

## 超低解像度動き検出センサの開発

今川 雅人<sup>†</sup> 中村 栄治<sup>†</sup> 沢田 克敏<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 愛知工業大学工学部電気学科情報通信工学専攻  
〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247  
E-mail: ††{eiji-nakamura,k-sawada}@aitech.ac.jp

**あらまし** 総画素数 64 ピクセルからなる動き検出に特化した超低解像度センサを提案する。このセンサは  $8 \times 8$  個の CdS 素子から構成され、集光原理としてレンズを用いない特徴を有している。CdS 素子上に配置されたパイプが素子への光ガイドの役割を果たすと同時に個々の素子の視野を限定することにより、被写体を小領域に分割することとなり像面画像を作り上げる原理となっている。昆虫の視覚情報処理モデルである Elementary Motion Detector (略して EMD) と呼ばれる動き検出器を利用することにより、超低解像度画像から被写体の動作を検出する仕組みである。EMD に基づくアルゴリズムは FPGA に実装され、リアルタイムで動き検出が行われる。動き検出実験を室内光環境下で行い、提案するセンサの動き検出能力を評価した。

**キーワード** 低解像度画像処理, EMD, 動き検出, 昆虫画像情報処理, リアルタイム画像処理。

## Super low resolution motion detection sensing device

Masato IMAGAWA<sup>†</sup>, Eiji NAKAMURA<sup>†</sup>, and Katsutoshi SAWADA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Electrical Engineering, Aichi Institute of Technology  
1247, Yachigusa, Yakusa, Toyota, Aichi, 470-0392, Japan  
E-mail: ††{eiji-nakamura,k-sawada}@aitech.ac.jp

**Abstract** This technical report presents a super low resolution imaging system dedicated for object motion detection. An imaging device forming the core part of the system consists of an array of  $8 \times 8$  CdS elements. Pipes are employed in place of lenses for guiding incident light rays to these elements so that low resolution images of  $8 \times 8$  pixels are generated. To cope with such low resolution images, elementary motion detectors or EMDs which are a computational model of insect's visual processing systems are hired for motion detection. An EMD based algorithm is implemented in an FPGA device to detect motion in real time. Our experimental results executed in an indoor light environment show that the proposed imaging system can perform motion detection in a various speed range.

**Key words** Low resolution image processing, elementary motion detector, motion detection, insect vision, real time image processing.

### 1. ま え が き

ハエは複眼により外界から視覚情報を得ているが、その解像度は約 3000 ピクセルと言われている [1]。正方形の像面にすればおよそ縦横 55 ピクセル程度の低解像度である。極めて粗くしか外界から視覚情報を得ることしかできないにもかかわらず、壁にぶつかるともなく飛行することができ、目標とする場所へびたっと着陸できる。このような正確であり複雑な飛行行動をこなすことができることは驚嘆に値しよう。低解像度であるため、当然はっきりと物体を見ることはできない。しかしながら、このような低解像度でも飛行行動が可能であることから、被写体の動きを捉えることに当たっては低解像度でも何ら

問題はないことを暗示しているとも言えるのではなからうか。つまり、動き認識の問題においては、それほど細かく物事を捉えなくても良く、粗く被写体をサンプリングできれば十分ではないかと考えられる。もちろん、細かい局地的な動きを捉える必要がある場合は、それに応じた解像度が必要であろうが、上記のような飛行制御においては不必要な解像度まで追求しなくても良いとも言えよう。本研究は、このような発想に基づいて進められてきた。

できる限り低い解像度で複眼的視点に基づいて動き検出を行いたい。これを実現するようなイメージングセンサの基礎的検討を行うことが本研究の目的である。CCD や CMOS イメージングセンサを用いるのではなく、CdS (Cadmium Sulfide) 素

子を受光素子として 2 次元配列状に配置した独自のイメージングセンサを検討した。個々の CdS 素子が被写体を局地的に観察し、CdS 素子による配列が像面となり被写体全体を捉えるため、提案するイメージングセンサにおいては、いわゆる apposition compound eye [2] と呼ばれる複眼と同様なメカニズムにより画像が形成されると考えられる。

