

J-QUEST ステレオTVカメラシステムの立体計測精度の検証

高橋秀行*¹・澤田浩一*²・高尾芳三*²・安部幸樹*²

Inspection of the Three-Dimensional Measurement Accuracy of J-QUEST Stereo TV-Camera System

Hideyuki TAKAHASHI*¹, Kouichi SAWADA*², Yoshimi TAKAO*², and Koki ABE*²

Abstract Three-dimensional measurement accuracy of J-QUEST stereo TV-camera system was evaluated. The camera system was calibrated by direct linear transformation (DLT) method. The DLT method does not need any camera constants such as focal length or base line length, but several control points are needed to be recorded by the stereo camera in advance for calibration, which three-dimensional positions are already known. To obtain the images of control points, optical targets were hung down at the edge of an experimental tank, and their images were recorded by the camera attached below an electric train on the tank. The train was moved to keep the targets in the visual field at ranges of 1.5m to 3.5m from the camera. Errors in three directions seen from the camera were measured and the three-dimensional measurement accuracy was evaluated by a root mean square (RMS) error of the measured positions of optical targets. Validation of correction of image distortion by software and the difference between two layouts of control points were investigated. The best condition was obtained when the image distortion was corrected and the control points were arranged along the edge of calibration space. The RMS error was less than 2.0cm within 3.0m from the stereo camera in this condition. Most of the errors were occurred in the direction which is parallel to the optical axis of the stereo camera. The correction of the image distortion was effective to improve the accuracy while the arrangement of control points was not. Known lengths between two targets (10cm) arranged perpendicular to the optical axis of the stereo camera were also measured and the errors were evaluated. The error was less than 1.0cm within 3.0m from the stereo camera in the best condition.

Key words: J-QUEST, stereo TV camera, fish size estimate, DLT method

音響的な水産資源調査において、最も重要なパラメータであるターゲット・ストレンクス（以下、TS）は、魚種、魚の大きさ、遊泳姿勢や魚体の生理的状態等によって変化する（古澤，1990）。しかし、船舶に装備された計量魚群探知機（以下、計量魚探機）では、特に複数魚種が混在する場合の魚種構成、魚の大きさ、遊泳姿勢等を精度良く推定することは困難である。また、TSが小さい魚種によって構成される魚群、大深

度に存在する魚群や、高密度の魚群等を対象とする場合も、正確なTSの測定は難しい。我々は、上記の問題を解決するため、計量魚群探知機とステレオ方式の超高感度TVカメラを搭載し、深度300mまで潜水可能な音響・光学複合型魚群計測システムJ-QUEST（Japan QUantitative Echo-sounder and Stereo Tv-camera system）を開発した（澤田ら，2004；高橋ら，2004）。J-QUESTを魚群に接近させれば、音響的かつ

光学的に詳細な計測が可能となる。

J-QUESTのステレオカメラによる立体計測精度を把握することは、魚の体長等を計測した際の測定値の信頼性を語る上で肝要である。そこで本報では、J-QUESTのステレオカメラのキャリブレーション方法及びその立体計測精度について報告する。

方 法

ステレオカメラの仕様

J-QUESTでは、2台の超高感度HARP (High-gain Avalanche Rushing Photoconductor) 撮像管方式水中TVカメラ (日本海洋(株)製) を、基線長 (2台のカメラの焦点間距離) 30cm, 光軸の交差角0度 (平行) に配置している。撮影対象の大きさや調査の目的等に応じて適当な解像度と撮影範囲が得られるように、2組の焦点距離の異なるレンズ (11mm, 23mm) が使用可能である (澤田ら, 2004; 高橋ら, 2004)。

本報では、2004年7月12日～8月6日に遠洋水産研究所漁業調査船・俊鷹丸で実施されたアカイカ資源および餌環境調査 (独立行政法人水産総合研究センター遠洋水産研究所・水産工学研究所, 2004) において撮影された画像データの解析に用いるため、調査時と同条件 (焦点距離23mmのレンズを装着, 被写界深度を概ね1.5～2.5mの範囲に設定) でのステレオカメラのキャリブレーション方法および立体計測精度を報告する。なお、調査および水槽試験 (後述) の時点において、左カメラの撮像管は従来品 (高橋ら, 2004) に対

して約2倍の感度を持つものに交換されている。このため、左右のカメラの画質は若干異なる。

キャリブレーション

1 原理

映像から3次元の空間座標を得るためには、異なる方向から見た複数の画像を用いて計算により座標を再構築しなければならない (池上ら, 1991)。本報では、再構築の手法として、バイオメカニクス分野で一般的なDirect Linear Transformation (DLT) 法 (Adbel-Aziz and Karara, 1971) を用いた。DLT法は、カメラの実空間での位置, 光軸の方向, レンズの焦点距離といったカメラ定数の情報を必要とせず、代わりに既知の実座標空間を持つ点 (コントロールポイント) の画像から3次元座標を再構築する。DLT法は、カメラの配置に関する制約が少なく、3台以上のカメラを使用する場合にも対応できるなど、汎用性が高い (池上ら, 1991)。我々は、DLT法を用いた市販の画像計測ソフトウェアMove-tr/32 (株)ライブラリー製) を用いて、キャリブレーション及び画像計測を行った。

2 水槽試験

精確な位置情報を伴うコントロールポイントの画像を得るため、2004年6月30日～7月2日にかけて、水産工学研究所の球面波水槽 (L15m × W10m × H10m) を用いて実験を行った (Fig. 1)。

