ICT を全面活用した造成工事の実績および精度検証

| 日本国土開発(株) | 正会員 | ○佐野 | 健彦 |
|-----------|-----|-----|----|
| 日本国土開発(株) | 非会員 | 佐藤 | 裕 |
| 日本国土開発(株) | 非会員 | 鈴木 | 一帆 |

1. はじめに

2015年11月24日に国土交通大臣から、「建設現場の 生産性向上に向けて、測量・設計から施工、 さらには 管理に至るまでの全プロセスにおいて、情報化を前提 とした新基準を2016年度から導入し、生産性5割向上 を目指す.」という発表があった.この取り組みは, i-Construction¹⁾と銘打たれ、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るととも に, 情報通信技術 Information and Communication Technology (ICT)の活用を標準化し、将来予想される労 働力不足への対応,対米比で約8割にとどまる労働生 産水準2)の向上および、依然として多い建設労働災害の 減少 1)といった建設現場の安全性の向上を目的とした ものである.一方, 無人飛行機 Unmanned Aerial Vehicle(UAV)を用いた写真測量データに基づく現況地 盤把握および 3D モデル化は、すでに多くの報告^{例えば3)} ~5)がされているが, ICT 技術を全面的に活用した事例 の報告はまだ少ない.

本稿では、i-Construction の考え方を適用した事例と して大規模造成現場において、UAV を用いた写真測量 データに基づく現況地盤の 3D モデル化、および CIM モデルと連携した、ICT ブルドーザの施工実績および精 度検証を行った結果について報告する.

2. ICT 施エシステムの概要

本章では,現況地盤把握および施工進捗に伴う土量 管理を目的とした UAV 写真測量および画像処理, ICT ブルドーザ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.

(1) 使用した3次元計測技術とその特徴

写真測量に用いた UAV およびデジタルカメラの諸元 を表-1 に示す.撮影対象とした施工エリアは 15.6ha であり,撮影高度は 125m とした.写真のラップ率はオ ーバーラップ 80%,サイドラップ 70%とし,撮影高度 125m とラップ率から計算した飛行速度は 3.5m/sec であ

表-1 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 | 一眼レフデジタルカメラ | | |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--|
| enRoute | Zion QC730 | SONY α 6000 | | |
| 本体寸法 | 本体寸法 479.42(mm) x 479.42(mm) | | 16(mm) | |
| 飛行時間 T | 54(分) 4 フライト合計 | 露出時間 T | 1/1250(秒) | |
| 撮影高度 H | 125(m) | 絞り値 | 22 | |
| 飛行速度 V | 3.5(m/s) | シャッター 間隔 | 5(秒) | |
| 撮影エリア 面積 | 34.3(ha) | 撮影素子サ イズ <i>d</i> _x | 23.5(mm) | |
| 施工エリア 面積 | 15.6(ha) | 有効画素数 $m(=m_x \times m_y)$ | 6000×4000 =2400 万(pix) | |
| 最大積載重 量 | 2000(g) | 画像分解能 δ_p | 0.003917(mm/pix) | |
| 地上分解能 ΔXY | 30.61(mm/pix) | 撮影枚数 | 432(枚) | |

表-2 使用アプリケーションの一覧

| 用途 | アプリケーション名 |
|-------------|----------------------------|
| UAV 飛行計画 | Mission Planner Ver.1.3.32 |
| 画像処理 | Pix4D mapper Ver.2.0.89 |
| 点群処理および土量計算 | TREND-POINT Ver.2016R1 |
| 設計地盤モデル作成 | Autodesk Civil3D Ver.2015 |

り,撮影エリアは東西長さ 457m 南北長さ 750m の長方 形で,撮影面積は,34.3ha であった.表-1 に示す地上 分解能は,式(1)より算定した.