この技術報告では、CdS 素子をベースにした低解像度イメージングセンサを提案するとともに、そのような低解像度において動き検出を可能にするアルゴリズムを解説する。また、室内光環境下で動き検出実験を行った結果を示し、提案するイメージングセンサおよび動き検出アルゴリズムについて、現状ではどの程度の動き検出が可能であるかを分析する。

## 2. 超低解像度イメージングセンサ

CdS 素子は硫化カドニウムを主原料にした光伝導素子である。CdS 素子の電気伝導度が受光量に応じて変化する現象を利用した半導体素子であり、素子を挟んだ抵抗値の変化により受光量を推定できる仕組みである。本研究で使用した CdS 素子を図 1 に示す。これは Everlight 社製の素子であり、最高感度波長が 550nm となっている。ヒトの相対的感度分布と似た感度分布を示す製品である。

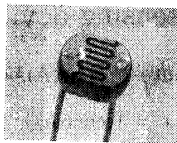


図 1 CdS 素子。

図 2 に示す様に、CdS 素子からの信号は電圧の変化として捉えることにした。ここでは、CdS 素子は抵抗が楕円によって囲まれているシンボルによって表されている。ADDR\_IN と記されている端子はこの CdS 素子へアクセスするための電圧印加端子であり 3.3V または 0V の電圧が印加される。DATA\_OUT と記されている端子はこの素子からの信号電圧を得るための端子である。左側の端子には常に 3.3V の電圧が印加されているため、ADDR\_IN に 3.3V の電圧が印加されている場合には、CdS 素子の受光量によらず DATA\_OUT への出力電圧は 0V である。逆に、ADDR\_IN の電圧が 0V に設定された場合、左側の電圧 3.3V との間で電位差が生じる。この回路には CdS 素子以外にも抵抗が存在するが、受光量により変化するのは CdS 素子による抵抗成分のみであるので、DATA\_OUT から得られる電圧が CdS 素子の受光量に応じて変化することになる。したがって、ADDR\_IN 端子はそれに繋がっている CdS 素子からの信号を得るかどうか決定するスイッチの役割を果たしていると分かる。言い換えると、ADDR\_IN 端子と CdS 素子を結ぶ配線はアドレス線と呼ぶことができよう。また、DATA\_OUT と CdS を結ぶ配線はデータ線と呼ぶことができよう。

提案するイメージングセンサにおいては個々の CdS 素子が画素となり、その配列が像面を形成することになる。即ち、使

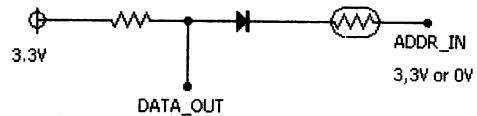
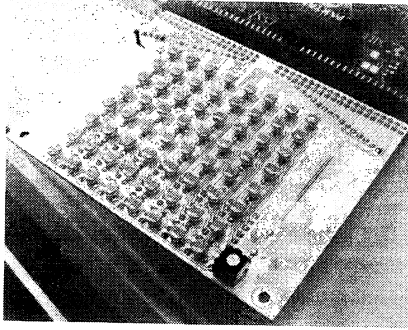


図 2 CdS 素子からの信号取得。

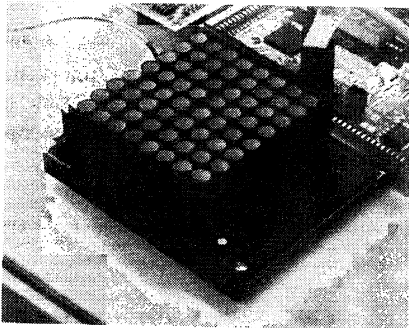
用する CdS 素子数が画像の解像度になる。図 3(a) に CdS 素子が配列状に基板に配置された写真を示す。大きさ 8×8 の配列である。合計 64 個の CdS 素子が使用されているため、イメージングセンサの解像度は 64 ピクセルになる。基板実装においては、配線の数を減らす工夫が必要である。配線と CdS 素子の関係を図 4 に示す。ここでは紙面の都合上、左右の列以外の CdS 素子に対応する部分は省略してある。このイメージングセンサでは、CdS 素子を時間を追って順に一つずつアクセス（アドレッシング）することにより、個々の CdS 素子から輝度信号を得る仕組みである。したがって、アドレス線が 64 本あればよいことになる。一方、データ線に関しては、同時に 2 つ以上の CdS 素子から信号が得られないようにアドレッシング信号タイミングを設定すればよいため、一本にまとめることが可能である。このような理由により図 4 に示すように、64 本のアドレス線が 1 本のデータ線に繋がる回路図が得られる。

