

## FISCHOMステレオカメラの立体計測精度の評価

高橋秀行\*1・松田秋彦\*2・赤松友成\*3

### Evaluation of the Three-Dimensional Measurement Accuracy of FISCHOM Stereo Camera System

Hideyuki TAKAHASHI\*1, Akihiko MATSUDA\*2, and Tomonari AKAMATSU\*3

**Abstract:** FISCHOM (Fish school monitoring system) is an effective and inexpensive tool for quantitative survey of artificial fish reefs, consisted of an echo sounder, a catadioptric stereo camera system, and a programmable timer to control the sensors. In this paper, we have evaluated the three-dimensional measurement accuracy of the catadioptric stereo camera system in FISCHOM. The camera system was calibrated by the direct linear transformation (DLT) method. The DLT method does not need any camera constants, but the stereo camera needs to photograph several control points (which the three-dimensional positions are already known) in advance for calibration. To obtain the images of control points, FISCHOM was fixed at the edge of an experimental tank, and optical targets were hung down on below an electric carriage on the tank and their images were recorded by FISCHOM. The carriage was moved to keep the targets in the visual field at ranges of 200cm to 500cm from FISCHOM. 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. Average RMS error was about 3cm within 500cm from FISCHOM. Known lengths between two neighboring targets arranged perpendicular to the optical axis of the stereo camera were also measured and the errors were evaluated. The average error was about 2.5% within 500cm from FISCHOM. Results are acceptable to gain the quantitative information of structure of reef fish assemblages.

**Key words:** artificial fish reef, stereo camera, three-dimensional measurement

#### 1. はじめに

200海里体制の定着に伴い沿岸漁業の重要性が増す中、人工魚礁も副漁具的なものから資源培養型機能を有する施設へと転換を求められている（高木ら，2000；高木ら，2001）。人工魚礁の効果を詳細に調べるためには、蜻集魚群の生態を知る必要があり、長期間にわたる蜻集状況の時系列変化の情報が求められる。人工魚礁の主たる調査手段はダイバーによる目視

調査であるが、調査中は船舶を魚礁上に係留する必要があり、また安全上の観点から調査時期や時間帯の制限を受けるため、魚礁における魚群生態を論じるに十分な情報を得ることはできない（岡本ら，1979）。また、近年発達著しい高層魚礁（高木ら，2002；森脇ら，2005）を対象とする調査では、潜水深度が大きくなるためダイバーのリスクが増加する。

そこで我々は、ダイバー調査に代わる、あるいはダイバー調査を補完する調査手段を得ることを目的として、魚類蜻集モニタリングシステムFISCHOM（Fish

SCHOOl Monitoring system)を開発した(高橋ら, 2004)。FISCHOMは、小型の魚群探知機とステレオ方式のデジタルカメラを搭載した音響・光学複合型定点観測装置であり、タイマー制御による長期間の間欠駆動が可能である。FISCHOMを人工魚礁に設置して定点観測を行えば、蜻集魚群に関する様々な定量情報が得られ、人工魚礁の効果調査の高度化や、蜻集魚の生態の解明に資することが期待できる。

FISCHOM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定量情報の信頼性を語る上で肝要である。そこで本報では、FISCHOMのステレオカメラのキャリブレーション方法及びその計測精度について報告する。

## 方 法

### ステレオカメラの仕様

FISCHOMでは、鏡を用いて1台のカメラの撮影範囲を分割してステレオ化を実現する、catadioptric(鏡とレンズを組み合わせた光学系の意) stereo方式(Gluckman *et al.*, 2002)を採用している。カメラとしては高解像度のデジタルカメラ(ニコン(株)D1x)に焦点距離28mmのレンズ(ニコン(株)Ai AF Nikkor 28mm F1.4D)を装着して使用し、カメラの撮影範囲を4枚の鏡を用いて左右に2分割している(Fig. 1)。2台のカメラを用いる場合のカメラの配置間隔に相当する基線長は30cm、光軸の交差角は0度(平行)である(Table 1)。