 $\Delta XY = H \times \delta_p / f$, $\delta_p = d_x / m_x$ (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. UAV の飛行性能に基づく飛行時間の限界値は 40 分 であるが, 緊急時の対応が可能となるように, 1 フライ ト当たり 20 分以下となるようにして合計 4 フライトの 飛行計画とした. 撮影写真の総枚数は 432 枚であった. 写真測量および ICT ブルドーザによる自動化施工は, 図-1(a)~(f)に示すフローであり, 表-2 に示すアプリ ケーションをそれぞれのステップで用いた.

(2)対空標識の設置

UAV は、GPS 測位によって撮影時の位置座標を取得 しているため、撮影写真から生成される 3 次元点群モ デルは、GPS 精度の座標値を有している.GPS 測位は

キーワード UAV, 写真測量, マシンコントロールブルドーザ, i-Construction, 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 TEL. 03-5410-5750 E-mail: takehiko.sano@n-kokudo.co.jp



図-1 UAVを用いた写真測量および ICT ブルドーザによる自動化施工

誤差を含む⁹ため、その誤差を小さくするためには、図 -2(a)に示す様な、地上に設置した対空標識 ⁷⁾と称され る基準点による補正が必要である.対空標識は、写真 画像解析の制約から,被写体の背景と円形のコントラ ストが重要であり、図-2(a)に示す様に、黒い紙に白い 円形のものを使用した. 高度 125m 上空からの撮影で十 分な精度を有するために、図-2(b)に示す寸法にて A3 の用紙に印刷したものを用いた. 撮影時の風等による めくれや変形を防ぐため、図-2(b)に示す対空標識を A3 用紙にプリントアウトし、ベニア板に貼り付けて設 置した. 対空標識は、計測対象エリアに最低 6 点以上 のバランス良く配置 8する必要がある.また,撮影エリ アの外側境界は,写真の歪みが生じるため境界近傍は 避けて配置した.対空標識の設置は、図-3に示す設置 イメージの様に対空標識の上空視界について円錐を仮 定して, 鉛直方向から45度以内に障害物がない見通し の良い箇所に設置した.

(3) 画像処理手法および地盤モデルの作成方法

図-1(d)に示すオルソモザイク写真および点群デー タは、UAV 写真測量により得られた写真画像を、表-2 に示す Pix4Dmapper を使用しバンドル調整法⁸⁾を用い た標定計算によって処理することで得た.3D 現況地盤 モデルは、点群データから生成した 1m 間隔等高線を Autodesk Civil3D で読み込み、不定形三角網 Triangulated Irregular Network(TIN)サーフェースを作成した.一方



図-3 対空標識の設置イメージ

| | 表-3 | ICT ブルドーザの諸 | 元 |
|--|-----|-------------|---|
|--|-----|-------------|---|

| 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 | GNSS アンテナ |
| (車両制御用コンポーネント) | 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 | VRS 方式(ネットワーク型 |
| | RTK-GNSS) |



図-4 各施工段階における切土量および盛土量の変化

3D 設計地盤モデルは,縦断線形中心 20m 毎に描かれた 2D 横断図を元に Autodesk Civil3D の機能であるコリド ーを用いて作成した.現況および設計それぞれの 3D 地 盤モデルは, ICT ブルドーザにデータ受け渡しが可能な フォーマット形式である Land XML データに変換した.

3. ICT ブルドーザを用いた本施工

対象とした造成現場は、一部現況地形を生かした設 計となっており,穏やかな傾斜や起伏を残した施工を 行う必要があった. 今までの土工事における施工管理 手法である丁張による施工では、仕上がり面の造形が 難しいといった特殊性を有しているが、3Dモデルを用 いて施工を行う ICT ブルドーザにおいては、長所を最 大限に活かせる対象であった. 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 %を使用し た. 機械の詳細については、表-3 に示す通りである. ICT ブルドーザは、3D 設計地盤モデルの TIN サーフェ スデータと機械の補正に用いる汎地球航法衛星システ ム Global Navigation Satellite System (GNSS)情報と同期 させるローカライゼーションを行い, 現地情報と3Dモ デルを一致させた. 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. そのため、オペレータ は、走行レバーの操作を行うだけで施工を行う事が出 来る. ICT ブルドーザは、一度で行う掘削深さを設定す ることで自動的にブレードの高さが制御され、掘削時 に高負荷が掛かった場合には, 排土板を上げて負荷を 低減させ、作業の最適化を図るといった特徴を備えて いる.施工出来形,出来高に関しては,図-4(a)~(c) に示す様に各施工段階において, UAV 写真測量を行い



