

機関番号：3 2 4 0 9

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：2 0 5 6 0 4 0 1

研究課題名 (和文) 自由多視点魚眼カメラ画像による高精度 3 次元形状計測法の研究

研究課題名 (英文) A high precision 3D shape measurement method using fish-eye camera images from free and multiple viewpoints

研究代表者

石井 郁夫 (ISHII IKUO)

埼玉医科大学・保健医療学部・教授

研究者番号：8 0 0 1 8 4 8 1

研究成果の概要 (和文): 医療用近接形状計測への適用を考慮した高精度 3 次元形状計測法を開発した。計測距離の自由度を大きくするために被写界深度が大きく超広角撮影が可能な魚眼カメラを用いた。まず、歪みの大きい魚眼画像から空間ベクトルを高精度に取得するために、魚眼カメラの内部パラメータの高精度較正法を開発した。つぎに、少数の撮影画像から物体上の多数点の奥行き値を高精度で取得する方法として輝度比法を開発した。これらの技術を活用して、新しい高精度自由視点 3 次元計測法を開発した。

研究成果の概要 (英文): A high precision 3D shape measurement method in consideration of the application for medical close range finder was developed. A fish-eye camera with very large depth of field and very wide optic angle was used to enlarge the degree of freedom of measuring distance. By the first step, a high precision calibration method of fish-eye camera was developed to acquire high precision space vectors from high distortion fish-eye camera images. Next, a high precision extraction method of space vectors beyond the object surface from minor camera images named brightness ratio method was developed. The new high precision 3D shape measurement method using fish-eye camera images from free and multiple viewpoints was developed using these technologies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：3 次元形状計測，アクティブステレオ法，魚眼カメラ，カメラパラメータ校正，輝度比法，自由視点形状計測

1. 研究開始当初の背景

変形性疾患の経時観察などの医療用として3次元形状計測装置(レンジセンサ)が利用されることがある。多くの場合、光切断法またはパターン投射法によるアクティブステレオ方式の可搬型レンジセンサが用いられる。この方式は簡易で高精度という特徴があるが、精度を維持するためにステレオ対の位置関係を固定するので、必要な領域を必要な分解能で計測したいという自由度が制限される。また、部分形状を接合して全体を再構成する際に位置あわせの問題が生じる。これらの問題を解決した自由度の高い簡易で高精度な3次元形状計測法が望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、医療用の近接3次元計測に適用することを念頭に、計測範囲と形状分解能に関する自由度が極めて大きく、かつ簡易な機材で実現できる3次元形状計測法の実現を目的とする。計測方式は比較的簡易で高精度が期待できるアクティブステレオ法を採用する。魚眼カメラとパターン投光用液晶プロジェクタを採用する。

魚眼カメラを採用する理由は次の2点である。近接3次元計測の場合、測定距離によるカメラのフォーカス調節が必要になるが、調節によりカメラ内部パラメータが変化し計測精度が低下する。魚眼カメラは被写界深度が深く、固定焦点で撮影距離の変更が可能であるためカメラ内部パラメータが変化しない。

計測距離と計測範囲に自由度を持たせるにはステレオ対の位置関係を自由に設定する必要があるが、3次元計測にはそれらの外部パラメータを取得する必要がある。この機能を魚眼カメラの超広角性を活用して実現する。

ステレオ3次元計測の高精度化には、カメラ撮影画像とパターン投光器双方から空間へ向かうベクトルを正確に求める必要がある。魚眼カメラ画像は射影関数からの誤差が大きく広視野角であるため、視野角全体にわたって内部パラメータの高精度校正を行わなければならない。現状では適切な校正法が見出されていないので、校正法の確立が課題である。

