

既存建築物の改修工事における3次元スキャニングの活用に関する研究 —設備改修を対象として—

○信太 洋行*¹ 野城 智也*²
関 ナホン*³ 横山 茂紀*⁴

キーワード：既存建築物 設備改修 3次元レーザーสキャナー

1. はじめに

我が国では温室効果ガスの排出量を2020年までに25%削減する中期目標と、2050年までに60~80%削減する長期目標を掲げている¹⁾。この目標を実現するために、新築建築物(業務部門)は2030年までに新築建物全体でのZEB化、そして既築建築物は改修工事によって2030年までに現在の一次エネルギー消費量の半減を目指している。既存建築物は、建物の現状という大きな制約条件のもとで改修目標を設定しなくてはならないが、現状の機能・性能を把握するために必要な設計図や施工図がそもそも保存しない、あったとしても長年に亘る修繕や部分改修によって、建設当時の図面とは一致しないことも少なくない。

改修工事に必要な現状図を新たに作図するにあたり、現場調査や実測を行うのが一般的であるが、①建物を利用しながら行う場合が多いため迅速な調査が求められる②計測箇所が多く、場合によっては再計測等の二度手間が発生する③実測データをもとに作図するが、不確定な部分を含むため情報一致が困難である、といった問題が生じる。

そこで、我々は既存建築物の計測方法として、昨今注目されている3次元レーザーสキャナーに着目した。これは対象物の位置や形状等を3次元データとして短時間で取得出来ることと、デジタルデータとして保存・加工出来る利点がある。特に、配管や設備機器が入り組んだ機械室への適用は作業手間の軽減だけでなく、設備更新による省エネ改修を検討するにあたり有効であると思われる。

この様な背景のもと、本研究では既存建築物の改修工事の一つである設備改修を対象に、3次元スキャナーによる計測実験を行い、3次元スキャニングによる情報取得の有効性を検討し、その活用可能性に関して考察することを目的としている。

2. 本研究の方法

2-1. 本研究の対象

本研究では、東京大学駒場Iキャンパスに建築された「理想の教育棟」(2011年10月運営開始)の給排水衛生空調機械室を対象とした。理想の教育棟は2030年までに設備の運転・制御方法の調整や機器更新によるZEB(Zero Energy Building)化の実現を計画している建築物である。

2-2. 本研究で使用した3次元レーザーสキャナーの概要

本実験では、Leica社のScanStation C10を使用した。本機器は本体が水平に回転すると同時に本体に付いている

ミラーが360°鉛直回転する方式で計測できる。計測原理は、計測対象物に照射したレーザーが戻ってくる往復時間を計測して距離を算出するTOF方式(Time of Flight)である。表1にスキャナーの仕様を示す。

表1 本研究で用いた3次元スキャナーの仕様

レーザータイプ	パルス方式半導体レーザー		
レーザー波長	532nm可視光(緑)		
測定距離	300m@反射率90%、134m@反射率18%、最短測定最短距離:0.1m		
測定範囲	水平360°(最大)、鉛直270°(最大)		
レーザー照射密度	水平間隔(100m遠方)	垂直間隔(100m遠方)	1スキャンあたりの計測時間(分)
highest	0.02m	0.02m	112(註1)
high	0.05m	0.05m	30
medium	0.1m	0.1m	7
low	0.2m	0.2m	2

2-3. 本研究で使用したソフトの概要

(1) 点群データの取得

3次元スキャニングによるデータは最初bin形式で出力され、本研究ではライカ社のソフトウェア「Cyclone」を用いて点群データを取得した。各点は、スキャナーの位置を原点としてX,Y,Z軸の座標値を有し、bin形式のファイルをptx形式のファイルに変換すると、その座標情報の他に反射強度をテキストで見ることが可能である。

