

デジタルスチルカメラを用いた形状計測システムの開発

東京理科大学

大林 成行、江野沢 誠、○掛橋 孝夫

三井建設株式会社

高田 知典、桜井 浩

1. はじめに

現在、建設現場における形状計測作業は、トータルステーションに代表される高精度多機能測量儀を用いて行われることが多い。しかしながら、このトータルステーション等を用いた測量作業は精度の高い測量結果が得られる反面、計測からデータの処理・解析までの一連の作業の中で人為が介在する作業が非常に多く、結果を得るまでに多大な労力と時間を必要とする。この点で、現状の形状計測方法には検討すべき課題が多く、合理的な形状計測システムの構築を目的としてさまざまな試みが行われている。しかし、これらのシステムは従来の計測手法と比べ様々な面で進歩が見られるが、計測費用が膨大である、自動化されていない、十分な精度で計測を行うことが出来ない等の問題点を内在している。そのためこれらのシステムは、合理化を進めるにあたって十分満足であるとはいえず、今だ次に挙げる要件を全て満たすことのできるシステムの出現には至っていないのが現状である。

- ①簡単にデータを収集（撮影）することが可能
- ②コンピュータ処理が可能なデータ（画像）がリアルタイムに入手できる
- ③計測作業が自動化できる
- ④実時間内で計測結果を得ることができ

このような状況において、最近非常に解像度が高く、デジタル方式で記録することのできるカメラが開発されてきており、このようなカメラを用いて形状計測システムを構築することによって、既存のシステムの欠点を補うことができるようになってきた。したがって形状計測作業に、デジタル記録方式の高解像度カメラを利用した近接リモートセンシングを導入することにより、建設現場の形状計測作業を合理化することは十分に可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、デジタル記録式のカメラを用いてステレオ画像を撮影し、これらのステレオ画像から自動的に3次元情報を抽出するシステムを構築するとともに、

本研究で開発するシステムの形状計測精度を明らかにすることを目的とした。具体的には、以下に示す3つの研究項目を設定し研究を進めた。

(1) 3次元情報の抽出

デジタルスチルカメラを用いて撮影したステレオ写真から、一般に広く普及しているエンジニアリングワークステーション（EWS）を用いて標定計算、マッチング処理等を自動的に行うことにより3次元情報を抽出する。具体的には、①相互標定、②対地標定、③偏位修正、④マッチング、⑤3次元情報の算出の5項目についてのアルゴリズムの検討、プログラムの開発、システム化を行う。

(2) 抽出した3次元情報の精度検証

本研究で開発したシステムを実際の建設現場へ適用し、デジタルスチルカメラで撮影したステレオ画像から抽出した3次元情報の精度検証を行う。

(3) 形状計測の作業効率の検討

トータルステーションを用いた測量作業の作業効率と比較検討を行うことにより、本システムによる形状計測の作業効率を評価する。

3. 現状の形状計測手法における問題点

前述のとおり、建設現場における形状計測作業は航空写真測量もしくはトータルステーションに代表される高精度多機能測量儀を用いて行われることが多く、これらの手法は高い精度で形状計測を行うことができる反面、多大な時間と労力を必要とする。そのため、この形状計測作業の合理化を図るため、現在様々なシステムの開発が進められている。具体的には、航空写真を用いた自動出来形計測システム、現場写真による簡易計測システム、ビデオ装置を用いた計測システム等を挙げることができ、これらのシステムはほぼ実用段階に達しているものといえる。しかし、これらのシステムには以下に示す問題点が内在している。

1) 航空写真を用いた出来形計測システムの問題点^{1)~2)}

- ①計測のたびに飛行機を飛ばさなければならない、経費が膨大となる。

- ②航空写真を撮影後フィルムの現像処理等が必要となり、リアルタイムな処理を行うことが出来ない。
- ③コンピュータ処理を可能とするためにフィルムに撮影された画像をデジタル画像へ変換（アナログ／デジタル変換）する必要があり、特殊なハードウェアを必要とする。
- ④現場で必要とする精度を確保するためには、アナログ／デジタル変換の際に非常に高い分解能で変換を行う必要があり、データ量が膨大となる（航空写真1枚あたり、約100メガバイト程度）。

