

新3Dカメラによる地形計測への応用

山口 博 義

最近応用が広まり始めている情報化施工において、施工の対象となる地形形状を如何に簡単に、短時間で、高精度に取得するかが重要となる。コマツエンジニアリング株式会社（以下、当社）で開発した新3Dカメラは、従来の写真測量で不可欠であったターゲットの設置を不要としたものであり、従来と比べて容易に、かつ、高速に計測対象の3次元形状を取得できる。

本報文では、この3次元形状復元写真測量システム（以下、新3Dカメラ）の特徴とこれを地形計測に応用した計測事例を紹介する。また、後半では、GPS等の最新の技術と組合わせた今後の地形計測技術についても紹介する。

キーワード：情報化施工、写真測量、デジタルカメラ、トータルステーション、新3Dカメラ、GPS、建設機械の目、3D計測車

1. はじめに

3Dカメラとは、カメラで異なる方向から撮影し取得した複数の画像を用いて計測対象の3次元形状を復元する写真測量システムである。複数画像から3次元形状を復元するためには、

- ・撮影したそれぞれのカメラの位置・姿勢を如何に高精度に特定するかという課題
- ・ステレオ処理と呼ばれる画像内各点の対応点探索の問題を如何に高速に処理するかという課題

の両方とも解決する必要がある。

従来の写真測量では、前者のカメラの位置、姿勢の特定のために座標が既知のターゲットを撮影範囲内に複数設置する準備作業と、各ターゲットの画像上での位置を後処理で求める解析作業が必要であった。また、後者の対応点探索はステレオ処理の計算量が膨大であり、計算時間が非常に長くなってしまいう問題があった。

コマツエンジニアリング株式会社（以下、当社）で開発した新3Dカメラは高精度トータルステーション（以下、TSと呼ぶ）と高解像度デジタルカメラを一体化させることによりカメラの位置、姿勢をターゲットなしで簡単に特定するとともに、専用の処理ソフトを開発することにより高速なステレオ処理を実現し、情報化施工で対象となる広い範囲の地形形状の高精度な計測を可能とした。

2. 他の計測手法との比較

地形を計測する計測手法には多くの種類があるがそれぞれに一長一短がある。TSやGPSは高精度であるが基本的に1点計測であり移動しながらの計測となる。また、スキャン式のレーザは高精度で多点計測ではあるがスキャンに時間を要するため移動しながらの計測は難しく価格的な問題もある。

一方、写真測量は他の計測手法と比べると計測精度は劣るものの多点計測であり離れた場所からの最低2箇所からの撮影で広い範囲を一度に計測できる。しかし、従来のターゲット式による写真測量では準備作業と解析作業に時間を要する。

また、もう一つの写真測量の手法としてカメラヘッド式がある。これは複数のカメラを固定した状態で使用するものであり、事前にカメラの位置関係を求めておくことで計測対象の3次元形状を容易に取得できる。ただし、カメラ間隔をあまり大きくすることができないため長距離の計測には向かない。また、撮影した時点でのカメラの位置・姿勢は不明であり複数の結果を統合することが単独ではできないという特徴を持つ。

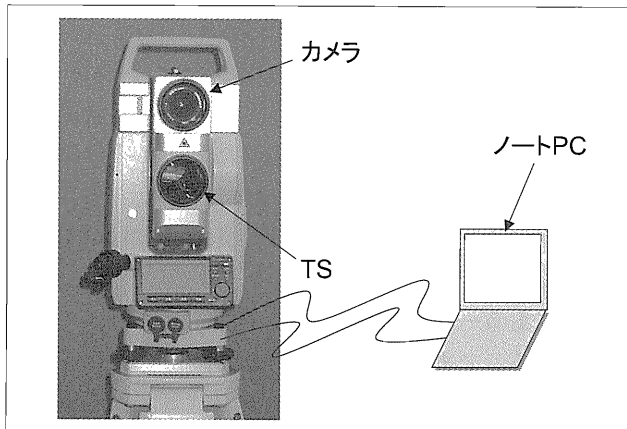
新3Dカメラは、従来の写真測量の長所を活かしながら、短所を改善したものと言える。これら計測手法の特徴を比較したものを表-1に示す。