図-5 施工完了時における施工精度確認試験測点

| 測点 | 設計 標高値 | 設計値 と測量 差 <i>δ</i> 1 | 測量値 と UAV 測定差 <i>る</i> 2 | 測点 | 設計 標高値 | 設計値 と測量 差 <i>8</i> 1 | 測量値 と UAV 測定差 <i>る</i> 2 |
|---|-----------|----------------------------|-----------------------------------|-----|-----------|----------------------------|-----------------------------------|
| | (m) | (mm) | (mm) | | (m) | (mm) | (mm) |
| 1-1 | 54.609 | 11 | 13 | 3-8 | 54.790 | 3 | 9 |
| 1-2 | 54.772 | -9 | 7 | 3-9 | 54.990 | 31 | 12 |
| 1-3 | 54.934 | -12 | 9 | 4-1 | 52.780 | 23 | 7 |
| 1-4 | 55.097 | -13 | -17 | 4-2 | 52.999 | -22 | -19 |
| 1-5 | 55.259 | 11 | -22 | 4-3 | 53.217 | -13 | -6 |
| 1-6 | 55.422 | 49 | -2 | 4-4 | 53.437 | -24 | 11 |
| 1-7 | 55.584 | 45 | -9 | 4-5 | 53.655 | -2 | -19 |
| 1-8 | 55.747 | 37 | 27 | 4-6 | 53.874 | 7 | 4 |
| 1-9 | 55.909 | 38 | 20 | 4-7 | 54.092 | -18 | 4 |
| 2-1 | 53.999 | -13 | 6 | 4-8 | 54.312 | 18 | -3 |
| 2-2 | 54.181 | -10 | 8 | 4-9 | 54.530 | 34 | 14 |
| 2-3 | 54.362 | -32 | 11 | 5-1 | 52.170 | -10 | 17 |
| 2-4 | 54.544 | -50 | -19 | 5-2 | 52.408 | -23 | -25 |
| 2-5 | 54.724 | 14 | 28 | 5-3 | 52.645 | -11 | 21 |
| 2-6 | 54.906 | 5 | 15 | 5-4 | 52.883 | -39 | 0 |
| 2-7 | 55.087 | 20 | 20 | 5-5 | 53.120 | -3 | -10 |
| 2-8 | 55.269 | 28 | 43 | 5-6 | 53.358 | 10 | 7 |
| 2-9 | 55.449 | -6 | 25 | 5-7 | 53.595 | -16 | 14 |
| 3-1 | 53.390 | -20 | -21 | 5-8 | 53.833 | 6 | 1 |
| 3-2 | 53.590 | -19 | -35 | 5-9 | 54.070 | -3 | 28 |
| 3-3 | 53.790 | -21 | -12 | 平均 | 直 | 0.6 | 3.2 |
| 3-4 | 53.990 | -18 | 80 | 標準 | 扁差 | 22.4 | 21.9 |
| 3-5 | 54.190 | 8 | -33 | 最大位 | 直 | 49 | 80 |
| 3-6 | 54.390 | 23 | -30 | 最小 | 直 | -50 | -36 |
| 3-7 | 54.590 | 12 | -36 | 中央 | 直 | -3 | 7 |
| ※差δのプラス値は、設計面より高いことを示し、マイナス値は低いことを示している | | | | | | | |

表-4 設計標高と測定標高値の差分

得られた情報から 3D モデル化し、土量配分管理を行った. 図-4(a)は、施工開始前に実施した UAV 写真測量
に基づき作成した 3D 現況地盤モデルを示している. 図
-4(b)は、施工開始1ヵ月後の様子を示しており、UAV

5. まとめ

本稿では、大規模造成工事現場を対象として、現況 地盤の把握および施工段階における土量変化の把握に UAV を用いた写真測量を行った.また、3 次元設計 CIM モデルを用いた ICT ブルドーザによる大規模造成およ び施工精度の検証を実施した.今回の検討範囲内で得 られた知見を以下にまとめる.