### キャリブレーション

#### 1 原 理

画像から3次元の空間座標を得るには、異なる方向

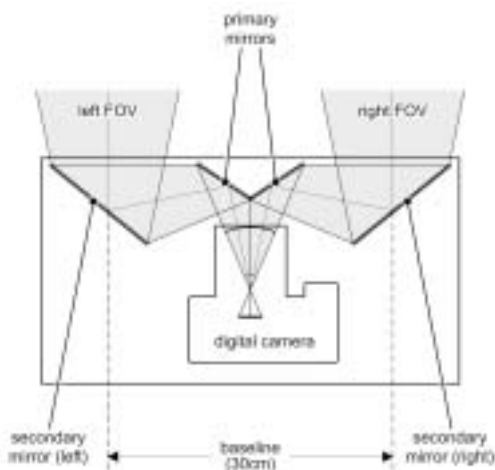


Fig 1 Arrangements of a camera and mirrors of catadioptric stereo camera system in FISCHOM.

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)。我々は、再構築の手法として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)を撮影した画像を用いて、3次元座標を再構築する。DLT法では、実空間座標とカメラで撮影した画像上の平面座標の関係が、11の係数を含む2つの方程式によって表される。実空間での座標が既知の6個以上のコントロールポイントと、その画像上での座標値が得られれば、計算により11個の係数の値が定まり、実空間座標と画像平面座標の関係式が求まる。DLT法は、カメラの配置に関する制約が少なく、3視点以上の多視点ステレオ計測にも対応できるなど、汎用性が高い(池上ら, 1991)。本報では、DLT法によるステレオ計測機能を搭載する市販の画像計測ソフトウェア((株)ライブラリー Move-tr/3D)を用いた。

### 2 水槽試験

正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、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. 2)。実

Table 1 Specification of FISCHOM stereo camera system

Camera	Nikon D1x
Resolution (H × V dots)	3008 × 1960
Baseline length (cm)	30
Convergence angle (deg.)	0
Horizontal FOV* (deg.)	17
Vertical FOV* (deg.)	21

\* field of view

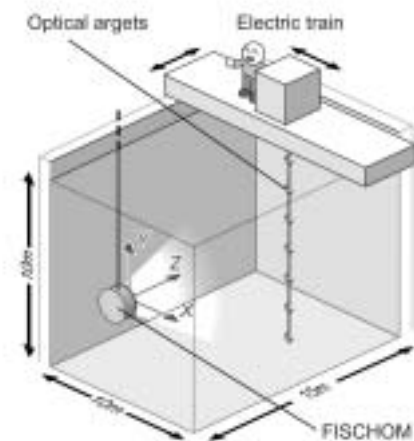


Fig 2 Experimental set-up of calibration and evaluation of measurement accuracy of FISCHOM stereo camera system.

験方法としては、高橋ら（2005）がステレオ方式テレビカメラのキャリブレーションを行った際にコントロールポイントの画像を得た手法とほぼ同様の方法を用いた。FISCHOMは水槽壁面に水平に安定するように吊り下げた。撮影対象とするターゲットは、水槽上で走行・横行が可能な電動台車の架台に吊り下げた。ターゲットは、中心を視認できるように彩色した直径6cmの円形状とし、これを伸縮性が殆どない鋼線入りワイヤーに10cm間隔で41個取り付け付けた。ワイヤー下端にウェイトを取り付け、ターゲットが鉛直方向に配列されるようにした。電動台車の位置表示値（台車制御用PC上において0.1cm単位で表示される）から、カメラとターゲットの位置関係を確認した後、ターゲットの撮影を行った。

計測空間の座標系は、FISCHOMの前面中心を原点とし、基線方向をX軸（右側の撮影範囲の側が+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。

ターゲットをFISCHOMの前方Z=200, 300, 400, 500cmの位置に順次配置し、それぞれのZ位置において両眼視野（分割された2つの視野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10cmずつ（Z=500cmの一部では30cmずつ）移動し、撮影を行った（Fig. 3）。

