

ICT の全面的な活用による造成工事の実績および精度の考察

日本国土開発(株) 正会員 ○佐野 健彦
日本国土開発(株) 佐藤 裕
日本国土開発(株) 鈴木 一帆
日本国土開発(株) 正会員 中村 裕希

1. はじめに

ICT の全面的な活用(ICT 土工)は、i-Construction¹⁾におけるトップランナー施策として位置づけられ、生産性向上が特に遅れている土工分野への技術展開を全面的に推進することを至上命題としている。ICT 土工の鍵となる技術としては、3D 計測技術と 3D データを活用した ICT 建設機械技術に大別される。3D 計測技術は、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)写真測量および 3D レーザースキャナ計測が該当する。UAV 写真測量および 3D レーザースキャナ計測に基づく 3D モデル化と精度検証は、すでに多くの報告^{例えば 2)~3)}がされているが、2016 年 3 月末に整備された、「3 次元データによる 15 の新基準」⁴⁾に対する考察はされていない。ICT 建設機械技術を用いた施工精度は、その位置座標の取得精度に依存している。位置座標の取得方式は、RTK-GNSS(RTK)方式およびネットワーク型 RTK-GNSS(VRS)方式などが主流⁵⁾である。前者は基準局の設置が必要な方式であるが、精度が高い方式である。後者は基準局の代わりに仮想局を設置する方式であり、RTK 方式よりも多少精度が落ちる⁵⁾が、基準局の設置を必要としない方式であり利便性の高い方式である。GNSS(Global Navigation Satellite System)の取得精度に影響を及ぼす山間地の谷間部で使用する場合などでは、施工現場の環境に合致した最適な選択になるように両者の特性を把握する必要がある。

以上のことを踏まえ、本報では、ICT 土工の考え方を道路土工事および造成工事に適用した事例に関して、3D 計測技術に基づく現況地形測量データの取得とその 3D モデル化、および CIM モデルと連携した、マシンコントロールバックホウ⁶⁾、マシンコントロールブルドーザ⁷⁾に対して RTK 方式および VRS 方式による施工精度の違いについて検証を行った結果について報告する。さらに、UAV を用いた写真測量に関して、撮影高度の違いおよび斜め撮影、撮影画像における不要部分の処

理の有無が結果に与える影響について精度検証を行った結果に対して「3 次元データによる 15 の新基準」と比較・考察した結果について報告する。

2. ICT 施工システムの概要

本章は、図-1 に示す、3D 計測技術を用いた現況地形測量および ICT 建設機械による施工、出来形管理までの一貫した情報化施工について詳述する。

(1) 使用した 3D 計測技術とその特徴

地表面の 3D デジタルデータは、レーザー計測技術を用いて直接的に 3D 点群データを取得する方法、写真測量によるデジタル写真画像から画像処理を経て間接的に 3D 点群データを取得する方法がある。それぞれのステップにおいて使用したアプリケーションを表-1 に示す。

a) 3D レーザースキャナの概要

3D レーザースキャナは、光源から発せられた光線が測定対象に反射して戻ってきた時間または、位相差を計測することによって距離を高精度に測定する技術であり、時間方式のタイムオブフライト(Time of flight)および位相差方式のフェーズベーストシステム(Phase based system)の 2 つに大別される。レーザースキャナにカメラが内蔵されている場合は、計測点の色情報を同時に取得することが出来る。位相差方式の特徴は、計測可能な最大距離が、数百メートル程度と近距離の計測しか出来ないが、点密度が高く計測時間が短い。時間方式の特徴は、測定距離が数キロメートルまでと比較的遠距離の計測が可能である。ただし、測定距離が長い場合は、点密度が低く、計測時間が長いといった特徴がある。本工事で用いた 3D レーザースキャナは、時間方式とした。点群データは、計測したデータに対して表-1 に示す Scan Master を使用し、合成することによって得た。3D レーザースキャナの詳細は、表-2 に示す通りである。

