

# 建築工事における3次元点群データの活用効果の検証

池田 雄一 坂上 肇  
金子 智弥

## Verification of Application Effect of Using 3D Point Cloud Data in Building Construction

Yuichi Ikeda Hajime Sakagami  
Tomoya Kaneko

### Abstract

Recently, it has been easy to obtain 3D point cloud data (PCD) by employing a laser scanner or by forming several images using photogrammetry. Because it has increased the case of using 3D PCD in building construction, it is necessary for us to grasp the effect quantitatively and arrange various data in order to determine the way in which it can be applied. First, we applied it to a project to repair the earthquake-proof type ceiling. After we accurately measured the ceiling with laser scanners, the present BIM model was drawn up. We checked interferences on the BIM software between the present BIM model and the newly erected steel-frame member, and hence made sure that it had no works to do over again at steel work. Second, we made flights of an unmanned aerial vehicle (UAV) to take considerable amount of pictures and generate 3D PCD. We acquired the 3D PCD of the ground level before the excavation work and calculated the amount of soil to be excavated. In addition, we measured the piles position on 3D PCD.

### 概要

近年、レーザースキャナーや大量の画像データから3次元点群データを容易に取得できるようになってきた。建築工事においても点群データの活用事例が増えてきており、その活用効果を定量的に把握して今後の工事適用の可否を判断するための各種データが必要になってきた。

まず改修工事では、天井耐震改修工事で3次元点群データを活用した。レーザースキャナーを利用して現況を正確に計測し、現況のBIMモデルを作成した。現況BIMモデルと新設鉄骨部材について、BIMソフト上にて干渉チェックを行った上で鉄骨工事を実施したため、手戻り工事をなくすことができた。

次に、新築工事では、対象範囲にUAVを飛行させ、大量に写真撮影を行い、点群データを生成した。掘削工事前の地盤面の点群データを取得して、掘削土量を算出した結果、BIMモデルから算出した土量とほぼ同量であった。また、掘削工事後の点群データから杭芯計測を行った結果、在来測量との差異の標準偏差は約30mmであった。

## 1. はじめに

これまで、レーザースキャナー(以下、LS)は高価な装置であったため、その利用が限定的であった。2011年に低価格で軽量の機種が市場に出ると急速に普及が進んだ。一方、ステレオ画像や複数枚の画像から点群データを生成する技術は古くからあったが、対象範囲が狭く、建築工事での利用には限界があった。2010年頃からUAV(Unmanned Aerial Vehicle)の普及とともに大量の画像データを読み込み、広範囲の点群データを生成する技術の性能が大幅に向上した。各社から点群データ生成ソフトが販売されるようになり、その結果、土砂災害の把握、土木工事での利用が急速に進んだ。大林組では、建築工事におけるPCa工事の進捗を自動認識する研究に応用し、ほぼ100%の自動認識結果を得た<sup>1)</sup>。

このように手軽に扱えるようになってきた3次元点群

データを建築工事で利用した。改修工事では、天井耐震改修工事ではLSを使用して現況計測を行い、得られた点群データを活用し、生産性向上効果を検証した。新築工事では、UAVから撮影した画像から点群データを生成し、掘削土量計算や杭芯計測を行い、その精度を検証した。本報では、3次元点群データの周辺技術の紹介、実工事での活用とその効果について報告する。

## 2. 3次元点群データの取得技術

### 2.1 レーザースキャナー

LSはレーザー光を照射して対象物の3次元空間位置を取得する計測装置である。LSの一例をPhoto 1に示す。レーザー光の照射角度を一定速度で水平・垂直に360°回転させて(一部、死角あり)、対象物までの距離と照射角度から3次元座標を算出する。レーザー光を連続的に照

射することで対象物上にある大量の点の3次元座標を短時間に数mm～10mm精度で取得できる。これら点の集合体を点群データと呼ぶ。LS計測では、手前の物体の点群データは取得できるが、その裏や奥の物体の点群データは取得できない。そのため、LSを細かく移設して障害物の裏や奥の点群データを取得しなければならない。