2)現場写真による簡易計測手法の問題点⁹⁾

- ①1)と同様に、撮影後現像・焼付け等の写真処理を必要とするため即時性に欠ける。
- ②オペレータが計測作業を行わなければならない、自動化されていない。

3)ビデオ装置を用いた計測システムの問題点

- ①解像度が粗い。
- ②画像を記録する（録画する）際に、画質が劣化する（アナログ信号であるため）。
- ③2)と同様オペレータによる計測作業が必要である。

このように、現在研究・開発が行われている形状計測手法には、依然として様々な問題点が内在しており、形状計測を合理化するために必要な条件をすべて満足できるシステムの出現には未だ至っていない。

4. システム構成

本研究では上述の問題点を踏まえ、最近開発された非常に解像度が高く、デジタル方式で記録することが可能なデジタルスチルカメラに着目し、次に示す方法で合理的に形状計測を行うことを可能とするシステムの構築を行った（図-1参照）。

- ①作業員が携帯したデジタルスチルカメラにより対象エリアのステレオ写真を基準点とともに撮影する。
- ②撮影した画像をメモリーカードを介して汎用的なコンピュータ（EWS）に入力する。
- ③入力されたステレオ写真をコンピュータのディスプレイ装置上に表示し、基準点およびパスポイントの座標を数点オペレータが指定する。この際、ディスプレイ装置上には左右のステレオ写真が表示されており、オペレータはマウスを用いて簡単に基準点およびパスポイントを指定できるようにシステムは整備されている。

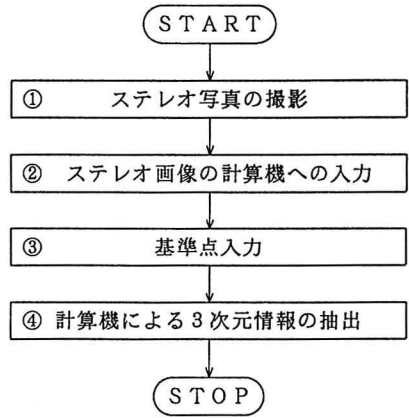


図-1 形状計測作業の流れ

④基準点の座標をもとに、標定計算処理、マッチング処理等を行い、3次元情報を算出する。

このようにデジタル方式で記録するカメラを用いて撮影することによって、アナログ／デジタル変換が不用となり、画像劣化の問題および特殊なハードウェアが必要となる問題は解決される。これによりリアルタイムな計測作業が可能となる。

ここで、本システムで用いたデジタルスチルカメラの外観を図-2に示すとともに、その諸元を表-1に示す。さらに、ステレオ写真の処理／解析および3次元情報の算出に用いたコンピュータ（EWS）の外観を図-3に示すとともに、その諸元を表-2に示す。



図-2 デジタルスチルカメラの外観

表-1 デジタルスチルカメラの諸元

記録方式	フレームデジタル方式
データ圧縮方法	サブサンプル及びADPCM
記録媒体	イメージメモ리카ード
記録枚数	12枚(標準) 6枚(高画質)
イメージセンサ	2/3インチ 40万画素 FIT-CCD
イメージセンサのサイズ	8.96×6.64mm
画像データ	RGB各8ビット/画素
画像構成	640×475画素
1画素のサイズ	0.0135mm
レンズ	F2.0 f:9~27mm



図-3 計測に用いたEWSの外観

表-2 計測に用いたEWSの諸元

CPU	SPARC IU(40MHz) : 整数 SPARC FPU(40MHz) : 浮動小数
処理性能	28.5 MIPS
仮想記憶容量	1GB/7°ロセス
主メモリ	16MB
ネットワーク	イーサネット
シリアルポート	2
バス	SAs 3スロット
磁気ディスク	424MB
フロッピーディスク	3.5インチ 1.44MB/720KB
ディスプレイ	19インチ カラーヒットマトリクスディスプレイ 76Hz ノンインターレース

