

## デジタルカメラによる土量計測システムの開発 - その1：システムの概要と計測精度の検証 -

高橋 正志\* 池田 正\*\*  
守屋 典昭\*\*\* 佐野 泰三\*\*\*

### 要 旨

土運船の積載土量をリアルタイムに計測することを目的とした、デジタルカメラを使用した船積み土量計測システムを開発した。実工事規模の1/4縮小モデルによる基礎実験を行った結果、直射日光、曇、雨の状況下においても十分な計測精度が確保でき、現場適用が十分可能であることを確認した。おもな精度検証結果を下記に示す。

船上に基準点を設置しなくても目標計測精度1.0%を確保できることがわかった。

縮小モデルでの理論上の測距精度3.4cmに対し、計測値の自乗平均が0.8cm、標準偏差が1.2cmであったことから、実工事においてもカメラの配置を検討することで目標精度を確保できることがわかった。

天候による計測精度への影響はなく、むしろ夜間における照明の影響が大きいことがわかった。

### 1. まえがき

大量の土砂を短期に投入する港湾、空港の埋立工事においては、土砂の投入サイクルを短縮するため、土砂の積み込み作業を中断することなく積載土量を計測できる方法が求められている。従来から実施されている土運船の積載土量の計測方法には目視による吃水計測、スタッフ・テープ計測による人力方式、および光波・超音波を使用した機械方式がある。

このうち人力方式は土砂の投入を中断して計測するため投入サイクル短縮のニーズには対応できない。一方、光波式、超音波式などの機械方式に対しては計測精度を確保しつつ計測コストのさらなる縮減が要求されている。

このような背景のもと、比較的廉価で保守が容易な複数台のデジタルカメラを使用した土量計測システムを開発し、1/4縮小モデルによる基礎実験を通じ光波式と同等な計測精度1.0%が確保できることを確認した。本稿で

はシステムの概要、実験結果などについて報告する。

### 2. システムの概要

本システムの計測原理は航空写真に利用されている「ステレオ画像計測法」と呼ばれるもので、2台のデジタルカメラで撮影した画像をコンピュータで画像処理することによって積載形状の三次元座標を求める。土砂投入前の船倉と投入後の積載形状を撮影し、その差から土量を算出する。

#### 2.1 土量の計測

通常、山から採取した土砂はベルトコンベヤで棧橋まで運ばれ、シップロダと呼ばれる土砂の積み込み装置によって土運船に連続的に積み込まれる。シップロダにデジタルカメラを取り付け積載土量を計測している状況を図-1に示す。

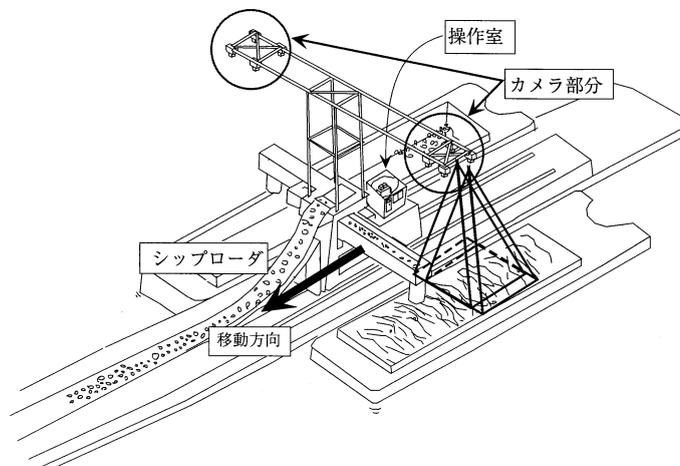


図 - 1 計測状況

\* 技術研究所 \*\* 北陸支店 \*\*\* 機械部

シップロダの土砂投入口上部に所定の計測精度を得るのに必要な離隔距離を設けて2台づつ、計4台のデジタルカメラを取り付ける。シップロダが矢印方向（左方向）に移動するときは右側のカメラで、右方向に移動するときは左側のカメラで投入後の形状を撮影する。全体を一度に撮影できないのでシップロダの移動距離を検知し、一定の距離移動毎にデジタルカメラのシャッターを動作させ自動的に撮影する。

撮影後、画像データをシップロダの操作室に伝送し、2枚の写真の重なった範囲を対象にコンピュータで画像処理してそれぞれの写真上での同一点を求め、表面形状の三次元座標を算出する。こうすることで、既存設備を利用しシップロダの移動にあわせて土砂を投入しながら積載土量を連続計測することができる。

