

## 複合センサ画像の補正処理の高速化

中村 在宏<sup>†</sup> 長原 一<sup>†</sup> 岩井 儀雄<sup>†</sup> 谷内田正彦<sup>†</sup> 鈴木 俊哉<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

<sup>††</sup> 株式会社映蔵 〒559-0034 大阪府大阪市住之江区南港北 2-1-10

あらまし 近年、世の中における高品質な映像のニーズの高まりにより、さらなる高解像度や高フレームレートの映像の撮像、提示技術が求められている。一般的な撮像センサを用いた高解像度高フレームレート撮像を実現する手法として複合センサカメラシステムが提案されている。複合センサカメラでは同一の視野を解像度とフレームレートの異なる2種類の画像センサで撮像することで、高解像度と高フレームレート情報の取得を実現しているが、この2つのセンサの特性が異なることから、光学的キャリブレーションと幾何学的キャリブレーションを行う必要がある。従来、この画像補正処理はソフトウェアにより実装されていたため、計算時間がかかることから実時間を要求する監視やライブ撮像の用途には適用できなかった。本研究では、複合センサ画像の画像補正処理をハードウェアにより行うことを提案する。実際にFPGAに補正処理を実装することで、実時間処理を実現した。

## Real-time Image Rectification for Dual Sensor Camera

Akihiro NAKAMURA<sup>†</sup>, Hajime NAGAHARA<sup>†</sup>, Yoshio IWAI<sup>†</sup>, Masahiko YACHIDA<sup>†</sup>,  
and Toshiya SUZUKI<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Gradient School of Engineering Science, Osaka University Machikaneyamacho 1-3,  
Toyonaka-shi, Osaka, 560-8531 Japan

<sup>††</sup> Eizoh Co. LTD. Nankokita 1-3, Suminoe-ku, Osaka-shi, Osaka, 559-0034 Japan

**Abstract** Recently, requirements of high-quality video have been remarkably increased. We have proposed dual sensor camera for capturing a high-resolution and high-frame rate video by using common sensors. The camera is required to sensor calibration between two sensors, because the camera consists of two different sensors. The image rectification process has been implemented by software in the previous work. The camera could not apply to real-time applications such as surveillance or live broadcasting. We propose a FPGA system for the image in realtime in this 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、それに伴ってさらなる高品質映像に対する世の中のニーズが高まっている。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、スムーズな動画像再生を実現する高フレームレートが挙げられる。従来より、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] が挙げられる。暫定的な仕様ではあるがこのカメラは走査線 4000 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 4096 × 2160 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つ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 4000 × 4000 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、一般的なセンサを用いて高品質な映像を実現するための手法として複合センサカメラシステムが重本らによって提案されている [3]。このカメラは、デジタルスチルカメラの様な高解像度低フレームレートセンサと、NTSC ビデオカメラの様な低解像度高フレームレートセンサを複合して用いることで、低コストで高解像度と高フレームレート情報を撮像できるという特徴を持つ。

複合センサカメラを構成する 2 つの撮像センサの特性は各々異なるため、その特性を合わせるために幾何学的キャリブレーションと光学的キャリブレーションを行う必要がある。この複合センサカメラのキャリブレーション手法は同様に重本らによって提案されている [3]。しかし、この手法では画像補正がソフトウェアで行われているため、実時間での補正処理ができず、複合センサカメラシステムをライブ配信やモニタリングなどライブ映像を必要とする用途に適用することは困難であった。

そこで、本研究では複合センサ画像の補正処理をハードウェアで実装することで高速化を実現する手法を提案する。実際に FPGA(Field Programmable Gate Array) に実装することにより、実時間での画像補正を実現した。FPGA を用いた画像処理の関連研究としては、リアルタイムでの画像処理に関する研究 [4] やリアルタイムでのステレオマッチングに関する研究 [5] があり、FPGA により処理を高速化できることが確認されている。