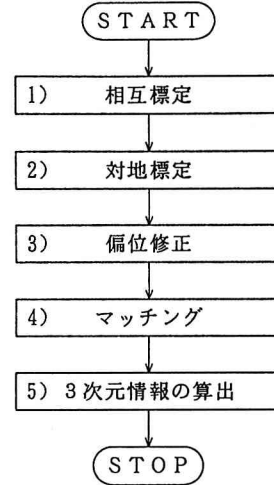


図-4 形状計測の流れ

5. 形状計測アルゴリズム

本研究では、図-4に示す流れに従って、デジタルスチルカメラにより撮影されたステレオ写真から3次元情報の算出を行った。具体的には、以下に示すとおりである。

(1)相互標定

本研究では、デジタルスチルカメラで撮影されたステレオ画像から、共面条件を用いてモデルの形成(相互標定)を行った。相互標定におけるモデル形成は、ステレオ画像の対応する2本の光束がことごとく交差するように、左右それぞれの投影中心の位置および傾きを定めることである。ステレオ画像の対応する2本の光束がことごとく交差するためには、最低5本の光束が交差すればよく、投影中心の位置に関する6つの変量および傾きの中から、5つの独立した変量(標定要素)を定めることにより相互標定を行うことができる。本研究では、左写真の投影中心を原点にとり、右写真の投影中心とを結ぶ線をモデル座標系のX軸とし、左写真の回転角(κ_1, ϕ_1)および右写真の回転角($\kappa_2, \phi_2, \omega_2$)の5つの回転角を標定要素とした。また、標定計算の手法としては、マッチング処理(後述)時の処理効率を考慮し、縦視差を消去する方法を用いることとした。

(2)対地標定

相互標定によって得られたモデルと地表面との位置

関係を求めるために、基準点の座標値を用いて対地標定を行った。対地標定を行うことにより、左右の画像の対応点の座標から、地表面上の3次元情報を求めることが可能となる。本研究では、対地標定処理として、①縮尺の計算、②平行移動量の計算、③回転行列の計算、④対地座標系への変換、を行った。また、モデルの変形による調整計算として、①標高調整、②傾斜補正、③平面位置調整、を行った。なお、本研究では対象領域の範囲や精度から判断し、地球曲率の補正は行わないこととした。

(3) 偏位修正

相互標定により求められる標定要素を用いることにより、縦視差のないステレオ画像を作成することができる。この処理を偏位修正という。偏位修正を行うことにより、比高による左右の画像上の位置のずれは横方向（画像のx軸方向）にのみ生じる。そのため、左右の画像上の対応点の探索（マッチング処理）の際に探索範囲を1次元（画像のx軸方向）に限定することが可能となり、マッチング処理の効率を大幅に向上させることができる。本研究では、原画像から偏位修正画像を作成する際の内挿法として共一次内挿法を用いた。

(4) マッチング

ステレオ画像の左右の画像に撮影されている同一ポイント（対応点）を探索する処理をマッチング処理という。本研究では、自動マッチング手法として一般的な面積相関法を用いた。本研究で行ったマッチング処理の流れを図-5に示す。

1) 基準格子の設定： 本研究ではマッチングを行う際に、ステレオデータの左画像を基準画像として、基準画像上の点に対応する点を対応画像（右画像）上から求めることとした。この際、基準画像上に適当な間隔で格子を引き、その格子の交点（格子点）を基準点として設定した。また、本研究では航空写真のような鉛直画像でなく、斜め方向から撮影した画像を対象とするため、格子の間隔を横方向（x方向）と縦方向（y方向）で任意に設定できるようにした。これにより、地上で正方形に近い格子点を設定することができるようになる。