水槽の一端に、カメラで明瞭に視認可能なキャリブレーション用の光学ターゲットを10cm間隔で41個取り付けた、伸縮性が殆どない鋼線入りワイヤーを吊り

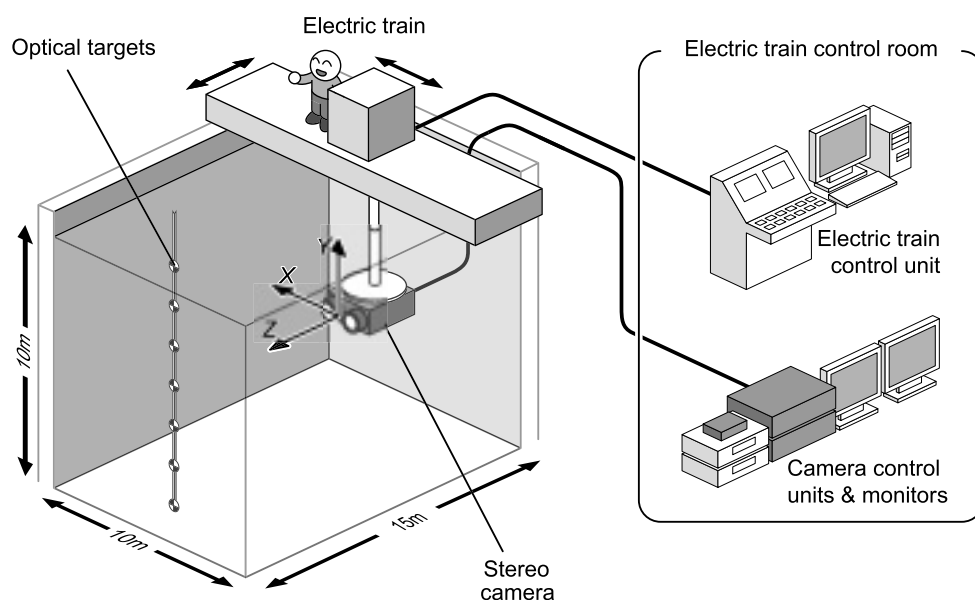


Fig. 1 Experimental set-up of calibration and inspection of measurement accuracy of J-QUEST stereo TV-camera system.

下げた (Fig. 2)。光学ターゲットとして、直径 6 cm の円形の耐水性シールを製作した。光学ターゲットの中心が明瞭に視認できるように、円形の中心部分で 4 分割し、白黒に彩色した。ワイヤーを中心に 3 枚のシールを貼り合わせ、ターゲットの向きに関わらずターゲットの中心が視認できるようにした。ワイヤーの下端にウェイトを取り付け、光学ターゲットが鉛直方向に配列される様にした。

HARP水中カメラは、J-QUEST搭載時と同じ配置を再現する治具 (Fig. 3) を用いて、水槽上で走行・横行が可能な電動台車の架台に設置した。電動台車の位置表示値 (台車制御用のコンピュータ上において 0.1cm 単位で表示される) から、カメラと光学ターゲットの位置関係を確認した後、光学ターゲットの撮影を行った。

計測空間の座標系は、2 台のカメラのレンズ中心を結ぶ直線の中点を原点とし、基線方向を X 軸 (右のカ

メラ側が + 方向)、基線と光軸に直交する方向を Y 軸 (カメラの上側が + 方向)、光軸方向を Z 軸 (カメラから遠ざかる側が + 方向) とした (Fig. 1)。

アカイカ資源および餌環境調査時に設定した被写界深度の範囲を網羅するように、光学ターゲットを $Z = 150, 200, 250, 300, 350\text{cm}$ に配置した。各 Z 位置において、両眼視野 (両方のカメラで同時に撮影できる範囲) 全体を網羅するように X 軸方向に 5 cm ずつ移動し、撮影を行った。

3 コントロールポイントの配置

本研究では、上記の水槽試験において撮影された光学ターゲットの中からコントロールポイントを選定した。コントロールポイントの配置や数については、事実上無限大の組み合わせがあり得ることから統一的な法則はない。しかし一般に、ステレオ計測を行う空間 (以下、計測空間) 内に、コントロールポイントを均等に数多く配置した方が高い計測精度が得られると言

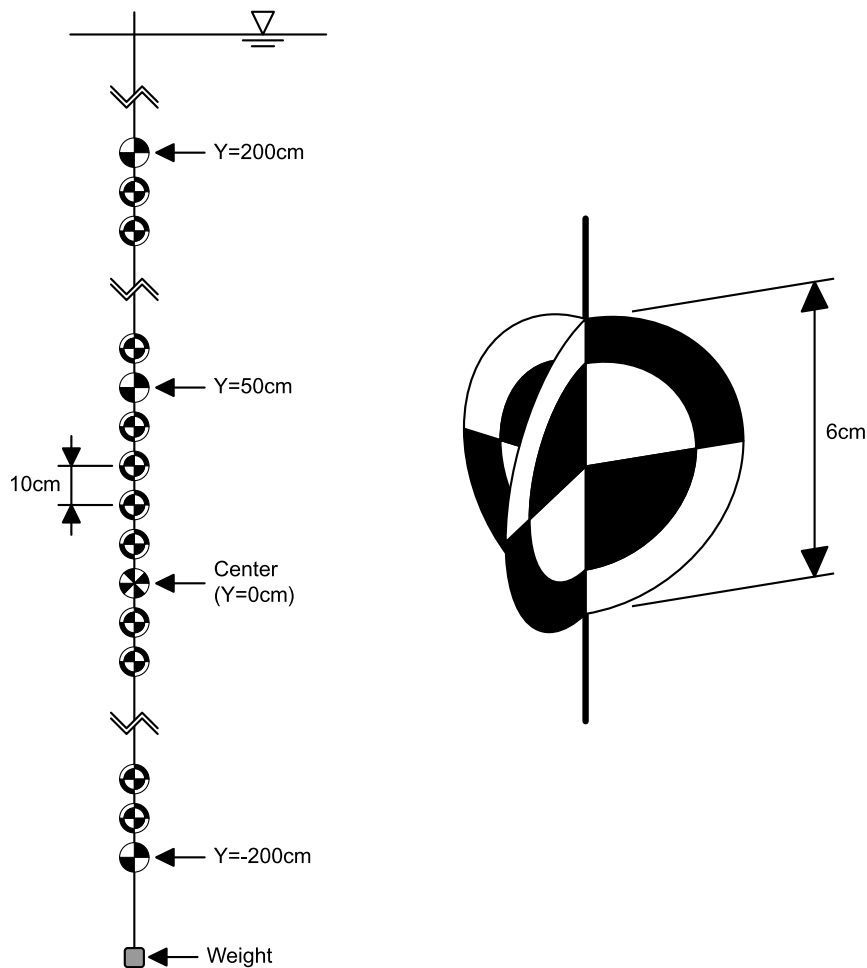


Fig. 2 Schematic drawing of optical target (right) and arrangement (left). Each optical target is consisted of three wings to be recognized from every horizontal direction.



