

移動型作業機械向け進入接近検知センサの開発

三田村 智行, 堤 大祐

Development of an Approaching Object Detector for Mobile Working Machinery

Tomoyuki MITAMURA, Daisuke TSUTSUMI

抄 録

農作業機などの移動型作業機械では、進行方向以外を見ながら行う作業や操作、死角などにより、衝突や巻き込みなどの重大事故が発生するおそれがあり、作業員が巻き込まれる死傷事故なども発生している。このような作業機械の安全確保は、基本的には運転者の安全確認に依存しており、事故を防ぐためには、運転者の安全確認をサポートするセンサ開発などの具体的な対策が求められている。本研究では、イメージセンサで取得した画像からリアルタイムに動き情報を求め、進行方向への進入接近の動きを捉えて警報を出力する進入接近検知センサを開発した。

キーワード：画像照合, FPGA, 画像センサ, 進入検知, 接近検知

Abstract

In operations of mobile working machinery, there are risks of serious accidents such as a collision because driving while working distracts attention of operators and mobile working machinery has blind spots. Therefore, operators require a warning system to prevent accidents. In this study, we developed an approaching object detector. This detector outputs a warning of approaches from the side to the front by detection of motion in real time processing with an image sensor and an FPGA.

KEY-WORDS : Image matching, FPGA, image sensor, approach detection

1. はじめに

農作業機をはじめとする移動型作業機械では、進行方向以外に視線を向けた操作・作業が必要になるため、運転者が常に前方を向き、運転に集中することが難しい。また、作業機械の構造上、運転席からの安全確認が難しい死角が大きくなりやすく、機械の大型化に伴う死角の拡大もみられる。このため、衝突や巻き込みなど重大事故が発生する恐れがあり、実際に、作業員が巻き込まれるなどの死傷事故も発生している。特に農家においては、ひとたび事故が発生するとその影響は大きく、その後の農業の継続が困難となる場合もあり、農業人口の減少や高齢化、担い手不足となっている本道の農業にとっての打撃は少なくない。

このような作業機械における安全確保は、基本的には運転者の安全確認に依存しており、事故を防ぐためには運転者の安全確認をサポートすることが求められている。具体的な対策としては、作業機械の前方など周囲の危険な領域への人や物体の進入を検知して警報を発し、運転者に注意を促すシステムの開発などが挙げられる。

そこで本研究では、イメージセンサで取得した動画像からリアルタイムに動き情報を求め、進行方向前方に進入してくる危険な動きを識別して警報を出力する進入接近検知センサを開発した。また、このセンサを実験用の台車に設置し、屋外において前進する台車の前方を人が横切る状況で実験を行って、動きの検出や警報の出力などの動作を確認した。

事業名：経常研究

課題名：移動型作業機械向け進入接近検知センサの研究開発

2. 進入接近検知センサの構成

本研究で開発した進入接近検知センサは、①画像の取得、②取得した画像から動きを求める動き検出処理、③求めた動きから危険な動きを識別する動き識別処理、④検出された危険な動きに応じて警報を発する警報出力処理で構成されている(図1)。このうち、動き検出処理は、比較的単純な処理を高速に行うことが必要となるため、FPGAを用いたハードウェア処理とした。また、動き識別処理や警報出力処理は、複雑な判断にも柔軟に対応できるソフトウェア処理とした。

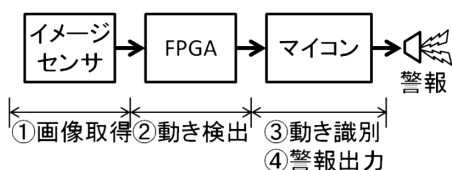


図1 進入接近検知センサの構成

3. FPGAを用いたリアルタイム動き検出処理

3.1 動きの検出方法

動画における動きは、フレーム間の物体の位置の変化として捉えることができる(図2)。動きを検出する代表的な方法として、ブロックマッチング法と勾配法が知られている¹⁾。ブロックマッチング法は、画像照合を用いて前のフレームの一部に対応する位置を現在のフレームから探索し、その座標の差として動きを検出するものである。比較的安定して動きを求めることができるが、計算量が極めて多い。勾配法は、画像の時空間微分から動きを推定する方法で、高速な計算が可能であるが、輝度変化やノイズにより誤った動きを検出することがある。