2) 初期探索点の設定： 1)で設定した格子点に対応する対応画像上の探索開始点を求める。初期探索点の設定方法は次のとおりである。

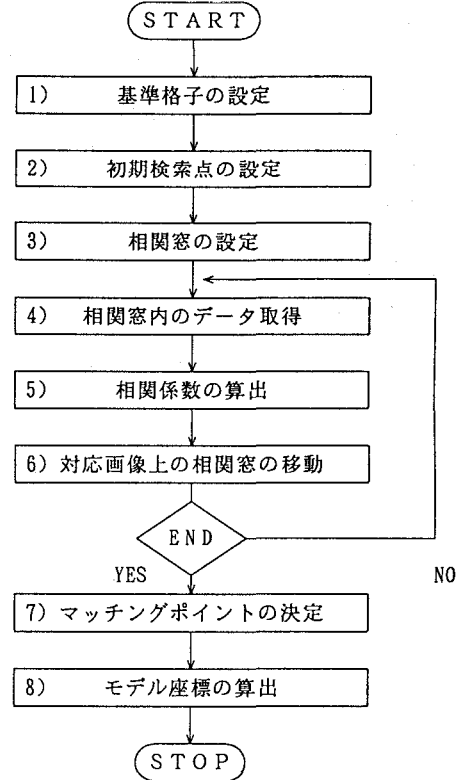


図-5 マッチング処理の流れ

- ①相互標定で用いたパスポイントから、相互標定で得られた標定要素を用いて偏位修正画像上のパスポイントの画像座標を算出する。
- ②①で得られた偏位修正画像上のパスポイントの座標を用いて、基準画像から対応画像への射影変換式を作成する。
- ③②で作成した射影変換式を用いて基準画像の格子点に対応する対応画像上の点を求め、この点を初期探索点とする。
- 3)相関窓の設定： 面積相関法で用いる相関窓を1)、2)で設定した基準点および初期探索点上に設定する。本研究では検討の結果、相関窓の大きさを15×15画素とした。
- 4)相関窓内のデータ取得： 3)で設定した相関窓内のデータ（画像濃度値）を取得する。
- 5)相関係数の算出： 4)で取得した相関窓間のデータの相関係数を算出する。

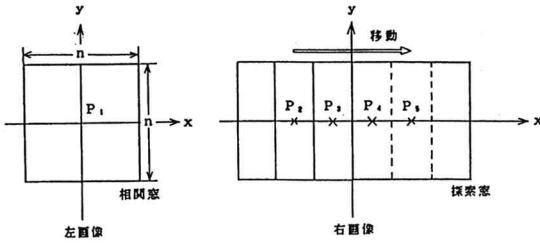


図-6 相関窓の移動

6) 対応画像上の相関窓の移動： 初期探索点を中心に左右に相関窓を移動させ、4)、5)の処理を繰り返す。探索範囲内の相関係数をすべて算出したならば7)に進む(図-6参照)。

7) マッチングポイントの決定： 6)で得られた相関係数をもとに、最も相関係数が高い点をマッチングポイントとする。

8) モデル座標の算出： 全てのマッチングポイントが決定したならばマッチングポイントの画像座標からモデル座標を算出する。

以上のステップの処理を行うことにより、ステレオ画像上のマッチングポイントの座標を算出できる。

ここで、マッチング処理の際に用いた相関窓の形状であるが、本研究では航空写真のような鉛直画像でなく斜めから撮影した画像を対象とするため、初期探索点の設定時に作成した射影変換式を用いて相関窓を図-7に示すように変形することとした。なお、対応画像上の相関窓は射影変換により変形しているので基準画像の相関窓内のデータ数と異なる場合がある、そこで本研究では、共一次内挿法を用いて対応画像上の相関窓内のデータ数を基準画像上のデータ数に合わせることにした。

(5) 3次元情報の算出

本研究では、標定結果とマッチング結果を用いて地表面の3次元情報の算出を行った。3次元情報は対地標定を行った際に得られた重心の座標、縮尺、平行移動量、回転行列を用いて算出する。なお、算出された3次元情報には、ミスマッチングによる誤った3次元情報が含まれている。そこで本研究ではメディアンフィルタおよびカラム並びによるチェックによってこのような誤った3次元情報の除去を行った。また、標高算出が行われた点の平面位置は、地表面上では不規則

