

## 高速動き検出における EMD パラメータの最適化

高橋 知子<sup>†</sup> 浅見 真吾<sup>††</sup> 中村 栄治<sup>†</sup> 沢田 克敏<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院工学研究科

〒 470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247

<sup>††</sup> 愛知工業大学工学部電気学科情報通信工学専攻

E-mail: ††{eiji-nakamura,k-sawada}@aitech.ac.jp

**あらまし** リアルタイム動画画像処理ではフレーム間内で必要な処理を行わなければならない。アルゴリズム自体の計算複雑性を低減することは、時間的制約に対処する極めて有効な手段と言える。その意味で、計算複雑性の低い Elementary Motion Detector (EMD) と呼ばれる動き検出器はリアルタイム動き検出を実現する有力な選択肢の一つである。しかしながら、正しい動き検出結果を得るためには、EMD を規定するパラメータを適切に設定する必要がある。この技術報告では、数値最適化法により最適化パラメータをリアルタイムで探索するアルゴリズムを提案する。アルゴリズムは PC および FPGA に実装され、異なる環境で撮影されたビデオ画像を用いて検証実験を実施した。EMD を規定するパラメータが最適化されることにより、動き方向の検出精度向上を確認した。

**キーワード** EMD, パラメータ最適化, リアルタイム動き検出, 動画画像処理, FPGA.

## EMD parameter optimization for fast motion detection

Tomoko TAKAHASHI<sup>†</sup>, Shingo ASAMI<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

<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** In real time applications, any procedures to process the current video frame need to be completed before the successive frame to come. Reducing the computational complexity of an algorithm is a good strategy to deal with such a time constrain. Hence, utilizing so called the elementary motion detector or EMD is very promising in realizing real time motion detection. EMDs, however, require a proper setup of parameters configuring them in order to obtain good detection results. In this technical report, a numerical optimization algorithm is proposed for finding optimal parameters in real time. The proposed algorithm has been implemented in a PC and an FPGA device and its performance has been examined for video image sequences captured in different environments. It has been found that the estimation of motion direction can be improved by optimizing the EMD parameters.

**Key words** EMD, parameter optimization, real time motion detection, video image processing, FPGA.

### 1. まえがき

家庭用デジタルハイビジョンビデオカメラやムービー機能付き携帯電話などを取り上げるまでもなく、ビデオ撮影技術の向上には目を見張るものがある。撮影技術ばかりでなく、デジタル化したビデオを圧縮などを施して保存する技術、あるいは必要なシーンを検索する技術など、ビデオ関連技術は我々の日常生活に大きなウェイトを締めるようになっていく。ビデオ

画像を扱う画像処理、即ち、ビデオ画像処理において、今日まで研究で得られた成果がこれビデオ関連技術の基礎をなしていると言えよう。

ビデオ画像処理において、動き検出は最も初期から取り組まれている研究課題である。様々な視点から、多くの動き検出アルゴリズムが提案されてきた。代表的な手法の例として、オプティカルフロー手法とブロックマッチング手法を挙げることができよう。オプティカルフロー手法では、被写体は移動先に

おいても同じ輝度を有することを拘束条件とした optical flow constraint equation [1] と呼ばれる方程式を解くことにより、動き検出を行う仕組みである。一方、ブロックマッチング手法では、被写体の移動先をブロック単位で検索し、検索範囲内で最も似かよっているブロックを求めることにより動き検出を行う [2]。

目的や使用可能な資源制約により、とるべき動き検出の戦略は異なってくるであろう。本研究では、メモリや計算能力など資源の限られた安価なハードウェアを使用し、リアルタイムで動き検出を行うことが最終目標であるため、アルゴリズムの計算複雑性の観点から動き検出手法を選択した。この様な方針により、計算複雑性が低いと判明している Elementary Motion Detector (略して EMD) と呼ばれる動き検出器を採用した。EMD は 1961 年に神経生理学者である Reichardt [3] により提案されたハエの視覚情報処理モデルである。今日まで、多くの研究者によりこのモデルの妥当性が検証されてきた [4]~[6]。EMD は信号を 2 つの離れた点において観測し、時系列においてそれらの信号の相関を積算により計算する。数学的には自己相関を計算することに相当する。EMD の最大の特徴は、2 つのリセプタを結ぶ軸上の運動方向を、その出力の符号により判定する点である。ただし、EMD を規定するパラメータは動き検出結果に影響を与えるため、動き検出の精度向上のためにはパラメータを適切に設定する必要がある。

この技術報告では、リアルタイムでパラメータを最適化するアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは、EMD を規定するパラメータを変数とし EMD 出力を目的関数とするパラメータ空間を数値最適化により最適パラメータを探索する。アルゴリズムは PC および FPGA に実装し、室外自然画像および室内人工テクスチャを動画データとして使い、パラメータ最適化の効果を検証した。