## 2. 複合センサカメラ

複合センサカメラの構成を図 1 に示す。複合センサカメラは、解像度を重視した高解像度低フレームレートカメラ（以下、高解像度カメラと呼ぶ）と、フレームレ

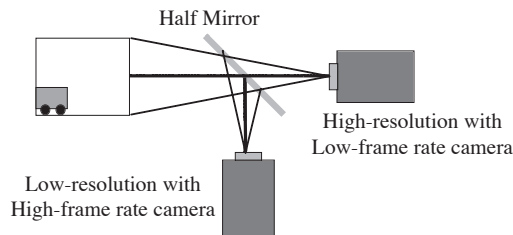


図 1 複合センサカメラの構成

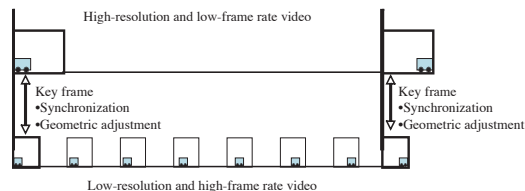


図 2 画像の同期

ートを重視した低解像度高フレームレートカメラ（以下、低解像度カメラと呼ぶ）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野、同一視点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。また、それぞれのカメラで撮像された動画は、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（図 2）。このキーフレームを利用することで、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。

たとえばこの複合センサカメラ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用いて、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の高解像度画像で特定した後、高フレームレート動画を用い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、複合センサカメラで撮像した解像度やフレームレートの異なる 2 種類の動画を渡辺ら [6] や松延ら [7]、Shechtman ら [8] 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。

実際の複合センサカメラの試作例として文献 [3] がある。複合センサカメラで取り込まれた画像を図 3、図 4 に示す。また、それぞれの輝度値のヒストグラムを図 5



図 3 高解像度低フレームレート入力画像 (4008×2672 画素,4.29fps)



図 4 低解像度高フレームレート入力画像 (1008×1018 画素,30fps)

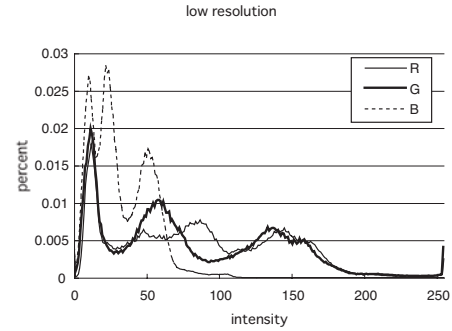
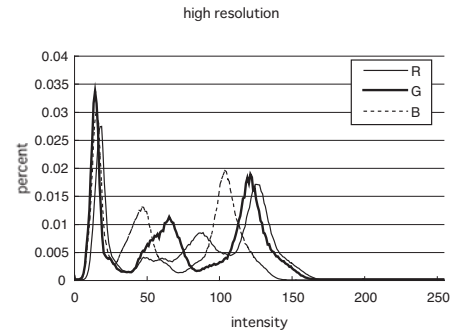


図 5 入力画像のヒストグラム

に示す．これらの図により示されるように，複合センサカメラで得られる2つの動画間には，CCD 特性やレンズ特性の違いから幾何学的，光学的な差が生じる．図2に示すようにこの2つの動画においてキーフレームでの画像の一致を前提としているため，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要がある．

本研究では，FPGA を用いることで複合センサ画像の補正処理を高速化する手法を提案する．これにより複合センサカメラシステムの応用をライブ用途にも広げることができる．

### 3. 複合センサ画像の画像補正処理

ここでは複合センサカメラの撮像モデルとその撮像画像を対象にした補正処理手法について述べる．

#### 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6に示すように基準となる世界座標系  $O_w-x_w-y_w-z_w$  における点  $P$  の座標を  $(x_w, y_w, z_w)$  と表し，カメラ座標系  $O-x-y-z$  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，点  $P$  の画像平面への透視投影点を  $P_u(X_u, Y_u)$  と表す．点  $P$  は実際にはレンズ歪みによって点  $P_d(X_d, Y_d)$  に投影される．複合センサカメラのモデルは，高解像度カメラと低解像度カメラそれぞれ2つ

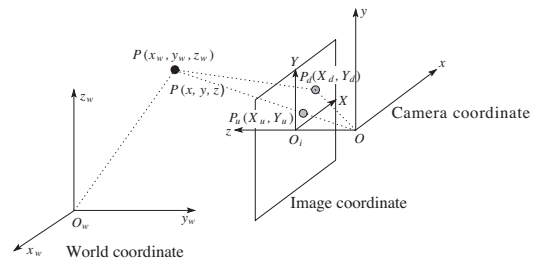


図 6 世界座標と画像平面の関係

のピンホールカメラモデルの結合として表すことができる．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7に示す．ただし， $P_f(X_f, Y_f)$  は点  $P_d(X_d, Y_d)$  に対応する観測画像上の点である．また， $high, low$  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．この図に示された各座標同士の関係式を以下に示すが，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  $\mathbf{R}$  と平行移動ベクトル  $\mathbf{T}$  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．