Fig. 3 Stereo camera frame for indoor tank experiment. The frame reproduces the same camera arrangement as J-QUEST pressure housing.

われている(池上ら, 1991)。一方で, コントロールポイント数の増加による計測精度の向上は20個程度までで, それ以上増えても殆ど向上しない(Chen *et al.*, 1994), コントロールポイントの配置は均等にするよりも, 計測空間の外郭に沿うようにした方が計測精度が高い(Challis and Kerwin, 1992), 計測空間外での計測, 即ち外挿では, 計測空間からの距離が離れるほど計測精度が低下する(Wood and Marshall, 1986; Hinrichs and McLean, 1995)等の報告もある。そこで, 20個以上のコントロールポイントを, 計測空間内になるべく均等に配置した場合と, 計測空間の外郭に沿うように配置した場合の2通りの配置を設定し, 計測精度を比較することにした。いずれの場合も外挿が最小限になるように, 計測空間の外郭にある光学ターゲットを取り入れることにした。

4 歪曲の補正

焦点距離23mmのレンズは耐圧部に平面ガラスを使用しているため, 水中で使用すると画像に糸巻歪曲が生じる(岸川, 1990)。DLT法は画像上の非線形の歪曲を考慮していないため, 歪曲のある画像を用いた場合, 3次元空間座標を正確に記述できない可能性がある。そこで, フリーウェアとして提供されているAdobe Photoshop用のプラグイン・ソフトウェアPanorama tools(Dersch, 2001)の画像補正機能を利用して歪曲を補正した。補正の有無による計測精度の違いを比較した。

立体計測精度の検証

2種類のコントロールポイント配置の組み合わせ, 並びに歪曲の補正の有無により, 計4通りのキャリブ

Table 1 Calibration conditions

Distortion	Control points	
	uniform	edge
not corrected	Condition 1	Condition 2
corrected	Condition 3	Condition 4

レーション条件を設定し(Table 1), 立体計測精度を比較した。

一般にステレオカメラによる立体計測精度は, コントロールポイントの実際の位置と計測した位置の差(距離)の自乗平均の平方根であるRoot Mean Square error(以下, RMS error)によって評価される(Wood and Marshall, 1986; Hatze, 1988; Kwon and Lindley, 2000)。本研究では, 計測精度をさらに詳細に検証するため, コントロールポイントを含む, ステレオ計測可能な全ての光学ターゲットの位置を計測し, Z位置毎にRMS errorを求めるとともに, 誤差をX, Y, Z方向に分解して評価した。また, Z位置毎にX-Y平面上における誤差の分布を比較した。さらに, 魚の体長を計測する状況を想定して, Z位置毎に水平あるいは垂直に10cm間隔で並ぶ2つのターゲット間の長さを計測し, 誤差を検証した。

結 果

キャリブレーション

1 水槽試験

撮影した光学ターゲットの画像をFig. 4に示す。Fig. 4では, Z位置が同じである光学ターゲットの画像を1枚の映像に合成している。計測範囲内に捉えた光学ターゲットは計193個で, Z位置(Z=150, 200, 250, 300, 350cm)毎の内訳はそれぞれ, 5, 21, 35, 57, 75個であった。被写界深度の範囲から外れたZ=300, 350cmにおける画像は不明瞭であった。

2 コントロールポイントの配置

撮影された光学ターゲットの画像からコントロールポイントとして使用する光学ターゲットを選択した。選択にあたっては, Z=150~350cmにおける両眼視野を最大限網羅する計測空間が得られる様な配置とした。各Z位置における計測空間の断面形状はFig. 5のように紡錘形をしており, この範囲を概ね網羅し外挿を最小限にするには, 45個前後のコントロールポイントが必要であった。そこで, 46個のコントロールポイントを計測空間内になるべく均等に配置した場合(Fig. 5-A)と, 44個のコントロールポイントをFig. 5-Aと同等の計測空間の外郭に沿うように配置した場合(Fig. 5-B)の2通りの配置を設定した。