2.2 計測原理

デジタルカメラなどの視覚センサーを左右に2つ並べて対象物を異なる位置からステレオ画像視(両眼立体視)する方法で、おのおのの視線方向(撮影点位置、カメラの傾きなど)が定めれば三角測量の原理から対象点の三次元座標が計算できる。三次元座標の算出の説明図を図-2に示す。

2枚の写真の撮影位置  $Q_1 (X_{Q1}, Y_{Q1}, Z_{Q1})$ 、 $Q_2 (X_{Q2}, Y_{Q2}, Z_{Q2})$  と撮影方向が既知である場合、写真上に写されている同一点  $P_1$ 、 $P_2$  が観測されると、撮影位置と同一点  $P_1$ 、 $P_2$  を結ぶ直線が交差する空間上の点として点  $P (X_p, Y_p, Z_p)$  が算出できる。本システムでは、この点  $P$  は地山の任意点になる。

また、点  $P$  が地山のように静止している場合は、1台のデジタルカメラを  $Q_1$ 、 $Q_2$  と移動させて撮影することで、2台の同時撮影と同様にステレオ画像視したことになり、点  $P$  の三次元座標が算出できる。

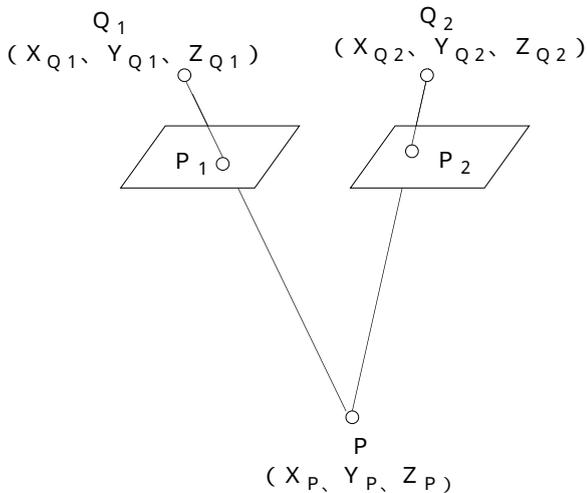


図-2 三次元座標の算出

3. 基礎実験

3.1 実験概要

3.1.1 実験目的

計測精度の検証

基準点がある場合とない場合の計測精度について比較する。

環境条件が計測精度におよぼす影響

直射日光・曇・雨・夜間の条件下で撮影し、太陽による陰影の影響、夜間の計測に必要な照度などを検証する。

3.1.2 撮影方法

高所作業車の作業台に取り付けたデジタルカメラで標準工事規模の1/4縮小モデルの地山(幅5.0m×長さ12.5m×高さ1.5mの大きさ)の表面形状を高所作業車を移動させながら撮影した。高所作業車によるデジタルカメラの撮影状況を写真-1に、地山の三次元復元形状を写真-2に示す。



写真-1 高所作業車による撮影状況

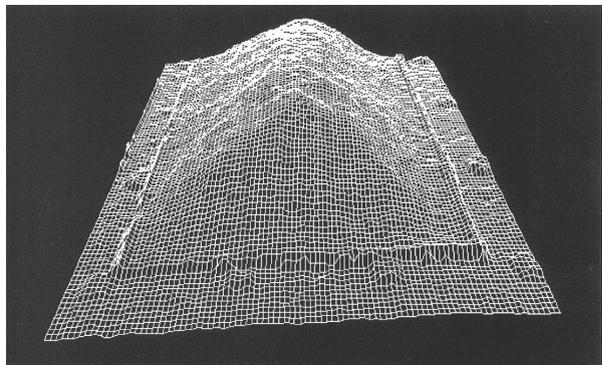


写真-2 地山の三次元復元形状

3.1.3 精度の検証方法

高精度三次元計測に適したトータルステーションで1断面あたり5～9点、1mないし2mピッチ毎の9断面に設置した標識(計測点79点、うち外周の20点は基準点に使用)を計測し、この値を真値として本システムの計測精度について検証した。トータルステーションによる計測状況を写真-3に示す。



写真-3 トータルステーションによる計測状況

3.1.4 使用機器

主な使用機器を表-1に示す。

表-1 使用機器

<デジタルカメラ>		高解像度CCD搭載電子スチルカメラ
型式	DCS460	
解像度	600万画素(1画素9ミクロン)	
寸法	170×奥行114×高さ208mm	
重量	1.6kg	
<トータルステーション>		
検定年月日	平成9年9月	
判定内容	国土地理院測量機器性能基準による 2級中距離型測距儀に適合	
水平角検定	倍角差観測	5秒以内
鉛直角検定	高度定数較差	5秒以内
光波測距儀検定	観測標準偏差	±0.47mm

