

時間的・空間的分解能の異なる複合センサカメラシステム

重本 倫宏[†] 星川 章[†] 長原 一[†]
岩井 儀雄[†] 谷内田 正彦[†] 鈴木 俊哉^{††}

カメラ技術の発達により高品質な映像に対する世の中のニーズが高まっている。その高品質な映像の条件として高解像度や高フレームレートがあげられるが、画像の掃き出し速度の限界のため1台のカメラで高解像度と高フレームレートを両立させるのは困難であった。そこで、本研究では高解像度低フレームレートの撮像センサと、低解像度高フレームレートの撮像センサを複合して用いる。このような時空間周波数の異なるセンサを複合することにより高解像度と高フレームレートの撮像を行うカメラシステムを提案する。さらに、本システムにおける2つのセンサ間での歪みなどの幾何学的特性を一致させる幾何学的キャリブレーションと、画素値の光学的特性を一致させる光学的キャリブレーション手法を提案する。

Dual Sensor Camera System with Different Spatial-temporal Resolution

TOMOHIRO SHIGEMOTO,[†] AKIRA HOSHIKAWA,[†] HAJIME NAGAHARA,[†]
YOSHIO IWAI,[†] MASAHICO YACHIDA[†] and TOSHIYA SUZUKI^{††}

In accordance with the development of camera technology, requirements of high-quality video have been remarkably increased. Some factors required for high-quality video are high-resolution and high-frame rate. Limitation of pixel transfer rate has, however, restricted the compatibility of high-resolution and high-frame rate in commercial cameras. In this paper, we propose a dual sensor camera consisting of two distinct cameras: one with high-resolution, low-frame rate and the other with low-resolution, high-frame rate. The system is capable of capturing two different image sequences: high-resolution images and high-frame rate images. A sensor calibration method for the dual sensor camera is also proposed in the paper.

1. はじめに

カメラ技術の発達により様々なカメラが市場に出回っている。また、それにともなって高品質な映像に対する世の中のニーズも高まっている。高品質な映像の条件としては高臨場感を与える高解像度や、スムーズな動画再生を実現する高フレームレートがあげられる。このような高品質な映像を実現するために多くの研究が行われてきた。その例として、日本放送協会(NHK)が開発した超高精細カメラ¹⁾があげられる。これは暫定的な仕様ではあるがこのカメラは走査線4,000本、フレームレート60fpsであり、高品質な映像を撮像できる。また、映画に対しては撮影から上映までをデジタルで行うデジタルシネマが提案さ

れている²⁾。これはフィルムに匹敵する品質の高精細映像を電子的手法により撮影、編集、保存することができ、またデジタルであるため画質の劣化がない。現在、4Kフォーマットと呼ばれる4,096×2,160画素、24fpsの超高精細の映像規格が確立され、これに対応する機器の開発や、配信実験が行われている。しかし、これらのシステムは、高価な機材を利用することで高品質な映像を実現しており、一般的な利用に結び付けるのはコストの面からも困難である。

一方で、一般的なテレビ放送映像方式であるNTSC方式では、フレームレートはスムーズな動画を表現できる30fpsであるが、解像度は640×480画素で、高解像度であるとはいえない。また、市販のデジタルスチルカメラには4,000×4,000画素という高解像度のものが存在するが、フレームレートは低く滑らかな動画を撮影することはできない。このように、単位時間あたりの画像データレートはCCD(Charge Coupled Device)の画素数とフレームレートの積で表され、カメラの画像掃き出し速度の制限のために解像

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{††} 株式会社映蔵
Eizoh Co., LTD.

度とフレームレートはトレードオフの関係にある。つまり、一般的なカメラを用いての高解像度と高フレームレートを両立した撮影を行うのは困難である。

そこで、本研究では高解像度と高フレームレートを両立した撮影を実現するために特性の異なる 2 台のカメラを複合して用いることを提案する。この複合センサカメラでは解像度を重視した高解像度低フレームレートのカメラと、フレームレートを重視した低解像度高フレームレートのカメラを複合して用いる。シーンからの入射光をハーフミラーで分光し、時空間周波数の異なる 2 台のカメラでそれぞれ撮像することにより同一視点、同一視野で高解像度と高フレームレートの撮像を行うことができるカメラシステムを構築する。また、本システムで撮像した 2 種類の動画を監視などの目的に使用するアプリケーションを提案する。さらに、2 台のカメラの特性が各々異なるため、レンズ歪みなどの幾何学的特性を一致させる幾何学的キャリブレーションと、画素値の光学的特性を一致させる光学的キャリブレーションを行う必要がある。このような 2 枚の画像を一致させるためのキャリブレーション手法を提案する。

従来、本研究のように複数のカメラ（センサ）を組み合わせた高解像度撮像のアプローチが数多く提案されている。ここで従来の研究を紹介して、本研究での提案システムとの違いを明確にする。杉田らは 2 台の視野角の異なるカメラを用いて、広視野かつ中心視野付近の解像度を高めた画像を撮像するシステム³⁾を提案している。また、田中らによる 2 台のカメラで撮像視野角を分けて撮像することにより広視野で高解像度画像を実現するシステム⁴⁾や、続らによるさらに多くのカメラを用いて垂直方向にも視野を分けて高解像度な画像を撮像するシステム⁵⁾なども提案されている。これらの研究は、中心領域のみの解像度を高めたり、それぞれのカメラで異なる視野を撮像してそれらをつなぎ合わせたりすることで広視野かつ高解像度の画像を得るものである。すなわち、複数のカメラを用いて空間を分割サンプリングして、高解像度化するアプローチであった。