投光器に液晶プロジェクタを採用する理由は次の2点である。自由視点3次元計測ではカメラとプロジェクタの外部パラメータの取得が必要になる。2値格子パターン投射による方法が一般的であるが、距離変化で生じるパターン投射像のぼけによるエッジ抽出誤差により校正精度に影響を与える。ぼけの影響が少ないエッジに輝度傾斜を持たせたパターンを用いることにより高精度化が期待できる。ステレオ計測の簡便化には、少ない撮影画像数で多数の奥行き値を取得可能な方法が必要になる。従来、プロジェクタを用いた

位相シフト法が開発されているが、ここではさらに簡易で高精度化が期待できる輝度比法を開発し適用する。

上記のような要素技術の開発を支えとして高精度な自由視点3次元形状計測法を実現する。

3. 研究の方法

(1) 魚眼カメラ内部パラメータの高精度校正法

魚眼カメラは超広角であるため、1画素あたりの空間分解能が低いこと、レンズのひずみや色収差が大きいこと、画像周辺部のぼけや明度低下が大きいことなどの欠点を持つ。魚眼レンズの立体射影方式、等距離射影方式、等立体角射影方式、射影方式のいずれかをを用いて周辺部を含む画像全体の表現をモデル化すると共に、Wengらのひずみモデルを組み合わせ、画像全域にわたって高精度に適用可能な内部パラメータを設定した。さらに、魚眼画像の全領域を一括して校正するために、撮影画像の仮想球面への再投影像を幾何学的に解析して内部パラメータを求めた。

内部パラメータは、画像座標 u, v 上の光学中心座標 C_u, C_v 、画素サイズと焦点距離の比 f_u, f_v ならびにWengのひずみ成分を表す5個のパラメータである(カメラモデルの詳細は発表雑誌論文(1)p.622参照)。校正には水平平行線群と垂直平行線群を切替えてLCDに表示し、カメラの位置姿勢を変更しながら複数組撮影する。それらをカメラ焦点を中心とする仮想球面上に再投影する(図1)。

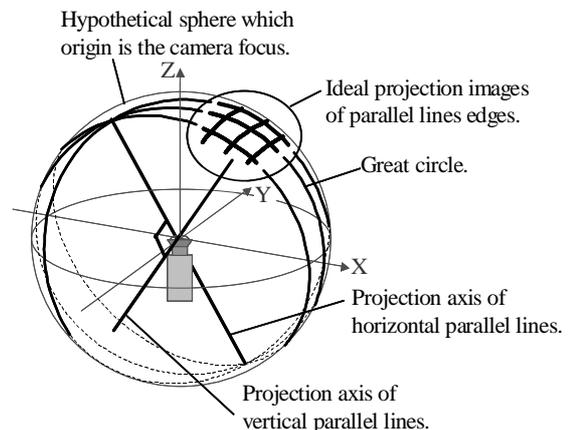


図1 仮想球面と理想的な格子投影像

理想的な内部パラメータで再投影された像は球の大円の一部となる。平行線が作る大円は球の中心を通る1本の軸(平行線投影軸)を通る。垂直と水平の平行線が作る2つの平行線投影軸は直交する、という幾何学的性質を持つ。校正で理想的な再投影像と実際の再投影像との角度差を評価値とし、3つの性質を同時に最もよく満たすパラメータを

Powell 及び Brent の最適化法により求める。視野角が大きい魚眼カメラでは、特にレンズの非点収差、湾曲収差により画像周辺部において大きなボケが現れる。また、倍率色収差の影響も大きく RGB 色成分それぞれで異なる歪曲を発生させる。白黒 2 値垂直平行線校正パターンの撮影像 (図 2(a)) について、画像の中央部 A_1 と周辺部 A_2 の RGB 各色成分の u 軸方向の輝度変化を求めた。結果を同図 (b), (c) に示す。 A_1 に比べ A_2 で明度低下とボケによりエッジ位置が不鮮明になる。