キーワード i-Construction, マシンコントロール, UAV, 写真測量, CIM

連絡先 〒107-8466 東京都港区赤坂 4-9-9 日本国土開発(株)土木本部技術部技術グループ TEL 03-5410-5750

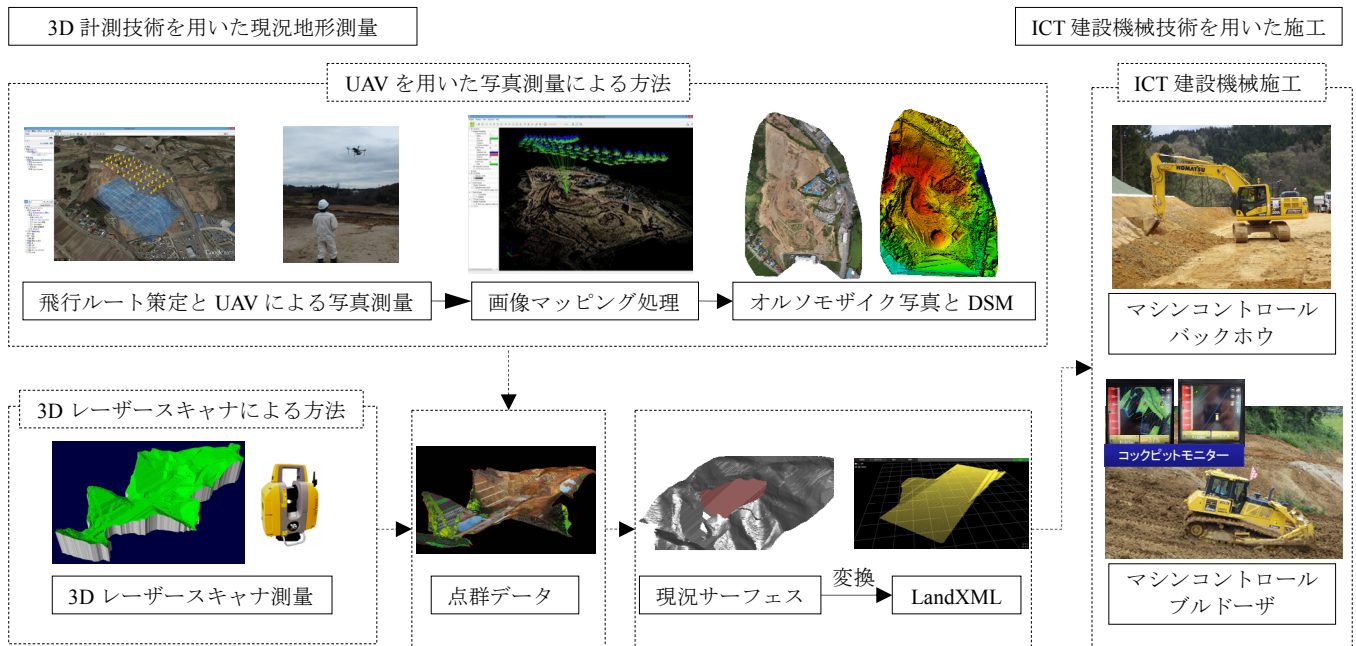


図-1 3D計測技術と3Dデータを活用したICT建設機械技術を用いた施工概要

b) UAVを用いた写真測量の概要

UAV写真測量は、3Dマップ上にて飛行計画を作成し、その計画に基づいて現地で飛行させデジタル写真を撮影する。撮影されたデジタル写真処理は、Pix4D mapperを使用し、バンドル調整法を用いた標定計算による画像処理を経て、図-1に示すオルソモザイク写真およびDSMに変換される。この処理によって3D点群データを取得出来る。写真測量に用いたUAVおよびデジタルカメラの諸元を表-3に示す。UAVは、GPS測位によって撮影時の位置座標を取得しているが、誤差を含む⁸⁾ため、地上に設置した対空標識⁹⁾を用いて基準点補正を行った。対空標識は、計測対象エリアに対して6点以上になるようにバランス良く配置¹⁰⁾した。

(2) 使用したICT建設機械の概要

ICT建設機械は、3D設計データや3D現況地形データに基づき、丁張りを設置すること無く施工可能な機械である。本研究では、マシンコントロールバックホウおよびマシンコントロールブルドーザを使用した。

a) マシンコントロールバックホウの概要

ICTを用いたバックホウの自動化技術には、大きく分けて、マシンガイダンス(Machine Guidance)とマシンコントロール(Machine Control)の2つがある。マシンガイダンスは、切土・盛土の3D設計データを搭載したコンピュータと機械に取り付けた、GNSSによって得られる位置情報、方位情報を重ね合わせ、機械、ブームやバケットの傾き等の情報から、オペレータの席にどのよ

表-1 使用アプリケーションの一覧

用途	アプリケーション名
3D レーザースキャナ処理	Scan Master Ver.3
UAV 飛行計画	Mission Planner Ver.1.3.32
デジタル写真画像処理	Pix4D mapper Ver.2.0.104
点群処理および土量計算	TREND-POINT 2016Ver.3
土量計算	AutoCAD Civil 3D 2016