## 2. EMD の基本原理

図 1 に典型的な EMD の構造を示す。EMD は左右対称の構造をしており、2 つのフォトリセプタ、あるいは単にリセプタ ( $P_A$ ,  $P_B$ ) と呼ばれるローカル領域を観察する入力を持っている。2 つのリセプタは距離  $\Delta\phi$  だけ離れて位置しており、 $\Delta\phi$  はリセプタ間隔、あるいは単にギャップと称されることが多い。それぞれのリセプタからの出力は二分され、一方はフィルタ  $F$  により一定時間遅延され ( $A_1$ ,  $B_1$ )、もう一方の信号は何も処理を施されない ( $A_2$ ,  $B_2$ )。他方のリセプタからの出力と時間遅延された出力が乗算器 (図 1 においては  $\times$  印に相当する) で乗算され ( $A_1 \times B_2$ ,  $A_2 \times B_1$ )、もう一組の乗算された結果と最終的に差を計算され ( $A_1 \times B_2 - A_2 \times B_1$ )、この値が EMD の出力  $R$  となる。

EMD がどのようにして一軸上の運動方向を判定するかを、観測信号が式 (1) で表される正弦波である場合を例にとり説明しよう。

$$f(t) = I + \Delta I \sin(\omega t). \quad (1)$$

ここで、 $\omega$  は正弦波の角速度を表している。この値が正であ

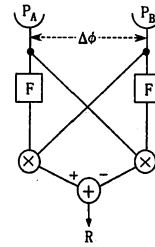


図 1 EMD の構造。

ば、正弦波はリセプタ  $P_A$  から  $P_B$  へ方向に移動していると仮定する。フィルタ  $F$  は式 (2) で表される一次のローパスフィルタであるとする。

$$\begin{aligned} \hat{F}(\omega) &= 1/(1 + \tau^2 \omega^2)^{1/2}, \\ \phi(\omega) &= -\arctan(\tau\omega). \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\tau$  はフィルタ  $F$  の時定数であるとし、 $\hat{F}$  と  $\phi$  は、周波数領域におけるフィルタ  $F$  のインパルス応答の大きさと位相であるとする。このような場合、Egelhaaf ら [6] によれば、EMD からの出力  $R$  は式 (3) となる。

$$R(t) = \Delta I^2 \sin\left(2\pi \frac{\Delta\phi}{\lambda}\right) \frac{\tau\omega}{1 + \tau^2 \omega^2}. \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$  は観測信号である正弦波の波長である。式 (3) で注目すべき点は、(i) 出力  $R$  が時間の関数になっておらず、(ii) その符号は観測信号の角速度  $\omega$  の符号と一対一の関係にあることである<sup>(注1)</sup>。したがって、出力  $R$  の符号が正であれば、観測信号はリセプタ  $P_A$  から  $P_B$  に向かって進んでいることを表しており、出力  $R$  の符号が負であれば、観測信号はリセプタ  $P_B$  から  $P_A$  に向かって進んでいると判断できることになる。

## 3. EMD による動き検出

### 3.1 EMD による方向推定

EMD はその出力の符号により、観測信号の進行方向を判定できるという特徴を持っている。しかし、どの方向の運動に対しても進行方向を判定できるわけではなく、2 つのリセプタを結ぶ線上の運動に限るという限定条件がついていた。この限定条件を克服するために、筆者らは 2 つの EMD を組み合わせ Extended EMD [7] と呼ばれる動き検出器を考案した。Extended EMD (以降 ExEMD と記す) は、動きを 2 つの直交する軸に投影することにより動きベクトルを検出するという発想に基づいている。

ExEMD の構造を図 2 に示す。ExEMD は 3 つのリセプタ  $P_C$ ,  $P_H$ ,  $P_V$  を持つ。リセプタ  $P_C$  と  $P_H$  を結ぶ線分は水平になるように設定され、リセプタ  $P_C$  と  $P_V$  を結ぶ線分は垂直になるように設定される。リセプタ  $P_C$  と  $P_H$  を入力とし出力を  $R_H$  とする EMD (以降、hEMD と呼ぶ) と、リセプタ  $P_C$

(注1)：一般性を失うことなく議論を簡潔にするために  $0 \leq \Delta\phi/\lambda \leq 1/2$  とした。

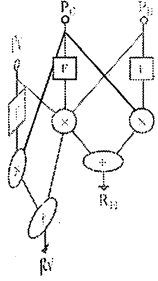


図2 ExEMDの構造。

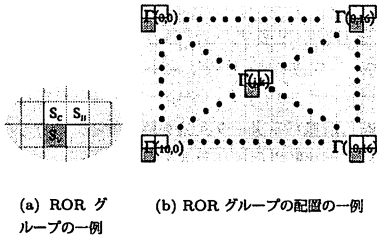


図3 RORの設定。

と  $P_V$  を入力とし出力を  $R_V$  とする EMD (以降、vEMD と呼ぶ) から ExEMD は成り立っているのが分るであろう。

任意の方向の運動は、水平方向の運動成分が hEMD により捉えられ、垂直方向の運動成分が vEMD により捉えられる仕組みになっている。具体的には、運動の方向  $\theta$  は式 (4) に示すように、2つの出力  $R_H$  と  $R_V$  との比を計算することにより求めることができる。