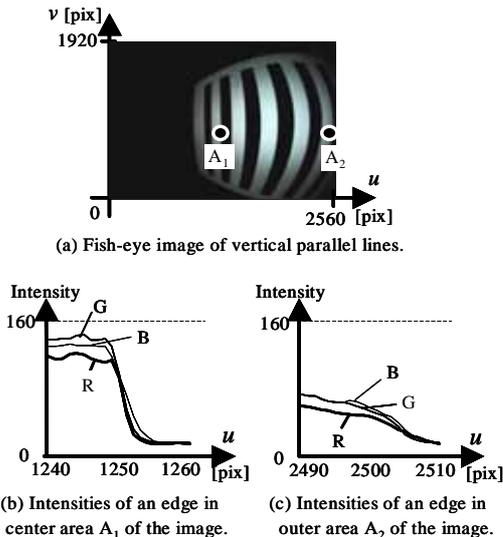


図 2 2 階調パターン撮影像のエッジの輝度変化

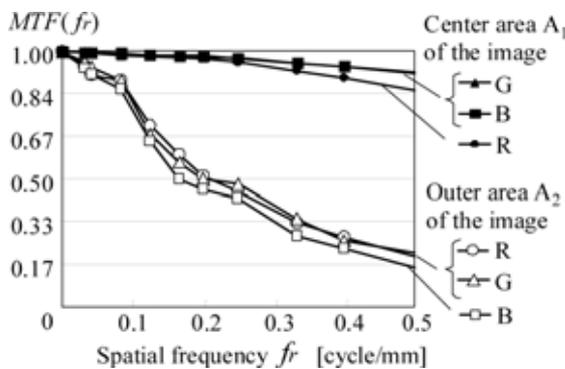
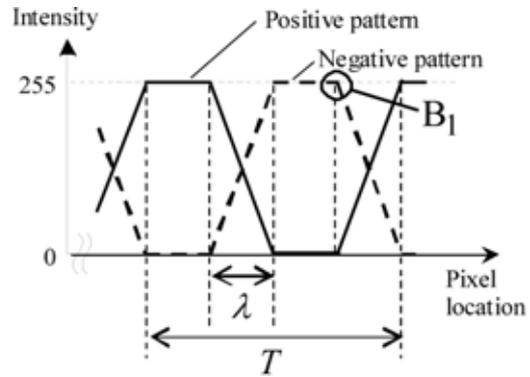


図 3 魚眼カメラの MTF

ボケの定量解析のため MTF (輝度正弦波パターンの撮影像における空間周波数 f_r に対するコントラスト比) の測定結果を図 3 に示す。画像周辺部で MTF が著しく低下し、従来の 2 値格子パターンのエッジ検出法では高精度な特徴点座標が得られない。

そこで、図 4(a) の実線のようにボケによる輝度変化より大きな輝度傾斜を持つ水平・垂直平行線パターン (ポジパターン) と同図の破線で示す輝度反転パターン (ネガパターン) の組 (同図 (b) ~ (e)) を校正パターンとして

使用し、カメラ位置を固定したまま LCD でこれらのパターンの表示を切り換えながら撮影する。RGB 各 256 階調で各色同一レベルで変化する。撮影画像の輝度変化の一部を図 5 に示す。



(a) Intensities of proposal patterns.