表-2 3D レーザースキャナの諸元

装置	トプコン GLS-2000
測定距離	150m
スキャンピッチ	10m/25mm
スキャン数	12 scan
計測点数	1 億 6480 万点

表-3 写真測量に用いた機器諸元および撮影概要

4 発マルチローターUAV enRoute Zion QC730			一眼レフデジタルカメラ SONY α 6000	
本体寸法	479.42(mm)× 479.42(mm)		焦点距離 f	16(mm)
撮影高度 H	50(m)	80(m)	露出時間 T	1/1250(秒)
飛行時間 T	8.5min	10min	絞り値	22
平均飛行速度 V	3.5(m/s)	3.5(m/s)	シャッター 一閃隔	2(秒) $H=50m$ 5(秒) $H=80m$
撮影エリア面積	3.56(ha)	4.86(ha)	撮影素子 サイズ d_s	23.5(mm)
地上分解能 ΔXY	12.24 (mm/pix)	19.58 (mm/pix)	有効画素 数 $m(=m_x \times m_y)$	6000×4000 =2400 万 (pix)
平均地上分解能 GSD	10.80 (mm/pix)	17.50 (mm/pix)	ISO 感度	ISO800
オーバーラップ サイドラップ 撮影枚数	80.00% 70.00% 211(枚)	80.85% 81.28% 88(枚)	画像分解 能 δ_p	0.003917 (mm/pix)

うに機械を操作したら良いかが表示される。マシンコントロールは、GNSSアンテナと基準局から取得した刃先の位置情報、3D設計データを入力したコンピュータを搭載し、加速度計とジャイロおよびストロークセンサの信号から車体の姿勢角を正確に検出する加速度セ

ンサを用いてリアルタイムに各場所における設計面と現地盤の標高差を計算し、バケットの刃先が設計面に沿って動くように自動でブームを上昇、停止といった制御をする。オペレータは、機械の微操作をすること無く、ブームおよびアームを動かすことで掘削が出来る。本工事で使用したマシンコントロールバックホウの諸元は、表-4に示す通りである。

b) マシンコントロールブルドーザの概要

ICTブルドーザは、3Dマシンコントロールを装備したブルドーザ⁷⁾を使用した。機械の詳細については、表-5に示す通りである。作業開始前にはキャリブレーションを行い、ブルドーザの排土板先端部を既設の基準点に合わせ、コントロールパネルに表示される座標値が一致していることを確認した。ICTブルドーザは、GNSS測位によって随時位置情報の補正がなされ、補正された位置情報と設計3D地盤モデルとの比較計算によって、各油圧シリンダーのストロークセンサが自動的に制御される構造となっている。

3. UAV 写真測量の精度検証

UAV 写真測量において撮影高度が測量精度に与える影響を検証するため、撮影高度 50m および 80m の 2 ケースの比較を行った。また、土量の算出方法の違いによる計算結果の違い、直下撮影と斜め撮影および撮影画像の前処理の有無が測量精度に及ぼす影響について検証した。写真測量の対象は、延長 325m、平均幅 45m、平均高さ 8m の盛土構造物とし、撮影対象エリアは 1.2ha であった。精度検証は、UAV 写真測量によって得られた 3D 点群データと盛土の管理断面上に設置した 118 点の TS(Total Station)測量における結果との差分を求めて比較した。地上分解能は、式(1)より算定することが出来る。

$$\Delta XY = H \times \delta_p / f, \quad \delta_p = d_x / m_x \quad (1)$$

ここで、 ΔXY は地上分解能(mm/pix)、 H は撮影高度(mm)、 δ_p は画像分解能(mm/pix)、 f は焦点距離(mm)、 d_x は x 方向撮影素子サイズ(mm)、 m_x は x 方向画素数(pix)である。表-6は、6箇所 の対空標識における x 座標値、 y 座標値、 z 座標値の各成分の平均 RMS 誤差および座標 3 成分の平均 RMS 誤差を示している。撮影高度 50m では、0.018m、撮影高度 80m では、0.023m であり、UAV 写真測量で作成した 3D モデルは十分な精度を有していることを確認した。

表-4 マシンコントロールバックホウの諸元⁶⁾

機種	PC200i-10 ステレオカメラ付
メーカー	コマツ
仕様	0.8m ³ (法面バケット)
機械質量	19600 kg
マシンコントロール(車両制御用コンポーネント)	ステレオカメラ, GNSS アンテナ, 慣性センサ(IMU), ストロークセンサ, ICT センサコントローラ, コントロールボックス
GNSS 補正情報(2 方式で検証)	RTK-GNSS 方式 ネットワーク型 RTK-GNSS(VRS)方式

表-5 マシンコントロールブルドーザの諸元⁷⁾

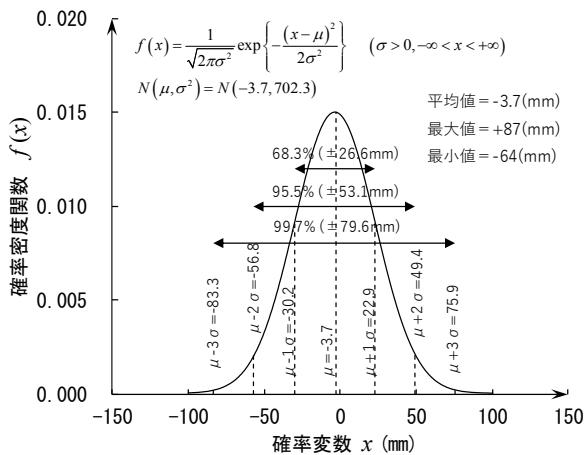
機種	D65PXi-18
メーカー	コマツ
仕様(ブレード形式)	湿地(ストレートチルト)
機械質量	22100 kg
ブレード幅	3970 mm
接地圧	36kPa
マシンコントロール(車両制御用コンポーネント)	GNSS アンテナ, 慣性センサ(IMU), ストロークセンサ, コントロールボックス
GNSS 補正情報(2 方式で検証)	RTK-GNSS 方式 ネットワーク型 RTK-GNSS(VRS)方式