それに対して本研究では、図 1 に示すように一方のカメラでは解像度を優先した動画を、もう一方のカメラではフレームレートを優先した動画を撮像することで、シーンの空間情報と時間情報を分割サンプリングするアプローチである。また、これらの動画は、高解像度低フレームレート動画の撮像周期で同期撮像され、幾何学的にも一致したキーフレームと呼ぶフレームを撮像できる。このキーフレームを利用す

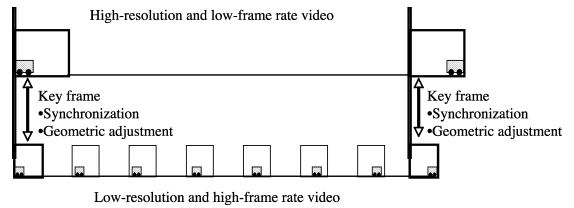


図 1 画像の同期
Fig. 1 Synchronization of images.

ることで、高解像度の空間情報と高フレームレートの時間情報をお互いに結びつけることができる。

たとえば本システムを監視システムなどに応用すれば、通常は高フレームレート動画で検出された不審な行動から高解像度動画を撮像して、不審人物の詳細な特徴を確認することができる。また、逆にあらかじめ顔や特徴などを高解像度画像で特定した後、高フレームレート動画を撮像してその人物の動きを追跡するといったことにも応用できる。

さらに、本システムで撮像した時間的・空間的分解能の異なる 2 種類の動画を渡邊ら^{6),7)}や松延ら^{8),9)}が提案した高解像度高フレームレート生成手法を用いて統合することで、高解像度かつ高フレームレートな動画を生成することが可能となる。すなわち、複合センサカメラに用いるセンサは市販の CCD やカメラを用いることができるため、NHK の超高精細カメラ¹⁾のように高価な機材を必要とすることなく高品質な映像を実現できる。また、空間情報と時間情報を分割サンプリングする本アプローチでは、撮像データ量を削減できるという利点がある。

2. 複合センサカメラシステム

本システムは複合センサカメラと、画像を取り込むための PC、画像記録用の RAID (Redundant Arrays of Inexpensive Disks) システム、画像表示用のディスプレイ、フレームレートの異なる 2 台のカメラを同期させて撮像するためのパルスジェネレータから構成される (図 2)。複合センサカメラで撮像シーンの入射光をハーフミラーを用いて分光して透過光を一方のカメラで、反射光をもう一方のカメラで撮像する。このようにして得られた画像を PC 上に取り込んで ディスプレイに表示させつつ、RAID システムに保存していく。

ここで、実際のシステムを図 3 に示し、試作した複合センサカメラで撮像される 2 種類の画像の仕様を表 1 に示す。また、本システムで取り込んだ画像を図 4、図 5 に示す。

2.1 複合センサカメラ

図 6 に示すように、複合センサカメラは高解像度

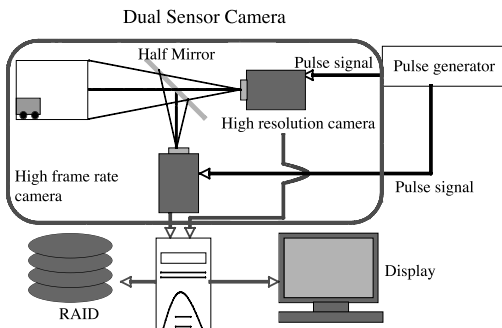


図 2 システムの構成
Fig. 2 System architecture.

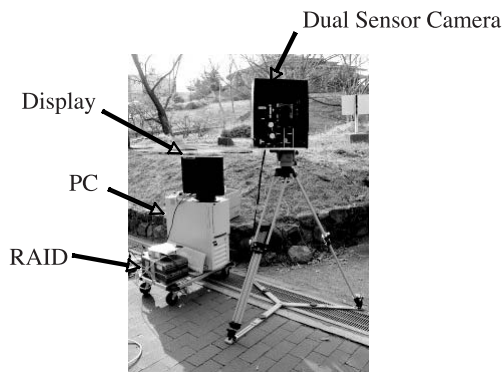


図 3 提案システム
Fig. 3 Proposed system.

表 1 複合センサカメラの仕様
Table 1 Specification of Dual Sensor Camera.

	High-resolution & low-frame rate	Low-resolution & high-frame rate
Resolution	4,008 × 2,672 pixels	1,008 × 1,018 pixels
Frame rate	4.29 fps	30 fps
Output image	Bayer Color	Bayer Color
Output format	8 bits/pixel	8 bits/pixel
Recording time	145 min	

低フレームレートカメラと低解像度高フレームレートカメラの 2 台とシーン情報を分光するためのハーフミラーから構成される。2 台のカメラは 3 軸ステージに固定されており位置の調整ができるようになっている。2 台のカメラ間で視点が一致するように、3 軸ステージで位置を調整して配置する。また、ハーフミラーの反射光と透過光の比は 4 : 6 である。高解像度低フレームレートカメラの方が感度が低いために、光量の多い透過光を高解像度低フレームレートカメラで、反射光を低解像度高フレームレートカメラで撮像する。この複合センサカメラで撮像した画像データを PC 上に取り込んで、RAID システムに記憶していく。

なお、低解像度高フレームレートカメラとして



図 4 高解像度低フレームレート画像
(4,008 × 2,672 画素, 4.29 fps)

Fig. 4 High-resolution image with low-frame rate (4,008 × 2,672 pixels, 4.29 fps).