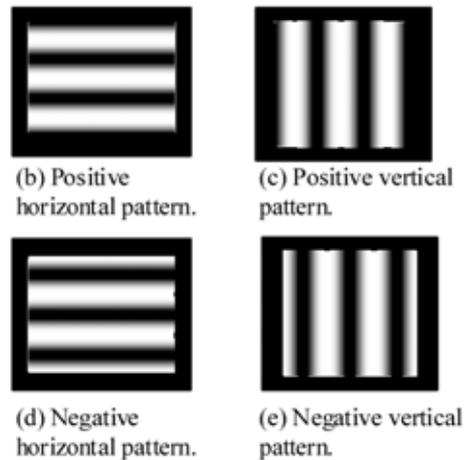


図 4 輝度傾斜パターン

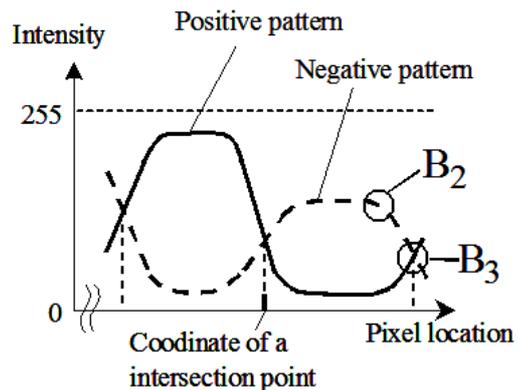


図 5 撮影画像の輝度変化

ポジパターンとネガパターンの輝度交点を線形内挿によって求めたサブピクセル精度の座標値をカメラ内部パラメータの校正に使用する。ボケや画像周辺部の明度低下の影響で図 4(a) の B_1 が図 5 の B_2 のようになるが、輝度交点の検出位置はこれらの影響を受けにく

い。LCDの輝度ムラや非直線性も両パターンで相殺されて位置ずれは抑制される。また、収差の影響を抑制するためにRGB色成分ごとにパターンの輝度境界検出と内部パラメータ校正を行う。さらに、LCD表示パターンで校正を行うため、LCD表面パネルの屈折の影響を低減するため屈折補正を行う(発表雑誌論文(1)p.622参照)。

本校正法の精度評価に再投影誤差(取得した内部パラメータにより求めた再投影像と推定した形状との誤差角 M_ϕ)を用いた。図4(a)の周期 $T=40$ [pix]とし、輝度傾斜幅と誤差 M の関係を図6の実線で示す。 $\lambda=4$ [pix]のとき M が最小となり輝度傾斜が有効であることがわかった。

また、周期20~50[pix]の輝度正弦波パターンに対する M を破線で示した。横軸は正弦波の最大輝度微分値でプロットした。同一の横軸値に対する誤差角の平均は輝度傾斜パターンとほぼ同じであることから、輝度正弦波パターンでも同等の精度改善が可能である。

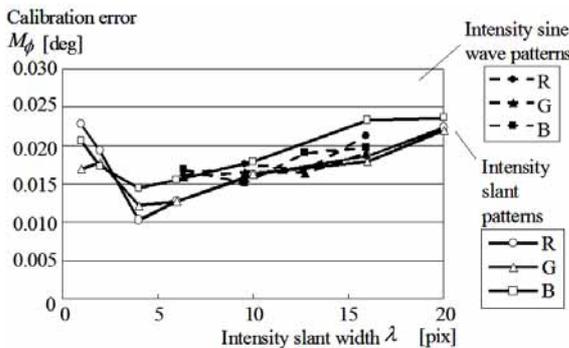


図6 輝度傾斜パターンと輝度正弦波パターンの校正精度

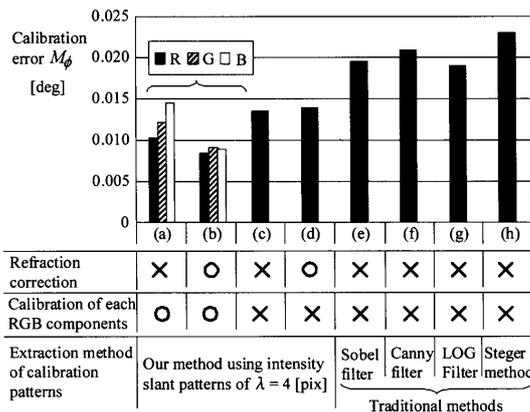


図7 提案法と従来法の校正精度比較

$\lambda=4$ [pix]のパターンを適用したとき、液晶パネルの屈折補正の有無、RGB別校正の有無に対する M を図7に示す。比較のために2値パターンを用いた従来法 M も示す。(b)の屈折補正とRGB別校正を適用した場合が M が最も小さく、精度が従来法より大幅に改善され、本校正法が有効であることがわかった。