表-6 対空標識 6 点における RMS 誤差

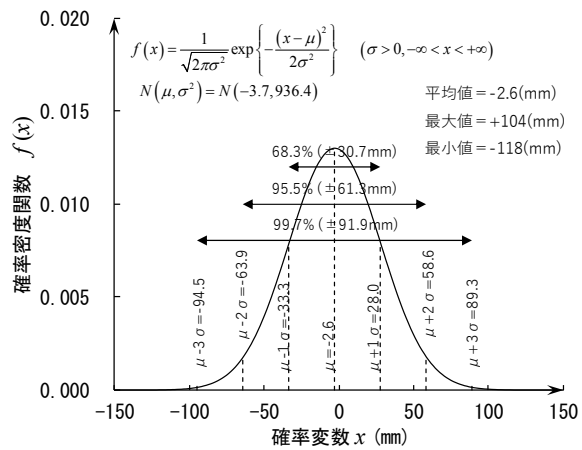
座標成分 撮影高度	X 誤差 (m)	Y 誤差 (m)	Z 誤差 (m)	平均 RMS 誤差 (m)
50m	0.020	0.008	0.025	0.018
80m	0.033	0.014	0.023	0.023

(1) TS測量とUAV写真測量の比較による精度検証

図-2(a)および図-2(b)は、118 箇所の TS 測量による標高値と UAV 写真測量によって得られた 3D 点群データの差を正規分布であると仮定して図示したものである。図の縦軸は、確率密度関数 $f(x)$ を示し、横軸は、TS 測量と 3D 点群データの差分値 $x(\text{mm})$ を確率変数として示したものである。撮影高度 50m の図-2(a)は、 2σ 区間(95.5%信頼区間)で $\pm 53.1\text{mm}$ であり、平均値は -3.7mm 、最大値は 87mm 、最小値は -64mm であった。一方、撮影高度 80m の図-2(b)は、 2σ 区間(95.5%信頼区間)で $\pm 61.3\text{mm}$ であり、平均値は -2.6mm 、最大値は 104mm 、最小値は -118mm であった。両者を比較すると撮影高度が低い方がデータのバラツキは小さくなっていることが分かる。出来形管理の監督・検査要領¹¹⁾では、出来形管理基準および規格値として、道路土工における盛土工の天端部では、平均値 $\pm 50\text{mm}$ 、個々の計測値は $\pm 150\text{mm}$ 、小段を含む法面では、平均値 $\pm 80\text{mm}$ 、個々の計測値は $\pm 190\text{mm}$ と記されている。個々の計測値とは、 3σ 区間(99.7%信頼区間)を指している。撮影高度 50m の図-2(a)は、 3σ 区間(99.7%信頼区間)で、 $-83.3\text{mm} \sim 75.9\text{mm}$ 、撮影高度 80m の図-2(b)は、 3σ 区間(99.7%信頼



(a) 撮影高度 50m のケースにおける測定誤差



(b) 撮影高度 80m のケースにおける測定誤差

図-2 撮影高度の違いによる精度比較

区間)で、-94.5mm~89.3mm であるが、このデータは、天端部および法面部をまとめて評価した値である。どちらの高度でも出来形管理の監督・検査要領を満足する結果であることが分かった。さらに、出来形管理の監督・検査要領では、計測性能として、地上画素寸法が 10mm/pix 以内という基準がある。図-3 は、撮影高度による 1 日あたりの撮影範囲および地上分解能の関係を示したものであり、縦軸(左)は、撮影が可能な 1 日当たりの撮影範囲の累積値を示している。縦軸(右)は、撮影高度における地上分解能を示している。横軸は、UAV の撮影高度である。図-3 から、撮影高度が、30m で地上分解能が 7.3mm/pix、撮影高度が 50m で地上分解能が 12.2mm/pix であることが読み取れる。撮影高度が、50m であっても、出来形管理の監督・検査要領に示された計測性能を満足しないことが分かる。この図に示された値から線形補間すると、地上画素寸法が 10mm/pix 以内という計測性能の基準を満足するための撮影高度は、今回の条件下では、40.8m が限界であることが分かる。