使用した CdS 素子においては、ほぼ前面すべての角度からの入射光に反応するため、CdS 素子を配列状に配置しても被写体の像を得ることは不可能である。そのため、CdS 素子への入射光角度を限定するために、図 3(b) に示す筒状のパイプにより個々の素子を覆うことにした。パイプが光ガイドの役割を果たすことになる。入射光がパイプ内で反射することにより入射光の減衰をある程度抑えることができるよう白いパイプを使用した。また、パイプ間で光の漏れによるクロストークをできる限り防ぐためパイプの外側は黒く塗られている。CdS 素子を丁度覆うぐらいの太さのパイプを使用した。その直径は 6.3mm である。パイプが長いほど CdS 素子の視野を限定できることで、より遠くに存在する被写体までも捉えることができるが、逆に回折により入射光量が減少するというトレードオフの関係にある。今回はパイプの長さの最適化検討は行わず、暫定的にパイプの長さを 30mm と設定した。

動き検出システム全体の写真を図 5 に示す。記号 A に対応するのがイメージングセンサ部分である。CdS 素子からの輝度信号の取得においては、CdS 素子へのアドレッシングと CdS 素子からの電圧取得の必要があるが、これらは記号 B によって表される FPGA 評価ボード (Xilinx 社製、Spartan-III Starter Kit Board) 上の FPGA により制御される仕組みである。CdS 素子からはアナログの電圧信号が得られるため、これらを 8 ビットのデジタル信号に変換するモジュールが記号 C により表される A/D 変換デバイスを含む拡張基板である。A/D 変換デバイスの信号変換スピードはイメージングセンサのフレームレートを規定することになる。今回報告するイメージングセンサのフレームレートは約 64fps である。さらに高速の A/D 変換デ



(a) CdS 素子配列



(b) 光ガイドパイプ

図3 超低解像度イメージングセンサ。

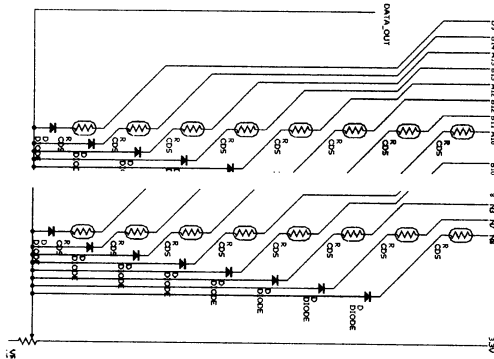


図4 CdS 素子配列回路図。

バイスを用いれば、CdS 素子の応答時間により制限される上限までフレームレートを向上させることが可能である。

具体的な信号の流れを図6に示す。合計7つの信号処理モジュールを確認することができよう。上述したイメージングセンサからの信号取得を制御しているのが CdS imaging device controller モジュールである。イメージングセンサ部は CdS

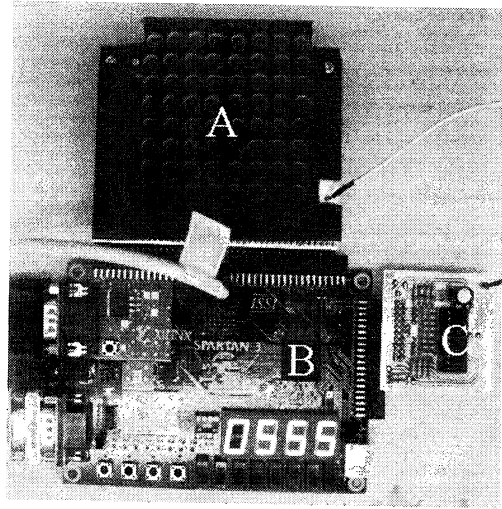


図5 動き検出システム。

imaging device モジュールに対応する。後述する動き検出アルゴリズムは20万ゲートを有するFPGA (XC3S200) に実装されており、図5では Motion detection モジュールとして表されている。動き検出においては過去のフレーム情報を利用するため、FPGA 内部でブロックRAMを作成し、これらの情報を保存しておく (Block RAM モジュール)。検出結果およびイメージングセンサ出力はリアルタイムでモニターを確認できるよう RGB display controller モジュールへも送信される。また、PCを使ったオフライン解析ができるよう RS232C controller モジュールも備えてある。