(2) 輝度比法による奥行き値取得

アクティブステレオ法において、プロジェクタパターンを投射した物体のカメラ画像から任意の画素に写ったオブジェクト点のプロジェクタ投射ベクトルを求める方法として位相シフト法がある。位相が0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ の4枚の輝度が正弦波状に変化する編画像を順次切替えて物体に投射し、撮影した物体像から対応点を探索する。4枚の撮影像から多数点の奥行き値を一括取得できる利点がある。しかし、輝度変化の誤差が奥行き値の精度に直接影響する。そこで、プロジェクタやカメラのガンマ特性など非線形輝度の補正が容易で、かつ位相シフト法より少ない画像枚数で奥行き値を求めることができる輝度比法を開発した。

図8(a)および(b)のようなパターンをプロジェクタから計測対象に投射しカメラで撮影する。(d),(e)は各パターンの横軸 X_p 方向の輝度変化を示す。撮影した2枚の画像の(a),(b)投射時の同じ画素の輝度をそれぞれ b_1 , b_2 とすると、輝度比 b_2/b_1 からその画素の X_p 座標を求めることができる。物体の反射係数、光路減衰、カメラの感度などの影響は(a),(b)同じ割合で生じるので輝度比に影響しない。パターンの縦軸 Y_p 方向に輝度傾斜をもつもう一枚のパターンを追加すると Y_p 座標も得られる。プロジェクタとカメラの位置関係が得られていれば計測対照の1点に向かうプロジェクタとカメラ双方からのベクトルが得られるので、その点の奥行きが求まる。この方法は3枚の画像からパターン投射領域の全画素の奥行き値を得ることができる。

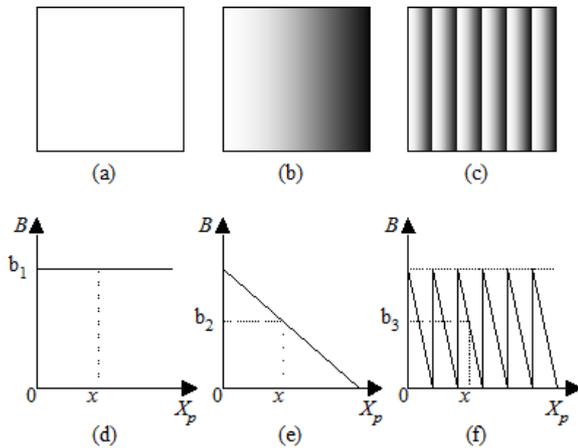


図8 輝度比法投射パターン

パターン(b)の座標 X_p に対する光度の直線性が輝度比から X_p を求める際の精度に影響を与えるので、プロジェクタのガンマ特性などの非線形をあらかじめ補正して各画素の輝度値を与える。

(b)のパターンは傾斜がゆるやかで雑音等

により輝度比から求める座標 x の誤差が生じやすい。そこでパターン(c)を追加して座標誤差を軽減する。(b)は(c)の輝度サイクルの識別用として機能させる。

(3) 自由視点3次元形状計測法

光源とカメラを分離した自由視点のステレオ法3次元計測では、外部パラメータ取得用の校正パターンの同時撮影が必要であること、非線形最適化を要することなどの問題点がある。これらの問題点は視野の広い魚眼カメラを用い、計測対象と光源を同時に撮影すれば解決可能と考えられる。そこで、魚眼カメラとプロジェクタを用いた自由視点3次元形状計測法を提案する。

高精度化のため事前にプロジェクタ内部パラメータ、魚眼カメラ内部パラメータ、プロジェクタの光学的特性、魚眼カメラの光学的特性を校正する。は従来法で、は(1)の方法で校正した。はプロジェクタから輝度 $L_p = 0 \sim 255$ のパターンを照度計に照射し、 L_p と取得照度との関係から校正した。は同じパターンを照度計と白色拡散反射板に照射し、白色板を魚眼カメラで撮影し、画像輝度 L_c と照度の関係から校正した。