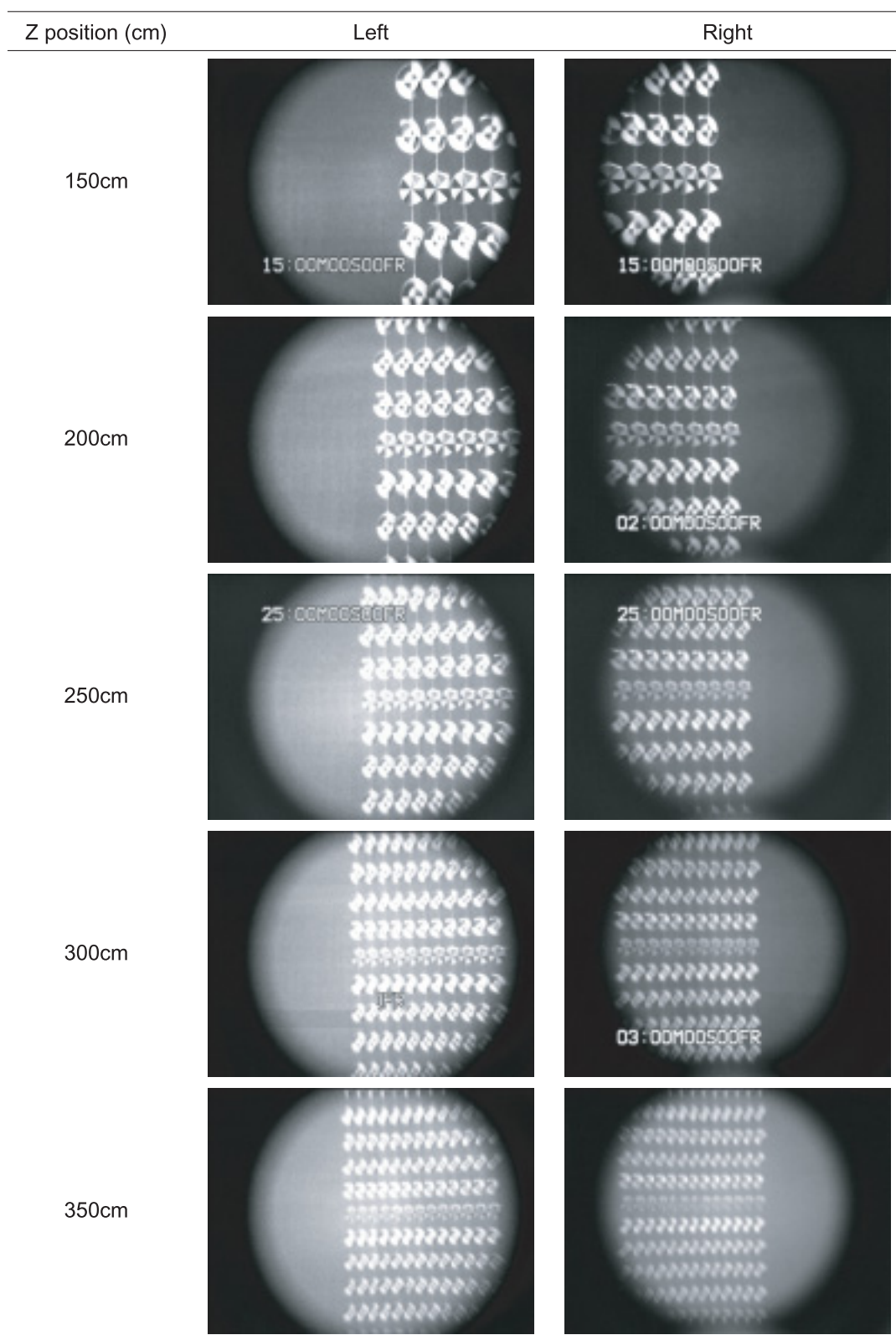


Fig. 4 Recorded images of optical targets. Targets recorded at the same Z position were collaged into an image.

3 歪曲の補正

歪曲を補正した画像をFig. 6 に示す。補正する前 (Fig. 4) は、画像の端に近づくにしたがって像が歪み、光学ターゲットの間隔が開いた。しかし、Panorama toolsのRemap機能を適用したところ、Fig.

6のように歪曲が補正され、光学ターゲットが縦横に直線的に配列する画像が得られた。このときの変換パラメータは、Convert from: Normal, Convert to: Fisheye hor., HFOV: 60deg.であった。

