3. 橋梁の維持管理における3D計測の活用

橋梁の健全性の診断は、定期点検における近接目視で得られる外観の損傷状態と、架設年度、架橋地点、交通量などを含めて総合的に評価している。このうち、健全性の診断に大きく影響のあるものは、「外観の損傷状態」である。しかし、この損傷状態の判定には、点検者の主観による判断がなされており、個人差による「バラツキ」が生じている。適切なインフラ整備を行うためには、点検の「バラツキ」を無くした外観の損傷状態の定量化が必要である。

本研究は、このような課題を解決するための新しい点検手法を検証することを目的に実施するものである。

3.1 現状の整理

(1) 定期点検の現状

- ①管理する橋梁については、5年に1回の定期点検が義務化
- ②定期点検の目的は、
 - ・重大な損傷の早期発見・早期対処
 - ・状態評価(予測)につながる情報の蓄積
- ③定期点検は、近接目視を原則としている。
- ④目視点検と損傷写真の結果から橋梁の健全性を診断している。
- ⑤技術者(人)による点検であり、1橋当たり半日～1日程度かかる(規模や地形で変動)

(2) 課題

- ①目視点検は、技術者によって損傷評価にバラツキがあり、定量的ではない
 - ②少子高齢化による点検技術者の減少が懸念される。
- 以上のような現状と課題を改善するためには、新たな点検手法が必要となる。

3.2 実施概要

すでに架橋されている橋梁を対象に、レーザースキャナを使用した三次元計測により、外観劣化点検を実施する。また、計測して得られたデータを基に三次元モデルの構築と外観劣化位置の特定及び損傷状態の確認を行い、そのモデルを活用して劣化情報の定量化及び状態評価を行うものである。

(1) 橋梁点検に適した分解能の設定

外観劣化情報の取得に適した精度での3D計測を行うため、精度に関するパラメータの1つである分解能についての評価を行った。分解能とは、単位面積あたりに取得する点数のことであり、精度をあげるにつれ

て計測時間も長くなる。よって、分解能 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 の精度と計測時間の比較を行うため、建物の外壁のひび割れを対象に3D計測を行った。

計測によって得られた、それぞれの分解能のひび割れの様子を Fig. 6 に示す。分解能 1/16, 1/8 は計測時間が短いですが、精度としては不十分である。分解能 1/4, 1/2 ではひび割れの様子が明確に確認することができるため、精度としては十分である。しかし、計測時間において分解能 1/4 では約5分であるのに対し、分解能 1/2 では約16分と長い時間を要してしまう。そのため、橋梁点検における分解能は 1/4 に設定する。

(2) 橋梁概要

対象橋梁は、長崎県内の以下の条件に当てはまる橋梁である。

【選定条件】

- 条件1：桁下へ進入可能な橋梁
- 条件2：交通規制等の制約が必要ない橋梁
- 条件3：点検結果判定区分Ⅲ程度の橋梁

Table 1 対象橋梁 (H29年現在)

橋梁名	橋梁 A	橋梁 B
架設年次	1967年	1971年
橋種	PC桁	PC桁
橋長, 幅員	L=33.4m, W=3.6m	L=55.8, W=5.8m
主な損傷	<ul style="list-style-type: none"> ・主桁…ひびわれ ・横桁, 床版…剥離・鉄筋露出 ・下部…剥離・鉄筋露出 ・支承…腐食 ・舗装…剥離 	<ul style="list-style-type: none"> ・主桁…ひびわれ ・横桁, 床版…剥離・鉄筋露出 ・下部…ひびわれ ・舗装…損傷
判定区分	Ⅱ	Ⅱ

