

# 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

大村 功, 三田村智行, 堤 大祐

## Development of the Real-time Stereo Vision Sensor using an FPGA

Isao OHMURA, Tomoyuki MITAMURA, Daisuke TSUTSUMI

### 抄 録

方向符号照合(OCM)を導入することで屋外での安定した計測を可能にするとともに、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた独自のハードウェア処理により、高速処理、小型化、低消費電力を実現したステレオビジョンセンサを開発した。左右画像間の対応点探索にOCMを導入することで明るさが大きく変化する屋外環境においても安定した計測が可能となり、FPGAの特長を活かした回路設計を行うことで毎秒60画面以上の高速なステレオ画像処理と中規模FPGAによるシングルチップ処理を実現した。屋外向けの農作業機械をはじめ、さまざまな用途における自動化、高機能化を進めるための視覚センサとして、応用展開を進めている。

**キーワード**：ステレオ画像処理，方向符号照合，FPGA，ロバスト，高速処理

### Abstract

We have developed the stereo vision sensor that designed by using Orientation Code Matching (OCM) and FPGA (Field Programmable Gate Array) realization. OCM applied for the stereo image processing made our sensor much robust for changing brightness in outside use. FPGA realization of the stereo image processing achieved high-speed processing over 60 frames per second. The size of the circuit is so small that can be programmed in an FPGA as single-chip stereo image processing. We are going to apply the sensor for weeding robots in agricultural fields.

**KEY-WORDS** : Stereo image processing, Orientation code matching, FPGA, Robustness, High-speed processing

## 1. はじめに

人間の視覚と同様に2つの画像から対象物の距離情報を得ることができるステレオ画像処理は、すでに自動車における衝突防止装置やロボットの視覚に利用されるとともに、今後もさまざまな応用が期待されている。しかし、多大な演算量や屋外での明るさ変動などが課題となっており、このため高い処理能力を備えたコンピュータの導入や撮像環境に合わせた再調整などを行う必要があった。

本研究では、方向符号照合(OCM)と呼ばれる画像照合の方法を導入することで屋外での安定した計測を可能にするとともに、FPGA(Field Programmable Gate Array)を

用いた独自のハードウェア処理により、高速処理、小型化、低消費電力を実現したステレオビジョンセンサを開発した。

OCMは北海道大学で開発され、実環境で頻繁に生じる遮蔽や明度の変動などに対して高いロバスト性を備えた画像照合手法である<sup>1-3)</sup>。農作業機向けセンサに適用した事例<sup>4,5)</sup>では、さまざまな環境の圃場実験により屋外使用における高いロバスト性を確認している。本研究では、左右画像間の対応点探索手法としてOCMを導入することで、明るさが大きく変化する屋外環境においても安定した計測を実現した。

さらに本研究では、ステレオ画像処理における多大な演算を高速に処理するため、FPGAを用いたハードウェア化を行った。パイプライン処理、並列処理による高速化を図るとも

事業名：経常研究

課題名：高精度ステレオビジョンセンサの開発と屋外作業機への応用(平成22~23年度)

に、FPGAの特長を活かした回路設計を行うことで、毎秒60画面以上の高速な処理を実現し、中規模クラスのFPGAによるシングルチップでのステレオ画像処理を可能とした。特にシングルチップ処理としたことで外部のデバイスに依存せず利用可能となり、デバイス構成の異なる他の処理系への移植が容易となった。さらに画像のサイズなどの処理構成をパラメータにより変更可能としたことによって、高い汎用性を備えたIP (Intellectual Property) として広く利用が可能となった。

開発したステレオビジョンセンサは、1枚のボード上に撮像系と処理系を搭載し、従来のコンピュータ処理をベースとしたステレオ画像処理システムと比較して、設置スペースや消費電力、発熱等の点で大きな優位性を有するセンサとなっている。さらに屋外での安定した計測を可能としたことによって、これまで導入の難しかった屋外向けの農作業機械をはじめ、さまざまな用途における自動化、高機能化を進めるための有効な画像センサとなることが期待できる。