な配列として求められるため、本研究ではこの不規則な配列の地上座標を規則的な配列に変換(正方化)し、コンピュータ処理に適した数値地形モデルを作成した。

以上、(1)~(5)の処理により算出された3次元情報の例を図-8に示す。

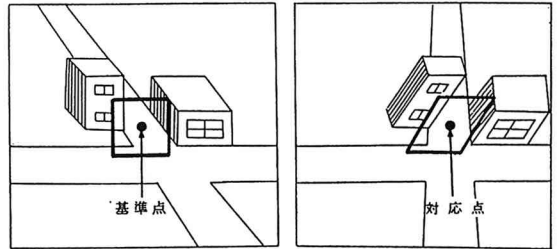
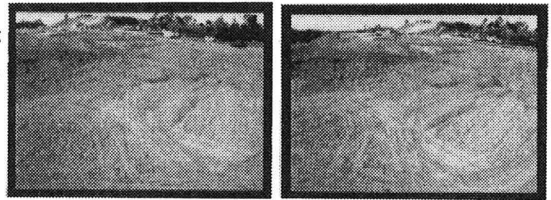
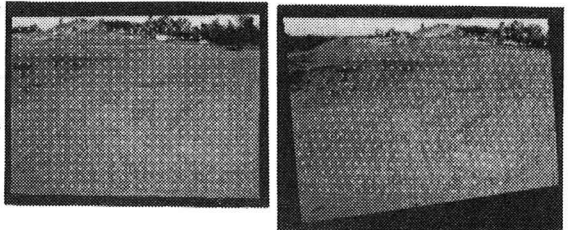


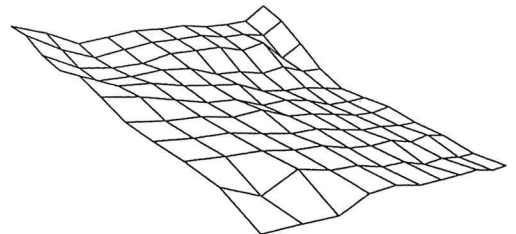
図-7 本研究で用いた相関窓



(a) 撮影されたステレオ画像



(b) 偏位修正画像に対するマッチング結果(・がマッチング点)



(c) 算出した3次元情報から作成した鳥瞰図

図-8 3次元情報算出例

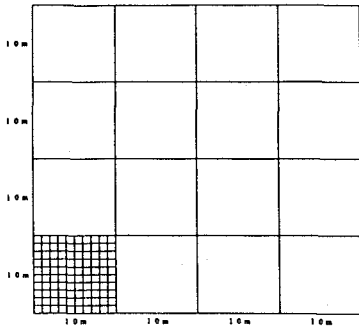


図-9 計測対象領域の測点の位置

6. 造成現場への適用結果

本研究では、本研究で開発した形状計測システムを実際に建設現場に適用することにより、どれくらいの精度で形状計測を行うことが可能かについて検証実験を行った。具体的には、造成現場において10m四方および40m四方領域のある程度起伏のある緩斜面を実験の対象とし、様々な撮影条件を変化させて計測を行った。なお、精度の検証を行うためにデジタルスチルカメラによる撮影と並行して、トータルステーションによる計測も同時に行った。

(1) 計測準備 (計測点のマーキング)

計測に先立ち、精度を検証するための計測点の位置を決める必要がある。そこで本研究では図-9に示すように10m四方の領域について1mピッチで121点、40m四方の領域について10mピッチで25点の格子点を計測点と定め、視認できるようマーキングを行った。マーキングに際しては、赤色のスプレーを用いて大まかな位置(±10cm程度)に+印をつけた。

(2) 計測作業

計測はデジタルスチルカメラによる撮影およびトータルステーションによる計測を並行して行い、計測作業時間も記録することとした。また写真撮影は、10m四方の領域については地上(1.6m)からと高所作業車(8.4m, 13.8m)から、40m四方の領域については高所作業車(14.9m)から行った。

(3) 処理解析

前述した手法を用いて標定計算処理、マッチング処理等を行い3次元情報を算出するとともに、土量の算出を行った。本研究では、算出した計測結果の精度を検証するために、基準点のX、Y、Z方向の誤差、全

計測点の標高算出精度、土量の誤差の3項目を検討項目として設定した。ここで、軸の方向であるが、本研究ではカメラの基線方向をX軸、高さ方向をZ軸、X軸とZ軸に直行する方向をY軸とした。そして、検証に際しては、トータルステーションによる計測値を真値として以下に示す方法で誤差の算出を行った。