3.2 デジタルカメラの幾何学的な配置

デジタルカメラの撮影可能範囲を考慮すると、標準工事における撮影高は海面から23.0m、デジタルカメラの取り付け間隔は6.0m、焦点距離は15.0mm程度になる。本システムの目標計測精度を1.0%とすると、必要な測距精度は土運船に搭載した土砂高が4.0mの場合には4.0cm

になる。

ステレオ画像計測法の理論上の計測精度はカメラの焦点距離、およびカメラの取り付け間隔が大きいほど良好になる。たとえば、シップローダ上のデジタルカメラ取り付け位置の幾何学的関係を相似的に再現した1/4縮小モデルの場合、撮影高は約5.75m、取り付け間隔は1.5mになり、焦点距離が約4.0mmのデジタルカメラが必要になる。しかし実際にはデジタルカメラの焦点距離を15.0mmから4.0mmに変更できないため15.0mmのままとし、撮影高を6.0mから7.5mに、取り付け間隔を2.0mから1.0mに変更し、理論上の測距精度を標準工事規模にあわせた。理論上の測距精度は、撮影高h(m)、焦点距離f(mm)、デジタルカメラの分解能S(mm)、取り付け間隔D(m)とすると、

$$\begin{aligned}
 &= h / f \times S \times (h / D) \\
 &= 7.5 / 15.0 \times 0.009 \times (7.5 / 1.0) \\
 &= 0.034 \text{ (m)} \\
 &= 3.4 \text{ (cm)}
 \end{aligned}$$

になる。したがって、前述したとおり標準工事規模での目標計測精度が4.0cmであるので、本実験で得られた精度によって、標準工事規模における計測精度を評価できることになる。デジタルカメラの幾何学的な配置を図-3に示す。

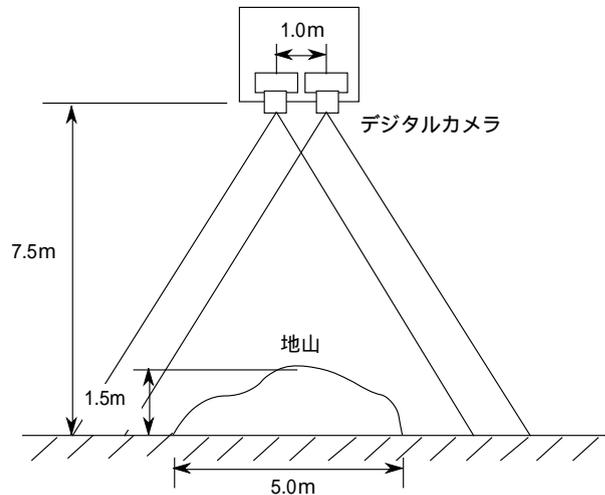


図-3 デジタルカメラの幾何学的な配置

4. 実験結果

4.1 トータルステーションによる計測土量

トータルステーションで計測した補正後の土量は46.83m<sup>3</sup>であった。この補正後の土量とは正味の土量のこと、トータルステーション設置点の標高を基準面として求めた土量から地表面の勾配による土量分(1.16m<sup>3</sup>)を

差し引いたものである。トータルステーションの計測土量を表 - 2 に示す。

4.2 システムの計測精度

4.2.1 土量の計測精度

トータルステーションの計測土量 (46.83 m<sup>3</sup>) を真値としたときの本システムの計測精度を表 - 3 に示す。基準点を使用した場合の平均土量は47.08 m<sup>3</sup>、誤差平均は0.65%、基準点を使用しない場合の平均土量は46.96 m<sup>3</sup>、誤差平均は0.83%であった。

4.2.2 測距精度

基準点を使用しない場合のトータルステーションと比較した測距精度の自乗平均は0.8cm、標準偏差は1.2cmであった。表 - 3 の撮影回数 1 回目、基準点なしの場合の測距精度を図 - 4 に、同じく表 - 3 の全撮影回数、基準点なしの測距精度の一覧を表 - 4 に示す。