## 2.2 大量の画像から点群データを生成する方法

対象物を異なる2箇所から写真撮影すると、両画像に撮影された複数の特徴点の位置からステレオカメラの原理を利用して、対象物に対する撮影点の相対位置と撮影方向(以下、撮影点情報)が計算できる。同時に特徴点が点群データとして得られる。この技術をフォトグラメトリ法と呼ぶ。大量(数十～数百枚単位)の画像に適用すると、1枚の写真には収まり切れない広く大きい対象にも対応できる。UAVを高度一定で飛行させ、大量に写真撮影を行い、フォトグラメトリ法を組込んだ市販の点群生成ソフトを利用すると広範囲の点群データが生成できる。フォトグラメトリ法により大量画像の撮影点を計算した結果の一例をFig. 1に示す。コントロールポイント(以下、CP)として3箇所以上のローカル座標を与えることで、点群データを任意の図面上のローカル座標系で構築することができる。詳細は飛行条件や撮影条件に左右されるが、得られる点群データの精度は10～50mm程度である。

## 2.3 点群データ取得技術の使い分け

最優先で精密な点群データが要求される場合は、LSによる計測が適している。計測対象が入り組んだ形状や隙間の多い形状の場合、多数の箇所計測する。それらのデータは専用ソフトにて結合できる。

一方、地盤面や壁面など2次元的に広く大きい計測対象で精密さが特に要求されない場合は、フォトグラメトリ法が適している。同手法により点群データを生成すると、対象物のエッジが丸みを帯びた滑らかな形状になる。狭い隙間は隙間が存在しないように滑らかな形状となる。同手法には、急激な形状変化に適応できない欠点がある。

以上から、天井耐震改修工事では、鉄骨部材やダクト・配管類などが密に配置され、さらに干渉チェックを行うことから精密さが最優先されたため、LS計測が適していると判断した。一方、新築工事の掘削工事や杭工事では、広範囲の地盤面の点群データを取得する。杭芯計測などの計測精度の検証を計画していたが、効率を優先してフォトグラメトリ法が適していると判断した。

## 3. 改修工事への適用

### 3.1 工事概要

工事概要をTable 1に示す。対象工事は、大型商業施設の1階から吹き抜けとなっている天井部分の特定天井耐震対策工事である。建物本体鉄骨に固定してどう棚を組み、天井下地を固定する工事である。作業時間は商業



Photo 1 レーザースキャナー  
Laser Scanner

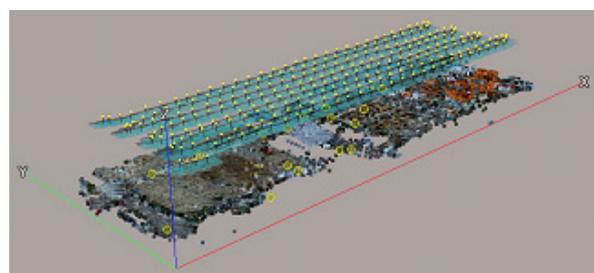


Fig. 1 カメラ撮影点の算出結果  
Calculation Result of Camera Point by Photogrammetry

Table 1 改修工事の概要  
Outline of Renewal Building Construction

建物用途	商業施設
構造	鉄骨造
建物規模	地上2階
対象面積	約 500m <sup>2</sup>
工期	2015年9月～2016年2月 (6ヵ月)

施設の営業時間外である深夜11時30分から翌朝7時までの短時間に制限された。

### 3.2 工事フロー

工事のフローを Fig. 2 に示す。同図において、従来と内容がまったく異なる箇所はフローチャートの図形を青色で、一部内容が異なる箇所は青字で示した。従来の2次元の竣工図から竣工 BIM モデルを作成した。竣工 BIM モデルを Fig. 3 に示す。同図内の緑線で囲んだ範囲が工事対象箇所である。本体鉄骨のレベルは、屋根スラブの水勾配から勘案して作成した。それ以外のキャットウォークを始めとする付帯設備や設備ダクト・配管の位置が不確かであったため、現況を正確に把握する必要があった。LS 計測で取得した現況に合わせて BIM モデルを修正し、現況 BIM モデルとした。BIM ソフト上で現況 BIM モデルと新設鉄骨部材との干渉チェックを行った。新設鉄骨部材が設備ダクトや配管と干渉した場合、設備を移設する方針とした。その他の建築部材と干渉した場