表一 新3Dカメラと他の計測手法との比較

項目	TS	GPS (RTK 式)	レーザ (スキャン式)	従来の 写真測量	新3D カメラ
計測点数	× (1点)	× (1点)	○ (多点)	○ (多点)	○ (多点)
計測作業 時間	× (要移動)	× (要移動)	○	× (要ターゲット 設置)	○ (ターゲット 不要)
計測精度	◎	◎	◎	○ (計測距離に 依存)	○ (計測距離に 依存)
画像との 融合性	×	×	△	◎	◎
価格	○	△	×	◎	○
座標系 の統合	◎	◎	△	△	◎
総合判定 (広域地形 計測)	△	△	△	△	○

3. 本システムの構成

図一1に本システムの構成を示す。装置の上側のデジタルカメラは300万画素のCMOSカメラを、下側のTSには測距精度±0.6mm、測角精度±1秒の1級TSを使用している。また、レンズは変更可能であるが、標準で焦点距離6mm(画角約60deg)を使用している。なお、カメラとTSの位置関係およびレンズ歪等のカメラの内部パラメータは事前の校正で高精度に求めている。



図一1 新3Dカメラシステムの構成

この装置を外部のノートパソコンで制御してカメラの撮影とTSの測距・測角を行い、画像とTS情報を自動で取込む。本システムの操作者は、パソコンの画面上で実際の画像を確認しながら作業を行う。また、その場で、解析結果を確認しながら測量作業を進めることができる。

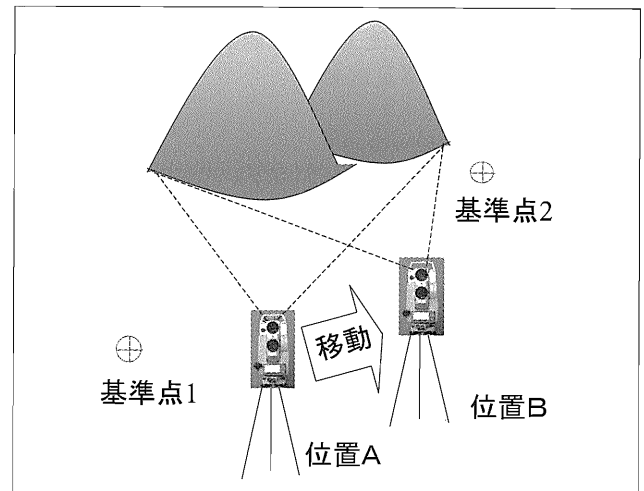
4. 本システムの測量手順

本システムによる測量手順を以下に示す(図一2)。

[手順]

- ①位置Aで基準点2点を視準し、計測対象の撮影を行う(必要があればパノラマ撮影を行う)。
- ②位置Bに移動し、基準点2点を視準し、同様に撮影を行う
- ③現場で解析(その場で解析結果を確認)

上記は一領域の測量手順であるが、広い現場では装置の位置を移動しながらこの作業を繰り返す。また、各基準点は3次元の現場座標を有しているので、各領域の測量結果は同一の現場座標であり統合した結果を現場ですぐ確認することができる。



図一2 測量手順

5. 本システムの測量原理

本システムでは、TSで基準点2点を視準し、後方交会法によりまずTSの位置を求め、これから一体化されたカメラの各撮影時の位置、姿勢を特定している。

撮影時のカメラの位置、姿勢が分かれば、各画像上の対応点を指示できれば三角測量の原理に基づき計測対象の3次元位置を推定できる。しかし、対応する数百万点を1点ずつ手入力で指示することは不可能である。