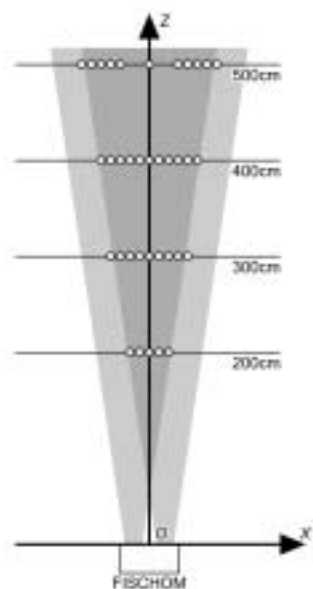


Fig. 3 Horizontal arrangements plan of optical targets (open circles). Light gray areas mean visual fields of right and left channels of stereo camera, and dark gray area means stereo visual field. Optical targets were arranged to cover stereo visual field with regular interval of 10cm at Z=200, 300, 400, and 500cm (in part 30cm at Z=500cm).

### 3 コントロールポイントの配置

上記の水槽試験において撮影された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われている（池上ら、1991）。一方で、コントロールポイントの数は20個程度以上増えても計測精度は向上しない（Chen *et al.*, 1994）、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。そこで本報では、20個以上を目安になるべく外挿の範囲が少なくなるように配慮しつつ、コントロールポイントを計測空間内に均等に配置した。

### 4 歪曲の補正

FISCHOMではステレオカメラの構造上、以下の3点に起因する画像の歪みが生じると考えられる。即ち、デジタルカメラに装着しているレンズに内在する歪曲、鏡を用いて光路を反射している事による光路の不等長、光路が水中から耐圧容器の平面ガラス窓に入射する際に屈折することによる歪曲である。DLT法は画像上の非線形の歪みを考慮していないため、歪曲のある画像を用いた場合、3次元空間座標へ正確に変換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）を利用し、同ソフトウェアのRemapおよびPerspective機能を用いて歪曲を補正した。

補正の順序を以下に示す。始めに、レンズに内在する歪曲を補正するため、左右に分割する前の画像に対してRemap機能を適用した。次に、光路が水中からガラス窓に入射する際の屈折による歪曲を補正するため、画像を左右に分割し、それぞれの画像に対してRemap機能を適用した。最後に、鏡を用いたことによる光路の不等長を補正するため、Perspective機能を適用した。各機能を適用する際には、変換パラメータを試行錯誤的に調節し、ターゲットが縦横に直線的に配列する画像が得られるパラメータを求めた。