(2) 位置合わせ

対象物の全体像を計測するには、複数の方向から撮影した点群データの位置を合わせ、正しく統合する必要がある。現在、位置合わせには撮影時に配置した複数のターゲットを基準にする手法が主に用いられるが、本研究では対応する点を自動で判別するプログラム「Alignment」を採用した。Alignmentは、大石ら²⁾とSagawaら³⁾が提案した手法で、本来は遺跡や歴史的建造物・文化財等のアーカイブ作成のために作成されたプログラムである。本研究に比べ大規模なデータの処理を前提としており、位置合わせを行うデータ間に共通のターゲットが不要な点に特徴がある。

そのため、撮影データを共通のターゲットにより数珠つなぎの要領で位置合わせしていく従来の手法に比べ、計測時点においてターゲットの設置及び撮影地点・順番を考慮する手間が軽減されることが予想される。

2-4. 計測実験の作業プロセス

計測実験はA~Gの7つのプロセスで行った(図2)。これらのプロセスは、A~Cのプロセスは現場作業、D~GはPC上でのデータ処理作業の二つに分類される。

3. 3次元スキャナーによる計測実験

3-1-1. 計測位置の選定(作業A)

計測対象である給排水衛生空調機械室の規模は、床面積

約 190 m²、高さ 5.7m、中央部には鉄骨のステージが組み立てられ、通路はそれを囲む形で確保されている。計測者は建築学科の学生 2 名で、他の小規模なサイトにてテスト計測を一度行い、本計測に臨んだ。また、計測位置・時間の記録は筆者が行った。計測位置は、計測漏れが生じないよう現場で判断し、12カ所で13回の計測を行った(図1)。

3-1-2. スキャナーの設定と計測 (作業 B、C)

上部ステージでの計測においては、鉄骨下地上に三脚の脚を設置し、計測者はスキャニング終了まで、その場を離れずに計測した。これは床がスチールのメッシュであったため、移動時の床の振動がスキャナー計測を停止させるためである。また、位置⑫(三脚高さ 1370 mm)上にある大型の電気配線ラックが、その上部の計測を困難にさせていたため、位置⑬では三脚高さを 2070 mm に調節して計測した。

計測時には、照明の影響を防ぐために機械室の照明を消し、レーザー照射密度は、作業時間とデータ量を考慮し、4段階の内3番目に高い Medium (表1) で計測した。

3-1-3. 点群データの取得 (作業 D、E)

取得した点群データは bin 形式で出力される。そのファイルを Cyclone 上で開き、ptx 形式に変換した。

3-1-4. 位置合わせ (作業 F、G)

13カ所で取得したスキャンファイルを一つのモデルにするため、位置合わせ作業を行った。ソフトウェア Alignment 上でファイルを開くために、ptx 形式のファイルを ply 形式のファイルに変換した。その後、13個の ply 形式のファイルを開いた結果、図2の様に点群モデル別に色分けされたまとまりを、マウスで動かし、モデル間の距離を目視で大まかに合わせた後、対応点間に許容するずれの最大値 (Length 値) を段階的に小さくしながら位置合わせを繰り返し、一つのモデルを作成した。ここでは Length 値を 1 mm とした。

次に、計測対象物ではない隣接する部屋や計測者の写り込み等のノイズを除去した。このノイズ除去によって、ply 形式の総容量は 1% 低減した。

3-2. 計測結果の分析

ここでは 3-1. で得た計測結果を対象に、(1) 取得した情報 (2) 作業手間の二つの視点で分析を行う。

(1) 取得した情報に関して

ここでは 13カ所で取得した点群データ (以降部分モデル) と位置合わせモデルを対象に分析を行う。

① 形状や表面の状態

部分モデルは、レーザーの反射強度をもとにした RGB で表現されており、形状だけでなく、ダクト類のジョイントや吊り金物、配管を被覆している断熱材のメッシュ、更に配管識別ラベルまでも確認出来る (図3)。