## 2. 方向符号照合を用いたステレオ画像処理

### 2.1 ステレオ画像処理

ステレオ画像処理は、2つのカメラで対象物を捉えることで、カメラから対象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つの画像間における対応点の探索が、もっとも重要でかつ処理時間の要する処理となる。このため、ステレオ画像処理では、左右画像で対応する点(対応点)の探索処理の簡略化と演算量の低減のため、図1に示す平行ステレオカメラ系が一般に採用される。

このカメラ系では左右の2つの光学系において、光軸が平行で、レンズの焦点距離 $f$ が等しく、投影面(イメージセンサデバイス面)が同一平面上にあり、さらに対象とする点と左右の撮像系のレンズ中心を結ぶ線(エピポーラ線)が撮像

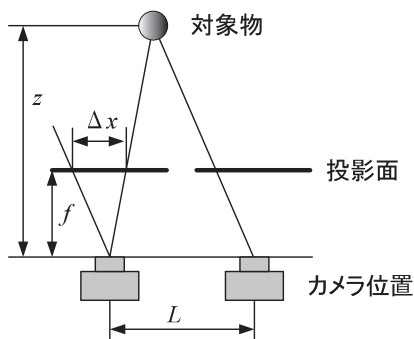


図1 平行ステレオカメラモデル

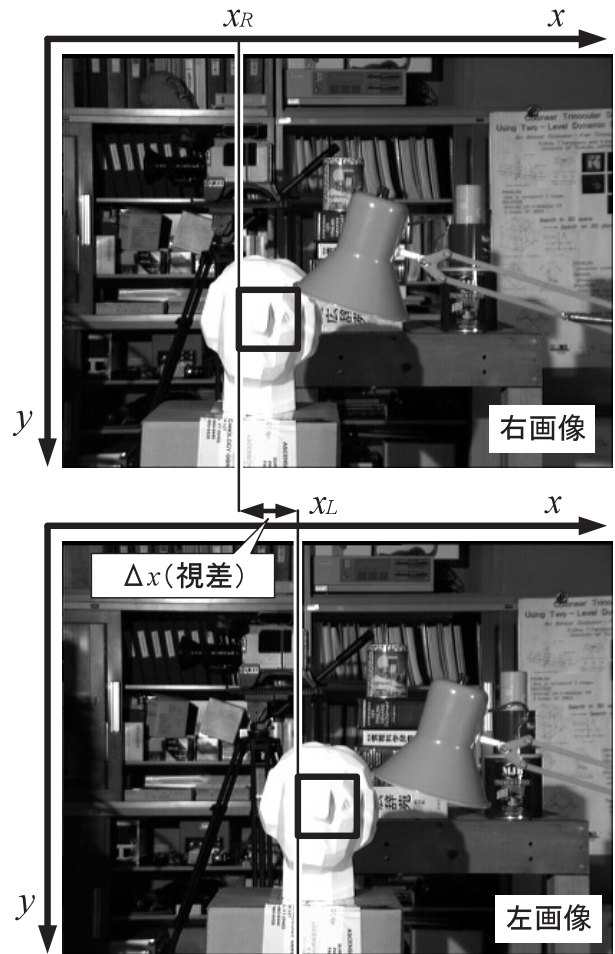


図2 ステレオ画像における視差

デバイスの同一水平ライン上に投影される。このような拘束条件のもとで得られたステレオ画像では、図2<sup>6)</sup>に示すように、対象物との距離は右と左の2つの画像における投影位置の水平方向のずれ量(視差) $\Delta x$ として観測される。このとき、対象物の距離 $z$ は三角測量の原理から、カメラ間の距離(基線長) $L$ 、レンズの焦点距離 $f$ を用いて、以下のように計算される。

