

i-Constructionを全面活用した造成工事の実績 および精度検証

佐野 健彦¹・大西 隆夫²

¹日本国土開発株式会社 土木本部 技術部技術グループ（〒107-8466 東京都港区赤坂4-9-9）

²日本国土開発株式会社 西日本支社 永平寺道路作業所（〒910-1204 福井県吉田郡永平寺町岩野5-115）

本研究では、i-Constructionに示されたICTの全面的な活用(ICT土工)の考え方を道路土工に対して適用した。現況地形測量は、3Dレーザースキャナを用いて実施し、測量データに基づく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による施工を行った。精度検証は、RTK-GNSS方式とVRS方式による比較を行い、いずれの方式も基準点におけるオフセット補正を行うことにより精度に大きな差が生じないことを確認した。また、UAVを用いた写真測量データに基づく3Dモデル化および精度の検証を実施し、撮影高度と測量精度の関係を明らかにした。

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

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し進め、生産性を50%向上させ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相当する。UAV写真測量および3Dレーザースキャナ計測に基づく3Dモデル化とその精度検証は、すでに多くの報告^{例えは2)}がされているが、要素技術の報告にとどまっている。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方式およびネットワーク型RTK-GNSS(VRS)方式などが主流³⁾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-GNSS方式よりも多少精度が落ちる³⁾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などで使用する場合など、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。ICT土工の考え方に沿った土工への全面活用に関しては、すでに佐野

ら⁴⁾によってUAVおよびマシンコントロールブルドーザ⁵⁾を大規模造成工事現場に適用し、全プロセスを一気通貫で実施した実績について、有効性およびその可能性は報告されているが、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」⁶⁾に対する考察はされていない。

以上を踏まえ、本研究では、ICT土工の考え方を適用した事例として、中部縦貫自動車道建設工事の永平寺大野道路轟東地区切土工事(本線施工延長137m、切土量150,000m³および残土仮置工事)を対象とし、3Dレーザースキャナを用いた現況地形測量データに基づく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⁷⁾の施工実績およびRTK-GNSS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とともに、残土仮置工事にてUAVを用いた土量管理および写真測量精度の検証を行っ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(a)に示す、本線工事を対象としたマシンコントロールバックホウによる施工および出来形管理までの一貫した情報化施工の概要について示すとともに、図-1(b)に示す、土量管理を目的とした残土仮置工事におけるUAV写真測量および画像処理の概要について示す。

