

画像照合と周期構造パターンを利用したレンズ歪みの補正方法

三田村 智行, 大村 功*

Correction Method of Lens Distortion using Image Matching and Periodic Structure Pattern

Tomoyuki MITAMURA, Isao OHMURA*

抄 録

画像センサは、計測や制御、ロボットの環境認識など幅広い分野で利用され、その活用範囲が広がっている。画像センサで取得された画像には、レンズによる歪みが生じている場合があり、計測誤差を生じたり、期待した処理結果が得られないおそれがある。このため、歪みによる影響が懸念される用途では、歪みを取り除く補正処理が行われる。本研究では、歪みのある画像と歪みを取り除いた画像の対応関係を表す補正テーブルを、周期構造パターンを撮影した1枚の画像と画像照合を用いて求める方法を開発した。また、この方法を画像センサやステレオビジョンセンサに適用し、その効果を確認した。

キーワード：レンズ歪み, 画像照合, 画像センサ, ステレオビジョンセンサ

Abstract

Image sensors are utilized in a wide range of fields, and its utilization range is widened. The lens distortion of the image sensor causes a measurement error, and there is a possibility that the expected processing results can not be obtained. Therefore, the applications where the distortion becomes a problem, the process of removing the distortion is carried out. This paper describes a method of determining a correction table representing the correspondence between the image with distortion and without distortion, using a single image of periodic structure pattern and the image matching. We applied this method to an image sensor and a stereovision sensor and confirmed the effect.

KEY-WORDS : Lens distortion, Image matching, Image sensor, Stereovision sensor

1. はじめに

画像センサは、計測や制御、ロボットの環境認識など幅広い分野で利用され、その活用範囲が広がっており、当試験場においても、イメージセンサとFPGAを組み合わせた小型画像センサやリアルタイムステレオビジョンセンサの開発と応用に取り組んでいる¹⁾²⁾。画像センサで取得する画像には、レンズによる歪みが生じていることがあり、歪みを考慮せずに画像処理を行うと、計測誤差を生じるなど、期待した処理結果が得られないことがある。補正処理により歪みを取り除くことができれば、誤差の発生を抑制することが可能となる。また、基本的なピンホールカメラモデルで画像を扱うことが

できるため、画像処理が容易になる。

レンズによる歪みの補正処理については、従来から多くの方法が提案されている。補正方法の多くは、レンズによる歪みをモデル化して数式で表し、キャリブレーション用の画像などを用いてモデルのパラメータを求めている³⁾。この方法とは別のアプローチとして、パラメータを用いずに、歪みのある画像と歪みのない画像との対応関係を直接求める方法がある。この方法では、歪みのある画像と歪みのない画像との対応関係を格子模様のパターンなどを用いて求めるため、直接対応関係が求められるのは線の交点など限られた点となり、補正に必要な対応点をさらに求めるには、補間を行う必要がある。補間の精度を高めるため、ベジェ補間を用いる方法⁴⁾

* 道総研 研究企画部, * Hokkaido Research Organization Research Planning Division

事業名：経常研究

課題名：画像照合を用いたカメラ画像の補正・校正手法に関する研究

などが提案されている。また、歪みのある画像と歪みのない画像との対応関係を密に求めるため、時系列的にグレイコードの各ビットで構成されたパターンを液晶ディスプレイに表示させ、得られた複数の画像を用いて対応関係を求める方法も提案されている⁵⁾。

本研究では、画像照合と周期構造パターンを用いて、1枚の画像から、歪みのある画像と歪みを除去した画像の対応関係をすべての画素について求める方法を開発した。複数の画像を扱う必要がなく、補間の必要もないので、当試験場で開発している画像センサのような、イメージセンサとFPGAの組み合わせによる規模の小さなシステムでも活用が可能である。