最終的に、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

画像の歪曲補正の有無により2通りのキャリブレーション条件を設定し、立体計測精度を比較した。

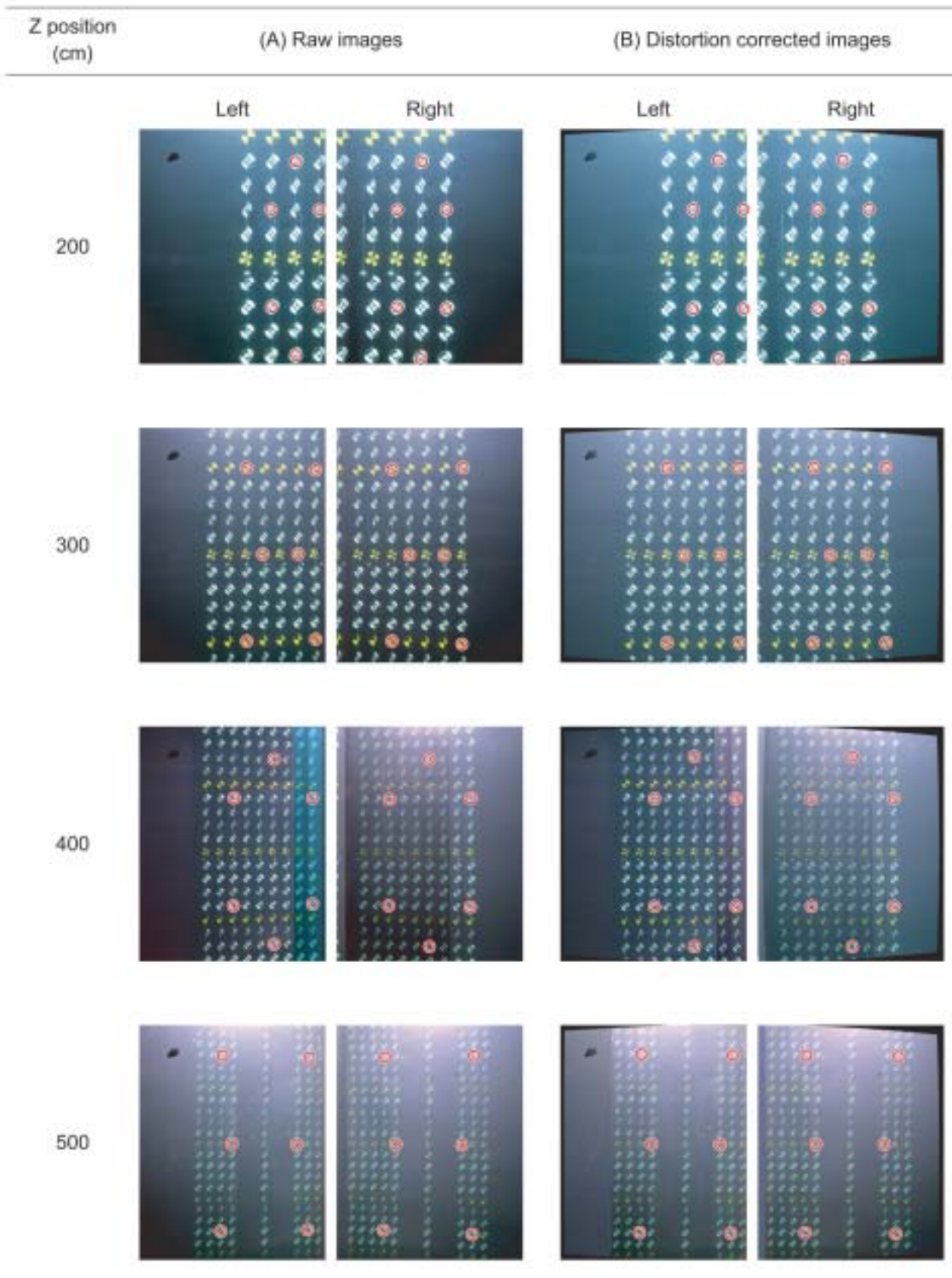


Fig. 4 Photographed images of optical targets. Targets recorded at the same Z position were collaged into an image. (A) raw images, (B) distortion corrected images. Targets marked by red open circles were used as control points of calibration.

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）。我々は、計測精度をさらに詳細に検証するため、撮影された全てのターゲットの位置をステレオ計測し、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。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並ぶ2つのターゲット間の距離を推定し、誤差を評価した。

## 結 果

### キャリブレーション

#### 1 水槽試験

撮影したターゲットの画像をFig. 4(A)に示す。Fig. 4では、Z位置が同じであるターゲットの画像を1枚の画像に合成している。計測範囲内に捉えたターゲットは、計385個で、Z位置（Z=200, 300, 400, 500cm）毎の内訳はそれぞれ、40, 73, 120, 152個であった。

#### 2 コントロールポイントの配置

撮影されたターゲットの画像から、Z位置毎に6点ずつ、計24点のターゲット（Fig. 4の赤丸部分）をコントロールポイントとして選択した。

#### 3 歪曲の補正

レンズに内在する歪曲を補正する際に適用したRemap機能の変換パラメータは、Convert from: Normal / Convert to: Fisheye hor. / HFOV: 40deg.であった。光路が水中からガラス窓に入射する際の屈折による歪曲を補正する際に適用したRemap機能の変換パラメータは、左側画像ではConvert from: Normal / Convert to: Fisheye hor. / HFOV: 15deg., 右側画像ではConvert from: Normal / Convert to: Fisheye hor. / HFOV: 25deg.であった。鏡を用いたことによる光路の不等長を補正する際に適用したPerspective機能の変換パラメータは、左側画像ではFormat: Normal / Turn to: 4deg., 右側画像ではFormat: Normal / Turn to: 5deg.であった。なお、左側画像については斜変形が見られたため、Panorama toolsのCorrect機能を適用して補正した（変換パラメータは、Shear / Vertical: -5）。歪曲を補正した画像をFig. 4(B)に示す。補正前（Fig. 4(A)）に対して、ターゲットが縦横に直線的に配列する画像が得られた。