$$z = \frac{fL}{\Delta x} \quad (1)$$

視差 $\Delta x$ は、図2に示した座標系において、右画像に投影される $x$ 座標位置を $x_R$ 、左画像に投影される $x$ 座標位置を $x_L$ とすると、イメージセンサデバイスの画素サイズ $a$ を用いて、 $\Delta x = a(x_L - x_R)$ と表される。ここで2つの座標位置の関係は、図1に示した対象物とカメラの関係から、常に $x_L \geq x_R$ となる。したがって、右画像を基準とした場合、左画像上の対応点は右と同じ座標位置を視差0として、常にそれより右側(+ $x$ 方向)に対応点が存在する。これを利用して探索範囲を絞った効率的な視差検出処理が可能となる。

左右画像の対応点の探索処理は、一般に画像照合を利用す

る。画像照合を利用したステレオ画像処理では、左右の画像における小領域を比較して対応点を検出する。画像照合方法としては、正規化相関がもっとも安定した手法として知られているが、実利用では演算量が多い点が課題となっている。特に演算量の多いステレオ画像処理では、より計算量の少ないSAD (Sum of Absolute Difference) が一般に利用されている。OCMはSADと比較して、同等の演算量で処理可能で、さらに遮蔽や明度変動におけるロバスト性に優位性がある<sup>3,7)</sup>。

## 2.2 方向符号照合法

OCMにおいては、2つの画像の類似度を評価するために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た値を符号として用いる。この方向符号 (OC: Orientation Code) の分布は画像ごとに固有性が高く、照明不良などに起因する明度変動に影響されにくく、無相関画像間における類似度は定値性を有するという特性がある<sup>1)</sup>。OCMの処理は符号化処理と照合処理の2つの処理に分けられ、以下のように定義される。

画素  $(x, y)$  での明度を  $I(x, y)$  とし、画像の  $x$  方向および  $y$  方向の勾配をそれぞれ、

$$\nabla I_x = \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \tag{2}$$

$$\nabla I_y = \frac{\partial I(x, y)}{\partial y}$$

と定義すると、対象とするすべての画素について、勾配角度  $\theta(x, y)$  は、

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{\nabla I_y}{\nabla I_x} \tag{3}$$

として計算することができる。勾配演算としては本研究ではSobel演算を用いている。

方向符号  $c_{xy}$  は適当な量子化幅  $\Delta\theta = 2\pi/N$  により量子化された勾配角度符号として、次式で定義される。

$$c_{xy} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\theta(x, y)}{\Delta\theta} \right\rfloor & \text{if } |\nabla I_x| + |\nabla I_y| \geq \Gamma \\ N & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4}$$

ここで、 $\Gamma$  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、十分な勾配値が得られない場合、すなわち低コントラストな画素であった場合に無効符号  $N$  を割り当てる。有効な方向符号は  $0 \sim N-1$  として得られる。

さらに、参照画像を  $I_{ref}$ 、比較する対象画像を  $I_{search}$  (ともに画素サイズ  $S_x \times S_y$ ) とし、それぞれの方向符号を  $C_{ref}$ 、 $C_{search}$  とする時、それらの残差絶対値  $d$  の平均残差絶対値  $D$  を照合評価値として次式により定義する。

$$D = \frac{1}{S_x \times S_y} \sum_{S_x \times S_y} d(C_{ref}, C_{search}) \tag{5}$$

$$d(a, b) = \begin{cases} \min\{|a-b|, N-|a-b|\} & \text{if } a \neq N, b \neq N \\ N/4 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

ここで、各画素間での残差絶対値  $d$  は、方向符号が巡回的であることを考慮した算出方法を採用している。図3に  $N = 16$  とした場合の方向符号化と残差絶対値の算出例を示す。なお、本研究では  $N = 16$  として方向符号化している。

照合評価値  $D$  は、0 から  $N/2$  までの値を採るが、類似度の高い画像間では0に近い評価値を示し、無相関では  $N/4$  に近い値を採る。 $N/4$  以上の評価値については、一般に相関の低い照合結果として処理する。