2. 周期構造パターンと画像照合を用いた歪み補正

本手法では、歪みのある画像から歪みのない画像への対応関係を表す補正テーブルを作成し、歪みの除去を行う。補正テーブルの作成には、基本パターンを繰り返し配置し、周期構造を持たせたパターンを利用する(図1)。このパターンの一部を切り出してテンプレートとすると、パターン中には、テンプレートと同じ画像が、基本パターンの繰り返し周期ごとに並んでいる。そこで、画像照合技術を用いてテンプレートと一致する位置を求めることで、繰り返しの構造を検出することができる。これは、格子模様線の交点やチェッカーボードのコーナーを検出する処理に相当する。

画像照合には、高速性とロバスト性を備えた方向符号照合法を用いた。

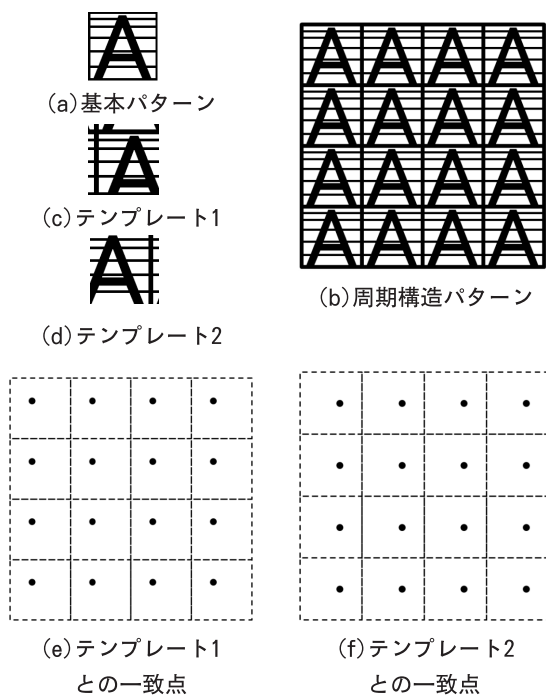


図1 周期構造パターン

2.1 方向符号照合法

方向符号照合法は、画像の明度そのものではなく、画素近傍における明度変化が最大となる勾配方向を量子化して得られる方向符号を用いて、2つの画像の類似度を評価する画像照合法である。この方向符号の分布は画像ごとの固有性が高く、また、照明不良などに起因する明度変動の影響を受けにくい、無相関画像間における類似度が定値性を有する、という特性がある⁶⁾。

画素 (x, y) での明度を $I(x, y)$ とし、画像の x 方向および y 方向の明度勾配を、それぞれ次のとおり定義する。

$$\begin{aligned} \Delta I_x &= \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \\ \Delta I_y &= \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \tag{1}$$

これより、画素 (x, y) における明度勾配の角度 $\theta(x, y)$ は、

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{\Delta I_y}{\Delta I_x} \tag{2}$$

として求めることができる。勾配演算には、Sobelオペレータなどを用いる。このとき、方向符号 c_{xy} は、明度勾配の角度 $\theta(x, y)$ を量子化幅 $\Delta\theta = 2\pi/N$ により量子化した符号として、次式により定義される。

$$c_{xy} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\theta(x, y)}{\Delta\theta} \right\rfloor & \text{if } |\nabla I_x| + |\nabla I_y| \geq \Gamma \\ N & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

ここで、 Γ は安定な符号生成を行うためのしきい値として使用する値である。画素近傍のコントラストが低く、十分な勾配値が得られない場合に、無効符号 N を割り当てる。有効な方向符号は $0 \sim N-1$ となる。

画像照合の評価は、参照画像と比較対象となる探索画像の方向符号の平均残差絶対値 D により行う。参照画像を I_{ref} 、探索画像を I_{search} 、それぞれの方向符号を c_{ref} 、 c_{search} とすると、平均残差絶対値 D は、方向符号の残差絶対値 d を用いて、次式により定義される。参照画像、探索画像ともに、画像のサイズは $S_x \times S_y$ である。

$$D = \frac{1}{S_x \times S_y} \sum_{S_x \times S_y} d(c_{ref}, c_{search}) \tag{4}$$

$$d(a, b) = \begin{cases} \min\{|a-b|, N-|a-b|\} & \text{if } a \neq N, b \neq N \\ N/4 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