当場では、これまでFPGAとイメージセンサを組み合わせた画像センサの開発と活用に取り組んできた。このなかで、照明変動など外乱の影響を受けにくく、ハードウェア処理も比較的容易な画像照合法である方向符号照合法²⁾に着目して、外乱の多い屋外環境で利用できるセンサを開発した実績がある³⁾⁴⁾。本研究においても、方向符号照合法のロバスト性やハードウェア処理による高速化が可能な特性を活かし、計算量の多いブロックマッチング法による動き検出をリアルタイムで実現した。

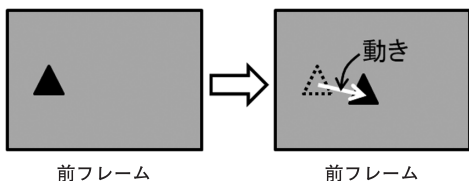


図2 動画における動き

3.2 方向符号照合法

画像照合は、あらかじめ用意したテンプレート画像と同じ画像が別の画像(対象画像)内に存在するかどうかを判断し、存在する場合にその正確な位置を求める手法である(図3)。テンプレート画像の位置をずらしながら対象画像と重ね合わせ、重なった部分とテンプレート画像との差(相違度)が最も小さい位置を照合位置とする。この相違度の評価に、画像の輝度そのものの差ではなく、方向符号の差を用いるのが方向符号照合法である。

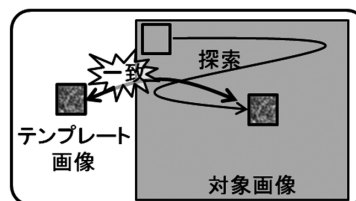


図3 画像照合

方向符号は、画素近傍における輝度勾配の方向を示す角度を量子化し、符号としたものである。画素 (x, y) における輝度を $I(x, y)$ とすると、輝度勾配の方向を示す角度 $\theta(x, y)$ は

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

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

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

と表すことができる。このとき、方向符号 c_{xy} は、量子化レベル数を N 、量子化幅 $\Delta\theta = 2\pi/N$ として、次式で定義される。

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

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は、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。

方向符号照合では、照合位置の判定に用いる相違度として、テンプレート画像と対象画像のうちテンプレート画像と重なった部分の方向符号の平均残差絶対値 D を用いる。テンプレート画像の方向符号を c_t 、テンプレート画像と重なった対象画像の方向符号を c_s とすると、平均残差絶対和 D は、方向符号の残差絶対値 d (図4)を用いて、次式により定義される。残差絶対値 d の計算は、方向符号が巡回的であることを考慮している。テンプレート画像のサイズは $S_y \times S_y$ である。

$$D = \frac{1}{S_x \times S_y} \sum_{S_x, S_y} d(c_t, c_s) \quad (4)$$

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

探索範囲内で平均残差絶対値 D を計算し、最小となる位置が照合位置となる。

方向符号の分布は、画像ごとの固有性が高い、照明不良などに起因する輝度変動の影響を受けにくい、無相関画像間の相違度が定値性を有する、という特性があるため、方向符号照合法は、照明変動や遮蔽などの外乱に対する高いロバスト性を有している。

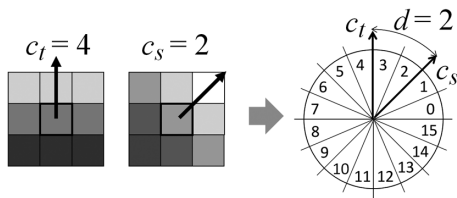


図4 方向符号と残差絶対値

3.3 FPGAを用いたリアルタイム動き検出

動きの検出は、画面上に一定間隔ごとに配置した検出領域について行い(図5)、複数の検出領域について並列に動き検出処理を行うことで、リアルタイム処理を実現した。動き検出回路の構成を図6に示す。