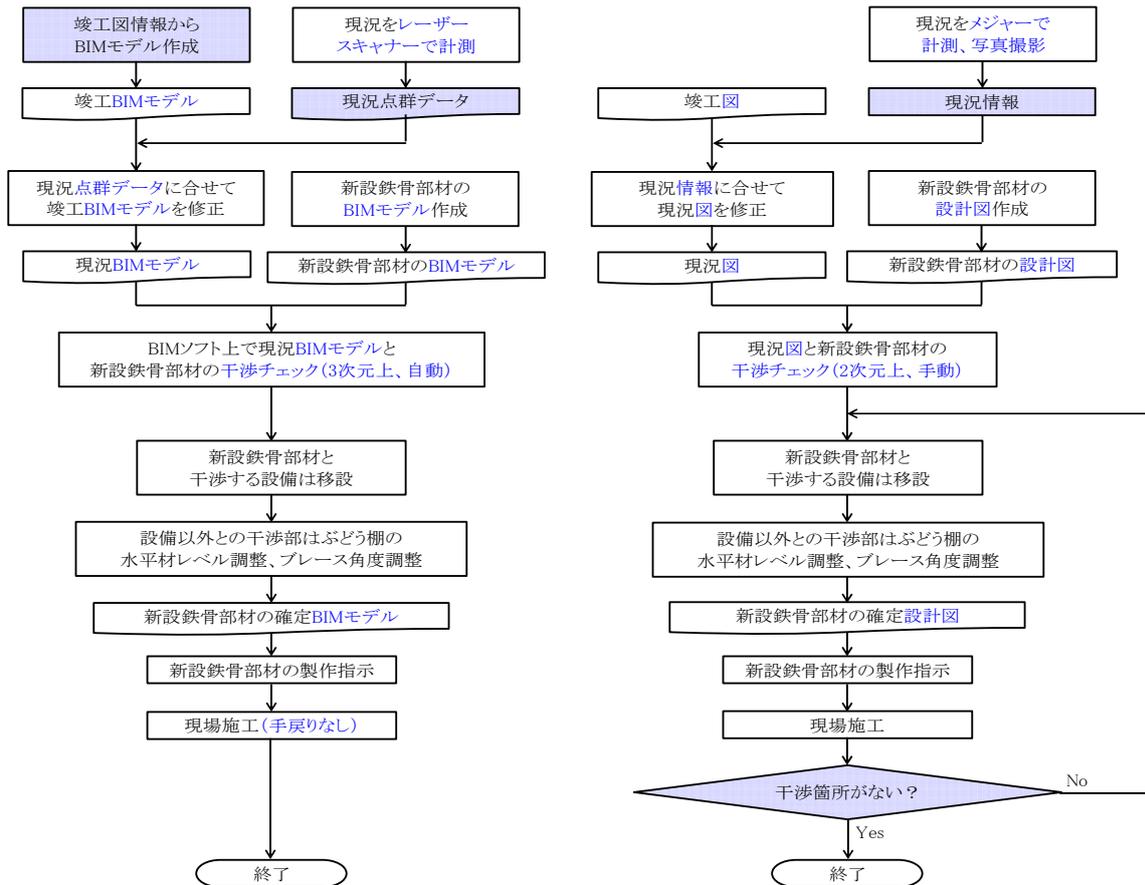


Fig. 2 工事フローの比較 (左：点群データ活用，右：従来手法)

Comparison of Construction Flow (Left : Using 3D Point Cloud Data, Right : Conventional Method)

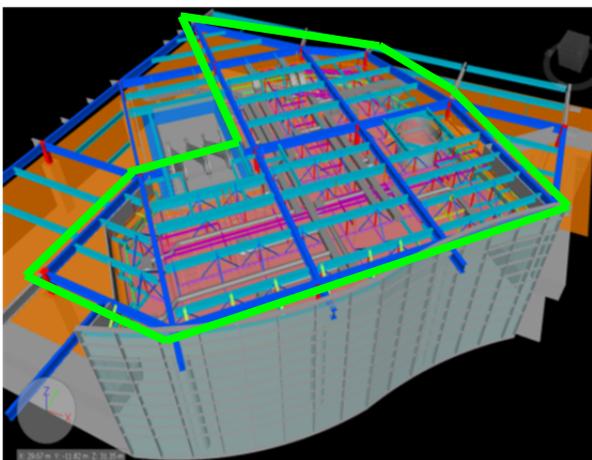


Fig. 3 竣工BIMモデル  
As Built BIM Model

合、新設鉄骨部材のぶどう棚のレベル調整やブレースの角度調整を行い、干渉を回避した。干渉箇所がなくなった時点で新設鉄骨部材の調整が完了し、鉄骨ファブへ製作指示を行い、手戻りのない現場施工が行えた。一方、従来手法では、2次元図面で干渉チェックを行うため、多大な時間を要し、干渉チェック漏れが発生しやすい。したがって、手戻り工事を想定する必要があった。