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

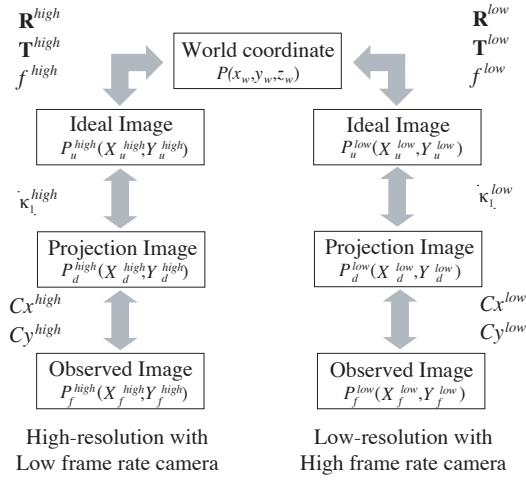


図7 カメラパラメータと座標の関係

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

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。

$$\begin{aligned} X_u &= X_d + X_d \delta(R_d) \\ Y_u &= Y_d + Y_d \delta(R_d) \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} X_f &= d_x^{-1} X_d + C_x \\ Y_f &= d_y^{-1} Y_d + C_y \end{aligned} \quad (5)$$

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[9]。

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

実際には radial distortion は第1項のみでも十分な精度が得られるため、

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

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

とする。

### 3.2 画像補正

複合センサ画像を対象とした補正処理の流れを図8に示す。この処理は低解像度画像の特性を高解像度画像の特性に一致させることを目的としており、輝度補正、幾

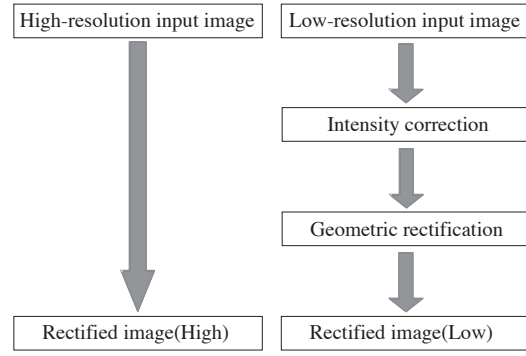


図8 処理の流れ

何学的補正の2つのステップで構成される。高解像度画像の特性と低解像度画像の特性を一致させることが目的であるため、高解像度画像と低解像度画像の両方に補正処理を加える必要はない。2つの画像の両方に補正処理を加える場合に比べて、どちらか一方の画像に処理を加える方がハードウェアでの実装は容易となる。また、高解像度カメラおよび低解像度カメラの画像データレートはそれぞれおよそ45MB/s、30MB/sである。単位時間あたりのデータ量の少ない低解像度画像に補正処理を加える方が高解像度画像のみに処理を加えるよりも計算量が削減できる。そこで、本手法では低解像度画像のみに補正処理を加える。

#### 3.2.1 輝度補正

高解像度画像と低解像度画像の間で異なる濃淡や色調を一致させるため、低解像度画像に対して輝度変換を行う。ここでは、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[10]を用いる。高解像度画像および低解像度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  $j$  を次式のように定義できる。

$$j = \arg \min_j |H_i^{high} - H_j^{low}| \quad (9)$$

この輝度変換の対応関係をRGBすべての輝度レベルに対して求めることで、輝度変換テーブルを作成することができる。輝度変換テーブルの作成には任意の同一視野の画像を用いるが、ダイナミックレンジが広い画像が好ましい。輝度変換テーブルは、センサ特性のみに依存するため、一度変換テーブルを事前に作成しておくことで、以後は異なる画像に対しても同じ変換テーブルを用いて補正を行うことができる。