視差の検出では、前述したように右画像から小領域 (本研究では  $16 \times 16$  画素) を切り出し、これを参照画像 (テンプレートと呼ぶ) として、左画像の同座標から順に照合を行う。1画素ずつ対象画像の切り出し位置を水平方向に移動させながら、最大視差 (本研究では127画素) までの評価値を算出し、そのうちの最も類似度の高かった位置を照合結果とする。実際には、遮蔽や視差の探索範囲外に対応点が存在する場合がある。そのため、得られた評価値は、しきい値などを設けて、信頼性の高い照合結果のみを対応点として採用する。

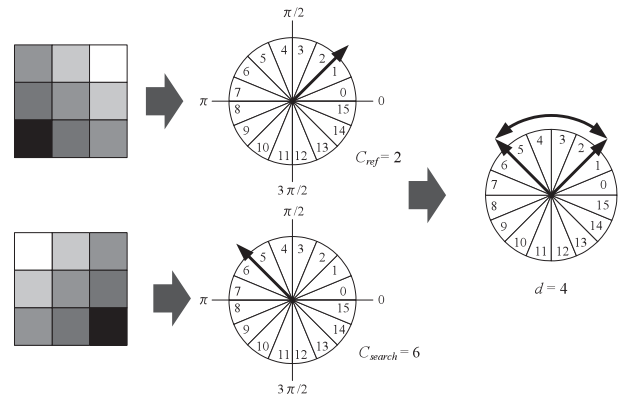


図3 方向符号化と残差絶対値の算出例

## 3. FPGAを用いたハードウェア化

### 3.1 ハードウェア構成

ステレオ画像処理をFPGAを用いてハードウェア化した処理構成を図4に示す。全体の処理は完全なパイプライン処理となっており、画素データの入力から照合結果出力までの時間はFPGA内部での遅延のみとなっている。特に、外部のフレームメモリを使用せずすべてFPGA内部のメモリを使用することで、高速化で問題となるメモリアクセス競合をなくし、すべての処理でクロック毎のデータ入力を可能とする高いス