Photo 2 LSによる計測  
Measurement Using Laser Scanner

### 3.3 計測計画

改修工事に全面ベニヤ板敷きの足場を整えた。足場から最下端の設備ダクトまでは2m弱しかないので、上方に障害物が多い環境下での計測となった。現況の点群データを漏れなく取得するためにLSの移設回数を大幅に増やす計画とした。実作業時間は約6.5時間に制限されたが、計測作業は1日で終える必要があったため、約500m<sup>2</sup>のエリアを1台のLSでは計測しきれないと判断し、LS2台体制で計測する計画とした。BIMモデルの修正では、

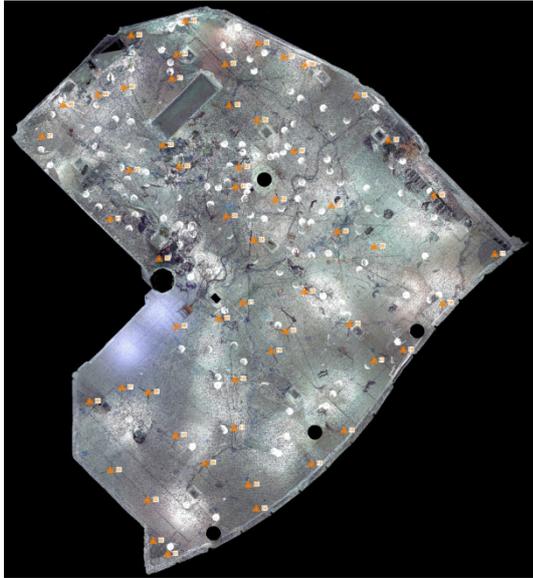


Fig. 4 LSの設置箇所  
Setting Point of Laser Scanner

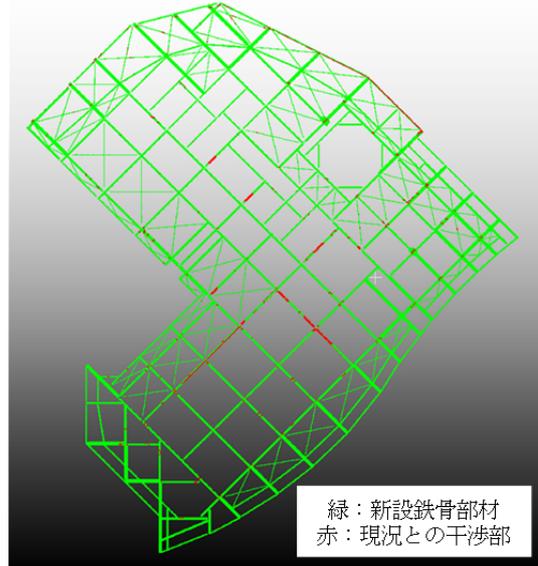


Fig. 6 干渉チェック  
Interference Check

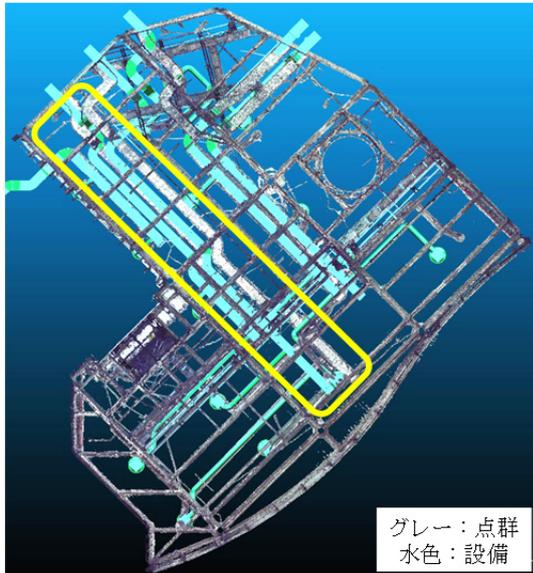


Fig. 5 竣工BIMモデルと現況点群データの比較  
Comparison of As Built BIM Model  
and Present 3D Point Cloud Data