一方、位置合わせモデルは、配管の円筒形やダクトの形状は確認出来るが、断熱材やラベル等の表面情報は確認出

表2 計測実験における作業プロセス

作業A	計測位置を選定する
作業B	3次元スキャナーを設定する
作業C	スキャニング
作業D	Cycloneでbin形式のファイルを開く
作業E	Cycloneでbin形式をptx形式に変換する
作業F	Alignmentでptx形式をply形式に変換する
作業G	位置合わせ作業を行う

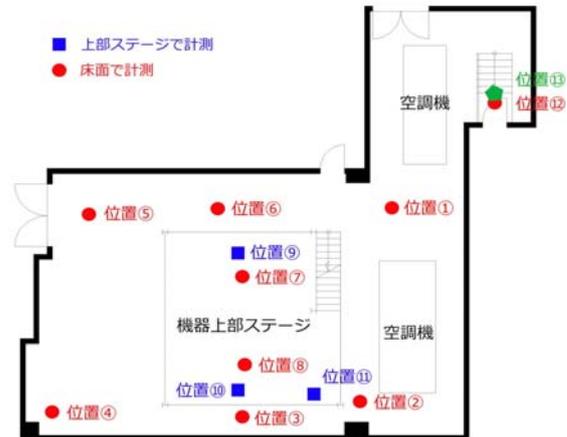


図1 計測位置の分布

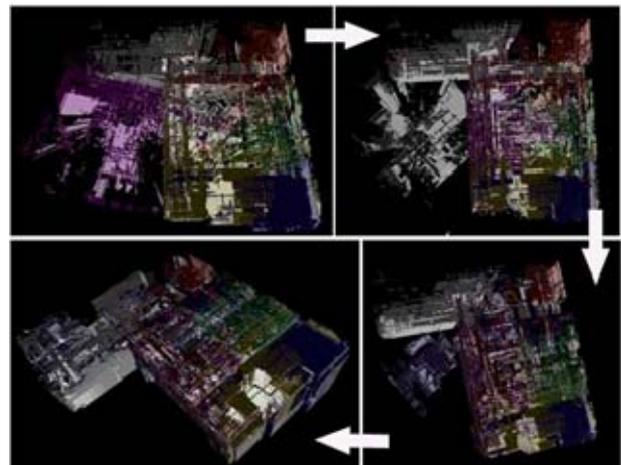


図2 位置合わせ作業のプロセス

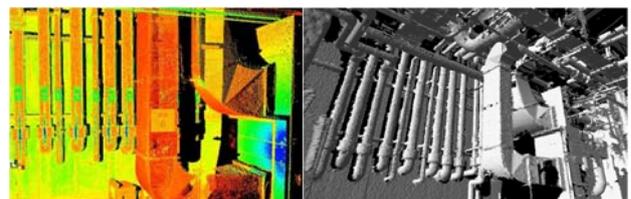


図3 部分モデル

図4 位置合わせモデル

来ない (図4)。

② 経路や位置関係

Cyclone 上の部分モデルでは、計測範囲内の配管とダクトの経路の確認しかできないため、各々の計測位置でのデータを一つに合せた位置合わせ段階で確認する必要がある。本研究で使用しているソフトウェア「Alignment」では、データの一部を任意的に編集することができるため、作業

者が確認したい部分を編集して確認することができる。

例えば、位置⑦と⑨の Cyclone 上での点群データを比較してみる。図5の左側は位置⑦で計測した点群データ、右側は位置⑨で計測した点群データであるが、赤枠の部分はそれぞれ把握できない限界があることが確認できる。しかし、位置合わせモデルからは上部と下部の経路が同時に確認できた。そして、ソフトウェア「Alignment」の機能により、見たい部分を平面的、断面的に切り出すことが可能であるため、系別の経路だけでなく各種インフラ間の納まり上の勝ち負けも確認出来る（図6）。

③ 寸法情報

本研究で用いた「Alignment」は、位置合わせを目的としたプログラムであるため、寸法測定機能を有していない。よって、その距離を確認するために「Cyclone」上の部分モデルで測定した（図7）。但し、測定したい対象が部分モデルの領域を横断する場合は測定することが不可能である。