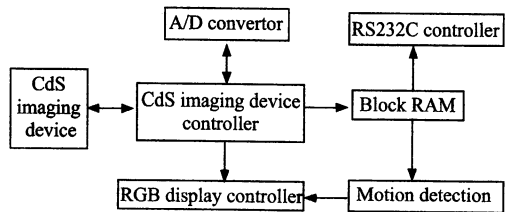


図6 信号の流れ。

### 3. EMD による動き検出

わずか64画素しかない超低解像度画像による動き検出は果たして可能であろうか。ハエなどに代表される複眼を持った昆虫は、われわれヒトに比べて遥かに低い解像度で被写体を捉えている。しかし、低解像度にもかかわらず生存していく上で十分な視覚情報を昆虫が得ている点に着目し、動き検出の計算モデルである EMD (Elementary Motion Detector の略) を提唱したのが Reichardt である [3], [4]。以降40年以上にわたり多くの学術分野で EMD の動き検出モデルとしての正当性について、あるいは EMD モデルの発展的改良について研究が行わ

れてきた [5]~[7].

EMD は遅延比較器とも呼ばれ [8], 異なる 2 点で観察した信号を時間をずらして比較することにより信号の動き方向を検出する仕組みである. 典型的な EMD の構造を図 7 に示す. 見ての通り EMD は左右対称の構造をしている.  $P_1$  と  $P_2$  は photo receptor あるいは単にリセプタと呼ばれる EMD への入力部である. それぞれのリセプタが異なる 2 つの場所で信号を観察する. リセプタからの入力は DC 成分  $\mu$  を除去された後, 時間遅延フィルタ  $F$  により遅延される信号とされない信号が生成される. これらの信号はもう一方のリセプタからの入力信号と積算器 ( $\times$ ) で掛け合わせられ信号  $S_1$  と  $S_2$  となる. これらの信号の差が特定の期間にわたり加算され ( $\Sigma$ ), EMD の出力  $R$  となる. EMD の理論的詳細は [5] などと譲るとして, EMD の特筆すべき点は, EMD の出力  $R$  の符号により, 2 つのリセプタ  $P_1$  と  $P_2$  を結ぶ線上の運動 (一軸上の運動) の方向を推定できる点である.

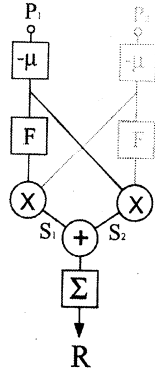


図 7 EMD の構造.

提案するイメージングセンサにおいて, どのように EMD が活用されているか具体的に述べよう. CdS 素子配列における  $r$  行目と  $c$  列目に位置する CdS 素子から得られ,  $n$  フレーム目における輝度信号を  $I(r, c, n)$  と表す. 2 つのリセプタを水平方向, あるいは垂直方向に並べた時, それらの間隔を  $d_h$  と  $d_v$  と記す. もちろん, リセプタはいずれかの CdS 素子に対応するため, これらの間隔は 0 以上 7 以下の整数である. このとき,  $n$  フレーム目における EMD の中間信号  $S_1$  と  $S_2$  は式 (1) または式 (2) により算出される. ここで  $\ell$  は時間遅延フィルタの時定数に対応するパラメータであり, イメージングセンサではデジタル信号を扱っているためパフファリングフレーム数となる. また, DC 成分  $\mu$  は式 (3) によりフレーム内平均輝度値となる.