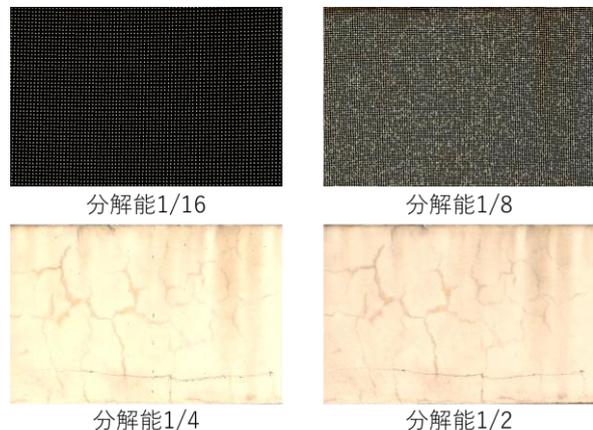


Fig. 5 分解能による精度の比較

(3) 計測

橋梁Aについては、橋面上10箇所、桁下9箇所の計19箇所からの計測を行い、橋梁Bについては、橋面上8箇所、桁下11箇所の計19箇所からの計測を行った。1箇所あたりの計測時間は約10分であり、それぞれの橋梁で約1日を要した。

3.3 結果

得られた3DモデルをそれぞれFig. 7, Fig. 8に示す。3Dモデルからひびわれ、鉄筋露出などの外観劣化が確認できた。外観劣化の様子をFig. 9に示す。

3.4 超解像技術の適用

得られた3Dモデルを確認すると、外観劣化の有無は確認できたが、写真データと比較すると画質が荒く鮮明ではない。そのため、今回は3Dモデルにより得られた外観劣化の画像に超解像技術を適用した。結果をFig. 10に示す。図の上の画像の処理時間は83分、下の画像の処理時間は26分であった。処理前の画像と比較すると鮮明に見ることができるが、写真データと比較すると精度は劣る結果となった。



Photo. 1 計測の様子

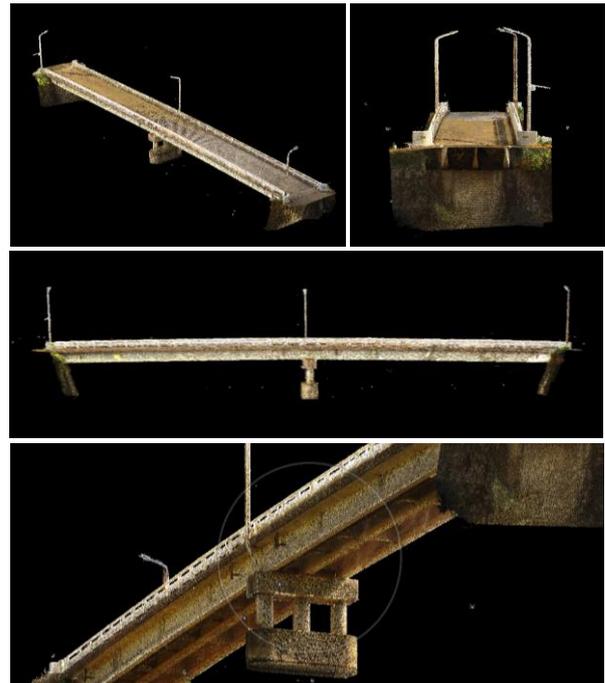


Fig. 7 橋梁Aの3Dモデル

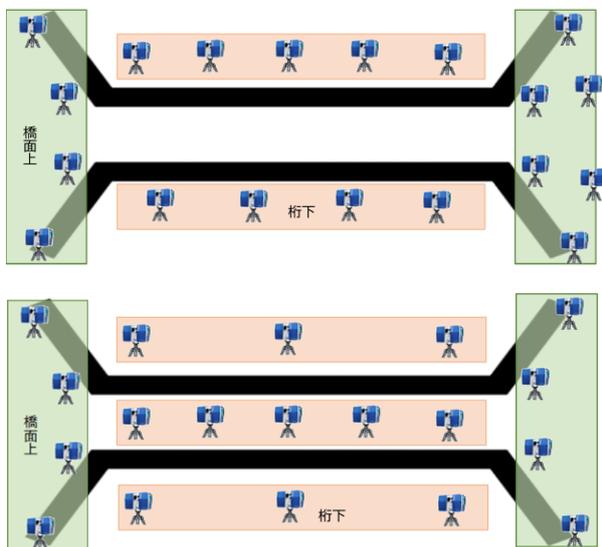


Fig. 6 計測配置図 (上: 橋梁A, 下: 橋梁B)