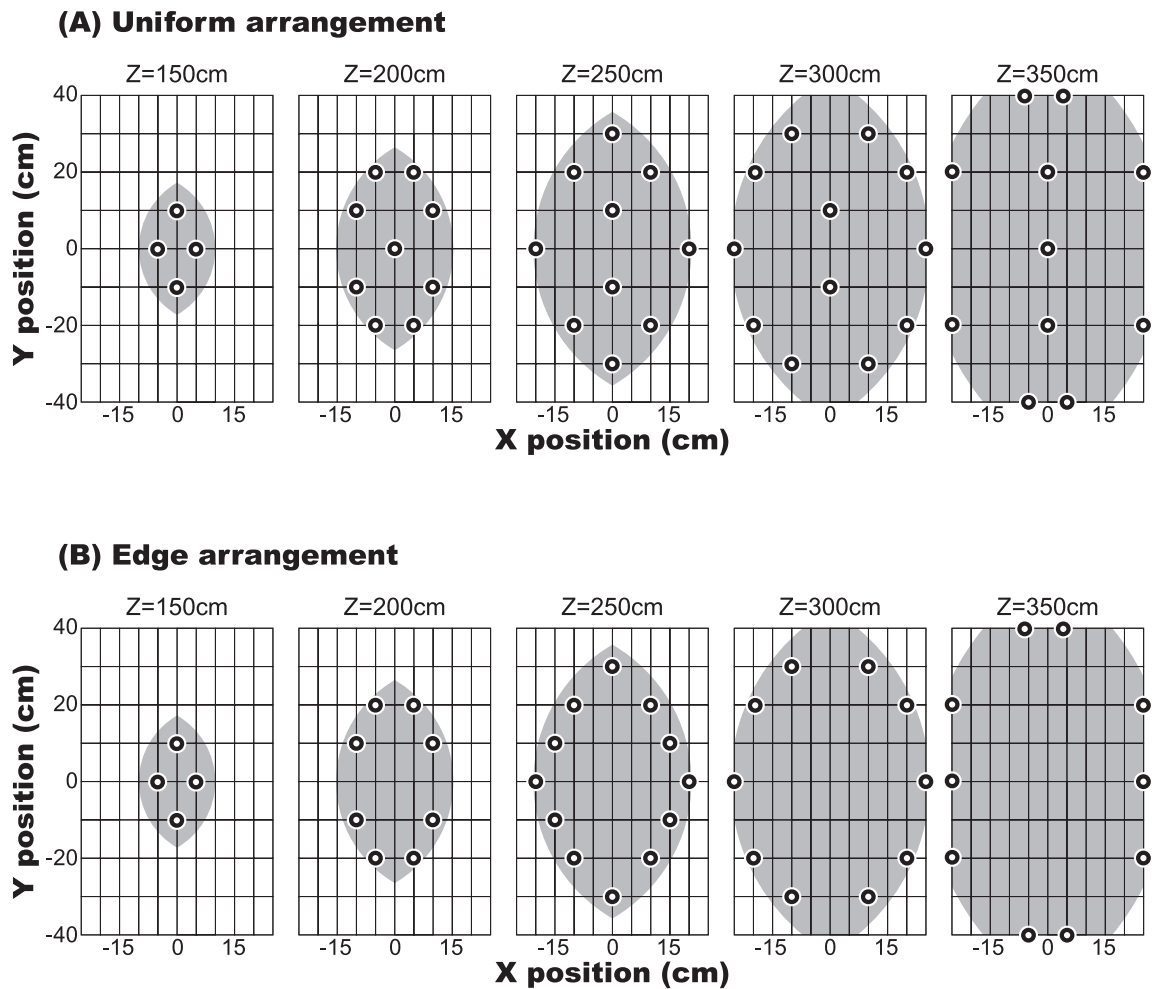


Fig. 5 Arrangement of control points. Gray areas are approximate stereo visual fields. Control points were arranged uniformly in the calibration space (A), or arranged on the edge of calibration space (B).

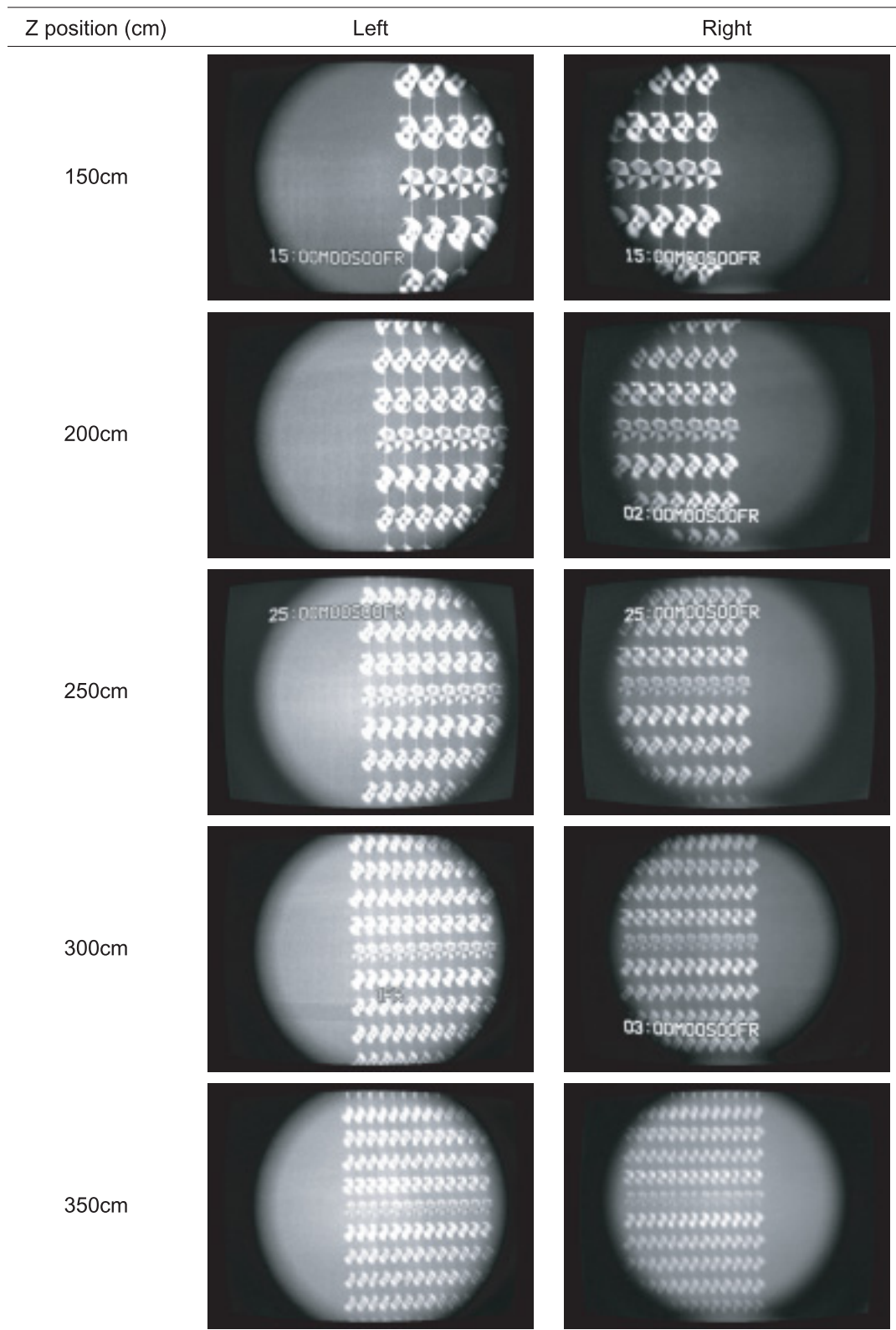


Fig. 6 Images of optical targets (distortion was corrected).

立体計測精度の検証

2種類のコントロールポイント配置，並びに歪曲の補正の有無による4通りのキャリブレーション条件において，光学ターゲットの位置を3次元計測した結果をTable 2に示す。Table 2では，Z位置毎にX，Y，Z方向の位置計測誤差の平均と分散，そしてRMS errorを示している。全ての条件で，RMS errorはカメラからの距離（Z位置）の増加に伴って増加した。また，誤差をX，Y，Z方向に分解したところ，殆どの誤差はZ方向に集中していた。Condition 2のRMS errorは，Z = 350cmを除く全てのZ位置においてCondition 1と差がなかった（ t -test, $p < 0.01$ ）。Condition 3と4の間では，全てのZ位置においてRMS errorに差がなかった（ $p < 0.01$ ）。Condition 3のRMS errorは，Z = 150cmを除く全てのZ位置においてCondition 1より小さかった（ $p < 0.01$ ）。同様に，Condition 4のRMS error