(2) 土量の算出方法の違いによる計算結果の検証

土量計算手法やモデル化手法が土量計算結果に及ぼす影響について検討した。土量計算方法は比較のために表-7 に示す 4 手法を採用した。それぞれの特徴は表-7 に示す通りである。図-4 は、現況地形面を基準値とし、盛土後の地形面に対して 4 点平均標高法を用いた盛立て高さの差分表示の例を示している。図-5 は、TIN サーフェスモデルを基準とした各手法による計算結果を離散化サイズ毎に整理した図である。縦軸は土量計算誤差を示し、横軸は、モデルの離散化サイズを示し

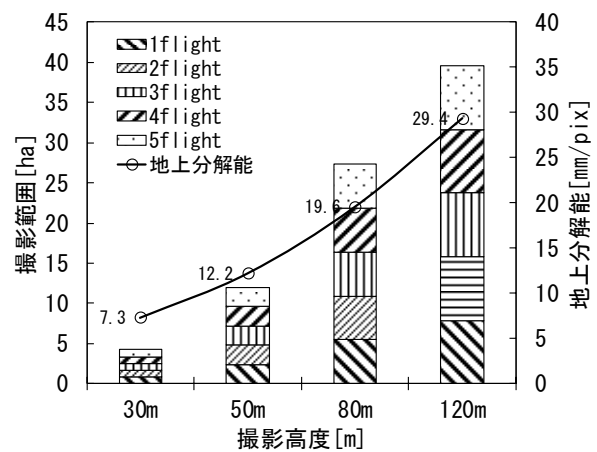


図-3 撮影高度の違いによる 1 日あたりの撮影範囲および地上分解能の関係

表-7 土量の計算方法

計算手法	特徴
4 点平均 標高法	4 つの格子点に囲まれた矩形領域に対し、各格子点を平均した標高を領域全体の標高と考え、柱状法により計算する方法。
1 点法	格子点を中心とした矩形領域を考え、格子点の標高を柱状法で土量を計算する方法。
平均 断面法	両端の断面積を平均し、これに両断面間の距離を乗じて体積を算出する方法。
プリズ モイダル法	平均断面法の両端断面に加え、連続する 2 つの測点の中間部の断面を追加して計算する方法。

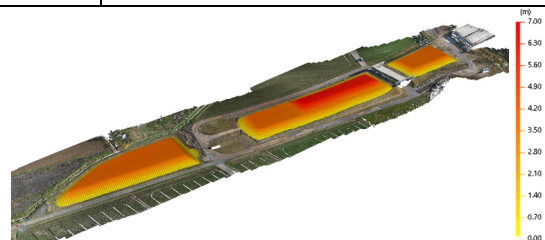


図-4 現況地盤面を基準値とした盛立て高さの差分表示 (4 点平均標高法 1m メッシュ) の例

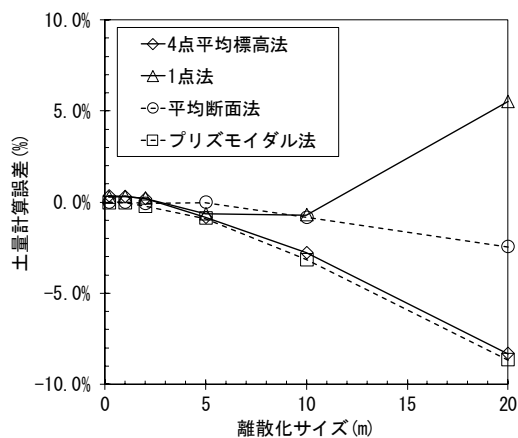


図-5 撮影高度 50m における離散化サイズと計算モデルの違いによる土量計算誤差

ている。離散化サイズが 5m 以下の範囲であれば、各計算手法の誤差は±1.0%以内であることが図から読み取れる。一方、離散化サイズが 5m を超えると誤差の範囲は大きくなり、離散化サイズが 20m では、誤差が±7.0%と大きくなっていることが分かる。図-6 は、撮影高度の違いについて撮影高度 50m の結果を基準として撮影高度 80m の結果を比較した図である。撮影高度の違いによる影響は、切土量では、約 3.72%程度であるが、差引土量では、0.67%と小さく、土工における日々の施工管理を目的とした相対土量の把握では、撮影高度が結果へ与える影響は小さいといえる。

(3) 直下撮影と斜め撮影および撮影画像の前処理の有無が精度に及ぼす影響の比較

空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領¹²⁾では、撮影方向に関しての具体的な規定は示されていない。一般的には、直下撮影を実施するが、法面などでは、極端に点群密度が小さい部分が生成されるなど、出来形管理で利用する場合には不具合が生じることが考えられる。一方、写真測量は、上空から広範囲に撮影することから、計測対象範囲外の草木や人工構造物などが写り込み、点群データ精度が低下する原因となる。出来形管理要領¹²⁾では、計測点群の対象範囲外データの削除方法については、点群生成後の 3D データ上で目視確認して選択削除するのが一般的な方法であるとしているが、3D 点群データ上で削除する方法は作業が煩雑である。以上を踏まえて、直下撮影だけで 3D 点群データを生成した場合と直下撮影に加えて、計測対象物を取り囲む様に斜め撮影した場合について比較した。斜め撮影は、法面中心にて対地高度と同じ離隔距