実際の輝度補正処理は、事前に求めた輝度変換テーブルをFPGA上のメモリにロードし、そのテーブルの対

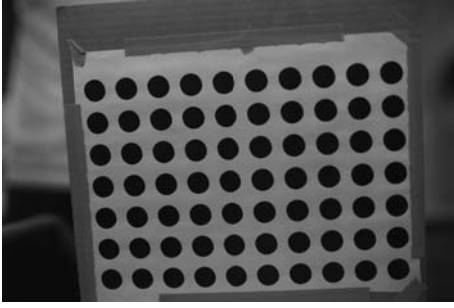


図9 キャリブレーションパターン

応関係に基づいて変換することで、実時間での処理を実現する。

### 3.2.2 幾何学的補正

幾何学的補正は、3.1節のカメラモデルを想定し、高解像度カメラと低解像度カメラのカメラパラメータを推定する。幾何補正処理では、そのパラメータを用いて低解像度画像を高解像度入力画像空間に一致させるように、変形することで幾何学的補正を行う。なお、カメラの配置やレンズの設定を変更しなければ、カメラパラメータは変化しないため、事前にカメラパラメータを決定し、そのパラメータを用いてFPGAにより実時間補正を行うことができる。

高解像度カメラと低解像度カメラそれぞれのパラメータの初期値推定法としてTsaiの手法[11]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 $R$ と $T$ を求めることができる。ここでは、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9)。既知のキャリブレーションパターンを用いることで、高解像度カメラと低解像度カメラのパラメータを推定することができる。このパラメータを用いることで、低解像度入力画像座標 $(X_f^{low}, Y_f^{low})$ と高解像度入力画像座標 $(X_f^{high}, Y_f^{high})$ の対応を計算することができ、低解像度画像を高解像度画像に一致させるように画像の幾何補正を行うことができる。

しかしながら、Tsaiの手法では特徴点の位置が一致するようにパラメータが最適化されているため、高解像度画像と低解像度画像を一致させるという観点からは、必ずしも最適なパラメータであるとは言えない。そこで、画像を用いてカメラパラメータの最適化を行う。具体的には、まずTsaiの手法で求めたパラメータの初期値として低解像度画像を高解像度入力画像座標に投影した画像 $I^b$ 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(10)を用いて評価関数 $Q$ を最小とす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。

$$Q = \sum \left( I^b(x, y) - I^{high}(x^{high}, y^{high}) \right)^2 \quad (10)$$

なお、実際の補正処理では、このように事前に求めた高解像度カメラの内部パラメータ $f^{high}, \kappa_1^{high}, C_x^{high}, C_y^{high}$ と外部パラメータ $R^{high}, T^{high}$ および低解像度カメラモデルの内部パラメータ $f^{low}, \kappa_1^{low}, C_x^{low}, C_y^{low}$ と外部パラメータ $R^{low}, T^{low}$ を、FPGAのメモリ上にロードして、画像補正処理のみをハードウェアで行うことで、実時間での処理を実現する。以下にFPGAでの補正のための変換モデルについて述べる。

3.1節で示したカメラモデルでは低解像度透視投影平面上の点 $P_u(X_u^{low}, Y_u^{low})$ からレンズ歪みを考慮した実際の低解像度画像平面への投影点 $P_d(X_d^{low}, Y_d^{low})$ を求める際に3次方程式を解く必要が出てくる。しかし、ハードウェアで3次方程式を解くには多くのクロックが必要となる。そこで、座標計算の高速化をはかるため低解像度カメラの歪みモデル(式(7), (8))を以下のように変更する。

$$X_d = X_u + X_u \kappa_1 R_u^2 \quad (11)$$

$$Y_d = Y_u + Y_u \kappa_1 R_u^2 \quad (12)$$

この変更により $(X_u^{low}, Y_u^{low})$ から $(X_d^{low}, Y_d^{low})$ への変換が四則演算だけで可能となり、変換計算が高速に行えるようになる。

本研究ではハードウェア記述言語としてVHDL(Verilog High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language)を使用した。幾何補正での演算におけるそれぞれの変数の値はbit vector型を用いて、固定小数点数として表現する。固定小数点数で表現することの利点として、情報落ちが起こらないことや演算が高速に行えることが挙げられる。しかし、VHDLでは除算はinteger型同士でのみ定義されているため、変数のデータタイプをbit vector型から符合付き32ビット長の整数値であるinteger型に変換してから行う必要がある。そのため、除算を行う際は桁落ちの影響を少なくするため、integer型への変換前に被除数に対してMSB(Most Significant Bit)側へのシフト演算を行う。しかし、除数が大きき値である場合はinteger型のビット長の制限から十分な有効桁数が得られるだけのシフト演算が行えないため、除