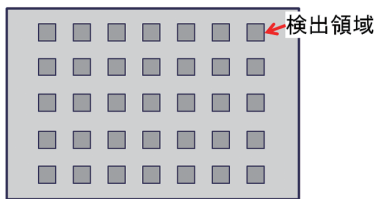


図5 検出領域の配置

3.3.1 方向符号の列ベクトルの生成

画像データは、画面左上から1画素ずつ送られてくるので、これを方向符号に変換し、バッファを用いてテンプレート高さ分の列ベクトルを生成する(図7)。この列ベクトルを用いて、以降の処理を行う。

3.3.2 テンプレートの生成

検出領域のデータは、次のフレームでテンプレートとして利用することになる。そこで、1つの検出領域を構成する列ベクトルをまとめてテンプレート行列とし、FPGA内部のメモリに保存する。

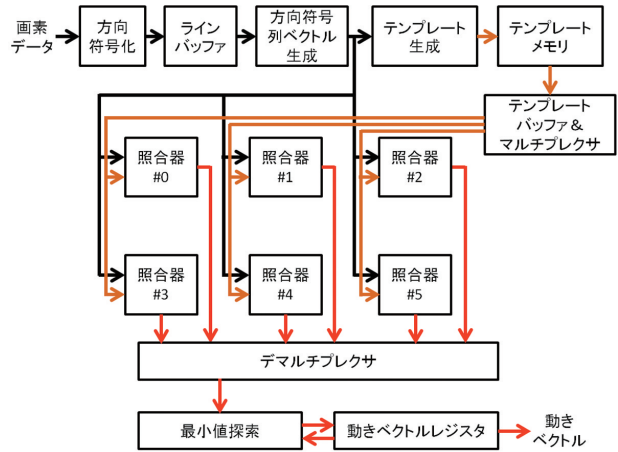


図6 動き検出回路の構成

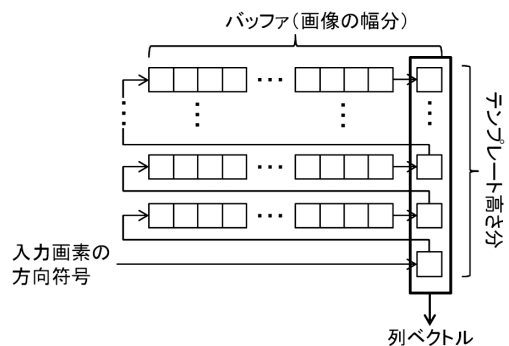


図7 列ベクトルの生成

3.3.3 照合器

照合器では、平均残差絶対値 D をテンプレート画像のサイズ ($S_y \times S_y$) 倍した残差絶対値和を計算する。画像サイズは正の定数なので、残差絶対値和が最小となる位置は平均残差絶対値が最小になる位置と同一で、照合位置となる。

画像データが1画素ずつ送られてくると、列ベクトルが順次生成されるので、この列ベクトルとテンプレート行列の各列との部分残差絶対値和を計算する。これを順次加算することで、残差絶対値和を求めることができる(図8)。

検出領域の周辺には、動き探索範囲が設定されている。生成される列ベクトルがこの範囲に入ると、その検出領域に照合器が割り当てられ、前フレームで生成されたテンプレート行列が設定される。列ベクトルが動き探索範囲から外れると、照合器の割り当てが解除され、次の検出領域に割り当てられる。図9の例では、生成される列ベクトルがグレーに着色された検出領域 D_{22} の探索範囲に入ると、照合器4に D_{22} が割り当てられ、 D_{22} のテンプレートが設定される。検出領域を示す枠の中の数字は、照合器の番号である。画像データの入力が進んで生成される列ベクトルが右側に進み、 D_{22} の探索範囲から外れると、照合器4の割り当てが解除される。さらに進んで、列ベクトルが D_{25} の探索範囲に入ると、照合器4に D_{25} が割り当てられ、テンプレートが設定される。このよ