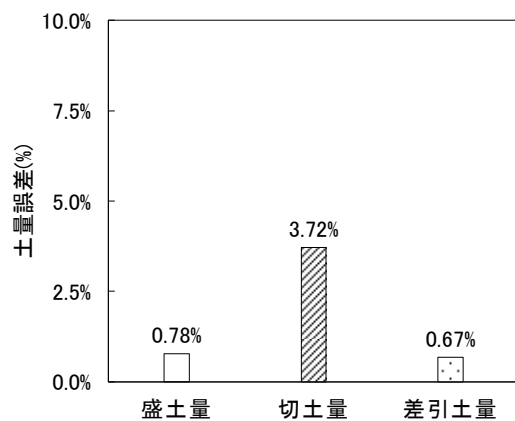
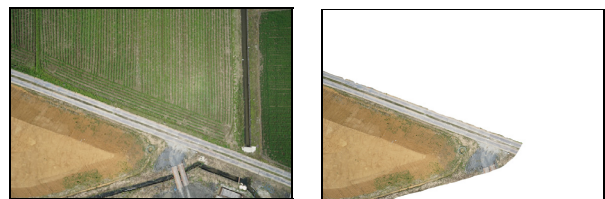


図-6 撮影高度の違いによる土量誤差

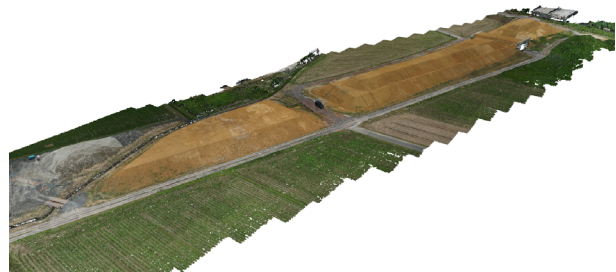


(a) 撮影画像 (b) 処理画像

図-7 撮影画像の処理前後の比較

表-8 画像処理条件と撮影条件

画像処理条件		撮影条件	
		撮影方向	
不要部分 処理方法	処理しない	直下	直下+斜め
	不要部白抜	Case1	Case2
		Case3	Case4



(a) 直下撮影で画像の不要部未処理の場合(Case1)



(b) 直下撮影で画像の不要部白抜処理の場合(Case3)

図-8 撮影方向と画像前処理の有無によるモデルの差

離になるようにフライト計画を行った。また、3D 点群を生成した後に不要な情報を削除する方法ではなく、撮影画像の段階で、不要な情報を削除した場合とそうでない場合についても検証することとした。具体的に