表 - 2 トータルステーションによる計測土量

断面	面積：m <sup>2</sup>	断面幅：m	土量：m <sup>3</sup>
1	0.93	1.0	1.78
2	2.62	2.0	6.53
3	3.90	2.0	8.25
4	4.34	2.0	8.60
5	4.26	2.0	8.45
6	4.19	2.0	8.45
7	4.27	1.0	3.75
8	3.24	1.0	2.18
9	1.12		
トータルステーション設置点の 標高を基準とした土量			47.99
補正後の土量			46.83

表 - 3 システムの計測精度

撮影回数	撮影条件		基準点あり		基準点なし	
	天候 照度Lx	撮影方法	計測土量 m <sup>3</sup>	誤差：% 注1	計測土量 m <sup>3</sup>	誤差：% 注1
1 回目	晴れ：110k	移動しながら 2 台同時撮影	47.28	-0.97%	47.33	-1.08%
2 回目	晴れ：125k	停止状態で 2 台同時撮影	47.12	-0.63%	46.90	-0.16%
3 回目	曇り：32.5k	移動しながら 1 台連続撮影	47.37	-1.16%		
4 回目	曇り：19.9k	移動しながら 2 台同時撮影	47.21	-0.82%	47.39	-1.21%
6 回目	夜間：4k	移動しながら 2 台同時撮影	46.69	0.29%	46.18	1.38%
8 回目	雨：20k	移動しながら 2 台同時撮影	46.80	0.05%	46.98	-0.33%
自乗平均			47.08	0.65%	46.96	0.83%
標準偏差			0.27	0.42%	0.48	0.55%
真値	トータルステーションによる計測土量		46.83		46.83	