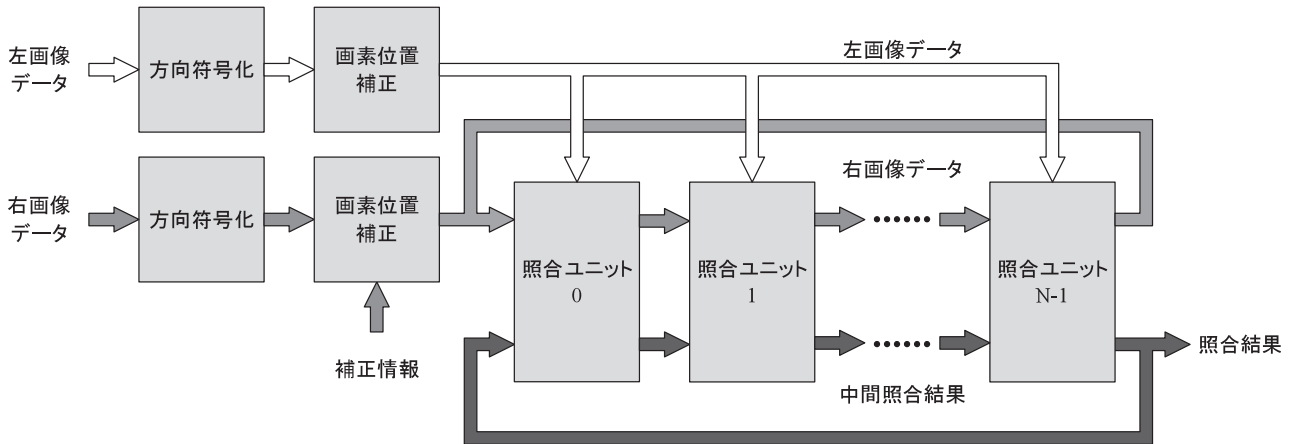


図4 ハードウェア化したステレオ画像処理の構成

ループットを保証した。

左右の画像データは、入力後、まず方向符号化処理と画素位置補正処理が行われる。入力直後に画像データを方向符号化することで、8 bitの明度データを16の明度方向と無効符号を表す5 bitの方向符号に置き換えることができ、以降の処理では5 bitのデータを対象とした処理とすることができる。画素位置の補正処理は、前述したカメラモデルと実際の撮像系の違いを吸収するためのもので、キャリブレーションにより予め算出した補正情報をもとに画素位置の補正を行う仕組みである。FPGA内のメモリを利用した画像全体の平行移動と各画素の位置補正を行っている。

これらの処理回路から出力された画素データは一旦バッファに保持され、16画素分（テンプレートのy方向の画素数に相当）をまとめて、視差検出処理を行う照合ユニット群へ送出される。照合ユニットはテンプレートサイズに合わせた照合を連続的に処理可能な回路で、高速化のため、視差に相当する数の照合ユニット（試作センサでは64個）を局所並列化している。

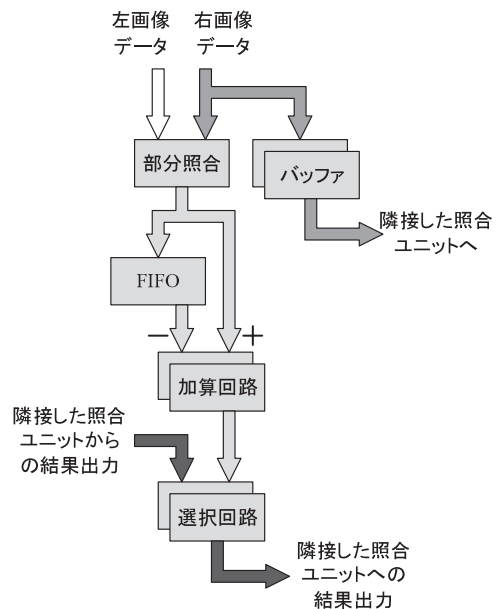


図5 照合ユニットの内部構成

### 3.2 照合処理回路

照合ユニットの内部構成を図5に示す。照合ユニット内部では、連続的に入力される2つの画像データ列を照合処理するため、テンプレートサイズに合わせたFIFO（First In First Out）バッファを備え、照合時に必要な差分のみを計算する構造とすることで回路規模を低減している。照合処理の出力は、(5)式における照合評価値  $D$  においてテンプレート画素数による除算を省いたものである。テンプレートサイズは処理中変わらないため、画素間の残差絶対値の総和でのみでの評価が可能であり、さらに除算回路を削減することで大きな回路規模低減を図っている。

各照合ユニットには、図4に示すように視差に対応した番号が割り振られており、この番号順に接続されて、最終段のユニットへ右画像データと中間照合結果が伝搬する構成となっ

ている。一方、左画像については直接、各照合ユニットへ入力される。これにより、左画像における入力位置と右画像における最大視差までのずれた位置との照合を同時に処理していることになる。照合ユニットの出力段では、図5に示すように、算出された評価値を隣接したユニットからの結果と比較し、より小さい（より類似度の高い）結果をそのユニット番号とともに選択して出力している。この結果を順に照合ユニットを介して伝搬させることで、最終的に右画像の各位置に対応した照合結果（評価値とユニット番号）が最終段から出力される構成となっている。この出力結果のユニット番号が照合処理回路により検出した視差となる。

これらの回路構成により、FPGAの動作クロック毎に1画素分の視差検出処理を可能として、高い実効処理性能を備えたステレオ画像処理を実現した<sup>8,9)</sup>。

### 3.3 対応視差の拡張と汎用性

高速化を図る上で並列化は大きな効果がある一方、回路規模が増大し、デバイスコストが大きく増大することになる。そのため本研究では、上記回路をさらに拡張し、照合処理の並列度を上げずに対応視差を広げるしくみとして、照合ユニットの時分割での多重化処理機能を加えた。