④ 計測漏れ

位置合わせモデルを確認したところ、計測漏れの部分があった。計測位置①の右側の空調機の裏には図8の左のように、壁との間に配管類が存在するが、その部分が計測できなかったことが確認された。ソフトウェア「Cyclone」での点群モデルでは、白色の枠（図8中央）のように計測できなかった部分が黒くなっており、その部分の様子が確認できない。一方、位置合わせモデル（図8右）で見ると、位置②で計測したデータが部分的に見えてしまい、誤った認識をする可能性が生じる。

(2) 作業時間に関して

① 作業時間

計測実験において、作業ごとに測定した作業時間の結果を表3に示す。位置の番号は、位置の区分のためだけではなく、計測の順番も意味する。

計測実験の作業時間は、A～Gの作業を含め計4時間40分31秒であった。その内訳は、計測現場での作業時間（A～C）は2時間24分14秒、PCでの作業時間（D～G）は2時間16分17秒である。現場での作業時間とPCでのデータ処理の作業時間を比較してみると、ほぼ半々の割合であった。

現場での作業において、時間を要した特徴的なポイントは以下の通りである。

- ・計測対象の前に置かれている積荷の移動
- ・高所における計測の準備（機材の重量、水平の確保等）
- 一方、PCでの作業において、時間を要した特徴的なポイントは以下の通りである。
- ・位置合わせ作業の進行と共にファイル容量も大きくなるため、作業スピードが低下
- ・複雑な形状に起因する、位置合わせの対応点を探す手間