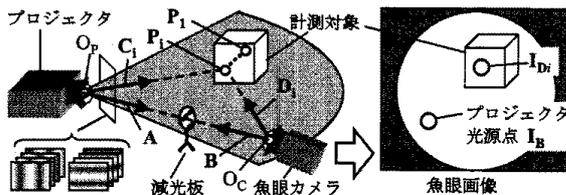


図9 自由視点3次元形状計測システム

図9のように輝度傾斜パターンを計測対象とカメラに照射し、それを魚眼カメラで撮影して計測する。プロジェクタ-カメラ間の位置、姿勢関係をそれぞれ T, R とし、各座標系原点をそれぞれ O_p, O_c とする。 $O_p - O_c$ 間に減光板を挿入する。プロジェクタ座標系における O_c 方向の単位ベクトルを A 、カメラ座標系における O_p 方向単位ベクトルを B とする。画像上のプロジェクタ光源の画素座標 I_B を(1)で示した魚眼投影モデルに適用すると B が求まる。また、 I_B 点における輝度比から A が求まる。

次に、画像上に複数の任意点 $I_{D_i} (i=1, 2, \dots)$ を取り、 I_{D_i} の魚眼投影モデルへの再投影点を D_i とする。また、それらの点の実空間中の3次元位置を P_i とし、 $O_p - P_i$ を C_i とすると、 C_i は I_{D_i} の輝度比から求まる。これら A, B より、

$$A = -RB \quad (1)$$

が成立つ。また、 A, B, C_i, D_i は1平面状にあるため、

$$A \times C_i // -R(B \times D_i) \quad (2)$$

が成立つ。式(1)(2)を行列でまとめ、最小二

乗法で R について解くと、

$$R = - \left[A \begin{array}{ccc} \frac{A \times C_1}{|A \times C_1|} & \frac{A \times C_2}{|A \times C_2|} & \dots \end{array} \right] \left[B \begin{array}{ccc} \frac{B \times C_1}{|B \times C_1|} & \frac{B \times C_2}{|B \times C_2|} & \dots \end{array} \right]^+ \quad (3)$$

となる。ここで、 $+$ は一般逆行列を表す。また、 $O_p - O_c$ 間の距離を s とすると T は、

$$T = sA \quad (4)$$

s は任意2点間の距離の実測値から導出できるので、ここでは $s=1$ として外部パラメータを求める。 R と T を用いると P_i は式(5)により線形導出できる。

$$P_i = \left([C_i]_x^2 + [RD_i]_x^2 \right)^{-1} \left([RD_i]_x (T \times RD_i) \right) \quad (5)$$

$$[E]_x = \begin{bmatrix} 0 & e_3 & -e_2 \\ -e_3 & 0 & e_1 \\ e_2 & -e_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

実験の結果、外部パラメータが未知の任意の配置で計測対象の奥行き値を高精度取得できることが証明された。

4. 研究成果

(1) 魚眼カメラとプロジェクタのみで構成する簡易なシステムで、カメラ-プロジェクタ間の位置姿勢関係を任意に設定して3次元形状計測する方法を開発した。

(2) 近接3次元計測を固定焦点カメラで実現するため、被写界深度の大きい魚眼カメラを採用し、近接撮影時の焦点調節による内部パラメータの変動による誤差を断って計測精度の向上を実現した。

(3) 魚眼カメラは超広視野角であるため1画素あたりの空間分解能が低い。したがって、低分解能画像からの高精度3次元計測を実現するために、新たに魚眼カメラ用の内部パラメータ、外部パラメータ校正法を開発した。