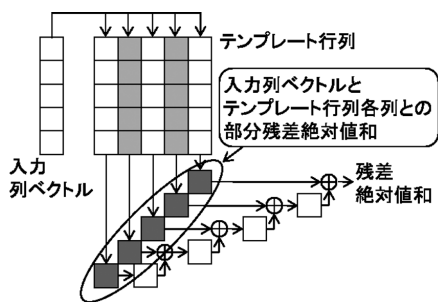


図8 照合器の構成

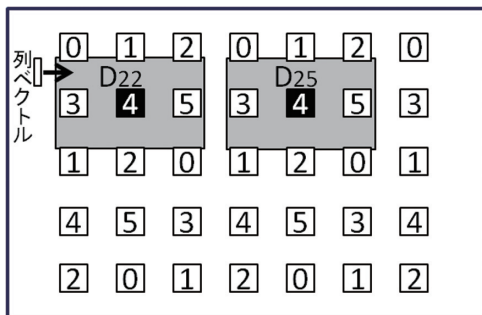


図9 照合器の割り当て

うに、入力される列ベクトルの位置に合わせて照合器が担当する検出領域を入れ替えながら、残差絶対値和の計算を行う。照合器で計算された残差絶対値和が、その検出領域についてそれまで計算された残差絶対値和の最小値よりも小さければ、その値と、列ベクトルの座標と検出領域の座標の差分、すなわち検出された動きの値を保持する。これを繰り返して、探索範囲すべてについて残差絶対値和の計算が終了すると、その検出領域についての動き検出が終了する。すべての検出領域の動き検出が終了すると、そのフレームの動き検出処理は終了となる。

検出領域の間で探索範囲が重複するため、1つの列ベクトルに対し複数の検出領域について残差絶対値和の計算を行う必要がある。同時に計算する必要のある検出領域の数は、検出領域の大きさ、間隔、探索範囲の大きさにより決まるので、照合器を必要数用意し、並列で動作させる。各照合器へのテンプレート行列の設定や、照合結果と検出領域との対応付けなどは、周辺回路で行う。

4. 進入物体による動きの識別

進行方向の前方に進入してくる物体の識別を、検出された動き情報を用いて行う。FPGAによる動き検出処理で得られる動きは、センサ自身が動くことにより画面に生じる動きと、画面中の物体の移動による動きが合成されたものとなっている。このため、検出された動きから物体の動きを分離した上で、その動きが進入物体による動きであるか識別する必要がある。

4.1 物体の動きの分離

動き検出処理では、センサ自身が動くことにより画面に生じる動きと実際の物体の動きを合成した動きが検出される。センサ自身が動くことにより画面に生じる動きとしては、前進に伴う下向き外側への動きや旋回に伴う横向きの動き、センサの揺れによる動きなどがあり、これらの動きは画面全体に及ぶ。動きの方向や大きさは、センサの設置位置や光軸の向き、画角、画面中の物体までの距離、画面上の位置により異なる。本研究では、近くに障害物のない空間で、前方を横切る動きの検出を目的とし、センサを光軸が水平よりやや下向きになるよう設置する。この場合、画面全体でこれらの動きに大きな差異は生じないので、画面全体の動きの平均値をセンサの動きに伴う動きとみなし、各検出領域の動きと平均値の差を物体による動きと考えて、進入物体の識別を行う。

4.2 進入物体による動きの識別

前節の処理により分離された物体の動きが、進入物体によるものであるか識別を行う。進行方向前方に進入する警戒すべき動きは、画面上では中央に向かう横方向の成分を持つ動きである(図10)。一方、中央から外側に向かう横向きの動きは、進行方向から離れていく動きであり、注意は必要だが、それほど警戒すべき動きではない。そこで、画面右半分にある検出領域の左向きの動きと、画面左半分にある検出領域の右向きの動きは、前方に進入する物体の動きと判断した。



図10 前方に進入する動き

5. 動き検出の安定性、進入接近判定精度の向上

動きの検出は画像照合により行うため、検出領域の特徴が乏しい場合などには、誤った動きが検出され、進入接近の判定に影響を及ぼす。このため、検出された動きから、誤って検出された動きを取り除く必要がある。