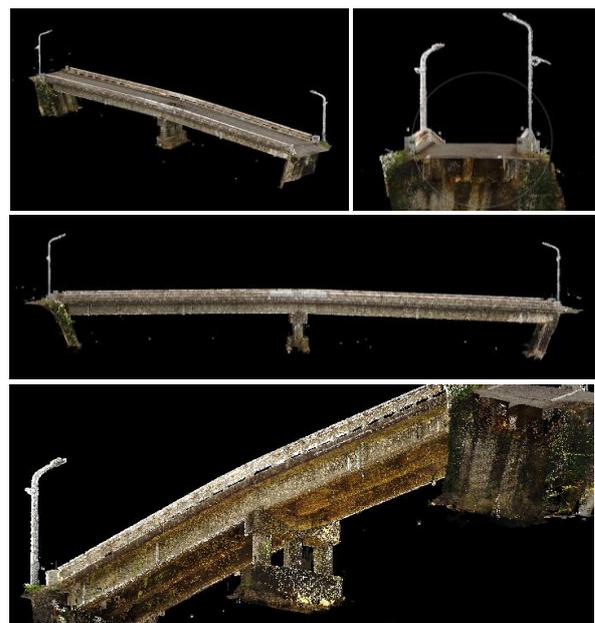


Fig. 8 橋梁Bの3Dモデル



Fig. 9 3Dモデルによる外観劣化の様子

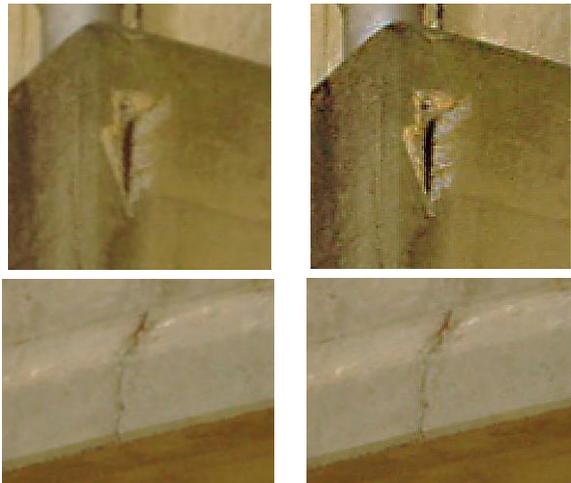


Fig. 10 超解像技術の適用 (左:処理前, 右:処理後)

4. 寸法測定における3D計測の活用

木造建築は材木を現場で組み立てるため、職人の腕や施工管理会社の品質管理体制によって、品質のバラつきが出やすい工法である。木材はコンピューター制御により、プレカット工場で加工されることがほとんどであるが、細部などは現場で職人が加工することが多い。構造体だけではなく、外装や内装工事においてもある程度の企画寸法はあるものの、現場加工、現場施工が基本となる。また、木材は湿気による膨張や乾燥収縮によって寸法が変化するため、現場では効率的な寸法計測が要求される。

本研究では、3Dモデルの寸法測定に関する機能に着目し、その精度について検証する。

4.1 外壁の寸法測定

3Dモデルを用いた建築物の寸法測定を目的として、建設中の一般住宅を対象とし3D計測を行った。今回は実寸7500mmの外壁に着目し3Dモデル化を行うため、外壁の正面で3カ所の計測を行った。

寸法の測定はSCENEのツールを用いる。寸法の測定方法には、スキャンポイント間と、球や平面などのオブジェクト間を測定する2通りがあるが、今回はオブジェクトとなるものがないため、スキャンポイント間の測定を行う。スキャンポイントは、3Dモデル上の任意の点を手動で選択するため、ある距離の始点と終点を選択する際に、測定ごとにバラつきが生じた。そのため、測定を10回行い、平均値を測定値とした。測定の様子をFig. 11に示す。



Fig. 11 寸法測定の様子

Table 2 測定結果 1

	測定値(mm)
1	7588.4
2	7580.0
3	7569.3
4	7588.4
5	7576.8
6	7589.5
7	7614.0
8	7578.6
9	7578.5
10	7579.8
平均	7584.3