(4) これまでの内部パラメータは透視投影モデルを用いて求められていたが、超広角の魚眼カメラではこのモデルを用いることができない。そこで、新たに球面投影モデルを採用し、直交する水平および垂直平行線群を撮影したときの直線性、平行性、直交性が球面投影モデル上で示す性質に基づいた最適化法により内部パラメータを求める方法を開発した。この方法では、魚眼カメラ射影関数からのひずみを表すパラメータも同時に求めることができる。この方法により超広視野角魚眼画像のほぼ全域を対象とした高精度校正を実現した。

(5) 内部パラメータ校正において使用する校正パターンに、従来の2値格子でなく輝度傾

斜パターンを用いた．輝度傾斜パターンは画像の分解能が低く，レンズの非点収差，湾曲収差，色収差などによる画像周辺部のボケや明度低下が大きくても，パターン上の特徴点を画像上で高精度に検出可能であるため，高精度な校正が実現できた．

(6) プロジェクタとカメラの位置を自由に設定する自由視点3次元計測では，プロジェクタとカメラ間の外部パラメータを高精度で取得する必要がある．魚眼カメラの広視野角性を活用して計測対象とプロジェクタ光源を同時に視野に収めて撮影することにより外部パラメータと計測対象の3次元形状を同時に最適化し高精度取得する方法を開発した．

(7) 3次元形状計測では少数の画像から計測対象の多数の点の奥行き値を取得する必要がある．従来，位相シフト法が開発されているが，より簡易で高精度な輝度比法を開発した．輝度比法はプロジェクタ投影画像のX軸またはY軸の座標変化に対して輝度が直線的に変化するパターンを投影する．プロジェクタ輝度非線形補正が容易で高精度である．

(8) プロジェクタは魚眼のような被写界深度の大きいレンズを用いていないので，固定焦点では投射距離によってボケが生じる（焦点調節を行うと内部パラメータの校正が必要になる）．輝度比法はゆるやかな輝度傾斜を持つパターンを用いるので，ボケの影響が少なく固定焦点でも高精度を維持することができる．

(9) 上記の各要素技術を用いて3次元形状計測実験を行った．形状を良好に復元することができたが，現在精度を詳細に検討中である．個々の要素技術の精度が高いので精度検証結果が期待できる．

(10) 個々の要素技術はそれぞれ新しい方式であり，カメラパラメータ校正，各種3次元計測の高精度化にも活用できると期待できる．

(11) 本方式は将来，内視鏡や腹腔鏡下の3次元計測への適用を考えており，そのためには小型化と遠隔制御が必要である．これらの開発が今後の課題である．

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

駒形英樹，石井郁夫，牧野秀夫，高橋章，若月大輔，輝度傾斜パターンを用いた魚眼カメラ内部パラメータの校正，電子情報通信学会論文誌，vol.J93-D，no.5，pp.621-631，2010，査読有．

〔学会発表〕(計5件)

石井郁夫，魚眼カメラによる自由視点3次元計測法，電子情報通信学会総合大会情報・システム講演論文集，D-12-26，pp.129，2010.3.14，東京

I.Ishii，High precision calibration method of intrinsic parameters for fish-eye cameras，Proc. of SPIE，Vol.7432，pp.743204-1 - 8，2009.9.10，San Diego.

石井郁夫，輝度傾斜格子縞による魚眼カメラ内部パラメータの校正，電子情報通信学会総合大会，2009.3.17，松山．

石井郁夫，魚眼カメラによる空撮画像を用いた災害時の被害状況把握システムの開発，電子情報通信学会総合大会，2009.3.19，松山

石井郁夫，魚眼カメラを用いた災害時空撮画像監視システムの開発，電子情報通信学会技術報告，IE2008-218，PP.81-86，2009.2.4，札幌．

6．研究組織

(1)研究代表者

石井 郁夫 (ISHII IKUO)
埼玉医科大学・保健医療学部・教授
研究者番号：80018481

(2)研究分担者

駒形 英樹 (KOMAGATA HIDEKI)
埼玉医科大学・保健医療学部・助教
研究者番号：80438861