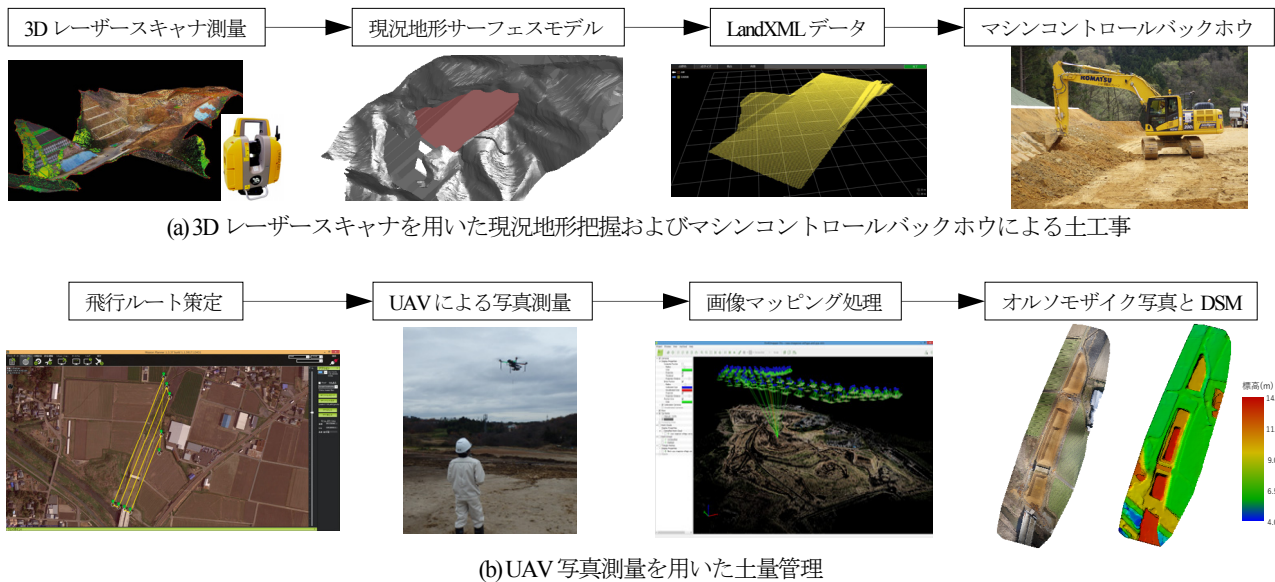


図-1 マシンコントロールバックホウによる自動化施工およびUAV写真測量による土量管理の概要

(1) 使用した3次元計測技術とその特徴

地表面の3次元デジタルデータは、レーザ計測技術を用いて直接的に3D点群データを得る方法、写真測量の写真画像から画像処理技術を通じて間接的に3D点群データを取得する方法がある。本線工事を対象とした現況地形把握は、送電鉄塔が近接していたため、安全性を考慮して3Dレーザースキャナによる方法を用いた。残土仮置場は、UAVによる写真測量結果から、画像処理を実施し3D点群データを取得した。それぞれのステップにおいて用い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、計測出来る最大距離が、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。本研究で用いた3Dレーザースキャナは、時間方式とした。点群データは、計測エリアを12回計測したデータに対して表-1に示した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。

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

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 レーザースキャナー処理	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 α6000	
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 間隔	2(秒)高度 50m 5(秒)高度 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	ISO8000
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 ϕ	0.003917 (mm/pix)

理を経て、図-1(b)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3次元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

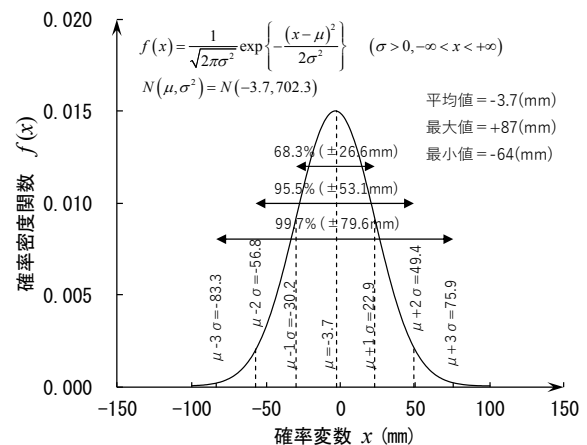
ICTを用いたバックホウの自動化技術には、大きく分けて、マシンガイダンス(Machine Guidance)とマシンコントロール(Machine Control)の2つがある。マシンガイダンスは、切土・盛土の3次元設計データを搭載したコンピュータと機械に取り付けた、GNSSによって得られる位置情報、方位情報を重ね合わせ、機械、ブームやバケットの傾き等の情報から、オペレータの席にどのように機械を操作したら良いかが表示される。マシンコントロールは、GNSSアンテナと基準局から得た刃先の位置情報、3次元設計データを入力したコンピュータを搭載し、加速度計とジャイロおよびストロークセンサの信号から車体の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事無く、ブームおよびアームを動かすことで掘削が出来る。いずれの技術も丁張りの設置が不要なのが特徴である。本研究では、3Dレーザースキャナ測量で得られた現況地形および、設計面をLandXMLデータに変換し、マシンコントロールバックホウに入力した。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。