時分割での処理では、動作周波数を画素データ入力の2倍とし、各照合ユニットの一部を多重化して、処理の切り替えを可能とする回路を追加する。中間結果と右画像データは一連の照合ユニット間の伝搬のループを2回経て、最終結果が得られる構成となる。図4に示した全体の構成では、この方法により視差を拡張した際の中間結果のリターンパスを、図5に示した照合ユニットではバッファ等を2重化したブロックを含んでいる。この機能拡張により、使用するFPGAの回路規模に応じて、高速化と回路規模のバランスを調整した設計が可能となった。

これらの処理回路は、さまざまな機器で利用可能とするため、回路記述にパラメータを多用した汎用性の高い設計を行った。ステレオ画像処理部分では、画像サイズ、照合におけるテンプレートサイズ、対応する最大視差と視差の拡張機能について、変更を可能とした。回路記述にはVHDLを使用している。

### 3.4 FPGAへの搭載結果

照合部分の回路規模は、AlteraのFPGAデバイスCycloneIIIシリーズを使用した場合、画像サイズ752×480画素、テンプレートサイズ16×16画素に対して、64視差（照合ユニット64個）で約27kLEとなった。また、視差を2倍に拡張した場合は約32kLEで、照合ユニット1個が約360LEであることを考慮すると、拡張機能による回路規模抑制の効果は大きいと考えられる。なお、照合方法としてSADを利用した場合は64視差で43kLEとなり、OCMを利用することで回路規模が5/8程度と低減することができた<sup>7)</sup>。開発環境はAltera社のQuartusII Web Edition v9.1を使用した。

## 4. センサの試作と屋外画像による評価

### 4.1 センサの試作

試作したセンサは、FPGAとCMOSタイプのイメージセンサ、SRAM、Flash ROM、USBコントローラを搭載したボードとレンズを装着するためのアルミ製マウントベースから構成される。アルミ製マウントベースはCSマウントタイプに対応しており、アプリケーションに応じてレンズを交換することが可能である。使用したイメージセンサデバイスはモノクロで、画像サイズがWVGA（752×480画素）タイプである。FPGAは収容回路規模が40kLE（800kGate相当）のデバイスを採用した<sup>11)</sup>。試作したステレオビジョンセンサの外

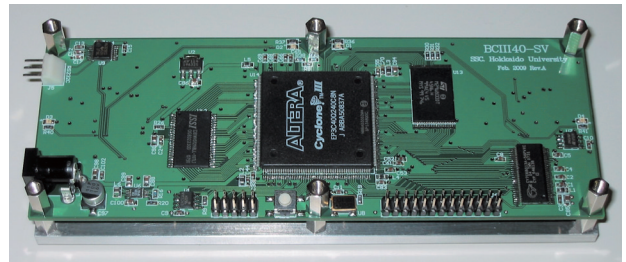
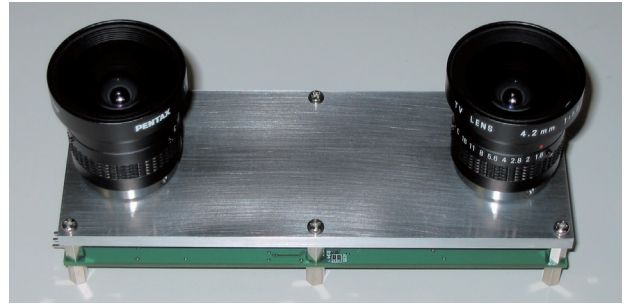