図 5 低解像度高フレームレート画像
(1,008 × 1,018 画素, 30 fps)

Fig. 5 Low-resolution image with high-frame rate (1,008 × 1,018 pixels, 30 fps).

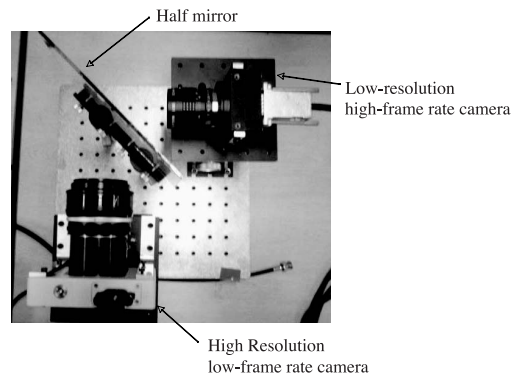


図 6 複合センサカメラ
Fig. 6 Dual Sensor Camera.

BASLER 社の A201bc を、高解像度低フレームレートカメラとして REDLAKE 社の ES11000 を用いる。

2.2 パルスジェネレータの設計

本システムでは高解像度低フレームレートカメラと低解像度高フレームレートカメラという 2 台のフレームレートの異なるカメラを同期させて撮像する。高解像度低フレームレートカメラは 4.29 fps、低解像度高フレームレートカメラは 30 fps である。そのため、1 : 7 の割合で高解像度低フレームレート動画像と低解像度高フレームレート動画像を同期して撮像する。すなわち、図 1 に示すように高フレームレート画像列

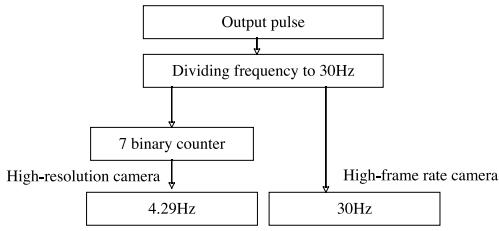


図 7 パルスジェネレータの処理
Fig. 7 Processing of pulse generator.

の 1 フレーム目と低フレームレート画像列の 1 フレーム目、高フレームレート画像列の 8 フレーム目と低フレームレート画像列の 2 フレーム目が同期するように撮像する。

2 台のカメラの同期をとるために、パルスジェネレータを作成し、そこから 2 台のカメラにパルス信号を送る。本システムで用いるカメラは 4.29 fps と 30 fps であるので高解像度低フレームレートカメラに 4.29 Hz、低解像度高フレームレートカメラに 30 Hz のパルス信号をそれぞれ送ることで 2 台のカメラの同期をとる。

4.29 Hz と 30 Hz のパルス信号を出力するためのパルスジェネレータを Max+Plus II Baseline (Altera 社) というソフトを用いて設計した。設計した回路は、ヒューマンデータ社の CSP-001 という FPGA (Field Programmable Gate Array) 評価ボードを用いて実装した。

パルスジェネレータからは 30 Hz と 4.29 Hz のパルス信号を出力するので、まず FPGA 評価ボードのベースクロック信号を 30 Hz にまで分周して、高フレームレートカメラにはそのまま 30 Hz の信号を、低フレームレートカメラには 30 Hz の信号に 7 進カウンタに通して 4.29 Hz に分周したものを出力する。パルス信号をカメラに出力するまでの流れを図 7 に示す。それぞれのカメラに送られたパルス信号は、カメラの取り込みボードに送られ、そこから取り込みトリガが生成され、カメラがトリガを検知して画像を取り込んでいく。これにより、高解像度低フレームレート動画と低解像度高フレームレート動画を 1 : 7 の割合で同期して撮像することができる。

3. キャリブレーション

複合センサカメラには 2 つのカメラ間での CCD 特性やレンズ特性の違いにより画像に幾何学的、光学的な差が生じる。複合センサカメラにより得られる 2 つの画像列情報を統合するためには、キーフレームでの画像一致を前提としている。そのため、幾何学的特性および光学的特性の差を 2 つのカメラ間で補正する必

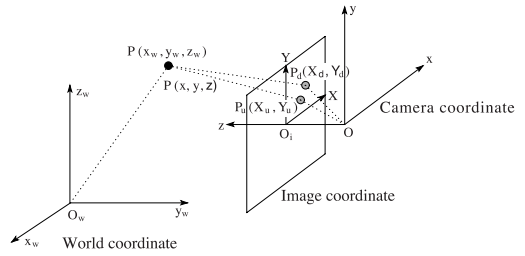


図 8 世界座標と画像座標の関係
Fig. 8 World coordinate and image coordinate.