そこで、本システムでは画素毎に類似した模様を自動探索する対応点探索を高速・高精度に実現できる専用の処理ソフトを開発し、一度に数百万点の測量を短時間で処理できる。

図一3に本システムの計測の原理について説明した図を示す。この例では基準カメラに写った一つの計測対象(車中の人)の座標を求める問題であるが、図を

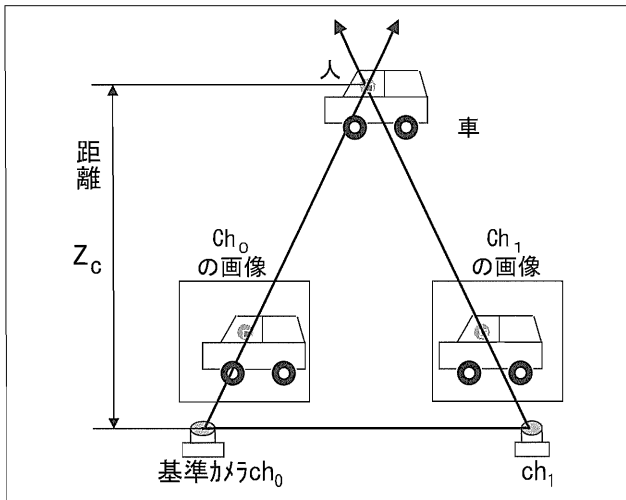


図-3 本システムの計測原理

用いて簡単に説明する。ここでの前提は、各カメラの位置・姿勢は正確に分かっており、画像からはレンズ歪が完全に消去されていることである。また、投影面は実際にはレンズ後方にあるが、話が分かりやすいようにレンズの前方に置いて考える。なお、計測対象はレンズ中心と画像上の対応点を結ぶ直線上に存在するが、どの距離に存在するかは不明である。

本システムでは、基準カメラの計測対象までの距離を仮定して計測対象の空間座標を仮決めし、これから別のカメラで写るべき画素位置を特定し、その周辺の

模様を比較し模様の類似度を算出する。もし、仮定した距離が間違っていれば異なった模様となり基準カメラの模様（車中の人）と大きく異なる。本システムでは、この仮定する距離を少しずつ変更していき、模様の類似度が最も大きくなる距離を真の距離とする。

この処理を画素毎に繰り返すことにより、すべての画素に対する3次元座標を推定する。なお、この対応点探索の計算量は膨大であるが、本システムでは条件にも依存するが数十秒から数分での高速演算を実現した。なお、この演算方法は、二つのカメラでも成立するが複数のカメラを利用すれば計測の信頼性を更に向上させることができる。

6. 地形計測の例

本システムを用いて道路、トンネル、採石場の地形を計測した例を紹介する。

(1) 道路の計測例

図-4に工事中の道路の計測例を示す。この例では約50m離れた地点から計測した長距離計測の結果と、約10m離れた地点から計測した複数の近距離計測の結果と、これらを統合した結果を示す。