### 立体計測精度の検証

歪曲補正の有無による2通りの条件において、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。両方の条件で、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。歪曲を補正した場合のRMS errorは、全てのZ位置において補正しなかった場合より小さくなった（*t*-test,  $p < 0.01$ ）。FISCHOMステレオカメラによる位置の測定誤差は、Z=500cmまでの範囲内で平均3cm程度に収まった。

2つのターゲット間の距離を計測した結果をTable 3に示す。ターゲットの配列方向による誤差の違いは、補正をしなかった場合におけるZ=400cm以外では見られなかった（ $p < 0.01$ ）。ターゲットの位置を計測した場合と同様に、距離を計測した際の誤差はZ位置の増加に伴って増加した。歪曲補正の有無による違いを比較すると、Z=200cmおよび500cmで垂直方向に並ぶターゲット間の距離を計測した場合に若干の違いが見られた（ $p < 0.01$ ）ものの、全体的には顕著な差はなかった。即ち、ターゲット間の距離の計測精度に、画像の歪曲補正は寄与しなかった。FISCHOMステレオカメラによる2点間の距離の測定誤差は、Z=500cmまでの範囲内で平均2.5%程度（例えば、長さ10cmの対象を計測した際に生じる誤差は0.25cm程度）に収まった。

## 考 察

FISCHOMのステレオカメラによってターゲットの位置を計測した際の誤差（RMS error）は、画像の歪曲補正により平均5cm程度から3cm程度に改善された。一方で、2つのターゲット間の距離を計測した際の誤差は、画像の歪曲補正による改善は見られず、いずれも平均2.5%前後であった。これは、ターゲットの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、即ち画像の歪曲等に起因するためと考えられる。そのため、ターゲットの位置を計測した場合には基準位置に対するずれが誤差として検出され、ターゲット間の距離を計測した場合には2つのターゲットの相対的な位置関係が正確に計測できたものと思われる。FISCHOMで撮影した画像に生じる歪曲は、前述した複数の要素の他に、製作過程で生じるカメラや鏡の固定位置のずれに起因する可能性も考えられるため、これを完全に補正することは難

Table 2 Measurement errors in each calibration condition

Distance (Z position)	N	Measurement errors (cm)							
		X - direction		Y - direction		Z - direction		RMS error	
		average	± SD	average	± SD	average	± SD	average	± SD
(A) Raw image									
200	40	- 0.687	± 0.165	1.058	± 0.313	- 0.476	± 2.447	2.531	± 1.187
300	73	0.237	± 0.252	- 0.569	± 0.325	1.886	± 3.565	3.633	± 1.868
400	120	1.254	± 0.377	- 2.153	± 0.601	2.633	± 6.210	6.602	± 2.895
500	152	- 0.736	± 0.697	1.386	± 1.059	- 0.059	± 9.614	8.277	± 5.248
Overall		0.017	± 0.373	- 0.070	± 0.575	0.996	± 5.459	5.261	± 2.800
(B) Distortion corrected image									
200	40	- 0.699	± 0.146	1.111	± 0.278	0.169	± 1.242	1.709	± 0.664
300	73	0.177	± 0.193	- 0.471	± 0.277	0.123	± 1.654	1.424	± 1.033
400	120	1.182	± 0.322	- 1.979	± 0.365	- 0.186	± 2.370	3.219	± 0.899
500	152	- 0.963	± 0.577	1.459	± 1.806	- 0.987	± 4.923	4.854	± 2.858
Overall		- 0.076	± 0.310	0.030	± 0.682	- 0.220	± 2.547	2.802	± 1.364

Table 3 Measurement errors of interval between two neighboring optical targets

Distance (Z position)	Measurement errors (%)			
	Horizontal		Vertical	
	N	average ± SD	N	average ± SD
(A) Raw image				
200	30	0.891 ± 1.098	36	0.284 ± 1.229
300	60	1.739 ± 2.043	66	1.609 ± 1.708
400	105	0.981 ± 2.340	112	2.707 ± 2.379
500*	133	3.990 ± 5.860	144	4.477 ± 5.943
Overall		1.900 ± 2.835		2.269 ± 2.815
(B) Distortion corrected image				
200	30	1.032 ± 1.249	36	1.392 ± 2.242
300	60	1.204 ± 1.933	66	1.468 ± 2.902
400	105	0.606 ± 2.796	112	2.398 ± 3.467
500*	133	3.913 ± 6.381	144	5.242 ± 8.019
Overall		1.689 ± 3.090		2.625 ± 4.158