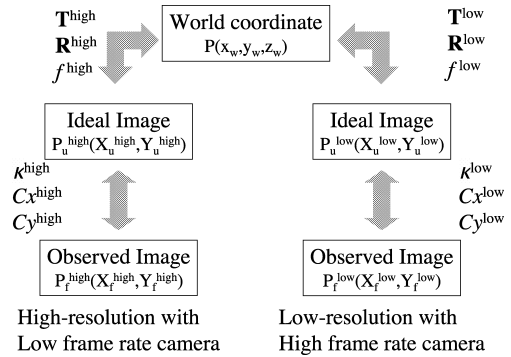


図 9 カメラパラメータと座標の関係
Fig. 9 Relationship of camera parameters and coordinate.

要がある。ここではこのような複合センサカメラを対象としたキャリブレーション手法を提案する。

3.1 カメラモデル

本研究では複合センサカメラの 2 つのカメラにそれぞれピンホールカメラモデルを使用する。図 8 に示すように基準となる世界座標 $O_w-x_w-y_w-z_w$ における点 P の座標を (x_w, y_w, z_w) と表し、カメラ座標 $O-x-y-z$ における点 P の座標を (x, y, z) と表す。ただし、 O はレンズ中心を表し、 z 軸はレンズの光軸に一致するように設定する。このとき、世界座標における点 $P(x_w, y_w, z_w)$ はそれぞれ $P_f^{high}(X_f^{high}, Y_f^{high})$ と $P_f^{low}(X_f^{low}, Y_f^{low})$ に投影される。複合センサカメラの高解像度カメラと低解像度カメラの 2 つの各画像空間と、世界座標の関係およびカメラパラメータの関係を図 9 に示す。ここで、*high*, *low* の添字はそれぞれ高解像度カメラと低解像度カメラを示す。以下でカメラモデルの説明を行うが、高解像度カメラと低解像度カメラでは同じカメラモデルを使用するため添字は省略した。

世界座標の点 (x_w, y_w, z_w) は回転行列 R と平行移動ベクトル T を用いてカメラ座標の点 (x, y, z) へ変換され、さらに透視投影によって焦点距離 f の画像面上の点 (X_u, Y_u) に投影される。

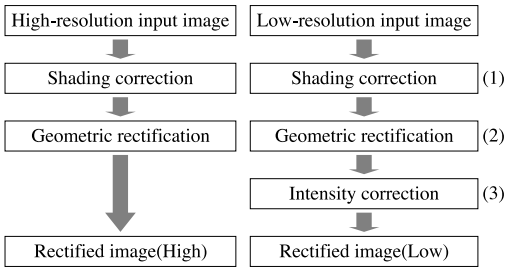


図 10 処理の流れ
Fig. 10 Processing flow.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (1)$$

$$X_u = f \frac{x}{z}, \quad Y_u = f \frac{y}{z} \quad (2)$$

画面上の (X_u, Y_u) はレンズ歪みにより (X_d, Y_d) に移り、さらに、撮像素子によってピクセル単位の画像座標 (X_f, Y_f) に変換される。ここで $\delta(\cdot)$ はレンズ歪みを表す関数である。

$$X_u = X_d + X_d \delta(R_d) \quad (3)$$

$$Y_u = Y_d + Y_d \delta(R_d)$$

$$R_d = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \quad (4)$$

$$X_f = d_x^{-1} X_d + C_x$$

$$Y_f = d_y^{-1} Y_d + C_y \quad (5)$$

ここで、 d_x, d_y は受光素子の水平・垂直方向の中心間距離、 (C_x, C_y) は画像中心の画像座標である。本研究では式 (3) における歪みのモデルとして radial distortion のみを考える¹⁰⁾。

$$\delta(R_d) = \kappa_1 R_d^2 + \kappa_2 R_d^4 + \kappa_3 R_d^6 + \dots \quad (6)$$

実際には radial distortion は第 1 項のみでも十分であるため、

$$X_u = X_d + X_d \kappa_1 R_d^2 \quad (7)$$

$$Y_u = Y_d + Y_d \kappa_1 R_d^2 \quad (8)$$

とする。

3.2 処理の流れ

複合センサカメラを対象としたキャリブレーション処理の流れを図 10 に示す。この処理は周辺明度低下の補正、幾何学的補正、輝度補正の 3 つのステップで構成される。高解像度カメラ、低解像度カメラにおいてそれぞれ様な明度を持つ白色ターゲットを撮影し、周辺明度低下の補正を行う。さらにキャリブレーションパターンを撮影することで幾何学的キャリブレーションを行い、画像の幾何特性の違いを補正する。最後に高解像度、低解像度の 2 枚の画像の輝度ヒストグ

ラムが一致するように低解像度側に対して輝度補正を行う。

(1) 周辺明度低下の補正

レンズを用いた撮像素子では、輝度が様なシーンを撮影しても画像中心から離れるに従って明度が低下することが知られている。2 枚のカメラでこの明度低下の度合いが異なるため、2 枚の画像の輝度差を正確に補正するためには、事前に各カメラで周辺明度低下の補正を行う必要がある。画像周辺の明度低下の原因としては $\cos^4 \theta$ 現象と口径蝕現象がある^{11),12)}。