算結果の桁落ちが避けられない．大きな桁落ちが起こった場合は，幾何変換に大きな誤差が生じるため，除算による桁落ちの影響を少なくするため，数式をまとめて除算回数を減らす．また，演算速度を向上させるために，定数はまとめて，あらかじめ求めておく．以下にその変換式を示す．

高解像度観測画像上の点  $P_f^{high}$  の座標からレンズ歪みを含む実際の高解像度画像平面への投影点  $P_d^{high}$  の座標への変換は式 (13), (14) で表される．

$$X_d^{high} = X_f^{high} - C_x^{high} \quad (13)$$

$$Y_d^{high} = Y_f^{high} - C_y^{high} \quad (14)$$

レンズ歪みを含む実際の高解像度画像平面への投影点  $P_d^{high}$  の座標から高解像度画像平面への透視投影点  $P_u^{high}$  の座標への変換は式 (15), (16) で表される．

$$X_u^{high} = X_d^{high} + X_d^{high} \kappa_1^{high} R_d^{high^2} \quad (15)$$

$$Y_u^{high} = Y_d^{high} + Y_d^{high} \kappa_1^{high} R_d^{high^2} \quad (16)$$

ただし，

$$R_d^{high^2} = X_d^{high^2} + Y_d^{high^2} \quad (17)$$

高解像度画像平面への透視投影点  $P_u^{high}$  の座標から低解像度カメラ座標系における点  $P^{low}$  の座標への変換は式 (18), (19) および (20) で表される．

$$x^{low} = c_1 X_u^{high} + c_2 Y_u^{high} + c_3 f^{high} \quad (18)$$

$$y^{low} = c_4 X_u^{high} + c_5 Y_u^{high} + c_6 f^{high} \quad (19)$$

$$z^{low} = c_7 X_u^{high} + c_8 Y_u^{high} + c_9 f^{high} \quad (20)$$

ただし， $c_i$  ( $i = 1, \dots, 9$ ) は定数であり，

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{low} \mathbf{R}^{high} + \frac{\mathbf{r}^{high} (\mathbf{T}^{low} - \mathbf{R}^{low} \mathbf{R}^{high} \mathbf{T}^{high})^T}{(\mathbf{r}^{high})^T \mathbf{T}^{high}} \quad (21)$$

ここで， $\mathbf{r}^{high}$  は  $\mathbf{R}^{high}$  の3列目の列ベクトルである．低解像度カメラ座標系における点  $P^{low}$  の座標から低解像度画像平面への透視投影点  $P_u^{low}$  の座標への変換は式 (22), (23) で表される．

$$X_u^{low} = f^{low} \frac{x^{low}}{z^{low}} \quad (22)$$

$$Y_u^{low} = f^{low} \frac{y^{low}}{z^{low}} \quad (23)$$

低解像度画像平面への透視投影点  $P_u^{low}$  の座標からレンズ歪みを含む実際の低解像度画像平面への投影点  $P_d^{low}$

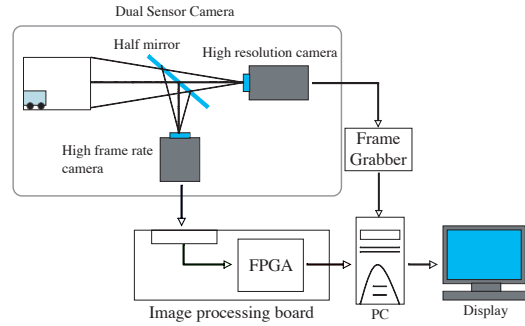


図 10 提案システムの構成

の座標への変換は式 (24), (25) で表される．

$$X_d^{low} = X_u^{low} + X_u^{low} \kappa_1^{low} R_u^{low^2} \quad (24)$$

$$Y_d^{low} = Y_u^{low} + Y_u^{low} \kappa_1^{low} R_u^{low^2} \quad (25)$$

ただし，

$$R_u^{low^2} = X_u^{low^2} + Y_u^{low^2} \quad (26)$$

レンズ歪みを含む実際の低解像度画像平面への投影点  $P_d^{low}$  の座標から低解像度観測画像上の点  $P_f^{low}$  の座標への変換は式 (27), (28) で表される．