なお、残差絶対値 d の算出では、方向符号が巡回であることを考慮している。方向符号とその残差絶対値の算出例を図2に示す。

さらに、平均残差絶対値 D の最大値が $N/2$ であることに留意して、類似度 S を次式により定義する。

$$S = 1 - \frac{4}{N}D \quad (6)$$

参照画像と探索画像の方向符号に無効符号がないとき、類似度 S は、両画像が同一のときに1、無相関のときに0、輝度が反転した画像のときに-1となる。

所定の範囲内で探索画像を移動させて平均残差絶対値または類似度を計算し、平均残差絶対値が最小または類似度が最大となる位置を、照合位置とする。

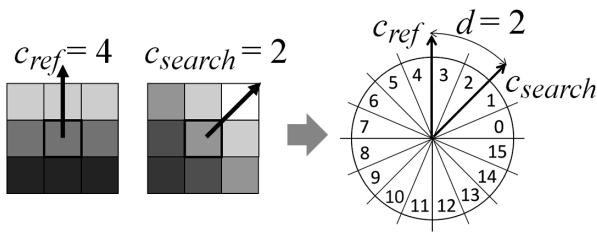


図2 方向符号とその残差絶対値の例 (N=16)

2.2 パターンの検出

方向符号照合を利用した歪み補正に適した周期構造パターンについて検討する。

画像照合により周期構造を検出し、歪みの補正に利用するためには、類似度がテンプレートと一致する位置で鋭いピークを示し、それ以外の位置では十分小さな値となることが重要である。基本パターンにランダムノイズ画像を採用し、これを繰り返し配置して作成した周期構造パターンは、その一部をテンプレートとして方向符号照合により類似度を求めると、照合位置で鋭いピークを示すなど、歪み補正用として優れた性質を示す(図3(a), (b))。しかし、パターンと画像センサの距離やレンズの焦点距離、焦点の調整などにより、撮影された画像上でのパターンの大きさが変化することを想定し、パターンを拡大または縮小すると、画像の周期性は失われ(図3(c)), 周期構造の検出ができなくなる(図3(d))ため、歪みの補正には利用できない。

このため、拡大縮小しても周期構造が維持され、かつ、類似度がテンプレートと一致する位置で鋭いピークを示し、それ以外の位置では十分小さな値となるパターンを採用する必要がある。

周期構造の検出に方向符号照合法を利用することを踏まえると、パターンは、次のような性質を備える必要がある。

- ① 方向符号が一定、すなわち明度変化の方向が一定であ

る適度な大きさの領域の組み合わせで構成されたパターンであること

- ② 領域の境界が多方向を向いていること

- ③ 隣接する領域との方向符号の差が大きいこと

①はパターンの拡大縮小に対応するための要件、②および③はテンプレートと一致する照合位置で類似度が鋭いピークを持ち、それ以外で小さな値となるための要件である。

本研究では、このような性質を持つパターンから、照合位置での類似度のピークの鋭さ、照合位置以外での類似度の小ささ、パターンの拡大・縮小による影響の程度を評価し、歪み補正に利用できるパターンを選定した。図4はその一例であり、パターンは方向符号が一定の領域の組み合わせとなっていることがわかる。図5は、図4(a)のパターン1を縮小し、画像中央にテンプレートを設定して、方向符号照合を行った結果である。縮小しても方向符号の周期構造が維持されて