$$\begin{aligned} S_1(r, c, n) &= \{I(r, c, n - \ell) - \mu(n - \ell)\} \times \\ &\quad \{I(r, c + d_h, n) - \mu(n)\} \\ S_2(r, c, n) &= \{I(r, c, n) - \mu(n)\} \times \\ &\quad \{I(r, c + d_h, n - \ell) - \mu(n - \ell)\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S_1(r, c, n) &= \{I(r, c, n - \ell) - \mu(n - \ell)\} \times \\ &\quad \{I(r + d_v, c, n) - \mu(n)\} \\ S_2(r, c, n) &= \{I(r, c, n) - \mu(n - 1)\} \times \\ &\quad \{I(r + d_v, c, n - \ell) - \mu(n - \ell)\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mu(n) = \frac{1}{8 \times 8} \sum_{r=0}^7 \sum_{c=0}^7 I(r, c, n) \quad (3)$$

EMD の出力は式 (4) により算出される. これは, 異なる 2 点でかつ時間をずらして信号を観察しながらある一定の期間  $K$  フレームに渡り中間信号を積算していることを意味している. つまり, EMD による動き検出とは, 信号が時間経過に伴いどれだけ移動したかを信号の自己相関のチェックにより推定することであると分かる. 具体的に述べれば, リセプタが水平に置かれた状況では, 出力  $R$  が正であれば右向の動き, 負であれば左向の動きとなる (表 1 参照). 同様に, リセプタが垂直に置かれた場合, 出力  $R$  が正であれば下向の動き, 負であれば上向の動きとなる. どのような動きも検出されない場合には出力  $R$  は 0 となる. EMD 出力の計算は信号の自己相関の計算であるため, オフセットの影響を防ぐ目的により式 (3) で表される DC 成分が信号から除去することが必要である.

$$R(r, c, n) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \{S_1(r, c, n - k) - S_2(r, c, n - k)\} \quad (4)$$

表 1 E 被写体運動方向と MD 出力の関係 ( $d > 0$ ).

Coord. $P_1$	Coord. $P_2$	$R > 0$	$R < 0$	$R = 0$
$(r, c)$	$(r, c + d)$	右方向	左方向	静止
$(r, c)$	$(r + d, c)$	下方向	上方向	静止

#### 4. 実験結果

提案するイメージングセンサと EMD を利用した動き検出アルゴリズムにより,  $8 \times 8$  ピクセルという超低解像度画像を利用して, どの程度動き検出が可能であるかを検証するため, 室内光環境下で実験を行った.

図 8 に示すように, CdS 素子配列の行および列ごとに EMD を 7 つずつ配置した. 各行あるいは各列には合計 8 個の CdS 素子が存在するため, 合計 7 つの EMD が行あるいは列ごとに生成されることになる. よって, CdS 素子配列全体では, 行方向と列方向にそれぞれ 56 個ずつの EMD が配置されていることになる. 図 8 から分かる通り, 隣り合う EMD は共通する CdS 素子から入力信号を受信することになる. このような設定では, リセプタ間隔パラメータは 1 ピクセルとなる.

動き検出実験の再現性を確保するために, 図 9 に示す実験装置により被写体の動きを作り出した. イメージングセンサの上方 30mm の高さにあるセンサに並行する面内を透明アクリル板がアルミフレームの溝ガイドに沿い, 左方向へ移動する仕組みになっている. 透明アクリル板はビニール紐により左端にあるモータにより引っ張られることにより左方向に等速運動を行う. このとき, モータへ印加される電圧は 3 端子レギュ

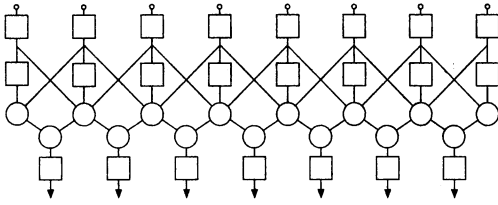


図 8 EMD の配置。

レータにより制御されており、複数のモータ回転速度を離散的に得られるように工夫されている。透明アクリル板には、35mm×35mm の大きさの白いボール紙が張られており、このボール紙が今回の実験の被写体である。図 8 は、ボール紙がイメージングセンサを半分ほど横切った時のスナップショットである。