$$X_f^{low} = X_d^{low} + C_x^{low} \quad (27)$$

$$Y_f^{low} = Y_d^{low} + C_y^{low} \quad (28)$$

## 4. 実 装

図 10 に提案する複合センサカメラ撮像，画像補正システムの概要を示す．また，試作した複合センサカメラの仕様を表 1 に示す．なお，高解像度カメラとして REDLAKE 社の ES11000 を，低解像度カメラとして BASLER 社の A201bc を用いた．図 10 に示すように，高解像度カメラの画像出力は，フレームグラバーを通してそのまま PC に取り込まれる．一方で，低解像度カメラの画像出力は，FPGA 画像処理ボードに接続され，FPGA 上で画像補正を行った後，PC に取り込まれる．3.2 節で述べたように低解像度画像と高解像度画像の一致を目的としているため，このようなシステム構成により，画像補正は低解像度画像のみに行われる．

表 1 複合センサカメラの仕様

	High-resolution with Low-frame rate camera	Low-resolution with High-frame rate camera
Resolution	4008×2672 pixels	1008×1018 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	

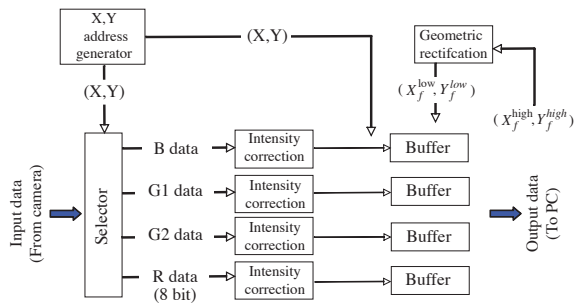


図 11 画像補正の流れ

B	G1	B	G1
G2	R	G2	R
B	G1	B	G1
G2	R	G2	R

図 12 ベイヤー配列

FPGA 内における画像補正処理を図 11 に示す。カメラの CCD は Bayer 配列となっており、1 画素ごとに RGB のいずれかのデータのみが入力として与えられる。CCD 上での R, G, B の配置を図 12 に示す。なお、後の説明のため G 成分は G1, G2 と表記することにする。アドレスジェネレータでは入力データの数からその座標を計算する。ただし、画像左上隅を原点とし、水平方向右向きに x 軸、垂直方向下向きに y 軸をとるものとする。入力データは原点から水平方向右向きに順に与えられる。セレクタで取り込んだ入力データをその座標から B, G1, G2, R のいずれのデータであるかを判別し、対応する出力信号線に送る。そのデータに輝度変換ブロックで輝度補正を加える。輝度変換は B, G1, G2, R ごとに先に 3.2.1 節で求めた変換テーブルを用意し、そのテーブルによって変換を行う。輝度補正テーブルの入力と出力の輝度値の対応を例として図 13 に示す。輝度補正後のデータはその座標とともに B, G1, G2, R ごとに用意したバッファに保存される。また一方で、出力データの座標に幾何変換ブロックで幾何補正を加え、その座標に対応する入力データの座標を求める。求められた座標のデータをバッファから取り出し出力する。出力データの座標は高解像度観測画像平面に投影された低解像度画像の座標であり、幾何変換により投影前の元の低解像度観測画像上の点の座標を求める。

## 5. 実験

実際に 3. 章で提案したアルゴリズムを、VHDL でプログラミングを行い、FPGA に組み込むことにより動

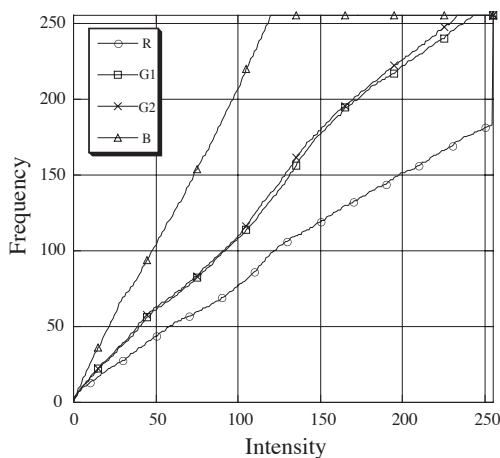


図 13 輝度変換テーブル

作実験を行った。FPGA 画像処理ボードとして soliton 社の Tsunami PCI A40 を用いた。このボードにはカメラインターフェース、FPGA、メモリが備えられている。FPGA として ALTERA 社の EP1S40 が搭載されている。画像処理ボードの仕様を表 2 に、FPGA の仕様を表 3 に示す。