色情報を頼りに物体の区別を行うため、照明が必要となった。可搬型のLED照明を10台準備した。

### 3.4 計測作業

LSによる計測状況をPhoto 2に示す。計測にはPhoto 1に示したLSを使用した。スキャンの設定は計測距離が10m以内であることから、分解能(点群密度)は10m離れた地点で7.67mm、品質は3回の計測結果を平均化する内容で実施した。このスキャン設定では、1箇所あたりの計測時間は9分弱掛かり、360° 全周で2840万点の点群データが取得できる。LSは、Fig. 4に示すように計57箇所(同図中の橙色△)に移設して計測した。計測作業効率を高めるため、5箇所程度で計測する度に点群データをノートPC

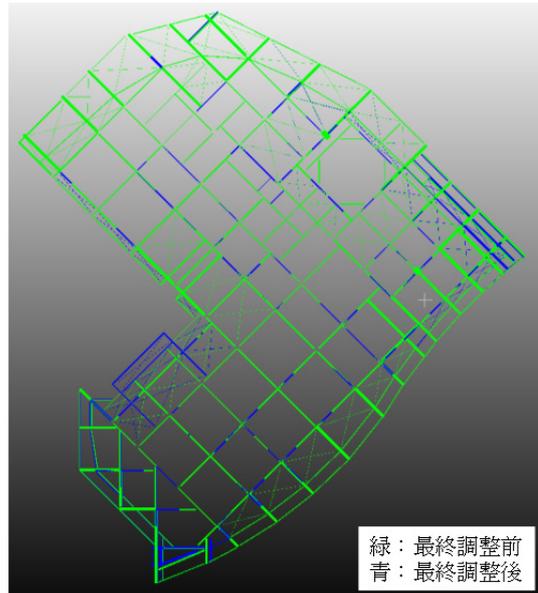


Fig. 7 新設鉄骨部材の調整  
Adjustment for Newly Erected Steel-Frame Member

へ取込んだ。専用ソフトにて順次、自動的に点群データを統合して計測漏れや点群データの欠落箇所を確認した。欠落した箇所は、作業の最後に計測を行い、補完した。実際の計測作業では、明るさに大きな差が生じないように照明機器の配置に配慮した。その後、点群データのノイズ(例えば、人、照明機器、レーザースキャナーなど)を除去し、現況点群データが得られた。

### 3.5 竣工BIMモデルと現況点群データとの差異

本体鉄骨とキャットウォークについては、竣工BIMモデルと現況点群データはほぼ一致した。設備の竣工BIMモデルと現況点群データをFig. 5に示す。同図の黄色線で囲んだ範囲の設備ダクト(水色)の位置が現況点群データ



Photo 3 採用した無火気工法  
Non Welding Construction Method

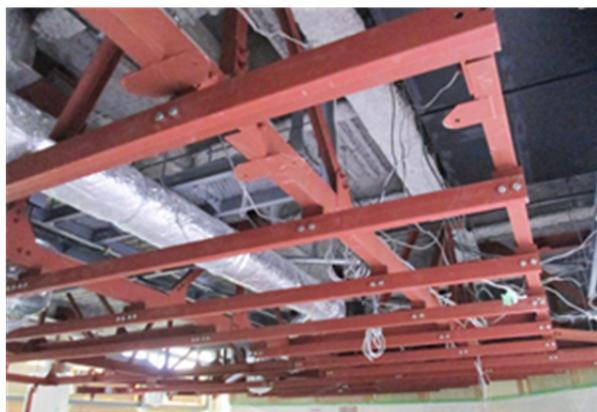


Photo 4 鉄骨工事の状況  
Circumstance of Steel Work

(グレー)と大幅に異なっていたため、位置を修正する対象となった。

### 3.6 干渉チェックと設備の移設

現況に合わせてBIMモデルを修正した。これを現況BIMモデルとした。Fig. 6に示すようにBIMソフト上で容易に干渉チェックができるようになり、構造・設備設計ともに1日で完了した。従来の2次元の干渉チェックでは、同等規模の場合、構造・設備設計ともに1週間は掛かるというヒアリング結果から、干渉回避に関する設計業務の工数・期間ともに約80%の削減効果を得た。BIMソフト上での干渉チェックは、新設鉄骨部材と干渉する部材・箇所が正確にわかるため、干渉部分の設備部材のみを効率良く移設できた。設備工事会社へヒアリングしたところ、設備部材の移設作業の工数を従来作業に対して約25%削減できたことがわかった。