現実の動きでは、動きの対象となる物体は一定の空間を占めるため、動きは空間的に連続している。また、動きが継続する時間は、通常はフレーム間隔と比較して長く、数フレームにわたって動きが継続するため、動きは時間的にも連続している。一方、誤って検出される動きは、多くの場合、瞬間的かつ局所的であり、通常検出される動きとは異なる特徴がある。そこで、近傍の検出領域に類似の動きがない空間的に

孤立した動きや、前のフレームの近傍の検出領域に類似の動きがない時間的に孤立した動きは誤検出とみなして排除し、動きの検出の安定性と識別精度の向上を図った。

6. センサの試作と実験

センサの試作を行い、屋外環境における動作について確認した。

6.1 センサの試作

センサは、ステレオビジョン用に製作した画像センサと市販のマイコンボードを使用して試作した。ステレオビジョン用画像センサに搭載された2個のイメージセンサのうち1個を使用して画像を取得し、FPGAにおいて動き検出処理を行う。検出された動き情報は、UARTによりマイコンボードに送られ、マイコンでは、誤った動きの除去、危険な動きの識別、警報の出力を行う。

使用した画像センサの仕様を表1、搭載された画像処理用FPGAのリソース使用状況を表2に、マイコンボードのおもな仕様を表3に示す。試作したセンサの動き検出パラメータは表4のとおりである。試作したセンサの外観を図11に示す。レンズは、PENTAX TS-412A (f=4mm, CSマウント)を使用した。

6.2 実験

遠隔操作で走行可能な実験用台車にセンサを設置し(図12)、屋外で実験を行った。実験を行ったのは、雑草が刈り払われた障害物のない平地である。台車を時速1~2kmで走行させ、その前方約5mを人が時速4~5kmで横切る状況におけるセンサの動作を確認した。

表1 画像センサの仕様

イメージセンサ	Aptina 社 MT9V032 (Mono, 1/3inch, 752×480px, 60fps)
イメージセンサ 制御用 FPGA	Altera 社 Cyclone II EP2C5T114C8 (5kLEs)
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
サイズ	W100 × H50 × D40mm (レンズを除く)

表2 画像処理用FPGAのリソース使用状況

リソース	使用状況
ロジックエレメント(LE)	88,139 / 114,480 (77%)
内蔵メモリブロック(M9K)	204 / 432 (47%)

表3 マイコンボードの仕様

型名	ストロベリーリナックス社 STBee
CPU	STMicroelectronics 社 STM32F103VET6 ARM Cortex-M3 コア, 内部クロック 72MHz フラッシュ 512kB, RAM 64kB
クロック	12MHz, 32.768kHz
電源	USB バスパワー / 外部電源 (4.5V~12V)
端子	50pin ヘッダ × 2 (I/O ポートなど) JTAG (20pin), USB-B, USART
サイズ	49 × 82mm

表4 動き検出パラメータ

画像サイズ	752×480px
フレームレート	27fps
検出領域のサイズ	16×16px
検出領域の間隔	32px
検出領域の数	345 個 (横 23 × 縦 15 個)
動き探索範囲	横 ± 47px, 縦 ± 31px
照合器の数	6 個
検出速度分解能 (横方向)	0.44km/h (前方 3m) 0.73km/h (前方 5m)
最大検出速度 (横方向)	20km/h (前方 3m) 34km/h (前方 5m)