実験では低解像度画像を取り込み、補正された低解像度画像を PC に取り込んでディスプレイに表示させる。この実験に用いたパラメータを表 4 に示す。図 14 に低解像度入力画像を、図 15 に幾何学的、光学的補正後の低解像度画像を示す。

この結果から、FPGA により与えた輝度変換テーブルおよびカメラパラメータに従って低解像度入力画像に幾何学的補正および光学的補正が行われたことが示され

表 2 画像処理ボードの仕様

	Tsunami PCI A40
PCI bus interface (bit range / speed)	32 bit / 33 MHz
local bus (bit range / speed)	32 bit / 50 MHz
SRAM memory	2 MB per bank, 4 MB total
SDRAM memory	512MB per bank, 1024 MB total

表 3 FPGA の仕様

	EP1S40
Total Logic Elements	41250
TriMatrix memory, total RAM bits	3423744
PLLs	8 (4 Enhanced, 4 Fast)
DSP blocks	14
Embedded multipliers	112

表 4 設定カメラパラメータ

$C_x^{high}$	$2.0040 \times 10^3$	$c_1$	1.0000
$C_y^{high}$	$1.3360 \times 10^3$	$c_2$	0.0000
$\kappa^{high}$	$5.0000 \times 10^{-9}$	$c_3$	0.0000
$f^{high}$	$8.0000 \times 10^2$	$c_4$	0.0000
$C_x^{low}$	$5.0400 \times 10^2$	$c_5$	1.0000
$C_y^{low}$	$5.0900 \times 10^2$	$c_6$	0.0000
$\kappa^{low}$	$-5.0000 \times 10^{-9}$	$c_7$	0.0000
$f^{low}$	$2.0000 \times 10^2$	$c_8$	0.0000
		$c_9$	1.0333



図 14 補正前の低解像度画像 (1008×1018 画素,30fps)



図 15 画像後の低解像度画像 (1002×668 画素,30fps)

た．また，低解像度入力画像を 30fps で補正処理が行えることが示された．

## 6. おわりに

本論文では，FPGA を用いることで複合センサ画像の補正処理を高速に行う手法を提案した．FPGA での画像補正処理手法を示し，補正処理を実装した．撮像実験により，低解像度画像への幾何学的，光学的補正および表示が実時間で行えることを確認した．

今後は得られた補正後の画像の精度評価を行う予定である．また，高解像度との同期撮像を行う予定である．

## 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．

## 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”, IPSJ Magazine, Vol. 45, No. 11, pp. 1157-1163, Nov. 2004.
- [3] 重本倫宏, 星川章, 長原一, 岩井儀雄, 谷内田正彦, 鈴木俊哉, “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”, 情報処理学会論文誌, Vol. CVIM-47, No. SIG-5, pp.35-44, Mar. 2006.
- [4] 平井慎一, 座光寺正和, 増渕章洋, 坪井辰彦, “FPGA ベースリアルタイムビジョン”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 7, pp. 873-880, 2004.
- [5] Divyang K.Masrani, W.James MacLean, “A Real-Time Large Disparity Range Stereo-system Using FPGAs”, *Proc. Asian Conf. Computer Vision*, Vol. LNCS 3852, pp. 42-51, 2006.
- [6] K. Watanabe, Y. Iwai, H. Nagahara, M. Yachida, T. Suzuki, “Video Synthesis with High Spatio-Temporal Resolution Using Motion Compensation and Image Fusion in Wavelet Domain”, *Proc. Asian Conf. Computer Vision*, Vol. LNCS 3851, pp. 480-489, 2006.
- [7] T. Matsunobu, H. Nagahara, Y. Iwai, M. Yachida, H. Tanaka, “Generation of High Resolution Video Using Morphing”, *Proc. SICE Annual Conference*, pp. 2101-2108, 2005.
- [8] Eli Shechtman, Yaron Caspi, Michal Irani, “Space-Time Super-Resolution”, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27, No. 4, pp. 531-545, 2005.
- [9] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou, “Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation”, *Proc. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, pp. 965-980, 1992.
- [10] X-D Yang, Q. Xiao, and H. Raafat, “Direct mapping between histograms: An improved interactive image enhancement method”, *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics*, pp. 243-247, 1991.
- [11] R. Y. Tsai, “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses”, *IEEE J. Robotics and Automations*, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344, 1987.