図中の距離画像は各画素に対応する計測対象のカメラからの距離を意味するが、各画素は現場座標として

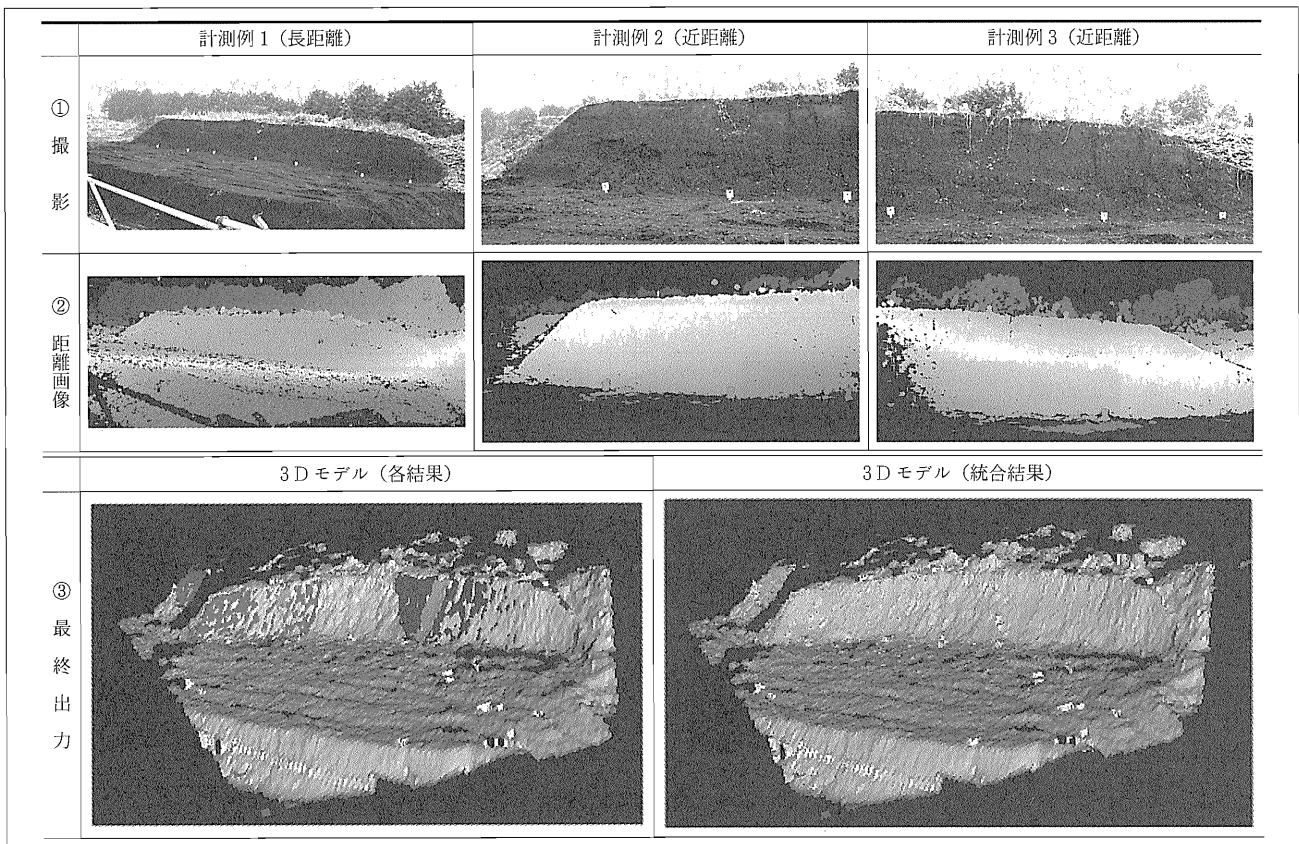


図-4 道路計測の例

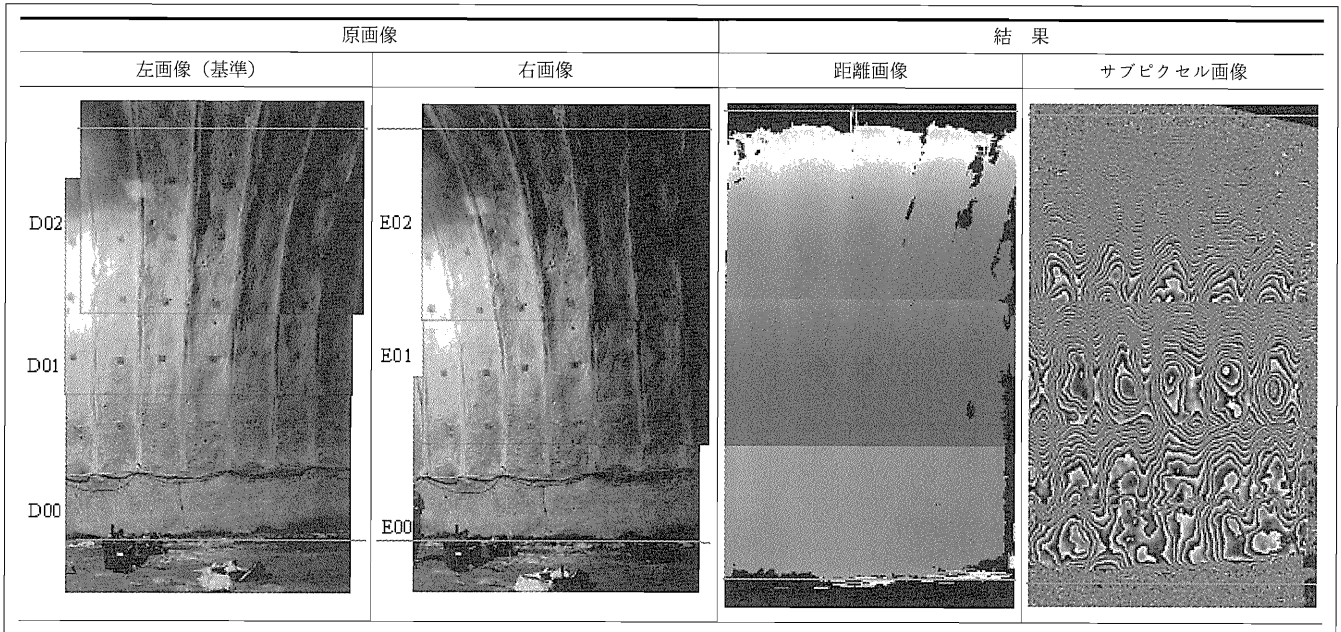


図-5 トンネル計測の例

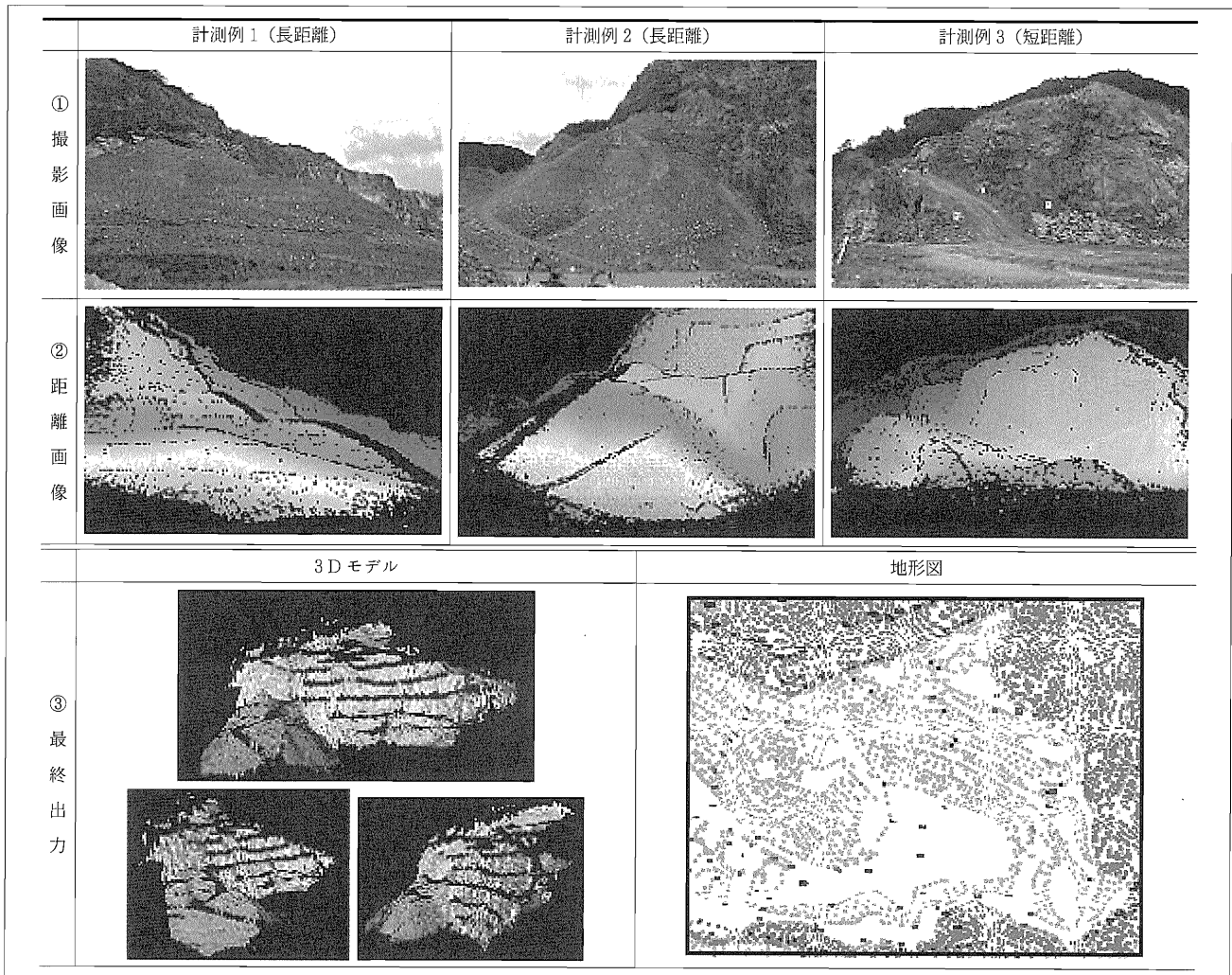


図-6 採石場計測の例

も表現される。それゆえ別の位置で計測した結果でも同一の現場座標として統合でき3次元モデルを作成することもできる。

いったん3次元モデルを作成すれば、任意の方向からこのモデルを立体視することができ、3次元形状を容易に確認することができる。

(2) トンネルの計測例

図一5にトンネル壁面の計測例を示す。この例では約8m離れた地点からパノラマ撮影を行い、結果を統合した。

図中のサブピクセル画像はカメラからの等距離線図を意味し、距離画像だけでは分かりにくい3次元形状を詳細に捉えていることが分かる。また、任意の場所での断面図を容易に取得することも可能である。

(3) 採石場の計測例

鉱山や採石場は、施工領域が非常に広く、また地形がどんどん変化するため迅速な地形計測が必要となる。図一6に採石場での計測例を示す。