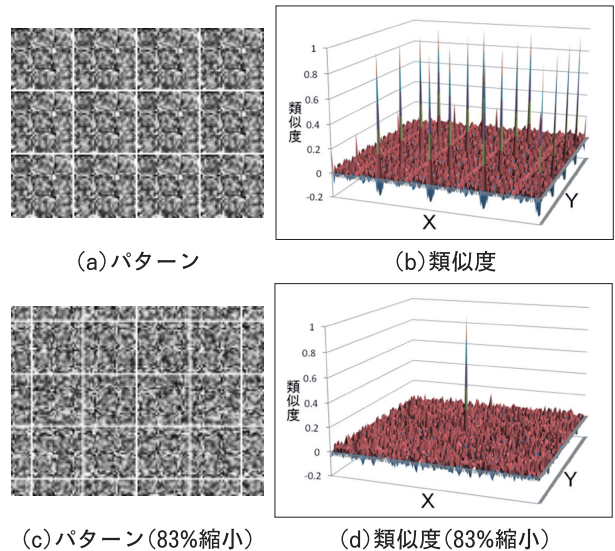
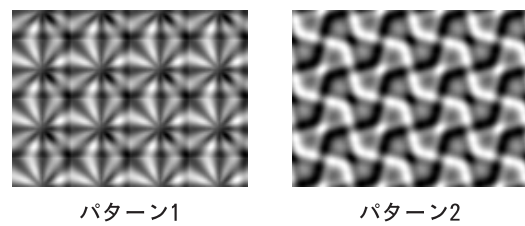
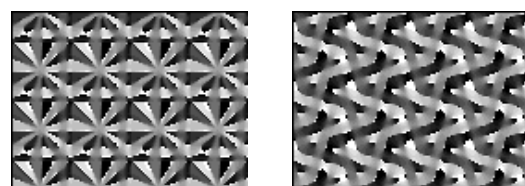


図3 ランダムノイズ画像を用いたパターン



(a) 周期構造パターン



(b) 周期構造パターンの方向符号

図4 周期構造パターンの例

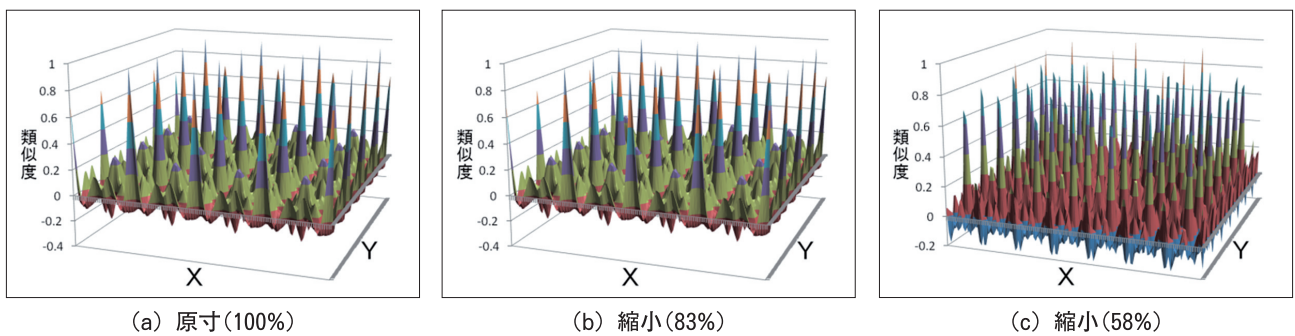
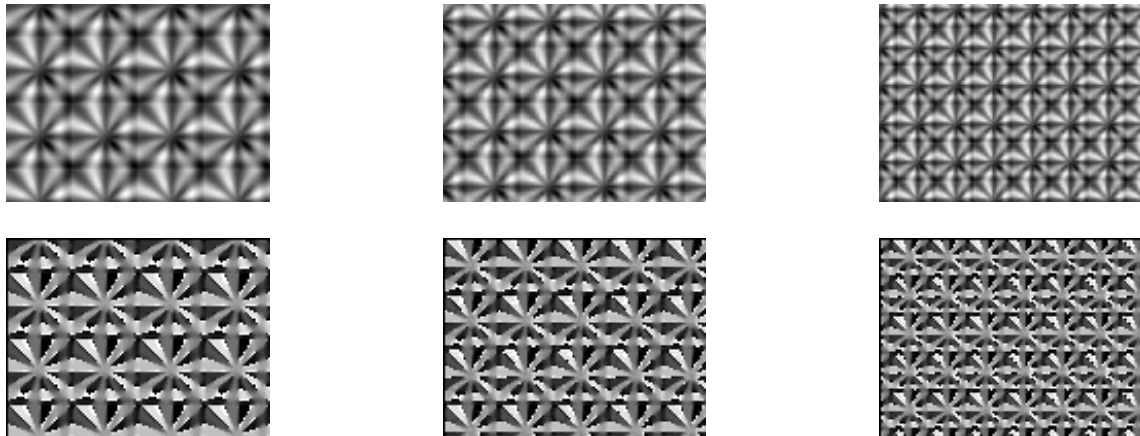