ここでは、 $\cos^4 \theta$ 現象や口径蝕現象による明度低下に加え、その他の要因による明度低下や画素間の感度のバラツキによる固定パターンノイズも考慮に入れるため、そのようなモデルを持たずに単純な補正法を利用して明度低下を補正する。具体的には放射輝度様の白色シーンを撮影し、画像全体で様な輝度を持つと仮定し、それぞれの画素ごとに輝度の低下率を記録する。このとき画像中心部の R の輝度を R_c とするとそれぞれの画素における低下率は以下の式で表される。

$$R_{ratio}(x, y) = R(x, y) / R_c \quad (9)$$

低下率の偏りを避けるために白色シーンを何枚か撮影しその平均の低下率をそれぞれの画素において求めておく。新たに撮影されたシーンに対して、先に求めた低下率を用いて以下の補正式により周辺明度低下を補正する。

$$R_{correct}(x, y) = R(x, y) / R_{ratio}(x, y) \quad (10)$$

ここで、 $R_{correct}(x, y)$ は補正された輝度、 $R(x, y)$ は補正前の輝度を表す。この変換を残りの GB 成分に対しても行う。

(2) 幾何学的補正

高解像度カメラと低解像度カメラそれぞれに 3.1 節のカメラモデルを想定し、パラメータ推定を行う。パラメータ初期値の推定法として Tsai の手法¹³⁾ を用いた。Tsai の手法では、多数の点の世界座標 (x_w, y_w, z_w) とそれらに対応する画像座標 (X_f, Y_f) の組が与えられたときに、内部パラメータとして $f, \kappa_1, (C_x, C_y)$ 、外部パラメータとして \mathbf{R} と \mathbf{T} を求めることができる。ただし、実験の容易さから平面のキャリブレーションパターンを使用する(図 11 参照)。

高解像度カメラは画像座標 (X_f^{high}, Y_f^{high}) が与えられると、高解像度カメラパラメータにより高解像度歪みなし平面 (X_u^{high}, Y_u^{high}) に画像を変換できる。低解像度カメラも同様に画像座標 (X_f^{low}, Y_f^{low}) が与えられると、低解像度カメラパラメータと高解像度カメラパラメータを用いて高解像度歪みなし平面 (X_u^{high}, Y_u^{high}) に変換できる。つまり、高解像度歪みなし平面上に 2 枚

の画像を投影することで幾何学的特性の異なる画像の一致をはかる．以後この高解像度歪みなし平面を基準平面と呼ぶ．

Tsai の手法では特徴点の位置が一致するように最適化されており、このままではキャリブレーションパターンから外れるに従い幾何的なズレが生じてしまう．そこで、画像を用いて最適化を行う．具体的には、まず Tsai の手法で求めた初期値により低解像度画像を基準平面に投影した画像 I^b を作成する．この画像の輝度 $I(x, y)$ に対して、高解像度画像の輝度 I^{high} に対応する $I^{high}(x^{high}, y^{high})$ を計算する． (x^{high}, y^{high}) は整数値とならないため I^{high} の輝度値を計算するために近隣 4 ピクセルから線形補間を用いてサブピクセルで計算した．次に式 (11) を用いて評価関数 Q を最小とるように全カメラパラメータを非線形最適化する．これにより基準平面上での画像間の輝度差を最小とすることができる．

$$Q = \sum (I^b(x, y) - I^{high}(x^{high}, y^{high}))^2 \quad (11)$$

(3) 輝度補正

周辺明度低下、幾何学的補正後画像間で異なる濃淡や色調を一致させるため、一方の画像に対して輝度変換を行う．2枚の画像間の輝度変換を行う際には、対応する点の輝度値を比較して最小自乗法により変換式を求めたり、変換テーブルを作成したりするのが一般的である．ここでは、そのような位置の制約を用いず、任意の非線形な変換に対応するために、2枚の画像の輝度ヒストグラムが一致するように変換を行う．

ヒストグラムの変換には Yang らの手法¹⁴⁾を用いた．2枚の画像の輝度ヒストグラムを正規化し、その累積ヒストグラムをそれぞれ H_i^{high} , H_j^{low} で表す．このとき、高解像度カメラの輝度 i に対応する低解像度カメラの輝度 j を次式のように求める．

$$j = \arg \min_j |H_i^{high} - H_j^{low}| \quad (12)$$

この変換を RGB すべての輝度レベルに対して行う．輝度変換テーブルの作成にはダイナミックレンジが広い画像を用いるのが好ましい．一度変換テーブルを作成しておく、以後は異なる画像に対しても変換テーブルを用いた補正が行える．

4. 実験

シミュレーション実験と実際の画像に対してキャリブレーションを行い本手法の評価を行った．

4.1 シミュレーション実験

ここではキャリブレーション精度についての評価実

表 2 設定カメラパラメータ

Table 2 Camera parameters.

		High-resolution	Low-resolution
f	[mm]	55.0	10.0
$\kappa \times 10^{-4}$	[1/mm ²]	1.0	8.0
T_x	[mm]	-100.0	-100.0
T_y	[mm]	-100.0	-100.0
T_z	[mm]	600.0	600.0
R_x	[deg]	0.0	0.0
R_y	[deg]	30.0	30.0
R_z	[deg]	0.0	0.0
C_x	[pixel]	2000.0	500.0
C_y	[pixel]	1300.0	500.0

表 3 推定結果

Table 3 Estimated camera parameters.