注 1：(真値 - デジタルカメラの測定土量) / 真値

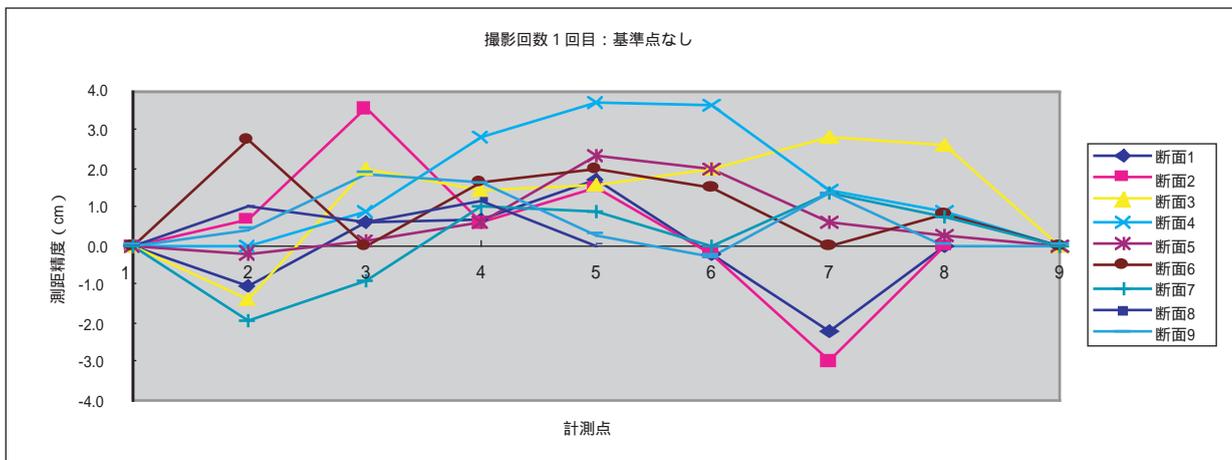


図 - 4 基準点を使用しない場合の測距精度

表 - 4 基準点を使用しない場合の測距精度

*1 撮影回数	*2 断面 NO	*3 計測点の測距精度 (トータルステーションの測定値との差 : cm)									自乗平均	標準偏差
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	1	0.0	-1.1	0.6	0.7	1.7	-0.2	-2.2	0.0		0.8	1.2
	2	0.0	0.7	3.5	0.6	1.5	-0.2	-3.0	0.0		1.2	1.8
	3	0.0	-1.4	1.9	1.4	1.6	2.0	2.8	2.6	0.0	1.5	1.4
	4	0.0	0.0	0.9	2.8	3.7	3.6	1.4	0.8	0.0	1.5	1.5
	5	0.0	-0.2	0.1	0.6	2.3	2.0	0.6	0.3	0.0	0.7	0.9
	6	0.0	2.7	0.0	1.6	2.0	1.5	0.0	0.8	0.0	1.0	1.0
	7	0.0	-2.0	-0.9	1.0	0.9	0.0	1.4	0.7	0.0	0.8	1.0
	8	0.0	1.0	0.6	1.1	0.0					0.6	0.5
	9	0.0	0.4	1.9	1.6	0.3	-0.3	1.3	0.0	0.0	0.7	0.8
2	1	0.0	0.0	1.0	1.6	-0.3	-0.4	-2.0	0.0	0.0	0.7	1.0
	2	0.0	0.9	2.4	1.3	-0.7	-1.4	0.3	0.0	0.0	0.9	1.2
	3	0.0	-0.7	1.5	0.3	2.7	1.8	-0.7	0.6	0.0	0.9	1.2
	4	0.0	-0.4	0.6	-1.7	-0.1	-1.0	-2.8	-1.8	0.0	0.9	1.1
	5	0.0	0.0	0.4	1.3	0.6	0.3	-0.7	0.4	0.0	0.4	0.5
	6	0.0	0.0	0.8	0.8	0.0	0.0	-2.1	-1.4	0.0	0.6	1.0
	7	0.0	0.0	0.0	2.4	1.3	0.4	-0.7	0.0	0.0	0.5	0.9
	8	0.0	0.5	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4
	9	0.0	0.1	0.0	2.5	-0.1	-2.1	-1.5	0.0	0.0	0.8	1.3
4	1	0.0	1.6	1.2	-0.5	-0.3	-2.6	0.2	0.0	0.0	0.8	1.3
	2	0.0	0.0	1.4	0.3	2.0	0.0	-2.1	1.7	0.0	0.9	1.3
	3	0.0	0.8	1.9	-0.7	0.4	0.8	-0.7	1.1	0.0	0.7	0.8
	4	0.0	0.0	1.1	0.8	2.4	0.8	-0.7	1.2	0.0	0.8	0.9
	5	0.0	1.4	1.4	1.8	2.0	0.4	0.4	-0.7	0.0	0.9	0.9
	6	0.0	0.0	2.5	2.7	2.2	1.8	0.6	1.5	0.0	1.3	1.1
	7	0.0	-2.1	0.4	0.0	0.5	0.0	-1.4	-1.4	0.0	0.6	0.9
	8	0.0	1.7	2.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
	9	0.0	1.8	2.0	2.5	2.0	2.3	0.0	0.0	0.0	1.3	1.1
6	1	0.0	2.7	2.6	1.9	2.9	1.1	0.9	0.0	0.0	1.5	1.2
	2	0.0	1.6	0.9	-0.1	-2.5	-0.4	0.1	0.0	0.0	0.7	1.2
	3	0.0	0.0	0.5	2.0	1.5	1.5	0.7	0.0	0.0	0.7	0.8
	4	0.0	1.1	-2.1	-2.8	-2.8	-2.8	-3.4	-0.7	0.0	1.7	1.6
	5	0.0	0.0	-2.8	-3.3	-3.1	0.5	-2.1	-2.8	0.0	1.6	1.6
	6	0.0	2.1	-1.4	2.7	0.0	-2.1	-2.8	-0.7	0.0	1.3	1.8
	7	0.0	0.6	0.6	0.1	-0.7	0.0	0.0	0.4	0.0	0.3	0.4
	8	0.0	-1.5	-0.2	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8
	9	0.0	-0.7	2.4	0.3	0.3	0.3	-0.8	0.0	0.0	0.6	1.0
8	1	0.0	-1.1	0.6	0.7	1.7	-0.2	-2.2	0.0	0.0	0.8	1.2
	2	0.0	-0.3	-0.1	1.7	2.3	0.8	2.2	0.0	0.0	0.9	1.1
	3	0.0	0.6	0.0	1.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.4
	4	0.0	0.4	1.7	-0.7	0.0	-0.7	-1.4	1.3	0.0	0.7	1.0
	5	0.0	0.1	0.1	0.0	1.6	0.5	-0.7	1.1	0.0	0.5	0.7
	6	0.0	0.0	0.0	-1.4	-0.7	0.4	-1.4	0.6	0.0	0.5	0.7
	7	0.0	-0.7	0.3	0.1	0.6	0.0	0.0	-0.7	0.0	0.3	0.4
	8	0.0	1.9	-0.1	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.9
	9	0.0	-0.6	-0.8	0.2	0.6	-1.1	-0.1	0.0	0.0	0.4	0.6