は，Z = 150cmを除く全てのZ位置においてCondition 2より小さかった（ $p < 0.01$ ）。即ち，ターゲット位置の立体計測精度に関して，コントロールポイントの配置の違いによる差は殆どなかったが，画像の歪曲を補正することによる改善が見られた。Condition 3と4では，Z = 150 ~ 200cmにおいて，RMS errorは約 0.8 ± 0.5 cm以内に収まり，概ね1cm程度までの誤差で位置を計測できることを確認した。

各Z位置におけるX-Y平面上の誤差の分布をFig. 7に示す。Table 2によると，殆どの誤差はZ方向に集中していたことから，ここではZ方向の誤差の分布のみを示した。Fig. 7は，Z方向の誤差の分布を等高線図にしたもので，実際の値からのずれ（誤差）の程度を色分けによって示している。薄い水色の部分が実際の値に最も近く，赤に近づくと過大（実際より遠く）に，青に近づくと過小（実際より近く）にZ位置を計測す

Table 2 Measurement errors in each calibration condition

Distance (Z position)	N	Measurement errors (cm)			
		X-direction average \pm SD	Y-direction average \pm SD	Z-direction average \pm SD	RMS error average \pm SD
Condition 1					
150	5	0.007 \pm 0.086	-0.061 \pm 0.057	1.364 \pm 1.158	1.423 \pm 1.073
200	21	-0.070 \pm 0.065	0.045 \pm 0.191	0.900 \pm 2.989	2.544 \pm 1.741
250	35	0.007 \pm 0.154	0.005 \pm 0.185	2.833 \pm 3.796	3.679 \pm 2.966
300	57	-0.085 \pm 0.214	-0.008 \pm 0.174	4.299 \pm 5.100	5.491 \pm 3.771
350	75	0.036 \pm 0.290	-0.210 \pm 0.274	5.807 \pm 5.730	7.028 \pm 4.141
Overall		-0.021 \pm 0.162	-0.046 \pm 0.176	3.041 \pm 3.754	4.033 \pm 2.738
Condition 2					
150	5	0.035 \pm 0.101	-0.067 \pm 0.057	1.621 \pm 1.154	1.632 \pm 1.144
200	21	-0.059 \pm 0.078	0.042 \pm 0.183	1.397 \pm 3.027	2.701 \pm 1.897
250	35	-0.006 \pm 0.176	0.007 \pm 0.157	3.661 \pm 3.885	4.300 \pm 3.148
300	57	-0.127 \pm 0.226	-0.001 \pm 0.147	5.607 \pm 5.354	6.369 \pm 4.412
350	75	-0.036 \pm 0.301	-0.204 \pm 0.295	7.890 \pm 5.997	8.655 \pm 4.833
Overall		-0.039 \pm 0.177	-0.045 \pm 0.168	4.035 \pm 3.883	4.732 \pm 3.087
Condition 3					
150	5	-0.006 \pm 0.073	-0.075 \pm 0.090	-0.313 \pm 0.415	0.399 \pm 0.340
200	21	-0.038 \pm 0.086	0.023 \pm 0.078	0.197 \pm 0.947	0.805 \pm 0.523
250	35	0.022 \pm 0.107	0.099 \pm 0.122	0.536 \pm 1.617	1.402 \pm 0.962
300	57	-0.047 \pm 0.106	0.070 \pm 0.172	1.324 \pm 2.060	1.953 \pm 1.481
350	75	-0.008 \pm 0.223	-0.133 \pm 0.275	-1.986 \pm 3.730	3.581 \pm 2.249
Overall		-0.015 \pm 0.119	-0.003 \pm 0.147	-0.048 \pm 1.754	1.628 \pm 1.111
Condition 4					
150	5	-0.031 \pm 0.073	-0.083 \pm 0.091	-0.334 \pm 0.428	0.427 \pm 0.343
200	21	-0.068 \pm 0.083	0.026 \pm 0.072	0.144 \pm 0.955	0.789 \pm 0.546
250	35	-0.011 \pm 0.105	0.118 \pm 0.112	0.431 \pm 1.600	1.354 \pm 0.951
300	57	-0.083 \pm 0.101	0.103 \pm 0.158	1.133 \pm 1.994	1.842 \pm 1.371
350	75	-0.047 \pm 0.234	-0.088 \pm 0.287	-2.297 \pm 3.708	3.719 \pm 2.286
Overall		-0.048 \pm 0.119	0.015 \pm 0.144	-0.184 \pm 1.737	1.626 \pm 1.099