図5 縮小した周期構造パターン(上)とその方向符号(中), 中央をテンプレートしたときの類似度(下)

いること、類似度が照合位置でピークを示し、周期構造を抽出できていることが確認できる。

2.3 補正テーブルの作成

周期構造パターンを撮影した画像から、補正テーブルを作成する。補正テーブルは、補正前の歪みのある画像と歪みを取り除かれた補正後の画像の対応関係を、画像中の各画素について表したものである。

まず、パターンとカメラを正対させ、パターンの水平垂直が画像の水平垂直と一致するよう調整し、撮影されたパターンの周期を求める。これは、歪みが小さく無視できると考えられる画像中央付近を使用して行う。テンプレートを画像中央に設定し、テンプレートと一致する照合位置を画像中央から上下方向、左右方向に探索する。それぞれの方向で最初に現れる照合位置とテンプレートの座標の差が、画像上でのパターンの周期となる。

基本パターンが正方形の場合、上下方向の照合位置とテンプレートの x 座標、左右方向の照合位置とテンプレートの y 座標がそれぞれ一致し、各方向の周期が一致するよう調整することで、パターンとカメラを正対させ、パターンの水平垂直を画像の水平垂直と合わせることができる。

この状態で、テンプレートを、求められた1周期の範囲にわたり1画素ずつ移動させ、画像照合により各々のテンプレートと一致する位置を求める。一方、歪みのない画像では、テ

ンプレートと一致する画像は求めた周期ごとに現れるので、その位置は計算により求めることができる。そこで、歪みのある画像上で求めた照合位置と、歪みがない画像におけるテンプレートの位置の座標の差を求めることにより、補正テーブルを作成することができる。

3. 小型画像センサを用いた実験

本手法の効果を確認するため、当試験場で開発した小型画像センサを用いて実験を行った。実験に用いた画像センサを図6に、その仕様を表1に示す。

周期構造パターンは、図4(a)のパターン1を用いた。パターンのサイズは2880×1920画素、基本パターンのサイズは96×96画素であり、これを大型プリンタで900mm×600mmの大きさに印刷して使用した。基本パターンの大きさは30×30mmである。

パターンと画像センサを正対させ、その間の距離を80cmに調整し、撮影した画像が図7(a)である。撮影されたパターンには、樽型の歪みが生じている。

この画像を用いて、2.3節の方法により補正テーブルを作成し、これを用いて図7(a)の歪みを取り除いた結果が図7(b)である。また、チェッカーパターンを撮影した画像の補正前後の画像を図7(c), (d)に示す。図7(a), (c)で歪んでいたパターン中の直線が、図7(c), (d)では直線となっており、