表-4 マシンコントロールバックホウの諸元⁷⁾

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 対空標識6点における RMS 誤差

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



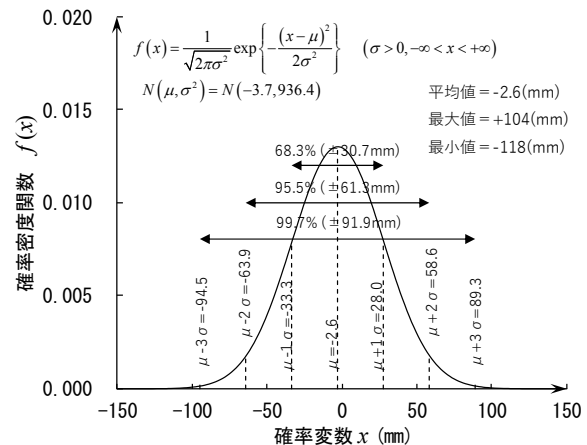
(a)撮影高度 50m のケースにおける測定誤差

3. UAV写真測量による精度検証

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。更に土量の算出方法の違いによる計算結果の違いを検証した。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 3 次元点群データと盛土の管理断面に設置した 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)、 f は画像分解能(mm/pix)、 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-5 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、3 次元モデルは十分な精度を有していることを確認した。



(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

(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3次元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3次元点群データの差分値 x (mm) を確率変数として示し

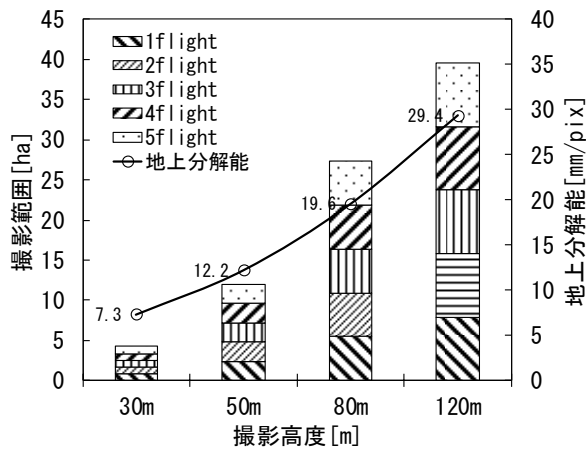


図-3 撮影高度による1日あたりの撮影範囲および地上分解能の関係

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。出来形管理検査要領¹⁾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%信頼区間)で、 $-94.5\text{mm} \sim 89.3\text{mm}$ 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検査要領を満足する結果であることが分かった。更に、出来形管理検査要領では、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には、撮影高度は、 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