\* Part of horizontal intervals are 30cm

しい。本報で使用した補正パラメタは、幾何学的に計測したり数学的に最適解を求めたりしたものではなく、歪曲が軽減される補正パラメタを試行錯誤的に模索したものである。しかし、人工魚礁に蝟集する魚の位置や大きさを把握するにあたっては、実用的な計測精度が得られたと考える。

本報では、同じZ位置にある2つのターゲット間の距離を扱ったが、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平行に近い状態では、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、ステレオ計測で魚の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。したがって本報で得た計測精度は、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。厳密には、魚体を模したターゲットを様々な向きで撮影する等、撮影現場における状況に近い条件で試験を行い、計測精度を求める必要があり、今後の課題としたい。

昨今発展の著しい音響的な水産資源調査において最も重要なパラメタであるターゲット・ストレングスは、対象とする魚の魚種、大きさ、遊泳姿勢や魚体の生理的状态等によって変化するとされている(古澤, 1990)。FISCHOMのステレオカメラを用いれば、魚種や大きさ、遊泳姿勢の推定が可能であり、音響資源調査を補完する情報の取得が期待される。ただし、遊

泳姿勢，即ち水平に対する魚の向きを知るためにはFISCHOM自体の水平に対する姿勢情報を得る必要がある。また，遊泳姿勢の計測精度の検証も今後の課題である。

本研究は，水産庁・水産基盤整備調査委託事業の一環として行われた。

### 参考文献

- Abdel-Aziz Y. I., and Karara H. M., 1971: Direct linear transformation from comparator coordinates into object space in close-range photogrammetry. *ASP Symp. Proc. on Close-Range Photogrammetry*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1-18.
- 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. Biomech.* 27(4), 493-500.
- Dersch H., 2001: Panorama tools (<http://home.no.net/dmaurer/~dersch/Index.htm>)
- 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．
- Gluckman J., and Nayar S. K., 2002: Rectified catadioptric stereo sensors. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 24(2), 224-236.
- Hatze H., 1988: High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. *J. Biomech.*, 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. Biomech.*, 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．
- Kwon Y. H., and Lindley S. L., 2000: Applicability of four localized-calibration methods in underwater motion analysis. *Proc. XVIII Int. Symp. Biomech. in Sports*, International Society of Biomechanics in Sports, Hong Kong, 48-55.
- 森脇晋平，為石起司，若林英人，松本洋典，田中伸和，齋藤寛之，2005：島根県浜田沖に沈設された高層魚礁に蝟集する魚類の経年変動．島水試研報，12，1-6．
- 岡本峰雄，黒木敏郎，村井徹，1979：人工魚礁近傍の魚群生態に関する基礎的研究-I 魚群量の予備調査，日水誌，45(9)，1085-1090．
- 高木儀昌，森口朗彦，木元克則，新井健次，蓮尾泰三，中村英夫，木村光，2000：高層魚礁の開発と効果，水工研技報，22，1-14．
- 高木儀昌，蓮尾泰三，花井正次，木村光一，2001：高層魚礁の開発と実用化．水産工学，38，139-144．
- 高木儀昌，森口朗彦，伊藤靖，石岡昇，新井健次，2002：山口県における高層魚礁の調査結果．水工研技報，24，31-42．
- 高橋秀行，松田秋彦・高木儀昌，赤松友成，2005：光学・音響複合型魚群観測システムFISCHOMによる人工魚礁蝟集魚群の定量的な観測．水産工学，41，261-265．
- 高橋秀行，澤田浩一，高尾芳三，安部幸樹，2005：J-QUESTステレオTVカメラシステムの立体計測精度の検証．水工研技報，27，81-92．
- Wood G. A., and Marshall R. N., 1986: The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. *J. Biomech.*, 19(9), 781-785.