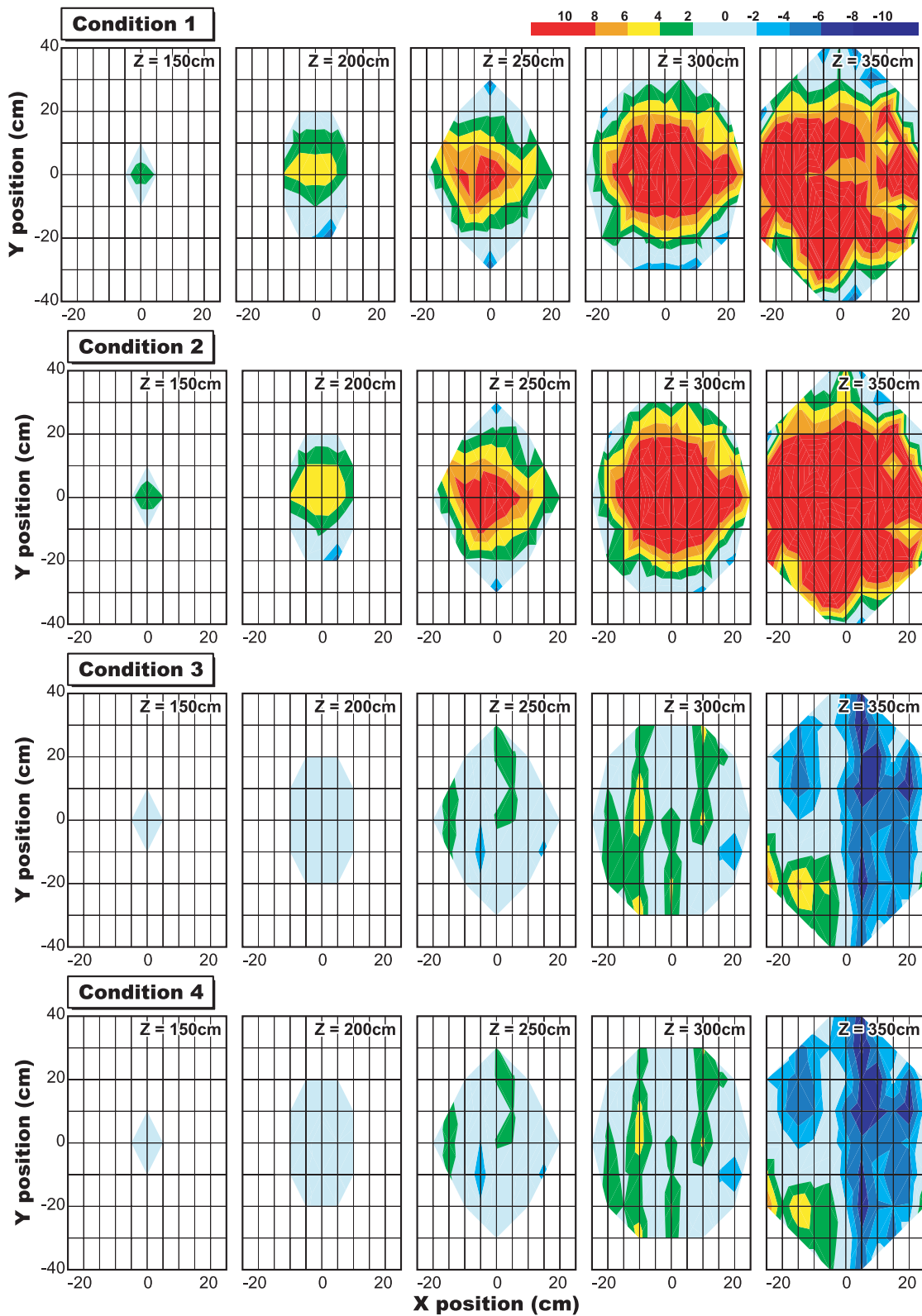


Fig. 7 Contour map of measurement error in Z-direction at each Z position.

ることを意味する。いずれの条件においても、誤差はZ位置の増加に伴って増加する傾向が見られた。画像の歪曲を補正しない場合（Condition 1, 2）では、計測範囲の縁辺部の誤差は小さく、中心に行くに従って過大に計測する傾向が見られた。画像の歪曲を補正した場合（Condition 3, 4）では、補正しない場合（Condition 1, 2）に比べて誤差は明らかに減少したが、Z位置の増加に伴って過大、あるいは過小に計測する箇所が増加した。コントロールポイントの配置の違いによる差は明瞭でなかった。

2つのターゲット間の長さを計測した結果をTable 3に示す。ターゲット位置を計測した場合と同様に、長さを計測した際の誤差はZ位置の増加に伴って増加した。しかし、長さを計測した際の誤差は、位置を計測した際のRMS errorに比べて明らかに小さかった。

Condition 1と2の間、そしてCondition 3と4の間では、全てのZ位置において誤差に差がなかった（ $p < 0.01$ ）。一方で、Condition 1と3の間、そしてCondition 2と4の間では、一部のZ位置において誤差に差があった（ $p < 0.01$ ）。即ち、ターゲット間の長さの立体計測精度に関しても位置の場合と同様に、コントロールポイントの配置の違いによる差は殆どなかったが、画像の歪曲を補正することによる改善が見られた。ターゲットの配列方向による誤差の違いは、Condition 3, 4のZ = 350cm以外では見られなかった（ $p < 0.01$ ）。Condition 3と4では、Z = 350cmで水平方向に並んだターゲットを計測した場合を除き、測定誤差は約 0.3 ± 0.4 cm未満に収まり、概ね1cmを下回る誤差で長さを計測できることを確認した。

Table 3 Measurement errors of 10cm interval between two optical targets in each calibration condition

Distance (Z position)	Measurement errors (cm)			
	Horizontal		Vertical	
	N	average \pm SD	N	average \pm SD
Condition 1				
150	1	0.206	2	0.292 \pm 0.036
200	11	0.357 \pm 0.354	16	0.646 \pm 0.471
250	23	0.630 \pm 0.782	26	0.866 \pm 0.738
300	43	0.873 \pm 1.168	46	1.341 \pm 1.022
350	57	1.208 \pm 1.470	64	1.945 \pm 1.863
Overall		0.655 \pm 0.943		1.018 \pm 0.826
Condition 2				
150	1	0.260	2	0.294 \pm 0.044
200	11	0.472 \pm 0.398	16	0.665 \pm 0.478
250	23	0.838 \pm 0.966	26	0.905 \pm 0.758
300	43	1.193 \pm 1.471	46	1.403 \pm 1.043
350	57	1.492 \pm 1.747	64	2.031 \pm 1.902
Overall		0.851 \pm 1.145		1.060 \pm 0.845
Condition 3				
150	1	0.005	2	-0.069 \pm 0.149
200	11	0.063 \pm 0.102	16	0.044 \pm 0.127
250	23	0.394 \pm 0.480	26	0.102 \pm 0.143
300	43	0.283 \pm 0.339	46	0.194 \pm 0.209
350	57	0.849 \pm 1.162	64	0.193 \pm 0.416
Overall		0.319 \pm 0.521		0.093 \pm 0.209
Condition 4				
150	1	0.000	2	-0.072 \pm 0.141
200	11	0.061 \pm 0.095	16	0.037 \pm 0.121
250	23	0.388 \pm 0.488	26	0.091 \pm 0.139
300	43	0.264 \pm 0.321	46	0.180 \pm 0.212
350	57	0.841 \pm 1.159	64	0.179 \pm 0.418
Overall		0.311 \pm 0.516		0.083 \pm 0.206