		High-resolution	Low-resolution
f	[mm]	54.98	10.14
$\kappa \times 10^{-4}$	[1/mm ²]	1.00	8.06
T_x	[mm]	-100.17	-95.01
T_y	[mm]	-100.70	-101.80
T_z	[mm]	599.57	608.29
R_x	[deg]	0.24	0.27
R_y	[deg]	29.96	30.46
R_z	[deg]	0.03	0.07
C_x	[pixel]	2000.95	490.80
C_y	[pixel]	1301.18	502.33

験を行う．まず初めに高解像度カメラと低解像度カメラのパラメータを設定し、世界座標から画像上へ特徴点を変換する．画像上の特徴点に平均 0 標準偏差 0.2 のガウスノイズを付加し、幾何学的キャリブレーションを行い幾何補正する．ただし、画像サイズは高解像度側 4,000 × 2,600、低解像度側 1,000 × 1,000 とし、特徴点は世界座標で (0, 0, 0) から (225, 150, 0) まで 25 mm 間隔で 10 × 7 = 70 個配置する．

設定したカメラパラメータを表 2 に示し、推定結果を表 3 に示す．誤差が含まれていても安定してパラメータが求められることが分かる．特徴点の誤差は基準平面上で平均 0.976735 pixel であった．

4.2 画像に対するキャリブレーション

キャリブレーションパターンとして半径 10 mm の円を中心間距離 25 mm 間隔で 10 × 7 = 70 個平面に配置したパターンを用いる (図 11 参照)．ただし撮影に使用した高解像度カメラの画像サイズは 4,008 × 2,672、低解像度カメラの画像サイズは 1,008 × 1,018 である．特徴点として円の重心を検出し、世界座標とそれに対応する画像座標の組を得る．さらに、幾何学的キャリブレーションを行いパラメータを推定する．

図 11 に高解像度画像と低解像度画像の幾何学的、光学的補正後の結果を示す．基準平面に投影された特徴点の誤差は平均 0.624 画素、標準偏差 0.410、最大

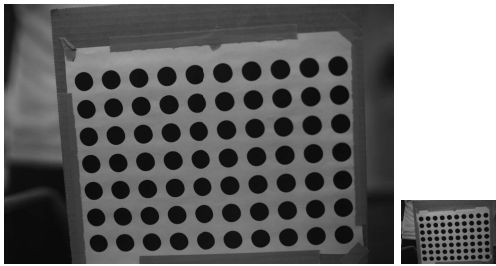


図 11 補正後画像

Fig. 11 Calibrated high resolution and low resolution images.

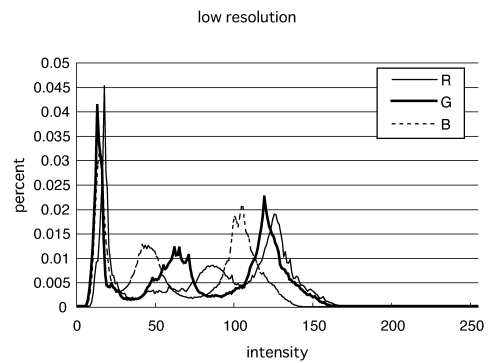
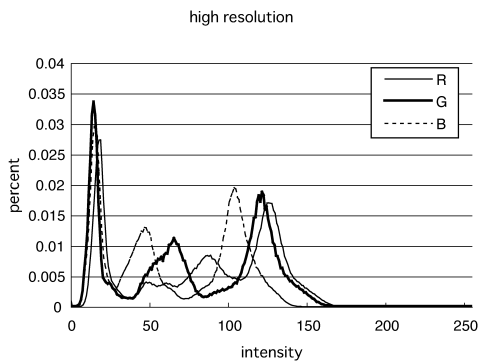
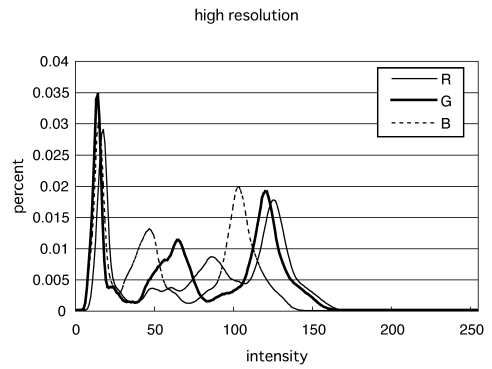


図 13 補正画像ヒストグラム

Fig. 13 Histograms of rectified images.

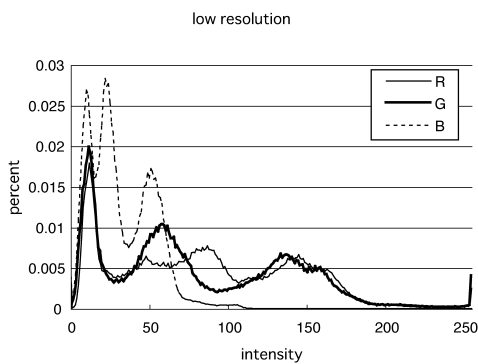


図 12 入力画像ヒストグラム

Fig. 12 Histograms of observed images.

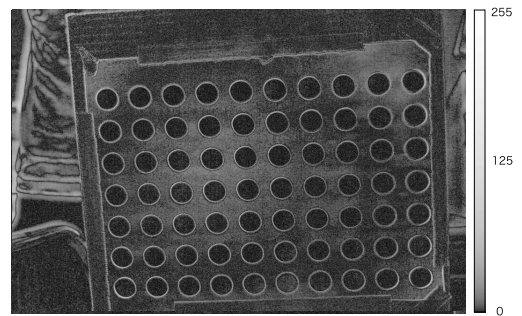


図 14 差分画像 (ログスケール)

Fig. 14 Subtracted image.