### 3.7 新設鉄骨部材の調整

Fig. 7に示すように建築部材と干渉する箇所は、ぶどう棚のレベル調整やブレースの角度調整を行った(同図の青の部分)。すべての干渉箇所がなくなった時点で新設鉄骨部材のBIMモデルが確定した。

Table 2 新築工事の概要  
Outline of New Building Construction

	事務所棟	整備棟
建物用途	事務所	整備場
構造	鉄骨造+RC造	鉄骨造
建物規模	地上2階	地上2階
敷地面積	76462.7m <sup>2</sup>	
建築面積	967.1m <sup>2</sup>	5513.2m <sup>2</sup>
延床面積	1845.1m <sup>2</sup>	5949.4m <sup>2</sup>
最高高さ	9.2m	15.9m
工期	2015年2月～2016年6月(17ヵ月)	



Fig. 8 対象工事の完成パース  
Perspective Drawing of Project

### 3.8 鉄骨工事

Photo 3に示すように無火気工法を採用したことにより、作業は既存鉄骨への孔明けとボルト締めのみであった。ぶどう棚の工事完了状況をPhoto 4に示す。事前にBIMソフト上で詳細な干渉チェックを行った上で設計を確定したため、鉄骨工事では手戻りが一切発生しなかった<sup>2)</sup>。工事関係者へヒアリングしたところ、手戻り工事が発生すると軽微なもので約1週間、それ以外では約2週間の工程遅延を招くことがわかった。したがって、手戻り工事が起こり得る従来工事に対して、本工事では鉄骨工事関連工程の約15%の工期短縮効果を得た。

## 4. 新築工事への適用

### 4.1 工事概要

対象工事の概要をTable 2、完成予想パースをFig. 8に示す。工事機械を整備・保管する社内施設に新築される事務所棟(同図右)および整備棟(同図左)の工事である。

### 4.2 適用対象工事

点群データを活用したのは掘削工事と杭工事である。掘削工事では、対象工事エリアの掘削土量計算を行い、BIMから得られた算出結果と比較した。杭工事では、杭芯計測を行い、在来測量による計測結果と比較した。

### 4.3 UAV飛行計画

計4回の飛行のうち、第1, 3回の飛行では、Photo 5に示すUAVに2400万画素のカメラを搭載した。第2, 4回の飛行では、6枚翼のUAVに3600万画素のカメラを搭載した。個別の飛行計画は専用ソフトウェア上において、飛



Photo 5 使用したUAV  
Unmanned Aerial Vehicle



Photo 6 CPの設置例  
Setting a Control Point



Fig. 9 UAVの飛行計画例  
Flight Plan of UAV

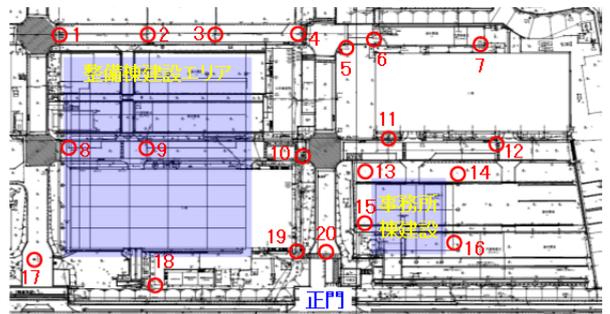


Fig.10 CPの配置例  
Arrangement of Control Points

Table 3 地上分解能  
Ground Sampling Distance of Images

	第1、3回飛行	第2、4回飛行
カメラ画素数	2400万画素	3600万画素
平面分解能	9.8mm	7.0mm
奥行き分解能	16.6mm	13.6mm

行高度・速度、カメラの画角、各画像のラップ率などを  
入力すると飛行ルートが自動生成される。実際の地図情  
報を利用して、飛行範囲が敷地外へ出ないように詳細に設  
定した。飛行計画例をFig. 9に示す。同図の赤線枠で示す  
約200×100mエリアが飛行エリアである。飛行高度は、  
画像の地上分解能に影響するため、できるだけ低く設定  
したい。しかし、エリア内で最も広い建物の屋根を撮影  
したときに特徴点が得やすい高さを優先的に考慮して、  
飛行高度を40mに設定した。各画像のラップ率である  
オーバーラップとサイドラップは、デフォルト値のそれ  
ぞれ80%、60%に設定した。この結果、各飛行における  
画像の地上分解能はTable 3に示す値となった。なお、本  
飛行はUAVの飛行ルールを定めた改正航空法(2015年12  
月10日施行)の施行前に実施した。