図6 試作したステレオビジョンセンサの外観

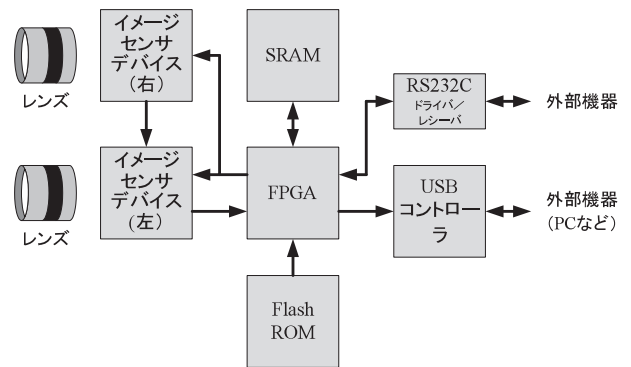


図7 ステレオビジョンセンサの構成

観を図6に、構成を図7に示す。また、センサボードの仕様を表1に示す。

2つのイメージセンサデバイスは、動作クロックレベルで完全に同期した動作となるようにFPGAから制御しており、左右の画像の同一座標の画素データは同時にFPGAに入力される。イメージセンサの動作クロックは26.5MHz、FPGA内

表1 試作したセンサボードの仕様

FPGA	Altera EP3C40Q240C8 (40k Logic Element)
イメージセンサデバイス	Microm MT9V032 (WVGA, mono, 60fps)
SRAM	ISSI IC61WV51216BLL-10TLI (16bit, 512kWord)
Flash ROM	ST Micro M29W800DT (16bit, 512kWord)
ボードサイズ	160×60mm
センサ間距離(基線長)	120mm



(1) 左センサによる画像

(2) 右センサによる画像

(3) 生成した距離画像

図8 試作したステレオビジョンセンサによる計測例

の処理回路は視差検出部を時分割で動作させるため画素データ入力の2倍の53MHzで動作させた。その結果、イメージセンサデバイスの解像度(WVGA:752×480画素)を対象として、テンプレートサイズ16×16画素、最大視差128画素までの処理を、60fpsで処理可能な処理回路をFPGAに実装可能とした。

ボード上の2つイメージセンサデバイスは、可能な限り前述した平行カメラモデルに合致するように実装しているが、センサデバイスの画素サイズ6μmに比較して、十分な精度での実装は困難である。また、レンズマウントの精度はさらに1桁以上悪く、レンズ収差等をとまなうため、各撮像素での校正と左右画像におけるエピポーラ線を一致させるための補正が不可欠となっている。このような問題に対応するために、本センサではFPGA内に画像全体の平行移動を行う回路を設けるとともに、Flash ROMを搭載して画素毎の補正情報を保持可能とした。なお、補正情報については、キャリブレーション用画像を撮影してパソコン上で校正処理を行い、予めFlash ROMに書き込んでおく必要がある。

また、本センサは屋外での使用を想定しており、天候や時刻によって撮影環境が大きく変わる可能性があるため、イメージセンサデバイスのオートゲイン機能を有効にして動作させている。本センサで使用しているOCMは明度の変化にロバストであるため、ゲインの変化がある場合でも安定した動作が可能であることが確認されている<sup>7,10)</sup>。オートゲイン機能と合わせることで、日中の広い時間帯で、さらに照明機器を装備することで、時間帯にかかわらず使用可能なセンサとなることが期待できる。

なお、外部とのインターフェースは、RS232CおよびUSBを装備しており、入力画像、処理画像をパソコン等外部機器へ出力可能とした。

#### 4.2 実環境での試験と処理結果

図8に試作したセンサによるステレオ画像処理の例を示す。実験画像は鶴沼ワイナリー(浦臼町)のぶどう園場において、曇りの日の日中に計測したものである。中央付近に黒っぽく捉えているのがぶどう樹の幹で上部にはぶどうの実も一部見

えている。図8において、(1)(2)はそれぞれ撮影した左の画像と右の画像、(3)は視差をマッピングした距離画像である。距離画像では、誤照合による結果を低減するため、画像照合結果に一定のしきい値を設け、しきい値に満たないものを黒で表示している。対応点がある部分については、その視差に応じて濃淡で表示し、より近いものを白色で表示した。