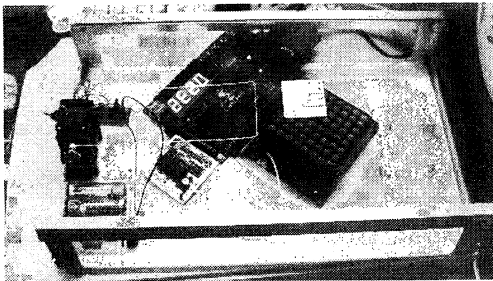
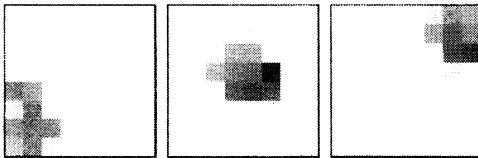


図 9 動き検出実験風景。

イメージングセンサは被写体が描く直線軌跡に対して約 50 度ほど斜めになった状態で固定されている。このような被写体の直線運動をイメージングセンサが捉えた画像で確認したのが図 10 である。個々の画素がそれぞれの CdS 素子から得られた輝度値を表している。CdS 素子の受光量が多いほど画素が明るく表示されている。図 10(a) においては、被写体が丁度イメージングセンサの視野の端に侵入した時であり、被写体に対応する画素が黒くなっているのが確認できる。図 10(b) では、被写体がイメージングセンサの中央にまで進んでいるのが確認できよう。やがてイメージングセンサの視野から被写体が離れようとしているのが図 10(c) である。



(a) センサ視野へ侵入した時 (b) センサ視野上にある時 (c) センサ視野から離れる時

図 10 像面の時間変化。

このようにして得られる輝度値情報から上述した EMD に基づくアルゴリズムにより推定される動き検出結果を図 11 に示す。横軸は経過時間を表し、縦軸は EMD の合計出力を最大値を 1 とするように規格化した値を表している。EMD の遅延フレームパラメータは 1 フレームと設定した。実線は水平方向（行方向）の動きを捉える EMD からの出力の合計を表している。一方、破線は垂直方向（列方向）の動きを捉える EMD からの出力の合計を表している。ボール紙被写体の移動速度は約 50mm/s に設定されている。被写体の動きはイメージングセンサに対して斜めの直線運動になっているため、この運動がイメージングセンサに対して垂直および水平方向の運動成分を有することになる（図 12 参照）。約 0.9 秒が経過した時から水平垂直方向に EMD 出力が現れ、約 1.8 秒で水平方向出力が最大に、垂直出力が最小になっている。約 2.6~2.7 秒後には EMD 出力がほぼ 0 に収束している。このように EMD 出力が変化することは、図 10 からも理解できよう。それは、EMD が動きを検出しないときは、EMD 出力が 0 であり、被写体が徐々にイメージングセンサの隅から視野に現れるため、時間経過に合わせて被写体の動きに反応する EMD が増加する。やがて、被写体が全部イメージングセンサの視野に含まれる時に反応する EMD 数が最大に達し、やがて視界から消えていくにしたがって反応する EMD 数が減少する。したがって、このような EMD 出力グラフが得られることになる。

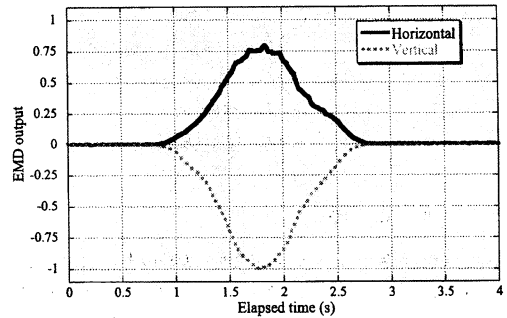


図 11 動き検出結果（低速）。

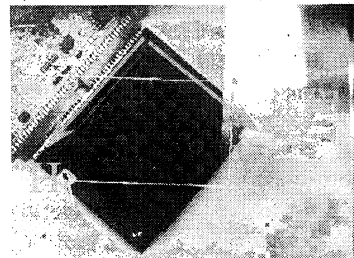


図 12 イメージングセンサにおける水平軸 (H) と垂直軸 (V)。

ここで注目すべきは、水平方向に対する垂直方向の動き検出 EMD の同時刻における相対的出力の比較である。両者の出力

の比はおおよそ-1.3である。これら出力の比により任意の方向の運動を推定することが可能である[9]。具体的には、水平成分のEMD出力を $R_H$ 、垂直成分のEMD出力を $R_V$ とした時、運動方向 $\theta$ は式(5)により求めることができる。この運動の方向を計算するとおおよそ53度となり、被写体の実際の直線運動と一致することが分かる。