- 走行操作のみで設計面の施工が可能であり、今までの土工事で必要であった丁張りが省略でき、測量、設計、施工計画、施工、検査の各段階でICTを全面に活用した i-Construction¹⁾の考え方に沿った土工事への適用が可能であることが確認出来た.
- 施工確認試験から、起伏がある地形であっても施工 管理基準に示される規格値を十分に満足出来る結 果が得られることを確認できた。

今後は,道路や堤防など,更に多くの現場に適用す るとともに,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および CIM モデルとのデータ連携 について検討していく予定である.

参考文献

- 建設記者クラブ配布資料 2015.11.24(国土交通 省)http://www.mlit.go.jp/common/001111976.pdf (2016年1 月4日時点)
- 2) 平成 25 年版通商白書, 経済産業省, pp13~14, 2013
- 五十嵐善一,浦本洋市,矢尾板啓,津口雅彦,佐藤俊明: UAV空中写真による造成施工現場の三次元データを用い た差分解析,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) 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
- 5) 江田正敏,栗原庸聡,津川恵介,福地良彦:普及型 UAV を用いた3次元地形測量~画像の視差情報による3Dモ デル作成技術~,土木学会第70回年次学術講演会講演概 要集,土木学会,2015
- 6) 西修二郎: 図説 GPS-測位の理論-,(社)日本測量協会, pp48-65, 2012
- 7) 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
- 2) 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
- 9) 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
- 10) 土木工事施工管理基準及び規格値(案),国土交通省,2013



写真測量による施工開始前のデータとの差分を表示したものである.図中の赤色着色部分は,盛土を示し, 青色着色部分は切土を示している.図-4(b)または図-4(c)の着色された部分を比較すると,時間の経過に伴って変化している事が確認出来る.このように,UAV によって得られた情報に基づき土量の管理を行った.

4. ICT ブルドーザ施工精度確認試験

ICT ブルドーザの 3D マシンコントロールにて施工が 完了した造成面の出来形を測量して設計データとの比 較を行った. ICT ブルドーザによる施工精度の確認試験 は、図-5に示す試験ヤードを用いて実施した.試験ヤ ードは, ICT ブルドーザによる施工が完了した長辺 40m×短辺 20m のエリアに対して、1 辺あたり 5m 間隔 の格子とした.格子の交点 45 点に関して、トータルス テーション Total Station (TS)測量·水準測量および UAV 写真測量を実施した. UAV 写真測量は, 飛行高度を 60m とした. そのため, 地上分解能は, 式(1)より 14.69mm/pix である. 測点の番号は、図-5に示す通りとした. 表-4 に設計標高値に対する TS 測量・水準測量の差 δ_1 およ び TS 測量・水準測量に対する UAV 写真測量の測定差 δ_2 を示す. 図-6 は、 δ_1 に関して、正規分布である と仮定して図示したものである. 平均値は, 末=0.6, 標 準偏差は、 $\sigma^2 = 22.4$ である. 図-6から、1 σ 区間(68.3%) 信頼区間)は、-22.1mm~+23.3mm に入る. 2の区間(95%) 信頼区間)では,-44.8~+45.9mm に入っていることが分 かる. 土工事における基準高の施工管理基準値 10は -50mm~+50mm であり, 表-4の最小値は-49mm, 最大 値は+50mm であることから、十分な精度を有している といえる. UAV 写真測量に関しても同様に算出した結 果、ほぼ同様の結果が得られ、両者とも土工事におい ては十分な精度を有していることが確認出来た.