この例では複数箇所からの計測を行い、山全体の3Dモデルを作成した。この3Dモデルから法尻と法肩の位置を推定することも可能である。

7. 計測精度

本システムの計測原理は前述のとおり三角測量であるため、計測精度は計測対象までの距離とカメラ間の距離に依存する。そこで、問題の要求精度に応じて計測距離とカメラ間の距離を決定する必要がある。なお、本システムでは近い距離の方が計測精度には有利であるが、計測範囲が狭くなることには注意が必要である。

表一2にカメラ間隔を変えた場合の計測精度を示す。

表一2 計測精度

標準レンズ：焦点距離6mmの場合

カメラ間 距離	計測距離/奥行き精度 (垂直面内精度)*							
	5 m	10 m	15 m	25 m	35 m	80 m	112 m	160 m
1 m	±0.2	±0.8	±1.8	±5	…			
2.5 m	—	±0.3	±0.8	±2	±4	…		
5 m			—	±1	±2	±10	…	…
10 m				—	±1	±5	±10	…
20 m					—	±2.5	±5	±10

* 単位：cm，—：計測不可，…精度低下

8. 今後の地形計測技術

ここでは、モータ駆動式 TS や、ジャイロ等の最新の技術と組合せた今後の地形計測技術について紹介する。

(1) モータ駆動式 TS との組合せ

新3Dカメラは手動式の TS を用いているが、モータ駆動式の TS と組合せることにより操作性が更に向上する。

例えば、前述のトンネル計測のような場合、手動式では長い距離を抜けなく計測するのは難しいが、モータ駆動式を用いればトンネルの設計データを考慮してパノラマ撮影の向きを自動で制御でき、効率的に計測作業を進められる。

また、モータ駆動式の新3Dカメラ2台を固定した位置に設置し、連動して制御すれば、広範囲の連続計測や監視にも応用できる。

(2) GPS との組合せ

ここでは前述の「2章 他の計測手法との比較」の中で紹介したカメラヘッド式とGPSとを組合せた例を紹介する。

カメラヘッド式は前述したように単独では撮影した時点でのカメラの位置、姿勢が不明であるとともに近距離での計測にしか利用できない。

しかし、位置を特定するGPSと傾き角度を特定するジャイロとの時間管理をうまく行えば、撮影した時点でのカメラの位置、姿勢を特定することができ、各計測結果を統合することができるようになる。また、カメラヘッドを機械に搭載することで機械周辺の計測対象は近距離であり十分に高い精度が得られるため、建設機械の目として制御に応用できる。