② データ容量

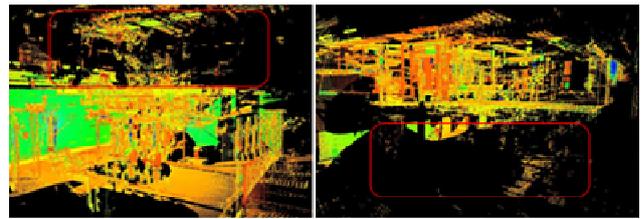


図5 左：位置⑦ 右：位置⑨

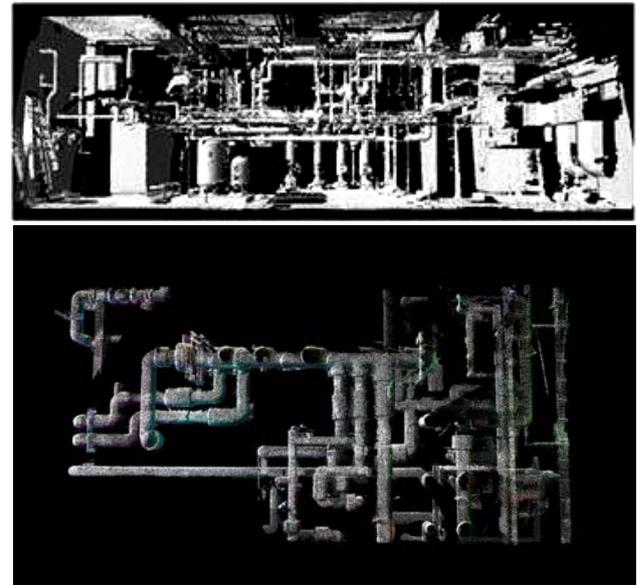


図6 上：切り出した断面 下：切り出した平面

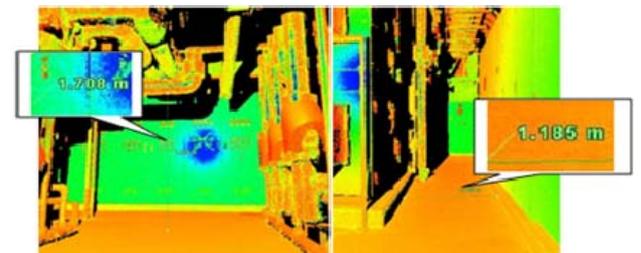


図7 「Cyclone」上での寸法測定の例

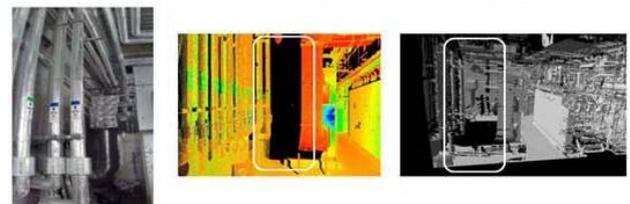


図8 計測漏れが発生した部分

表3 計測実験における各作業時間

	作業A	作業B	作業C	作業D	作業E	作業F	作業G	合計
位置①	4分54秒	5分02秒	7分12秒	2分3秒	2分24秒	1分06秒	1分34秒	22分41秒
位置②	40秒	1分53秒	6分42秒	2分8秒	2分30秒	1分14秒	1分58秒	16分41秒
位置③	1分40秒	50秒	6分46秒	2分21秒	2分33秒	1分38秒	1分58秒	17分46秒
位置④	3分05秒	1分08秒	6分46秒	2分10秒	2分24秒	1分42秒	2分34秒	19分49秒
位置⑤	1分05秒	1分02秒	6分46秒	2分11秒	2分33秒	1分28秒	2分59秒	18分56秒
位置⑥	1分40秒	1分30秒	7分14秒	2分13秒	2分28秒	1分27秒	3分03秒	19分
位置⑦	58秒	1分01秒	6分40秒	2分14秒	2分37秒	1分41秒	3分18秒	18分26秒
位置⑧	1分30秒	1分35秒	6分50秒	2分35秒	2分35秒	1分40秒	5分54秒	22分39秒
位置⑨	2分50秒	1分50秒	6分39秒	2分20秒	2分23秒	1分35秒	5分17秒	22分54秒
位置⑩	1分40秒	1分15秒	7分00秒	2分18秒	2分28秒	1分29秒	7分45秒	23分55秒
位置⑪	1分40秒	1分08秒	7分08秒	2分25秒	2分23秒	1分54秒	6分57秒	23分35秒
位置⑫	3分55秒	2分05秒	7分08秒	2分21秒	2分20秒	1分58秒	6分18秒	26分
位置⑬	2分45秒	5分51秒	6分45秒	2分26秒	2分19秒	2分48秒	5分26秒	29分
合計	27分28秒	27分10秒	1時間2分36秒	29分45秒	31分57秒	21分40秒	52分55秒	4時間40分31秒
平均	2分36秒	2分55秒	6分53秒	2分17秒	2分27秒	1分38秒	4分04秒	21分34秒

計測時に生成される様々なファイル形式を横軸に、そして各計測位置を縦軸にとり、各データ容量の結果を表4に

示す。

表4の合計に着目すると、bin形式のファイルの容量は計3,758,248KB、そのbin形式のファイルをptx形式のファイルに変換すると、その容量は7,150,712KBになり、約2倍増加した。また、それをポリゴン化するための出力形式であるply形式のファイルに変換すると、その容量は321,865KBになり、ptx形式のファイル容量の約4.5%に軽減することが確認できた。これはptx形式をply形式に変換する際、点の間隔のしきい値を調整することで、点の数を低減しているためである。

本計測実験の作業ファイル容量は、計11,230,825KB(約11GB)であり、その内訳はbin fileが33%、ptx fileが64%、ply fileが3%であった。

一方、点群数は13カ所それぞれ約1400万点であり、13カ所合計で約1億9000万点であった。

4. 活用方法に関する考察

3-2.計測結果の分析結果より、3次元スキャニングデータの活用方法に関して考察する。

① 点群データ(部分モデル)に関して

座標情報と反射強度を併せ持つ点群データは、対象物の形状だけでなく表面情報まで取得出来るほど精度の高いものである。既存の配管類に、新設する配管類を接続するような精度を求められる場合や干渉チェックをする場合は、そのインターフェースとなる位置情報を正確に把握する必要がある。このような場合、精度の高い点群データをモジュールとして捉え、データ互換性のある設計用の3次元CADにそのまま取り込む手法が考えられる。