考 察

本研究では、屋内の水槽を利用して、水中で正確なコントロールポイントを撮影する試験方法を用いた。陸上におけるコントロールポイントの撮影では通常、キャリブレーション・フレームと呼ばれる堅牢な立体構造体に光学ターゲットを描き、ステレオカメラの計測空間に配置する (Wood and Marshall, 1986; Challis and Kerwin, 1992; Chen *et al.*, 1994)。しかし、我々は水中で容易に正確な位置に定位させることを考慮して、伸縮性の殆どない鋼線入りワイヤーに光学ターゲットを取り付け、水槽内に垂下する方法を採った。この方法では、ワイヤー下端にウェイトを取り付けることで、水中で光学ターゲットを容易に垂直に配列できる。

画像の非線形な歪曲を補正する方法としては、非線形要素を考慮したModified DLT (Hatze, 1988), quadratic functionを用いたZ方向の誤差の補正 (Chen *et al.*, 1994), 計測空間を複数に分割してキャリブレーションを行うLocalized calibration method (Kwon and Lindley, 2000) 等が報告されている。しかし、これらは試験的なアプローチで、市販の画像計測ソフトウェアには実装されておらず、導入は必ずしも容易でない。本報では、キャリブレーション手法自体は通常のDLT方を用い、キャリブレーション前に画像の歪曲を補正することで、立体計測精度を向上することができた。

一方で、コントロールポイントの配置の変更は、立体計測精度の向上に寄与しなかった。画像の歪曲を補正しなかった場合には、コントロールポイントを計測空間の外郭に配置することで、むしろ立体計測精度は悪化した。これは、コントロールポイントの最適な配置は、使用する光学系により異なることを示唆している。コントロールポイントの配置については、光学系毎に複数の条件を検証する必要がある。

2つのターゲット間の長さを計測した際の誤差は、ターゲット位置を計測した際のRMS errorに比べて明らかに小さかった。これは、ターゲット位置を計測した際に生じる誤差がランダムなものではなく、一定の傾向を持つことを示唆している。本報では、同じZ位置にある2つのターゲット間の長さのみを扱ったが、これは魚の体軸がカメラの光軸に対して垂直を成す場合に相当する。ステレオ計測で魚の体長を計測するためには、画像上で吻端と尾端が明瞭に視認される必要がある。しかし、魚の体軸がカメラの光軸に対して水平に近い状態では、吻端あるいは尾端のいずれかが魚体に隠れ画像上で視認できない。そのため、実質的に

ステレオ計測で体長を計測するためには、体軸がカメラの光軸に対して垂直に近い状態で撮影される必要がある。したがって、長さを計測する場合について本報で得た誤差は、実際に魚の体長を計測する場合に概ね準ずると考えられる。しかし厳密には、魚体を模したターゲットを様々な角度で撮影する等、実際に魚を計測する状況に近い条件で試験を行い、立体計測精度を求める必要がある。

本報によって、J-QUESTのステレオカメラが概ね1cm以内の誤差で魚の体長を計測できることを実証した。しかし、魚の位置を計測する場合は、Z位置が2mより離れると1cmを上回る誤差が生じた。立体計測精度を向上できる可能性として、前述の補正方法 (Hatze, 1988; Chen *et al.*, 1994; Kwon and Lindley, 2000) を適用することが考えられる。

本報では、実海域調査時における被写界深度の設定の問題で、Z方向の範囲はZ = 350cmまでの検証となったが、J-QUESTのステレオカメラで想定するZ = 500cm程度までの計測範囲 (高橋ら, 2004) について、立体計測精度を検証する必要がある。また、焦点距離11mmのレンズを装着した場合の立体計測精度についても検証する必要がある。これらについては今後の検討課題としたい。

文 献

- Abel-Aziz Y. I., and Karara H. M., 1971: Direct linear transformation from comparator coordinates into object space in close-range photogrammetry. in ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry, American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1-18.
- Challis J. H., and Kerwin D. G., 1992: Accuracy assessment and control point configuration when using the DLT for photogrammetry. J. Biomechanics, 25(9), 1053-1058.
- Chen L., Armstrong, C. W., and Raftopoulos D. D., 1994: An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. J. Biomechanics, 27(4), 493-500.
- Dersch H., 2001: Panorama tools (<http://home.no.net/dmaurer/~dersch/Index.htm>)
- 独立行政法人水産総合研究センター遠洋水産研究所・水産工学研究所, 2004: 平成16年度俊鷹丸アカイカ資源および餌環境調査速報. 14pp.
- 古澤昌彦, 1990: 水産資源推定のための超音波による

- 魚群探知に関する研究．水工研報告，11，173-249．
- Hatze H., 1988: High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. *J. Biomechanics*, 21(7), 533-538.
- Hinrichs R. N., and McLean S. P., 1995: NLT and extrapolated DLT: 3-D cinematography alternatives for enlarging the volume of calibration. *J. Biomechanics*, 28(10), 1219-1223.
- 池上康男，桜井伸二，矢部京之助，1991：DLT法．*J. Sports Sci.*, 10(3), 191-195．
- 岸川利郎，1990：ユーザーエンジニアのための光学入門，第1版，オプトロニクス社，東京，pp. 121-129．
- Kwon Y. H., and Lindley S. L., 2000: Applicability of four localized-calibration methods in underwater motion analysis. in XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports, International Society of Biomechanics in Sports, Hong Kong, 48-55.
- 澤田浩一，高尾芳三，高橋秀行，安部幸樹，奥村都誉司，小林朝子，杉本守弘，2004：水産調査のための音響・光学複合システムJ-QUESTの開発　音響システムの開発　．*水工研技報*，26，23-34．
- 高橋秀行，澤田浩一，高尾芳三，安部幸樹，町田憲司，菊元千史，杉本守弘，2004：水産調査のための音響・光学複合システムJ-QUESTの開発　光学システムの開発　．*水工研技報*，26，35-45．
- Wood G. A., and Marshall R. N., 1986: The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. *J. Biomechanics*, 19(9), 781-785.