図一7に、建設機械に2眼カメラヘッドおよびGPS、ジャイロを搭載した例を示す。

この例では、巡回しながら撮影を行い施工前後の地形形状を比較することで土量を算出できる。これは独立行政法人土木研究所が実施している「ロボット技術を利用した施工システムの研究プロジェクト」の中で、テストを現在実施中である。

また、図一8に3眼カメラヘッドとGPS、ジャイロを計測車に搭載し、時速80kmで走行しながら撮影を行い3次元情報を取得する計測車システムを示す。

この計測車では、道路周辺のビルや信号機、白線などの地物の3次元座標を世界座標(緯度、経度、標高)

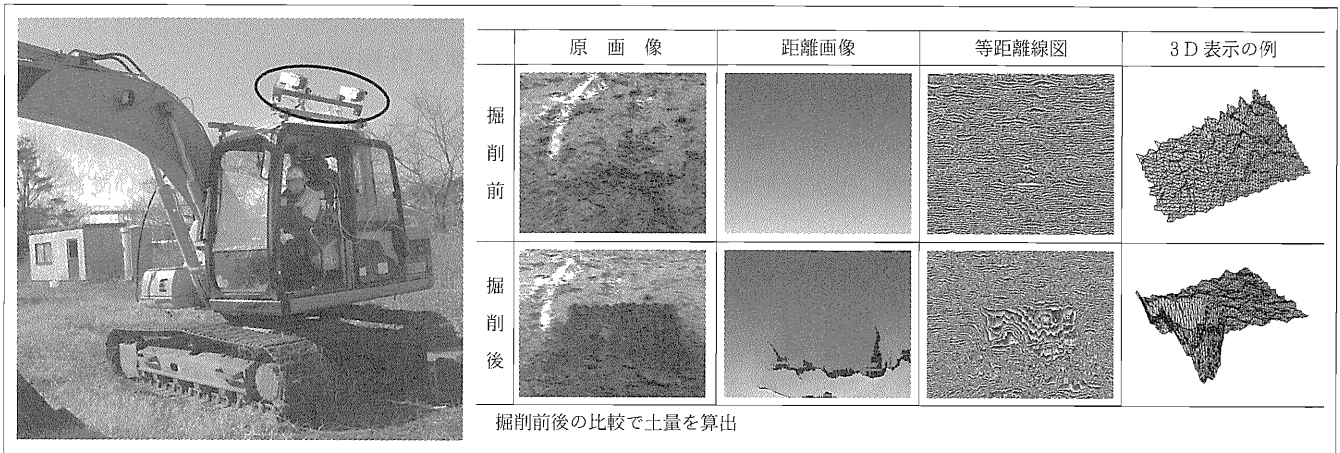


図-7 GPS との組合せ（機械の目）



図-8 GPS との組合せ（計測車の目）

で取得できる。これは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業を受けて開発したものであるが、このシステムをオフロード

カーに搭載すれば地形計測にも応用できる。

9. ま と め

本報文では、主に新3Dカメラを地形計測に応用した事例を紹介した。情報化施工では、施工前の地形計測、施工中の現況管理、仕上げの検査、施工後の保守までのすべての場面において地形や建設物の形状を正確に捉え管理していく必要がある。

本報文の中で紹介したように世の中には様々な計測手法があるがオールマイティなものはない。そこでユーザは、現状においては場面に応じて最適な計測手法を使い分ける必要があると考える。

私どもは、これからも高解像度化されていくデジタルカメラを用いて高精度化やステレオ処理の高速化を図り3Dカメラの技術を進化させていくだけでなく、最新の別の技術との融合を行いながら新しい計測システムを今後も開発していく予定である。

JCM A

【筆者紹介】

山口 博義（やまぐち ひろよし）
 コマツエンジニアリング株式会社
 メカトロシステム事業部
 計測エンジニアリング部
 新商品開発課
 技術担当課長