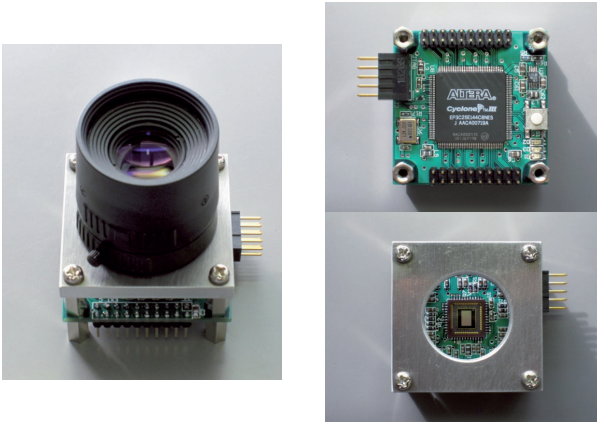


図6 小型画像センサ

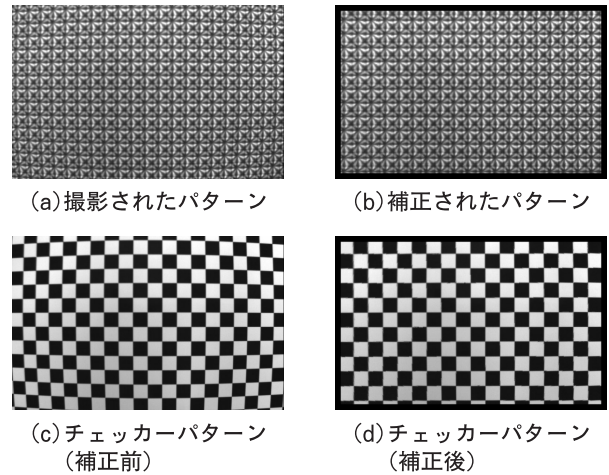


図7 小型画像センサを用いた補正実験

表1 小型画像センサの仕様

イメージセンサ	Aptina社 MT9V032 (Mono, 1/3inch, 752×480px, 60fps)
FPGA	Altera社 Cyclone III EP3C25E144C8NES(25kLEs)
レンズマウント	CSマウント
サイズ	W45×H45×D25mm(レンズを除く)
レンズ	TAMRON CCTVレンズ f=6mm 13FM061R
サイズ	W45×H45×D25mm (レンズを除く)

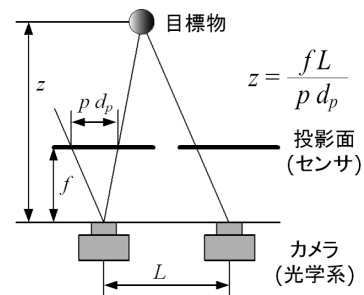


図8 ステレオビジョン (平行等位)

補正の効果が確認できる。

4. ステレオビジョンセンサへの応用

本手法を、当試験場で開発したステレオビジョンセンサ²⁾の簡易較正に応用した。ステレオビジョンは、2台のカメラで目標物を撮影し、カメラから目標物までの距離を三角測量の原理で計測する技術である。この技術では、2つのカメラで撮影された画像の間で、対応点を求める必要があるが、2台のカメラを平行等位の関係とすることで、対応点の探索範囲を1本の水平ライン上に限定できるため、大幅な演算量の削減が可能となる(図8)。当試験場で開発したステレオビジョンセンサでも、平行等位ステレオを採用している。

平行等位ステレオでは、2台のカメラは、光軸が平行で、レンズの焦点距離が等しく、投影面(イメージセンサ)が同じ高さで平行に配置される。しかし、実際のステレオビジョンセンサでは、イメージセンサの実装精度やレンズの取り付け誤差などの影響により、完全な平行等位ステレオを実現することは難しく、較正が必要である。また、画像周辺部ではレンズの歪みの影響を受け、対応点の探索精度が低下するため、歪みの補正を行うことが望ましい。そこで、本手法をス

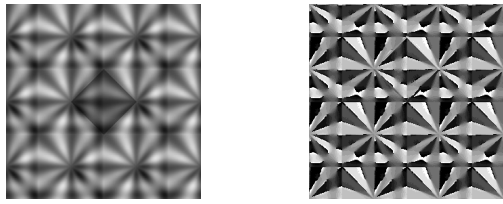
テレオビジョンセンサの較正とレンズ歪みの補正に応用した。

4.1 周期構造パターンへのマーカの付加

左右のカメラそれぞれの画像の歪みの補正は、2.3節の方法により可能であるが、周期構造パターンを撮影した2つの画像の対応関係を求めるためには、パターン中の位置を特定できるマーカが必要である。そこで、歪みの補正に用いる画像照合に影響を与えずに、2つの画像の対応関係を把握することができるマーカを開発した。