2.342 画素であった。誤差の平均はサブピクセルとなり十分な精度で幾何補正されたことが分かる。図 12 に高解像度入力画像と低解像度入力画像のヒストグラムを、図 13 に高解像度補正画像と低解像度補正画像のヒストグラムをそれぞれ示す。ヒストグラムより補正前にはバラバラだった RGB の値が補正後には一致していることが分かる。これにより光学的補正がうまく行われたことが分かる。ホワイトバランスについてはカメラ側でホワイトバランスをあらかじめとるので、別途補正処理は必要ない。

図 14 に補正画像の差分を図 15 に差分画像のヒス

トグラムを示す。ただし差分画像はログスケールで示す。図 14 よりエッジの部分で輝度に差があるのが分かる。しかし、差分画像のヒストグラムを見てみるとその差は小さいものであった。以上の結果より本手法によって複合センサカメラのキャリブレーションがうまく行われたことを確認した。

5. アプリケーション例

本論文で提案した複合センサカメラを用いた実際のアプリケーション例を紹介する。

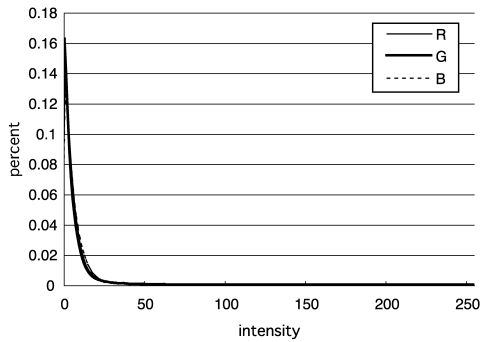


図 15 差分画像ヒストグラム

Fig. 15 Histogram of subtracted image.



図 16 監視システム (高フレームレート動画表示)

Fig. 16 Monitoring system (High-Frame rate video).

5.1 モニタリングシステム

試作した複合センサカメラを用いてモニタリングシステムを構築した。一般に、モニタリングシステムを考える場合、高フレームレート動画だけでは、対象の動きを見ることは容易であるが解像度が高くないために対象の詳細な特徴までは分からない。逆に、高解像度動画だけでは、対象の詳細な特徴は確認できるがフレームレートが低いため動きを追跡するのは困難である。

そこで、複合センサカメラで撮像された、サンプリングレートの異なる動画を用了モニタリングシステムを構築した。本システムでは、高フレームレート動画と高解像度動画を切替提示することができる。具体的には、通常は高フレームレート動画を表示して動きをチェックしておき、対象の詳細な特徴を確認するときには高解像度画像を表示するといった利用が可能となる。図 16 は実際に実装したシステムで、高フレームレート動画が表示されている。

たとえば図 16 では、高フレームレートにより動きは確認できるが、車のナンバープレートなどは詳細な画像用法は把握することはできない。そこで、図 17



図 17 監視システム (高解像度画像表示)

Fig. 17 Monitoring system (High-Resolution image).



図 18 生成画像

Fig. 18 Generated image.

のように表示されている画像上をマウスをクリックするとその領域の高解像度画像が表示されるようにした。また、そのままドラッグすることで他の領域の高解像度画像も表示することができる。図 17 を見れば、車のナンバープレートを確認することができるのが分かる。

5.2 高解像度高フレームレート動画生成

本研究で提案した複合センサカメラで得られた動画から高解像度高フレームレート動画を生成する手法^{6)~9)}が提案されている。

渡邊らの手法^{6),7)}では画像空間上で動き補償された高解像度画像のスペクトルに低解像度画像のスペクトルを合成することによって、松延らの手法^{8),9)}ではモーフィングを用いて高解像度低フレームレート動画の中間フレームを補間することによって高解像度高フレームレート動画を生成している。図 18 に松延らの手法を用いて実際に生成された画像を示し、図 19 に生成画像の拡大画像、図 20 に低解像度画像の拡大画像を示す。図より高精細な画像が生成されていることが見てとれる。このように複合センサカメラと高解像度生成手法とを組み合わせることで、低コストでの



図 19 拡大画像 (生成画像)

Fig. 19 Magnified generated image.



図 20 拡大画像 (低解像度画像)

Fig. 20 Magnified low-resolution image.

高精細動画撮像や提示，配信などが可能となる．

6. おわりに

本論文では高解像度低フレームレートと，低解像度高フレームレートといった時空間周波数の異なるカメラを備える複合センサカメラシステムを提案した．本センサカメラでは，高解像度低フレームレート動画と低解像度高フレームレート動画を同一視点，同一視野で撮像できる．シーンを空間情報と時間情報に分割する新しいセンシングアプローチであり，これらの情報を統合することで，高解像度高フレームレートの高品質な映像生成などの応用に用いることができる．このようなアプローチに基づき，実際に複合センサカメラの試作を行った．また，本センサカメラに対応したキャリブレーション手法を提案し，試作センサにおいて画像補正が行えることを確認した．さらに，本センサカメラシステムと高解像度高フレームレート動画生成手法と組み合わせることで，高精細画像撮像や提示システムに本センサを応用できることを示した．現在のシステムにおいては，画像補正をソフトウェアにより行っている．今後は，この画像補正処理のハードウェア化など高速化を検討することで，ライブ撮像配信など，実時間応用にも対応できるシステムに拡張する予定である．