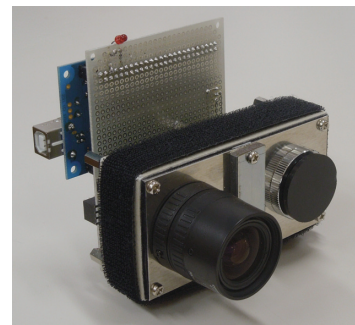


図11 試作したセンサ



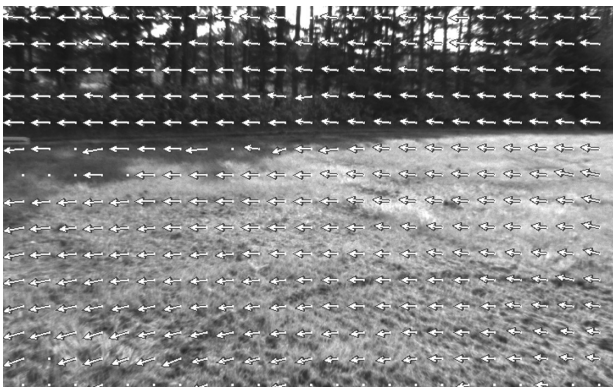
図12 センサを設置した実験用台車

図13は、前進している台車の前を人が横切ったときに検出された動きである。進入する人に対応した動きが検出されており、画面左側から中央に向かう横向きの動きであるため、警報が出力された。

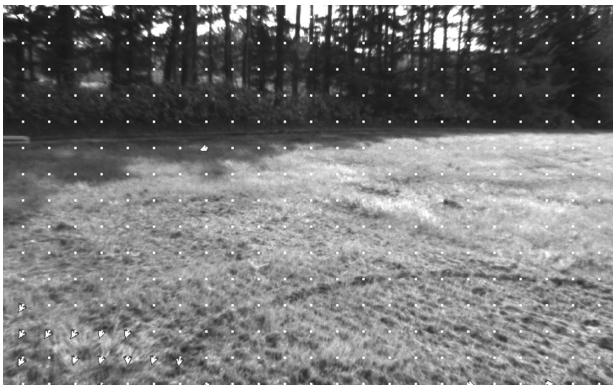
図14(a)は、進入物体がない状態で右に旋回しながら前進しているときに検出された動き、図14(b)は画面中の動きと動きの平均値の差として求められる物体の動きである。旋回により、画面全体に横向きの動きが検出されているが、各検出領域の動きと動きの平均値との差は小さく、物体の動きは検出されていない。図15(a)は右旋回中に人が進入したときに検出された動き、図15(b)はそのときの物体の動きである。進入し



図13 動きの検出例（人が進入）



(a) 検出された動き



(b) 分離された物体の動き

図14 動きの検出例（右旋回、進入なし）

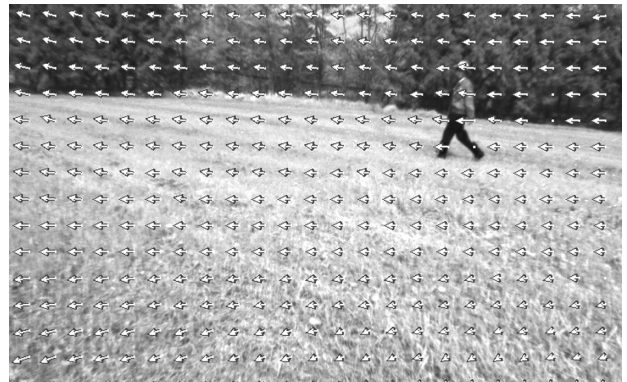
た人に対応する動きが検出されており、かつ画面中央に向かう横方向の動きであるため、危険な動きとして警報が出力された。

このように、試作センサがイメージセンサで取得した画像から動きを検出し、前方を横切る危険な動きを識別することが確認できた。

7. まとめ

イメージセンサで取得した画像からリアルタイムで動き情報を求め、この動き情報から進入物体を識別し、警報を発するセンサを開発した。試作したセンサを台車に設置し、屋外で走行させて実験を行い、動きの検出、進入物体の識別が可能であることを確認した。

今後は、動き検出、進入接近判定の精度向上を図るとともに、実際の使用環境での有効性について確認を進め、農作業機械などの前方監視、死角監視への活用を図る予定である。



(a) 検出された動き



(b) 分離された物体の動き

図15 動きの検出例（右旋回、人が進入）

引用文献

- 1) デジタル画像処理編集委員会監修：デジタル画像処理，(財)画像情報教育振興協会，383PP.，(2004)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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)