本手法では、画像照合において方向符号を用いて類似性を評価しているため、マーカの付加により方向符号が変化しないことが望ましい。方向符号は、明度の勾配方向であり、明度そのものではないので、明度の勾配方向が保存されるように、パターンの一部分の明度を変化させることで、その部分をマーカとして利用することができる。パターンは、方向符号が一定である領域の組み合わせで構成されているので、この領域の境目で明度変化を与えても、方向符号はほとんど影響を受けない。

そこで、図4(a)のパターン1について、図9(a)のように明度差を付け、マーカとした。これを方向符号に変換したものが図9(b)であり、マーカが方向符号には影響していない



(a) マーカを埋め込んだパターン (b) (a)の方向符号

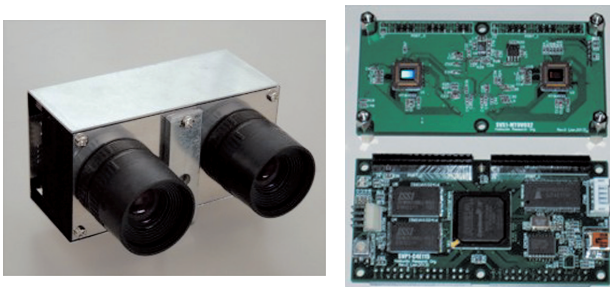
図9 ステレオ校正用のマーカ

ことがわかる。

このマーカを埋め込んだパターンでは、歪みの補正に加えて、周囲と明度の異なる部分同士で画像照合を行うことにより、2つの画像の対応関係を把握することができる。

4.2 ステレオビジョンセンサの補正・校正

当試験場で開発したステレオビジョンセンサに、レンズ歪みの補正と簡易校正を行い、効果を確認した。実験に用いたステレオビジョンセンサを図10に、その仕様を表2に示す。ステレオビジョンセンサの右カメラを基準カメラとし、これと正対するよう調整した後に撮影したパターンが図11(a)である。これを、基準カメラである右カメラの画像については



(a) 外観 (b) 基板

図10 ステレオビジョンセンサ

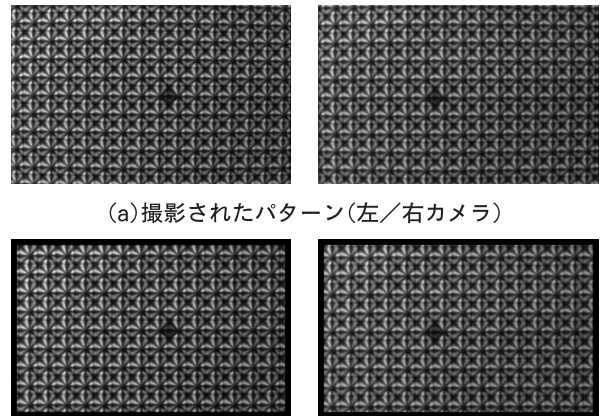
表2 ステレオビジョンセンサの仕様

イメージセンサ	Aptina社 MT9V032 (Mono, 752×480px, 60fps)
イメージセンサ制御用FPGA	Altera社 Cyclone II EP2C8T144C8(8kLEs)
画像処理用FPGA	Altera社 Cyclone IV E EP4CE115F23C9L(115kLEs)
SRAM	ISSI社 IS61WV102416 × 2枚 (1024k × 16bit)
USBコントローラ	Cypress社 CY7C68013A (USB2.0 480Mbps)
レンズマウント	CSマウント
基線長	60mm
サイズ	W100×H50×D40mm (レンズを除く)

2.3節の方法で、左カメラの画像については、基準(右)カメラのパターン周期で補正テーブルを求める。左カメラの画像を基準カメラの周期で補正するのは、左カメラの焦点距離を基準カメラと一致させるためである。得られた補正テーブルで図11(a)の画像を補正したのが、図11(b)である。また、明度の低い部分に着目して画像照合を行うことで、左右カメラの高さのずれ、視差の誤差を得ることができるので、この値を利用してステレオ画像処理を行う。