謝辞 本研究は独立行政法人情報通信機構「民間基盤技術研究促進制度」の援助を受けた．

参考文献

- 1) 山下誉行, 三谷公二, 菅原正幸, 島本 洋, 岡野文男: 走査線 4000 本級 4 板式超高精細動画カメラ, 映像情報メディア学会誌, Vol.58, No.3, pp.383-391 (2004).
- 2) 藤井哲郎: デジタルシネマの標準化とその最新動向, *IPSS Magazine*, Vol.45, No.11, pp.1157-1163 (Nov. 2004).
- 3) 杉田 馨, 高野孝英, 苗村 健, 原島 博: 4 眼撮像系を用いた広視野角ステレオ画像通信, 3 次元画像コンファレンス'99, 1-7, pp.37-42 (1996).
- 4) 田中健二, 鈴木保成, 荒川佳樹, 田中英史, 佐藤正人: 800 万画素超高精細カメラ, 第 13 回画像入力シンポジウム, pp.10-14 (2001).
- 5) 続 元宏, 岩田洋夫: 旋回式高解像度実画像ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会, Vol.7, No.1, pp.49-57 (2002).
- 6) 渡邊清高, 岩井儀雄, 長原 一, 谷内田正彦: 時空間周波数の異なる画像列からの高解像度動画の合成, 情報科学技術レターズ (FIT2004), Vol.3, No.LI-004, pp.169-172 (Sep. 2004).
- 7) Watanabe, K., Iwai, Y., Nagahara, H., Yachida, M. and Tanaka, H.: Video Synthesis with High Spatio-temporal Resolution Using Motion Compensation and Spectral Fusion, *Proc. SICE2005*, pp.2109-2114 (2005).
- 8) 松延 徹, 長原 一, 岩井儀雄, 谷内田正彦, 田中紘幸: モーフィングによる高解像度高フレームレート動画の生成, 電子情報通信学会技術研究報告 (Jan. 2005).
- 9) Matsunobu, T., Nagahara, H., Iwai, Y., Yachida, M. and Tanaka, H.: Generation of High Resolution Video Using Morphing, *Proc. SICE2005*, pp.2101-2108 (2005).
- 10) Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M.: Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, pp.965-980 (1992).
- 11) Horn, B.K.P.: *Robot Vision*, Ch. 10, pp.206-208, MIT Press (1986).
- 12) 天野 晃, 浅田尚紀, 馬場雅志: ズームレンズの光学的ひずみの解析と補正: 可変円筒モデルを用いた口径蝕現象の解析と画像周辺明度低下の補正, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-D-II, pp.1458-1465 (1997).
- 13) Tsai, R.Y.: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, *IEEE J. Robot. Automat. RA-3*, No.4, pp.323-344 (1987).
- 14) Yang, X.-D., Xiao, Q. and Raafat, H.: Direct mapping between histograms: An improved in-

teractive image enhancement method, *IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, pp.243-247 (1991).

(平成 17 年 5 月 16 日受付)

(平成 17 年 11 月 18 日採録)

(担当編集委員 山澤 一誠)



重本 倫宏

平成 16 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。現在，同大学院基礎工学研究科博士前期課程在学中。



星川 章

平成 16 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。現在，同大学院基礎工学研究科博士前期課程在学中。



長原 一 (正会員)

平成 8 年山口大学工学部電気電子工学科卒業。平成 10 年同大学院理工学研究科博士前期課程修了。平成 13 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年より日本学術振興会研究員として同研究科に所属。平成 15 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 17 年フランスピカルディ大学客員助教授。画像処理，コンピュータビジョン，仮想現実感の研究に従事。2003 年 ACM VRST2003 Honorable Mention Award。電子情報通信学会，日本ロボット学会各会員。工学博士。



岩井 儀雄 (正会員)

平成 4 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 6 年同大学院基礎工学研究科修士課程修了。平成 9 年同大学院基礎工学研究科博士課程修了。同年同大学院基礎工学研究科助手，平成 15 年同大学院助教授。平成 16～17 年英国ケンブリッジ大学にて客員研究員。コンピュータビジョン，パターン認識に関する研究に従事。IEEE，電子情報通信学会，日本ロボット学会各会員。工学博士。



谷内田正彦 (正会員)

昭和 46 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学基礎工学部制御工学科助手。同助教授を経て同学部情報工学科教授，平成 6 年同学部システム工学科教授。昭和 42～43 年デンマーク原子力研究所留学。昭和 47～48 年米イリノイ大学にて Research Associate。昭和 55～56 年西独ハンブルグ大学 Research Fellow。昭和 57 年米ミネソタ大学 CDC Professor。ロボット学会，人工知能学会等会員。著書『ロボットビジョン』(昭晃堂，大川出版賞受賞)，『コンピュータビジョン』(丸善，編著)等。コンピュータ・ビジョン，画像処理，人工知能，移動ロボット等の研究を行っている。工学博士。



鈴木 俊哉

昭和 58 年岩手大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電線工業(株)入社。平成 15 年(株)映蔵入社，現在に至る。