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{R_V}{R_H} \right) \quad (5)$$

図13は、被写体の動きをモータへの印加電圧を上昇させることで約100mm/sに設定した時の動き検出結果である。被写体の運動と遅延フレームパラメータ数は図11と同じ条件である。運動スピードが約2倍になったため、EMDの出力が変化する期間が約半分になっていることが確認できよう。運動方向については、水平方向と垂直方向のEMD出力の比が先ほどと同様-1.3であるので、運動方向は変わっていないことも確認できる。

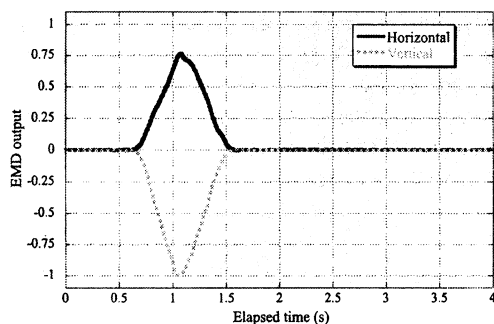


図13 動き検出結果(高速)

## 5. まとめ

この技術報告では、CdS素子を使った総画素数64ピクセルからなる動き検出に特化したイメージングセンサを提案した。イメージングセンサは8行8列のCdS素子配列を覆うように光ガイド用の同数のパイプが配置されており、集光レンズを用いない特徴的なイメージングセンサである。このような超低解像度においても動き検出ができるよう、昆虫の視覚情報処理計算モデルであるEMD(Elementary Motion Detector)を採用することで、任意の方向の動き検出を実現した。EMDをベースにした動き検出アルゴリズムは20万ゲートの安価なFPGAデバイスであるXilinx社のSpartan-IIIに実装した。室内光環境下での実験において、運動速度が異なる直線運動もEMD出力を観察することにより可能であることを示した。

イメージングセンサのフレームレートはCdS素子からの出力電圧をデジタル値に変換するA/D変換デバイスの性能に依存するため、今後の研究においては、より高性能のA/D変換デバイスを用いて高フレームレートでの動き検出を検討していく予定である。また、光ガイドの役割を果たすパイプの太さや長さは、イメージングセンサが動きを感知できる被写体まで

の距離を規定するため、パイプに関するこれらパラメータの最適化やパイプ以外の集光方法を検討する予定である。

謝辞 本研究は、平成17年度科学研究費および日東学術振興財団の援助により行われました。著者一同、これらの援助に深く感謝いたします。

## 文 献

- [1] N. Franceschini, J. Pichon, and C. Blanes, "From insect vision to robot vision," *Philos. trans. Roy. Soc. Lond. B*, vol. 337, pp. 283-294, 1992.
- [2] D. Stavenga and R. Hardie Eds., *Facets of Vision*, Springer-Verlag, 1989.
- [3] W. Reichardt, *Autocorrelation, a principle for the evaluation of sensory information by the central nervous system*, pp. 303-317, MIT Press and John Wiley & Sons., 1961.
- [4] M. Egelhaaf and A. Borst, "Mini review. Motion computation and visual orientation in flies," *Comp. Biochem. Physiol.*, vol. 104A, no. 4, pp. 659-673, 1993.
- [5] J. van Santen and G. Sperling, "Elaborated Reichardt detectors," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 2, no. 2, pp. 300-321, 1985.
- [6] A. Johnston, P. McOwan and C. Benton, "Robust velocity computation from a biologically motivated model of motion perception," *Proc. R. Soc. Lond. B*, vol. 266, pp. 509-518, 1999.
- [7] J. Zanker, "Theta motion: a paradoxical stimulus to explore higher order motion extraction," *Vision Res.*, vol. 33, No. 4, pp. 553-569, 1993.
- [8] S. Palmer, *Vision Science. Photons to Phenomenology*, MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
- [9] E. Nakamura, T. Nakamura, and K. Sawada, "Fast local motion estimation algorithm using elementary motion detectors," *Proc. Visual Communications and Image Processing 2003*, Proc. SPIE Vol. 5150, pp.1491-1502, 2003.