実験では、圃場における場所や天候など条件の異なる複数のぶどう樹を対象とした画像において、同様に距離データを得ることができた。

#### 4.3 今後の課題

本研究では、従来のステレオ画像処理で課題であった屋外での安定性や高速化、小型化、省電力化等の点を大きく改善し、実利用可能なセンサを実現した。しかし、実際の利用においては、キャリブレーションの煩雑性や計測精度、さらに認識機能など、自動化機器の視覚センサとしては不十分な点もまだ残されている。

特に開発したセンサでは、レンズ交換等によるセンサの幅広い応用を可能とした一方で、その都度キャリブレーション処理が必要となっており、煩雑な手間の低減が大きな課題となっている。

また、農作業への応用では、作物の種類の識別なども求められており、そのためには距離分解能の向上やカラー処理による精度の高い対象物の検出が必要と考えられる。

さらに、屋外作業機への応用では、耐久性や保守性などの点も重要な要素であり、今後検討していく必要がある。

#### 5. おわりに

本研究では、屋外での利用と組込み向けに利用できるコンパクトなステレオビジョンセンサを目指した研究開発を行ってきた。その結果、OCMを用いた屋外での安定した計測性能とFPGAによる高速処理と小型化を実現し、従来にないステレオビジョンセンサを実現した。ステレオ画像処理については、中規模クラスのFPGAのみで、シングルチップ処理が

可能となっており、移植性の高いIPとして他のシステムへの利用を可能とした。

実利用については、いくつかの課題が残されているが、単体のセンサとしてさまざまな機器に利用可能なサイズとなっており、今後は、用途に応じた機能の開発を進めながら、実用化に向けた検討を進めていく。

本センサは、平成23年度より開始している研究プロジェクト「果樹園向け除草作業試験ロボットの研究開発」において、視覚センサとして利用しており、今後も機能の向上を図る予定である。

## 謝辞

(有)鶴沼ワイナリーには、開発センサの実地試験にあたり、圃場の一部を使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。

## 引用文献

- 1) 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)
- 2) F.Ullah・Kaneko：Using orientation code for rotation-invariant template matching, *Pattern Recognition*, Vol.37, No.2, pp.201-209 (2004)
- 3) 金子俊一：画像処理におけるロバストなセンシング技術, *精密工学会誌*, Vol.69, No.10, pp.1383-1386 (2003)
- 4) 中原和哉・高氏秀則・金子俊一・田中孝之・清水将志・宮下行雄・大村功：方向符号照合による農作業機のためのロバスト速度計測, *電子情報通信学会論文誌D* Vol. J91-D, No.3, pp.793-802 (2008)
- 5) 大村功・三田村智行・中原和哉・高氏秀則・金子俊一・清水将志・宮下行雄：方向符号照合法のFPGA実現に基づく農作業機のための実時間速度計測センサ, *電子情報通信学会論文誌* Vol.J91-D, No.5, pp.1325-1335 (2008)
- 6) Daniel Scharstein・Richard Szeliski：Middlebury stereo vision page, URL:<http://vision.middlebury.edu/stereo/> (2007)
- 7) 大村 功・三田村智行・高氏秀則・金子俊一：方向符号照合を用いたリアルタイムステレオビジョンセンサ, *動的画像処理実利用化ワークショップDIA2011*, pp.344-348 (2011).
- 8) 大村 功・三田村智行・高氏秀則・金子俊一：方向符号照合のFPGA化によるステレオビジョンセンサ, *ビジョン技術の実利用ワークショップViEW2009*, pp.232-236 (2009)
- 9) 大村 功・三田村智行・高氏秀則・金子俊一：FPGAベー
- スリアルタイムステレオビジョンセンサ, *ロボティクス・メカトロニクス講演会2010*, 2P1-E08 (2010).
- 10) I.Ohmura・T.Mitamura・H.Takauji・S.Kaneko：A real-time stereo vision sensor based on FPGA realization of Orientation code matching, *Proc. of ISOT 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies*, 3DSI-2 (2010)
- 11) Altera corp.：CycloneIII Device Hand Book (2009)