#### 4.4 点群データの生成

点群データの生成には、Smart 3D Capture<sup>®</sup>を使用した。  
いずれも対象エリア内にCPを約20箇所設定した。CPの設



Fig.11 飛行エリアの点群データ  
3D Point Cloud Data of Flight Area

置例をPhoto 6, 配置例をFig. 10に示す。計4回の飛行では、  
それぞれ400～600枚の画像から点群データを生成した。  
同一のCPが写っている連続画像の最初と最後および中  
間付近の3枚の画像でCPを必ず指定した。4回目の飛行で  
得られた飛行エリア全体の点群データをFig. 11に示す。

生成された点群データはいずれも2億点以上であったため、点群データを(再配置せず、ランダムに)間引いて5千万点のデータとして使用した。

#### 4.5 掘削土量計算

専用ソフトに1回目の飛行で得られた地盤面の点群データを取込み、掘削床付けのBIMモデルとの差分計算を行い、Fig. 12に示すように掘削土量を計算した。掘削土量の計算にはTrend Point<sup>®</sup>を使用した。なお、対象エリアの工事用車両、作業中の重機、仮置きした他工区の掘削土などの点群データは除去した。比較対象として、地盤面の数十箇所の測量結果から作成した地盤面のBIMモデル(以下、測量地盤面モデル)を用いて同様に掘削土量を計算したところ、地盤面の点群データから算出した値とほぼ同数量(約1%の差異)であった。

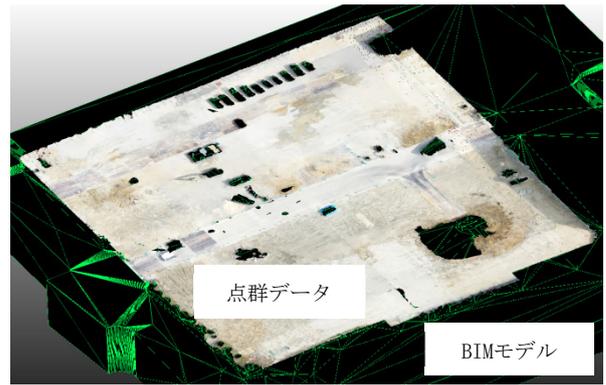


Fig.12 掘削土量の計算

Calculation of Amount of to Be Excavated Soil

#### 4.6 杭芯計測

整備棟の掘削工事開始後、計3回UAVを飛行させ、得られた点群データから工区ごとに杭芯計測を行った。Fig. 13に示すように杭芯座標は点群データと杭頭のBIMモデル(緑線)を重ね合わせて計測した。まず、同図の右下拡大図左側のようにBIMモデルを水平方向に動かし、杭頭(点群データ)に合わせて1mm単位で位置決めする。次に、同拡大図右側のようにBIMモデルを高さ方向に動かして、BIMモデルと杭頭(点群データ)が半分ずつ現れるように1mm単位で位置決めした。そのときのBIMモデルの天端芯の座標が得られる杭芯座標となる。対象の約100本の杭芯座標について、トータルステーションを利用した在来測量の計測結果と比較したところ、その差異の標準偏差は約30mmであった。