4.2 ターゲットを用いた寸法測定

以上のようなターゲットオブジェクトを用いて計測を行うことで、オブジェクト間の測定を行うことができる。また、SCENE では、人工ターゲットの中心点を認識することができる。オブジェクトを用いない測定を行うと測定にバラつきが生じ、十分な精度が得られないため、3D モデル上でのターゲット間の寸法測定を行い、実寸と比較することによって、その精度の検証を行う。

ターゲットを用いた寸法測定を行うため、ドアの幅を測定対象とし 3D 計測を行った。今回の計測では、Excel で作成でき手軽に用意できるため、チェッカーボードを人工ターゲットとした。測定したい始点と終点にターゲットの中心を合わせて貼り付け、計測箇所は対象物の正面で 1 箇所のみ行った。

SCENE にてチェッカーボードを自動認識し、ターゲット間の寸法を測定した。自動認識したターゲットの中心点を拡大してみると、実際のターゲットの中心点と自動認識したターゲットの中心点にズレが生じていた。そのため、手動により実際のターゲットの中心点に近い点をポイントし、そのポイント間の測定も行った。

4.3 結果

外壁の寸法の測定結果を Table 2、ドアの幅の寸法の測定結果を Table 3 に示す。外壁の寸法測定では測定値 7584.3mm であり、設計図の寸法との差が 84.3mm あったため、木造建築における寸法の変化が顕著に表れた。ターゲットを用いた寸法測定では、自動認識によるターゲット間の測定値の誤差が 1.2mm、手動によるポイント間の測定値の誤差が 0.0mm であった。所要時間は 10 分程度であり、3D 計測に約 5 分、点群処理に約 3 分、寸法計測に約 2 分の時間を要した。

以上の結果から、寸法計測にはターゲットを用いた方がより良い精度の測定値が得られ、ターゲットの中心点は自動認識するのではなく、手動でポイントした方がより良い精度の測定値が得られると考えられる。

5. まとめ

- ・橋梁の 3D 計測は劣化位置特定が可能であり、ひびわれや鉄筋露出を確認することができたが、画質が荒く、精度においてはまだ不十分である。
- ・ターゲットを用いた寸法測定は、高い精度の測定値が得られたため、3D 計測による寸法測定の有用性を確認できた。

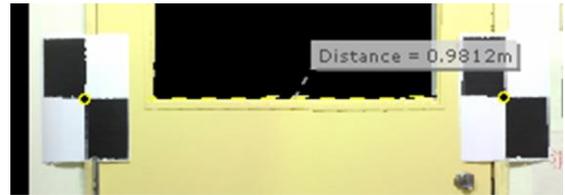


Fig. 12 ターゲット間の寸法測定

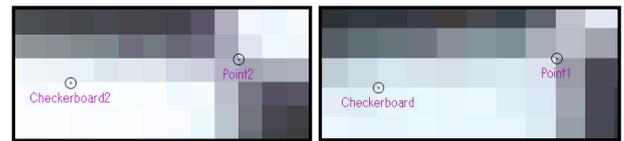


Fig. 13 自動認識による中心点と手動による中心点



Fig. 14 手動によるポイント間の測定

Table 3 測定結果 2

	測定値(mm)	誤差(mm)
ターゲット間の測定値	981.2	1.2
手動ポイント間の測定値	980.0	0

謝辞：本研究で使用した計測機器やソフトウェアの操作に関する貴重な助言を頂いたクモノスコポーレーション株式会社の廣瀬眞理氏に心からの感謝の意を表します。また、現場計測に同行、協力して頂いた長崎県建設技術研究センターの松原健治氏、田添智宏氏に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 松田浩, 河村太紀, 西行健, 木本啓介, 西川貴文：3D計測とFEM解析と実振動計測に基づく橋梁振動特性同定, 鋼構造年次論文報告集, 第24巻, pp.445-448, 2016.
- 2) 水智弘, 吉川眞, 瀧浪, 秀元尾崎, 高橋康将, 中山忠雅, 内田修, 近藤健一：3Dモデルを用いた橋梁維持管理システムの開発
- 3) FARO@Laser Scanner Focus3D X 330マニュアル