また、測定したい対象が明確で、かつ比較的規模が小さいものであるならば、測定対象を部分モデル内に納まる位置で計測することで、寸法情報の取得を容易にし、後の位置合わせ作業を低減するという工夫も考えられる。

② 位置合わせモデルに関して

位置合わせモデルは、部分モデルと比較すると表面情報等の精度は低下するが、部分モデルを横断する配管・配線類を、それぞれの系毎に捉えるには有効である。ソフトウェアによって対象物のみを平面的・断面的に切り出すことで、各種インフラ間の納まり上の勝ち負けを確認出来るため、例えば配管解体時の施工手順をシミュレーションすることが可能である。

また、既存の配管や熱源補機を編集によって削除することで、新設する設備を設置できる有効スペースを検討することも可能である。但し、編集においては、測定物の属性を明確に区分しておく必要がある。形状のみで明らかに区分できるものと、配管のように類似した形状が連続する場合の二つがあるが、後者はスキャニング時に手間加えることで、後の属性分けが容易になると思われる。例えば、現場調査時、測定物の属性別にマーキングする手法である。具体的には、位置合わせモデルにおいて識別出来る程度の

表4 計測実験における各ファイル容量

	bin file	ptx file	ply file	合計
位置①	289,096	543,382	33,548	866,026
位置②	289,096	552,533	32,844	874,473
位置③	289,096	553,597	11,677	854,370
位置④	289,096	553,478	31,906	874,480
位置⑤	289,096	552,923	39,325	881,344
位置⑥	289,096	550,049	35,273	874,418
位置⑦	289,096	553,416	31,174	873,686
位置⑧	289,096	553,391	23,619	866,106
位置⑨	289,096	551,404	21,651	862,151
位置⑩	289,096	553,056	24,428	866,580
位置⑪	289,096	552,936	24,714	866,746
位置⑫	289,096	542,179	7,000	838,275
位置⑬	289,096	538,368	4,706	832,170
合計	3,758,248	7,150,712	321,865	11,230,825
平均	289,096	550,055	24,759	863,910

形状(例えば球体や円錐体など)・サイズの物体を配管に吊る等の方法が考えられる。

5. まとめ

5-1.本研究の成果

本研究では、給排水衛生空調機械室を対象に3次元スキャニングを行い、計測した3次元スキャンデータの分析を通じて、その活用可能性を考察した。その結果、各データの特徴を活かすことで、設備改修においても活用できる見通しが立った。

但し、取得した3次元データの精度は、目視による定性的分析を行ったに過ぎないため、今後は映像学の理論等に基づいた定量的分析による検証が必要である。

5-2.今後の課題

- ・高所における計測方法や計測漏れを生じない計測位置の選定などを検討する。
- ・設備設計者、設備施工者等の専門家へのヒアリングを通じて、設備改修に求められる情報のまとまりや精度を明らかにし、照射密度や位置合わせ精度、計測位置を検討する。

註1) highestの値のみ理論値である

*謝辞

本研究を行うにあたり、東京大学生産技術研究所の池内教授、大石准教授から丁寧なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の実用と展開に向けて、平成21年11月、ZEBの実用と展開に関する研究報告書
- 2) T.Oishi 他/2005/『Fast Simultaneous Alignment of Multiple Range Images using Index Images』/Proc. Int'l Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling
- 3) R.Sagawa 他/2002/『Iterative Refinement of Range Images with Anisotropic Error Distribution』/Proc. Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems

*1 東京大学生産技術研究所 助教 博士(工学)

*2 東京大学生産技術研究所 教授 博士(工学)

*3 東京大学大学院 修了

*4 東京大学大学院生