図-11 基準点オフセット補正値の確認

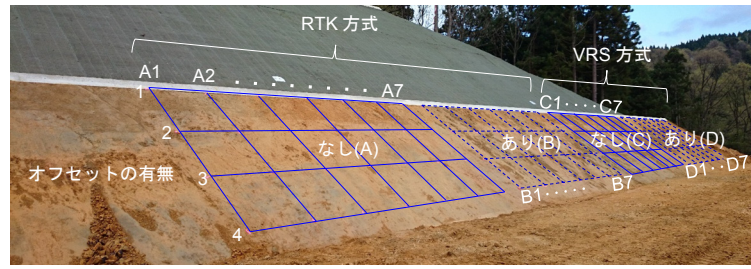


図-12 施工精度確認試験の概要

表-10 RTK方式およびVRS方式のオフセット補正有無の違いによる設計座標値と測定座標値の差分

測点	RTK-GNSS方式						VRS方式					
	オフセット無し(A)			オフセット有り(B)			オフセット無し(C)			オフセット有り(D)		
	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
1-1	-23	-13	-5	-10	14	-18	-18	-44	-38	35	13	21
1-2	-14	-14	-61	-5	12	-30	-40	-50	19	17	8	-2
1-3	-27	-29	-41	-3	-16	9	-30	-64	-23	11	4	6
1-4	-31	-44	-21	-19	-26	19	-49	-49	-21	-1	-15	18
2-1	12	-36	-43	-2	2	4	-4	-28	-21	26	21	-3
2-2	94	-160	-49	-2	-1	-14	-8	-44	-39	19	14	-2
2-3	0	-39	-23	-13	-10	-6	-35	-45	-12	-4	7	-30
2-4	-17	-41	-3	-31	-6	0	-39	-59	1	-11	-3	-30
3-1	9	-48	88	-1	-6	10	0	-37	19	27	17	-11
3-2	-2	-26	-44	-4	-7	-9	0	-59	-42	11	8	-17
3-3	-14	-41	-25	-29	-10	-26	-29	-56	-36	4	5	-25
3-4	-13	-54	-5	-25	-23	20	-52	-51	-9	-4	4	-28
4-1	1	-25	-21	2	15	28	-13	-25	43	30	19	-20
4-2	-9	-34	-52	3	1	-2	-9	-32	-28	8	16	-26
4-3	-21	-46	-36	-17	-15	2	-39	-47	-8	8	23	-37
4-4	-28	-46	-16	-29	-9	14	-35	-49	-28	-7	1	-36
5-1	5	-36	-25	13	-10	26	-6	-29	1	62	-8	-23
5-2	-15	-31	-43	-1	-3	5	-16	-28	-15	34	24	-36
5-3	-25	-39	-55	-17	-10	10	-42	-63	43	11	10	-39
5-4	-27	-53	-36	-25	-18	29	-39	-58	18	9	-15	-6
6-1	-2	-31	-23	13	-5	50	-16	-10	-20	38	13	-43
6-2	-6	-46	-37	11	-19	6	-17	-26	-4	48	4	10
6-3	-16	-38	-29	-10	-21	-1	-41	-41	-32	15	1	-23
6-4	-39	-41	-41	-26	-20	2	-58	-42	-7	1	-12	-14
7-1	-5	-32	15	14	12	18	-2	-44	-32	35	18	-6
7-2	-19	-34	-38	-4	10	-14	-14	-37	-26	29	17	-23
7-3	-25	-36	-38	-8	-9	-1	-32	-47	-24	12	6	-23
7-4	-37	-42	-41	-20	-14	12	-49	-50	-14	8	11	-24
平均値	-10.5	-41.3	-26.7	-8.7	-6.9	5.1	-26.1	-43.4	-12.0	16.8	7.5	-16.9
標準偏差	24.0	24.8	27.8	13.3	11.4	17.2	17.2	12.8	22.5	17.2	10.7	16.8
最大値	94.0	-13.0	88.0	14.0	15.0	50.0	0.0	-10.0	43.0	62.0	24.0	21.0
最小値	-39.0	-160.0	-61.0	-31.0	-26.0	-30.0	-58.0	-64.0	-42.0	-11.0	-15.0	-43.0
$\mu+\sigma$ (68.3%区間)	13.5	-16.5	1.1	4.5	4.5	22.3	-9.0	-30.6	10.6	34.0	18.2	0.0
$\mu-\sigma$ (68.3%区間)	-34.5	-66.0	-54.6	-22.0	-18.2	-12.1	-43.3	-56.1	-34.5	-0.4	-3.1	-33.7
$\mu+2\sigma$ (95.5%区間)	37.5	8.3	29.0	17.8	15.9	39.5	8.2	-17.8	33.1	51.2	28.9	16.8
$\mu-2\sigma$ (95.5%区間)	-58.5	-90.8	-82.4	-35.3	-29.6	-29.3	-60.5	-68.9	-57.0	-17.6	-13.8	-50.6
$\mu+3\sigma$ (99.7%区間)	61.6	33.1	56.8	31.1	27.3	56.7	25.3	-5.1	55.6	68.5	39.5	33.7
$\mu-3\sigma$ (99.7%区間)	-82.6	-115.6	-110.2	-48.6	-41.0	-46.5	-77.6	-81.7	-79.6	-34.8	-24.5	-67.4

から、1 σ 区間(68.3%信頼区間)は、-22.1mm～+23.3mmである。2 σ 区間(95%信頼区間)では、-44.8～+45.9mmであることから、十分な精度を有しているといえる。

5. マシンコントロールバックホウの施工精度確認

マシンコントロールバックホウによる施工精度の確認試験は、RTK方式で施工した場合と、VRS方式で施工した場合について、施工精度がどの程度異なるかという点に着目して実施した。また、それぞれの方式に対して、図-11に示す、地上の基準点にてオフセット補正を実施した場合と、実施せずに施工した場合について検証した。検証ヤードは、図-12に示すように、RTK

方式で施工した場合の基準点におけるオフセット補正の実施有無、VRS方式で施工した場合の基準点におけるオフセット補正の実施有無の計4ケースについて、1.5mの格子状に区切った、掘削完了面に設けた検証点に対して、TSを用いた現地計測を行い、バックホウの刃先にて測定した座標値とTS測量のX座標値およびY座標値から算定した設計モデルにおけるZ座標値を求め比較した。表-10は、RTK方式およびVRS方式のオフセット補正の有無の違いによる設計座標値と測定座標値の差分を求めた値である。この結果に基づき、データの差分値が正規分布であると仮定し、各座標成分の2 σ 区間(95.5%信頼区間)に着目して、表-10に示した