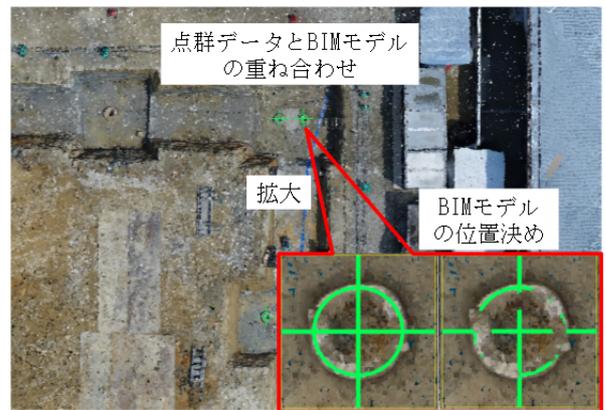


Fig.13 杭芯計測

Pile Position Measuring

(オーバーラップ：80%，サイドラップ：60%)より少し高めに設定して、ラップ率が標準値を下回らないように維持する必要がある。

#### 4.7 結果考察

点群データの位置精度は、撮影画像の分解能、CPの配置・数とその座標精度、撮影時のラップ率の確保などに左右される。CP付近では実際の座標に補正されるため、位置精度が最も高く、それ以外の場所では画像処理結果に左右される。したがって、点群データの位置精度は、CP付近で撮影画像の分解能の1~2倍、それ以外で同1~3倍程度になると言われている<sup>4)</sup>。今回対象の工事エリア内で事前に行っていた在来測量結果に対する点群データの位置精度を検証した結果、その差異の標準偏差はCP付近で約17mm、それ以外で約27mmであった。今回の飛行では、画像分解能は7.0~16.6mmであったことから、ほぼ理論値通りの結果が得られた。

飛行時の風速値が高いとUAV機体の姿勢や位置精度が安定しないため、撮影画像のラップ率が設定値に対して不安定に変動する。ラップ率が低下すると隣り合う画像内に存在する共通の特徴点が少なくなり、ステレオ相関(2点のカメラ撮影点と姿勢)の計算精度が低下するとともにそのエリアの点群データの位置精度が低下する。したがって、強風時には計画時よりラップ率を標準値

#### 4.8 建築工事におけるUAV活用の見通し

今回の飛行・撮影では、CPの配置・数は適正であったと考えている。むしろ、座標精度の低いCPが存在したこと、強風下での撮影時のラップ率の確保に問題があった。これらの問題が解決できた場合、点群データの位置精度はCP付近で約10mm、それ以外で約20mmを十分に達成できたと推測できる。

上記の位置精度では、測量や建築部材の建入れ計測などへの活用は現実的ではない。少し視点を変えて、精度の要求されない高所などの点検や定点写真撮影などへの活用が現実的であると考えられる。また、地盤面の点群データは、ArchiCAD<sup>®</sup>へ取込むと地盤面のBIMモデルを自動的に生成できる<sup>3)</sup>。全体的な位置精度が重要であり、細かい位置精度は要求されていないため、現状でも活用は適していると言える。

フォトグラメトリ法で生成した点群データの位置精度は、カメラ解像度に比例する。測量器並みの位置精度を実現するには、カメラの解像度を現状の高解像度機種種の2~3倍の7200万画素程度に向上させる必要がある。このカ

メラ解像度であれば、測量や建築部材の建入れ計測などへの活用も現実的になるため、建築工事におけるUAVの活用は益々発展すると考える。

## 5. まとめ

建築工事において3次元点群データの活用効果を検証した。改修工事では、天井耐震改修工事の現況計測を行い、生産性向上効果を検証した。新築工事では、UAVから撮影した画像からフォトグラメトリ法により点群データを生成し、掘削土量計算や杭芯計測を行い、その精度を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 改修工事では、レーザースキャナーによる現況計測とBIMモデルの修正に計5日を要したが、その後の干渉チェックと設備の移設作業の工程を短縮できたため、鉄骨工事前の工程は在来と同等以下に収められた。
- 2) 改修工事では、BIMソフト上で詳細な干渉チェックを行ったことで鉄骨工事における手戻り工事がなくなり、全体で約15%の工期短縮効果を得た。
- 3) 新築工事では、フォトグラメトリ法で得られた点群データから掘削土量計算を行ったところ、BIMモデルから算出した値と同数量が得られた。掘削土量計

算であれば、フォトグラメトリ法で得られた点群データで十分な精度が得られる。

- 4) 新築工事では、同様に杭芯計測を行ったところ、在来測量による計測結果との差異の標準偏差が約30mmであった。カメラ解像度が現状の2~3倍になれば、在来測量の計測精度に近づくと推測できる。

## 参考文献

- 1) 嘉納, 池田, 浜田: 点群データに基づく工事進捗の自動識別に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 80, No.715, pp.2081-2090, 2015.09
- 2) 池田, 坂上: 建築工事における3次元点群データの活用と効果の検証 その1 改修工事における検証事例, 日本建築学会2016年度大会(九州) 学術講演梗概集, pp.1023-1024, 2016.07
- 3) 坂上, 池田: 建築工事における3次元点群データの活用と効果の検証 その2 新築工事における検証事例, 日本建築学会2016年度大会(九州) 学術講演梗概集, pp.1025-1026, 2016.07
- 4) 村木: UAVに搭載されたデジタルカメラを用いた高精細3次元点群やDSM・オルソの検証, 第1回UAV活用フォーラム講演資料, 2015.11