計測値の自乗平均 = 0.8  
 全測定値の標準偏差 = 1.2

\* 1 : 表 - 3 に示す撮影回数

\* 3 : 1 断面ごとの計測点 ( 5 ~ 9 点 ) のトータルス

\* 2 : 地山の計測断面で 1 m ないし 2 m ピッチごとの  
 9 断面

テーションを正とした場合の測距精度

## 5. 実験の評価

### 5.1 計測精度

土量の計測精度は0.05～1.16%（基準点を使用）、0.16～1.38%（基準点なし）であり画像ブレが発生していると思われる基準点を使用しない夜間撮影（撮影回数6回目）での計測精度が最も悪く1.38%であった。しかし、今回の実験では理論上の測距誤差が3.4cmになるように撮影高、およびデジタルカメラの取り付け間隔を設定したので、土量の目標精度は地山の高さが1.5mであるから $3.4\text{cm} / 1.5\text{m} = 0.0227$ （2.27%）になる。したがって、計測土量はすべて目標精度を満足しており、実工事においても計測精度1.0%を確保できるといえる（表-3参照）。

縮小モデルでの理論上の測距精度3.4cmに対し、計測値の自乗平均が0.8cm、標準偏差が1.2cmであったことから実工事においてもカメラの配置を検討することで目標精度を確保できるといえる（表-4参照）。

### 5.2 撮影方法

高所作業車の移動にともなうデジタルカメラ自体の振動が撮影画像に与える影響が懸念されたが、特に支障なく良好な画像データを得ることができた。また、2台のデジタルカメラの同時撮影と1台のデジタルカメラの連続撮影による計測精度もほぼ同等であった。

このことから設備費、保守上の観点からは1台のデジタルカメラで連続撮影する方法が適しているといえる。しかし、この方法で撮影する場合は通常の航空写真測量と同様に基準点が必要になり、このことを考慮したシステム設計、運用方法の検討が必要になる。

### 5.3 太陽光が計測精度におよぼす影響

高所作業車の陰影が地山に写り込んでいた状態で撮影（撮影回数1回目）したときの計測精度は、基準点ありの場合-0.97%、基準点なしの場合1.08%であったことから、太陽光による陰影が計測精度におよぼす影響は特にないといえる（表-3参照）。

### 5.4 夜間の計測に必要な照度

夜間における計測精度を検証するため投光器による照明下で撮影を行った。本実験では高所作業車上に投光器を取り付けられなかったため、地山の斜め上方から照射した。そのため、投光器に最も近い土砂面の一部にハレーションが発生し、計測精度に影響をおよぼす結果となった。また、地山の中央部は照射方向の死角的な位置にあたるため照度の低い状態で撮影され、画像ブレが発生し計測精度に影響をおよぼす要因になった。

以上から、撮影に必要な照度ということでは、当然、作業者が作業を行える安全上の最低限の照度は必要であるが、上方から照射することによって改善できると考えて

いる。ただし、シャッター速度が極端に遅くなった場合は振動に対する対策が必要になる。

### 5.5 基準点の有無と計測精度

基準点の有無による計測精度の違いはなかったが、基準点の設置にともなう維持管理など作業者の負担増を考慮すると、基準点を用いない計測方法が適しているといえる。反対に、デジタルカメラの取り付けスペースなどの制約から複数のカメラをシップローダに設置できない場合も想定されるので、並行して基準点を用いる計測手法、特に基準点の標定の自動化などの検討も進めて行く所存である。

## 6. まとめ

今回の実証実験によって本システムの計測精度が十分であることが検証できた。

その他、実工事を想定した場合は下記の特徴があげられる。

デジタルカメラの取付け点を基本にした座標系を使用しているため、土運船上に基準点の設置が不要になる。機器構成がシンプルであり、初期投資、およびランニングコストが廉価になる。

デジタルカメラをシップローダに取り付けることによって専用ゲートの構築が不要になり、設備費のコストダウンだけでなく、ゲートを通す必要がないため作業性の向上にもつながる。

2台のデジタルカメラのシャッターをほぼ同時（時間のずれは1/500秒以下）に動作させることができるため画像ぶれが発生しにくい。

ビデオカメラで積載状況を撮影しておくことで後処理で積載土量が算出でき、危機管理対策が容易になる。駆動機構がないため運用保守が比較的容易になる。

## 7. あとがき

次年度以降も引続きシステムの詳細設計、撮影モジュール、計測断面補正モジュール（自動標定モジュール）、土量算出モジュール、データ管理モジュールなどのソフト開発を進めるとともに、実工事を想定した条件下で実験を行い撮影から終了までの処理時間、操作性などの最終確認を行っていく所存である。

## 謝辞

最後に、本システムの開発に際しご協力いただいた関係各位に感謝いたします。