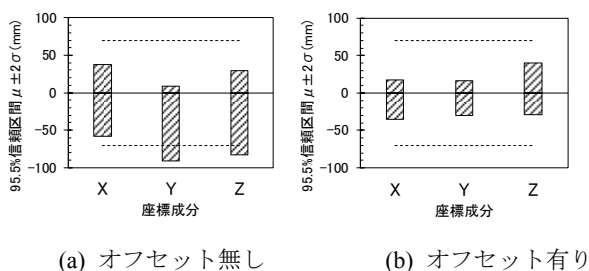


図-13 RTK-GNSS 方式による施工精度

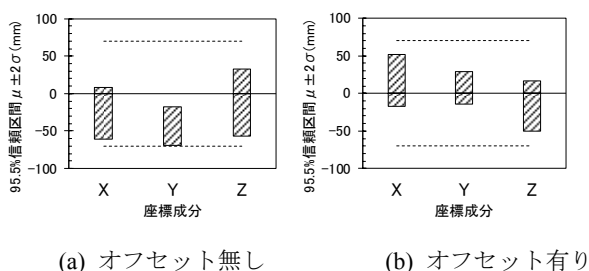


図-14 VRS 方式による施工精度

統計値をそれぞれについて図示したものが、図-13(a)、図-13(b)および図-14(a)、図-14(b)である。図中の-70mm～+70mmは、土木工事施工管理基準¹³⁾に示された掘削工法面部の水平または標高較差の規格値である。これらの図から、RTK方式およびVRS方式のいずれを用いた場合も、施工前に基準点にてオフセット補正を行うことで、施工精度に有意な差は生じないということを確認出来た。

6. まとめ

本研究では、ICTの全面活用に向け、3D計測技術を用いた現況地形測量およびICT建設機械技術を用いた施工並びに精度検証を実施した。今回の検討範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 土工事における掘削工法面部の水平または標高較差の規格値は-70mm～+70mmおよび地上画素寸法が10mm/pix以内であることから、UAVを出来形検査に用いる場合の撮影高度は40.8m未満とする必要がある。撮影高度は、求められる測量精度に応じて選択することで効率的な土工事を行うことが出来る。
- 2) 土量を算出する種々の方法の比較を行った結果、離散化サイズが5m以下では、それぞれの計算誤差が±1.0%程度であり、いずれの計算方法によっても問題が無いことが分かった。土量算出においては、UAVの撮影高度50mと撮影高度80mの違いによる影

響は小さく、いずれも十分な精度を有している。

- 3) あらかじめ画像データの不要部分を消去したデータを用いて、直下撮影のデータに斜め撮影を加えたデータを用いた場合は、精度の向上が認められた。
- 4) マシンコントロールバックホウ・ブルドーザを用いた施工および精度確認試験から、基準点オフセット補正を適切に行うことで、非常に高精度な施工が可能であることが確認出来た。

今後は、土工事における締め固め密度管理等の品質管理手法の自動化について検討していくと同時にICTの全面的な活用(ICT土工)を推進していく予定である。

参考文献

- 1) i-Construction～建設現場の生産性革命～、i-Construction委員会、2016年4月
- 2) 佐野健彦、佐藤裕、鈴木一帆：ICTを全面活用した造成工事の実績および精度検証、第43回土木学会関東支部技術研究発表会、土木学会、VI-24、2016
- 3) 黒台昌弘、澤正樹、小川満、大谷仁志：造成工事の出来形・土量管理に適用する3次元計測技術の比較検討、土木学会第70回年次学術講演会講演概要集、土木学会、2015
- 4) 建設記者クラブ配布資料 2016.3.30(国土交通省) <http://www.mlit.go.jp/common/001125408.pdf>(2016年7月15日時点)
- 5) ネットワーク型RTK-GPSを利用する公共測量作業マニュアル(案)、国土地理院技術資料A1-No.302、国土交通省国土地理院、2005年6月
- 6) 島野佑基、上義樹、下風研一郎：PC210LCi-10/PC200i-10の開発 マシンコントロール油圧ショベル、KOMATSU TECHNICAL REPORT, VOL.60 NO.167, 2014
- 7) 林和彦、嶋田健二郎、石橋永至、岡本研二、米澤保人：D61EXi/PXi-23の開発作業機自動制御ブルドーザ、KOMATSU TECHNICAL REPORT, VOL.59 No.166, 2013
- 8) 西修二郎：図説GPS測位の理論一、(社)日本測量協会、pp48-65, 2012
- 9) 村井俊治、近津博文：デジタル写真測量の理論と実践、(社)日本測量協会、pp27-28, 2004
- 10) 津留宏介、村井俊治：デジタル写真測量の基礎～デジカメで三次元測定をするには～、(社)日本測量協会、2012
- 11) 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理の監督・検査要領(土工編)(案)、国土交通省、2016
- 12) 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)、国土交通省、2016
- 13) 土木工事施工管理基準(案)(出来形管理基準及び規格値)、国土交通省、2016