1) 基準点のX、Y、Z方向の誤差： 基準点の誤差としては、ステレオデータを対地標定およびマッチング処理を行う際に生じるRMS誤差を採用することとした。ここでRMS誤差は次式に示すとおりである。

$$(RMS \text{ 誤差}) = \sqrt{\frac{\sum (a_i - A_i)^2}{n}}$$

A_i : トータルステーションの計測値

a_i : 本手法により算出した値

n : 比較点の数

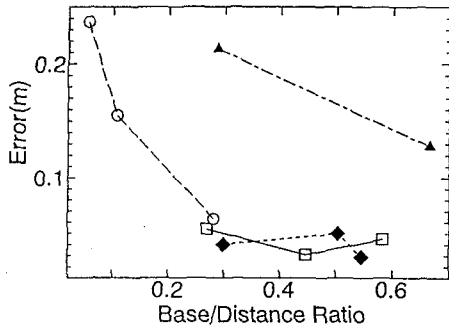
2) 全計測点の標高算出精度： 本研究では、トータルステーションにより計測した全計測点と同一平面位置の標高を本手法により算出し、そのRMS誤差を標高算出精度とした。

3) 土量の誤差： 本研究では、トータルステーションにより計測した格子点の座標から計算した土量とステレオデータから算出した格子点の座標から計算した土量を比較することによって、土量誤差を算出した。土量の算出方法は、各格子の細胞的な四角形を形成する4点の標高(h_1, h_2, h_3, h_4)の平均値 h と、四角形の面積 S を乗じた値の各格子の総和を土量と定めた。ここで、土量計算を行う際の基準面であるが、標高90m(対象領域よりも低い標高)を基準面として盛土量を計算することとした。そして、トータルステーションを用いて算出した土量を真値として、土量の誤差量を算出した。

本研究では、異なる撮影条件で撮影した11ケースのステレオ画像データに対して、上記の項目の精度検証を行った。図-10から図-14に各検証項目毎の誤差を基線長/距離比(通常の航空写真測量における基線長/高度比に相当する)により整理した結果を示す。

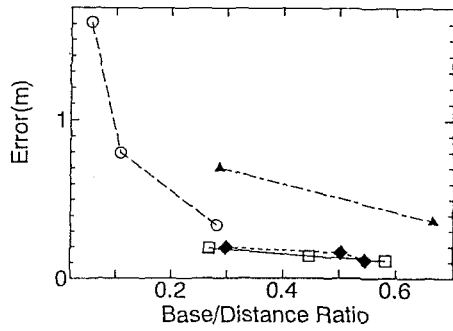
以上の11ケースの検討結果をまとめると以下のとおりである。

①地上から撮影したステレオ画像から抽出した3次元



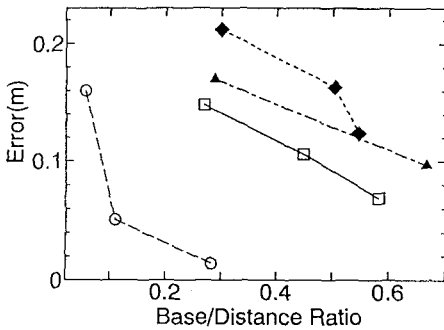
○ 地上 1.6mより10m領域を撮影
 □ 地上 8.4mより10m領域を撮影
 ◆ 地上13.8mより10m領域を撮影
 ▲ 地上14.9mより40m領域を撮影

図-1 0 基準点のX方向誤差



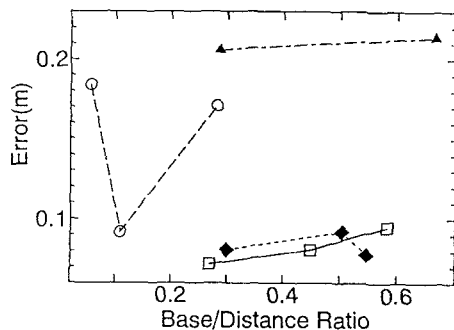
○ 地上 1.6mより10m領域を撮影
 □ 地上 8.4mより10m領域を撮影
 ◆ 地上13.8mより10m領域を撮影
 ▲ 地上14.9mより40m領域を撮影

図-1 1 基準点のY方向誤差



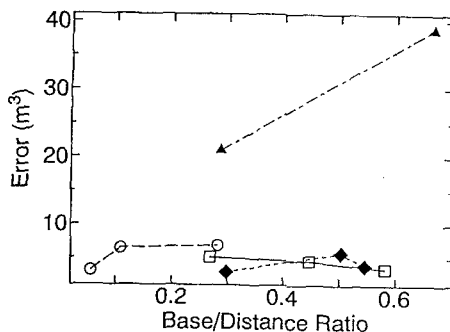
○ 地上 1.6mより10m領域を撮影
 □ 地上 8.4mより10m領域を撮影
 ◆ 地上13.8mより10m領域を撮影
 ▲ 地上14.9mより40m領域を撮影