次に、土量計算手法やモデル化手法が土量計算結果に

表-6 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。

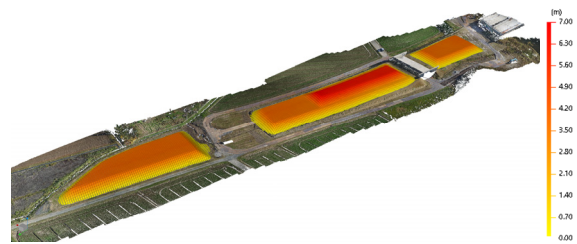


図-4 現況地盤面を基準値とした盛立て高さの差分表示(4点平均標高法 1mメッシュ)の例

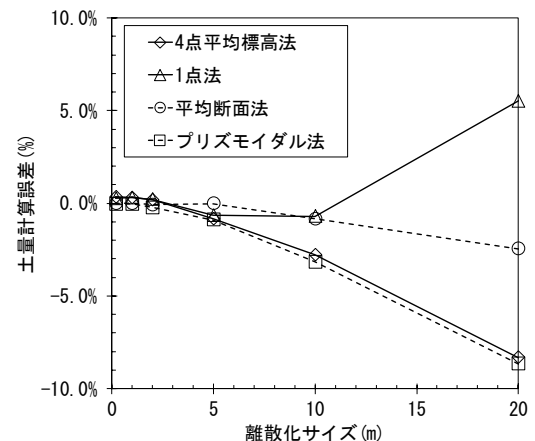


図-5 撮影高度 50mにおける離散化サイズと計算モデルの違いによる土量計算誤差

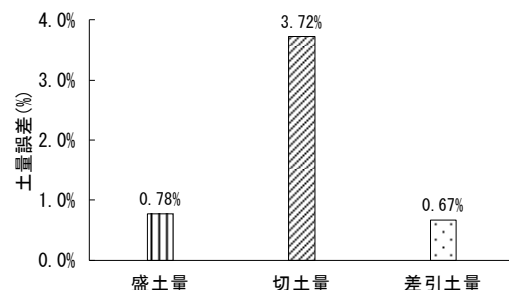


図-6 撮影高度の違いによる土量計算誤差

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-6に示す4手法を採用した。それぞれの特徴は表-6に示す通りである。図-4は、現況地形面を基準値とし、



図-7 基準点オフセット補正値の確認

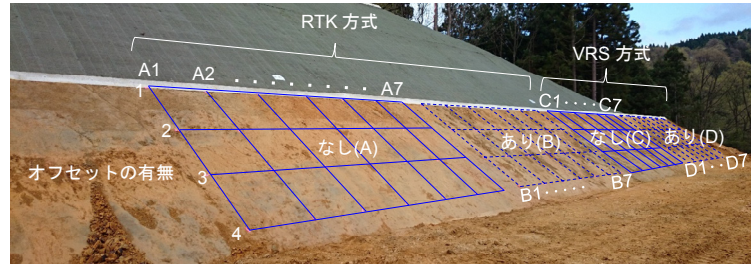


図-8 施工精度確認試験の概要

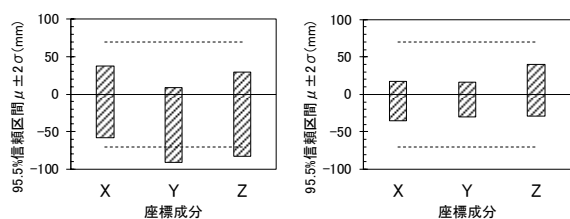
表-7 RTK-GNSS方式およびVRS方式のオフセット補正有無の違いによる設計座標値と測定座標値の差分

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	-105	-413	-26.7	-8.7	-6.9	5.1	-26.1	-43.4	-12.0	16.8	7.5	-16.9
標準偏差	240	248	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

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 $\pm 1.0\%$ 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 $\pm 7.0\%$ 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比較した図である。撮影高度の違いによる影響は、約4%程度であり、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、撮影高度の違いが結果へ与える影響は小さいといえる。

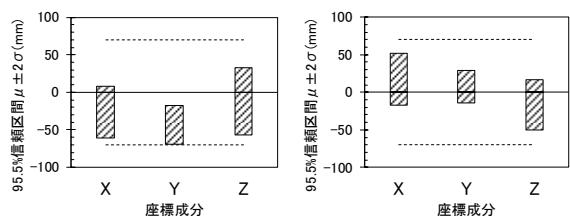
4. マシンコントロールバックホウの施工精度確認

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-GNSS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-7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-8に示す様に、RTK-GNSS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、



(a) オフセット無し (b) オフセット有り

図-9 RTK-GNSS方式による施工精度



(a) オフセット無し (b) オフセット有り

図-10 VRS方式による施工精度

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-7は、RTK-GNSS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-7に示した統計値をそれぞれについて図示したものが、図-9(a)、図-9(b)および図-10(a)、図-10(b)である。図中の-70mm~+70mmは、土木工事施工管理基準及び規格値¹²⁾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-GNSS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。

5. まとめ

本研究では、i-Constructionの全面活用に向け、UAV写真測量による撮影高度の違いによる測量精度および適用範囲、土量計算誤差に関する検討および、マシンコントロールバックホウを用いた施工および施工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 $\pm 1.0\%$ 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) マシンコントロールバックホウ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、UAV写真測量を利用した出来形検査の精度確認を行うとともに、道路や堤防など、更に多くの現場に適用する予定である。また、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)を更に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) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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6月3日時点)
- 7) 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
- 8) 西修二郎：図説GPS一測位の理論一、(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～デジタル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) 土木工事施工管理基準及び規格値(案)、国土交通省、2016