4.3 屋外で撮影した画像への適用

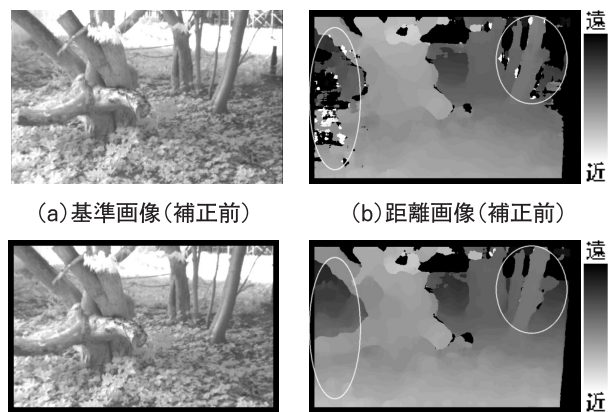
ステレオビジョンセンサを用いて屋外で撮影した画像に、4.2節で得られた補正テーブルおよび左右カメラの高さのずれなどの値を適用し、その効果を確認した。図12(a)が、屋外で撮影した画像(基準(右)カメラ)、図12(b)が左右カメラの高さのずれのみを補正して得られる距離画像である。距離画像では、カメラからの距離が近い画素が白く、遠い画素が黒く表されている。図12(c)は基準カメラの画像を補正したもの、図12(d)は補正・校正した画像から求めた距離画像である。補正前の図12(b)では距離情報が得られず、黒くなっ



(a) 撮影されたパターン(左/右カメラ)

(b) 補正・校正後のパターン(左/右カメラ)

図11 ステレオビジョンセンサの補正・校正



(a) 基準画像(補正前)

(b) 距離画像(補正前)

(c) 基準画像(補正後)

(d) 距離画像(補正後)

図12 ステレオビジョンセンサ実験

ていた部分でも、補正後では距離情報が得られており、補正の効果が確認できる。また、左右の画像の対応点探索が正しく行われず、距離が正しく求められていない白い画素は、大幅に減っている（線で囲んだ部分参照）。

5. おわりに

本研究では、周期構造パターンと方向符号照合法を用いて、レンズ歪みを除去するための補正テーブルを作成する方法を開発し、当試験場で開発した小型画像センサの画像を用いて実験により、有効性を確認した。この方法では、複数の画像を撮影したり、補間処理を行うことなく、補正に必要なデータを得ることができる。また、この方法を応用して、ステレオビジョンの簡易校正を行う方法を開発し、当試験場で開発したステレオビジョンセンサの画像を用いて、有効性を確認した。

今後は、小型画像センサやステレオビジョンセンサでの利用が容易になるように、開発した手法のハードウェア実装を行い、作業機に搭載する画像センサなどに活用する予定である。

引用文献

- 1) 大村 功・三田村智行・吉川 毅・多田達実ほか：画像照合を用いた農作業機向け車速計測センサの開発，北海道立工業試験場報告，No.307，pp27-34，(2008)
- 2) 大村 功・三田村智行・堤 大祐：FPGAを用いたリアルタイムステレオビジョンセンサの開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告，No.311，pp.7-13，(2012)
- 3) R.Y.Tsai：Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses,IEEE Journal of Robotics and Automation., Vol. RA-3, No.4 pp.323-344, (1987)
- 4) A.Goshtasby：Correction of Image Deformation from Lens Distortion Using Bezier Patches, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol.47, no.3, pp.385-394, (1989)
- 5) 高辻誠也・佐川立昌・越後富夫・八木康史：グレイコードパターンを利用したレンズ歪みの補正手法，画像の認識・理解シンポジウム（MIRU2005），(2005)
- 6) F.Ullah・S.Kaneko・S.Igarashi：Orientation code matching for robust object search, IEICE Trans. on Inf. & syst., Vol.E84-D, No.8, pp.999-1006, (2001)