図-1 2 基準点のZ方向誤差



○ 地上 1.6mより10m領域を撮影
 □ 地上 8.4mより10m領域を撮影
 ◆ 地上13.8mより10m領域を撮影
 ▲ 地上14.9mより40m領域を撮影

図-1 3 全計測点の標高算出精度



○ 地上 1.6mより10m領域を撮影
 □ 地上 8.4mより10m領域を撮影
 ◆ 地上13.8mより10m領域を撮影
 ▲ 地上14.9mより40m領域を撮影

図-1 4 土量誤差

情報は平面位置の y 方向に大きな誤差が生じており、これは対象領域を斜めから撮影しているためである。

②高所から撮影したステレオ画像から算出した3次元情報は、地上から撮影した場合に比べて精度が高く、平面位置および標高に含まれる誤差はほぼ同程度である。

③撮影高さの変化(8.4mと13.8mの場合)による精度の向上はあまり見られなかった。

④基準点回りの精度は、理論どおり基線長/距離比が大きくなるほど向上している。

⑤理論的には基線長/距離比が大きくなるほど精度は向上するが、標高算出精度や土量誤差ではその傾向は見られない。これは基線長/距離比が大きくなるとミスマッチングが多くなるためである。そのため、さらに詳細な実験を行い、最適な(最も精度の高い)基線長/距離比を決定する必要がある。

⑥通常現場で行われるトータルステーションによる計測方法(20m間隔の計測)から算出した土量誤差は250.903m³であり、本手法により計測した土量の方が精度が高いことが判明した。

以上より、本手法は造成地の工事の進捗状況を把握するには十分な精度を得ることが可能であるということが判った。

次に、トータルステーションを用いた測量作業との作業効率面における比較であるが、本研究では検討項目として、計測時間と処理時間の2項目を設定した。ここで、計測時間は基準点の設置から機材の撤去に到るまでの時間を対象としており、10m四方の領域について11×11の格子121点の計測を行った場合の作業時間である。処理時間は一般的な建設現場で行われるトータルステーションによる計測データの処理に要する時間であり、トータルステーションのデータレコーダからパソコンへ計測データを転送し、汎用的なトータルステーション解析用のソフトウェアを用いて計測点の座標計算・土量計算を行うまでの時間である。また、本システムにおける処理時間は、コンピュータへの画像の入力から数値地形モデルを作成し、土量計算を行うまでの時間である。比較結果を表-3に示す。

表-3 作業効率の検討

	計測時間	処理時間
本システムによる計測	4分	20分
トータルステーションによる計測	54分	8分

表-3に示したように本研究で開発した手法はトータルステーションによる作業時間に比べ圧倒的に効率的であることが判明した。これにより、本研究で開発した手法を用いることにより、建設現場における形状計測作業を大幅に効率化することが可能であることが判った。

7. おわりに

本研究では、近接リモートセンシングを形状計測に導入することにより、建設現場における計測作業の合理化を図ることを目指し、デジタルスチルカメラを用いた形状計測システムの開発を行った。その結果、本研究で開発したシステムは、造成地における土量算出には十分な精度が得られること、およびトータルステーションによる形状計測作業に比べ圧倒的に効率的であることが判った。これにより、建設現場における形状計測作業に本システムを導入することにより、形状計測作業を大幅に合理化することが可能である。

今後、より精度の高い3次元情報を得るために、デジタルスチルカメラの解像度の向上が望まれる。

参考文献

- 1) 苗村正三他：土工の出来形自動計測・管理システム、土木技術資料、vol.31 No.2 pp.34～pp.40、(財)土木研究センター
- 2) 服部進、村井俊治、柴崎亮介：写真測量を利用した出来形計測・管理システムの研究、(社)日本写真測量学会：写真測量とリモートセンシング、vol.27、No.2 pp.32～pp.43、(社)日本写真測量学会、1988
- 3) 管健彦：数分の写真撮影で出来形を測る、日経コンストラクション、4.12号 pp.42～pp.47、日経BP社、1991