$$\theta = \tan^{-1}(R_V/R_H). \quad (4)$$

### 3.2 ローカルモーションベクトルの方向推定

像面の輝度値を EMD への入力とすることにより、ローカルモーションベクトルの方向推定を EMD により行う。像面を多くの矩形領域に分割し、それぞれの矩形領域の平均輝度値を EMD リセプタへの入力とする。個々のリセプタへの入力を供給するローカル矩形領域を ROR<sup>(註2)</sup> と呼ぶことにする。一つの ExEMD は図 3(a) に示すように、合計 3つの ROR を持つことになる。ここで、 $S_C$ 、 $S_H$ 、 $S_V$  は、それぞれリセプタ  $P_C$ 、 $P_H$ 、 $P_V$  に対応する ROR を意味している。これら 3つの ROR が一つのグループとなり、一つのローカル領域を形成することになる。この例ではリセプタ間隔が 0 に設定してある。

像面全体に渡りローカルモーションベクトルの方向を推定するためには、複数の ROR グループを配置する必要がある。図 3(b) は像面を  $12 \times 18$  の矩形領域に分割した例を示したものである。ここでは、 $(j, k)$  番目の ROR グループを  $\Gamma(j, k)$  と表している。この例では、合計 187 個の ROR グループ ( $\Gamma(0, 0) \sim$

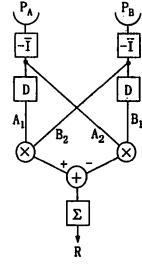


図4 離散信号用の EMD。

$\Gamma(10, 16)$ ) により 187 個のローカル領域におけるローカルモーションベクトルの方向が推定されることになる。

図 4 は ExEMD を構成する個々の EMD の構造である。リセプタにおける入力から EMD の出力までの流れは次のようになる。

- リセプタ  $P_A$  と  $P_B$  の出力を、それぞれ  $\bar{f}_A$  と  $\bar{f}_B$  とする。個々のリセプタに対応する ROR の大きさを  $M_1 \times M_2$  の矩形領域であるとする、出力  $f_A$  と  $f_B$  は式 (5) で表される。ここで、 $f(r, c, n)$  は座標  $(r, c)$  における  $n$  フレーム番目の輝度値であり、 $\Delta r$  と  $\Delta c$  は、それぞれ縦横方向のリセプタ間ギャップであるとする。

- あらかじめ定められたフレーム期間  $L$  に渡りリセプタ出力の平均値を計算し、これをリセプタ出力の DC 成分とする。図 4 で  $-\bar{f}$  で示されているように、リセプタ出力から DC 成分を差し引く。

- 式 (6) に示すように、DC 成分を引かれたリセプタからの出力は 2 分され、出力を遅延するためのバッファ ( $D$ ) を通過するもの ( $A_1$  と  $B_1$ ) と、しないもの ( $A_2$  と  $B_2$ ) が掛け合わされる。ここで、 $k_r$  はフレーム数で表した遅延時間 (バッファリング時間) である。

- 式 (7) に示すように、あらかじめ定められた期間  $K$  (フレーム数) に渡り信号が積算され、その時間平均が EMD 出力  $R$  として得られる。

$$\begin{aligned} \bar{f}_A(n) &= \frac{1}{M_1 \times M_2} \sum_{r=0}^{M_1-1} \sum_{c=0}^{M_2-1} f(r, c, n), \\ \bar{f}_B(n) &= \frac{1}{M_1 \times M_2} \sum_{r=0}^{M_1-1} \sum_{c=0}^{M_2-1} f(r+\Delta r, c+\Delta c, n). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_1(n) &= \bar{f}_A(n - k_r) - \frac{1}{L} \sum_{\ell=0}^{L-1} \bar{f}_A(n - k_r - \ell), \\ A_2(n) &= \bar{f}_A(n) - \frac{1}{L} \sum_{\ell=0}^{L-1} \bar{f}_A(n - \ell), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} B_1(n) &= \bar{f}_B(n - k_r) - \frac{1}{L} \sum_{\ell=0}^{L-1} \bar{f}_B(n - k_r - \ell), \\ B_2(n) &= \bar{f}_B(n) - \frac{1}{L} \sum_{\ell=0}^{L-1} \bar{f}_B(n - \ell). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(n) &= \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \{A_1(n-k)B_2(n-k) \\ &\quad - A_2(n-k)B_1(n-k)\}. \end{aligned} \quad (7)$$

(註2) : Recetpor Observing Region の略

#### 4. パラメータの最適化

式 (3) から、リセプタ間隔  $\Delta\phi$  および入力遅延時間  $\tau$  が EMD 出力  $R$  の結果に影響を及ぼすことが分る。これら EMD を規定するパラメータを適切に選択しなければ、最悪の場合、 $R$  の符号が逆転することもありうる。符号が逆転することは、180 度逆方向の動きとして検出されることになり、動き検出におけるエイリアシングと呼ばれる深刻な状況を引き起こすことになる。本研究では、一軸方向の動きではなく、水平成分  $R_H$  と垂直成分  $R_V$  の比により式 (4) に基づき任意の動き方向を推定する。EMD 出力の値そのものの大きさに誤りがあれば、推定される動き方向に誤差となって現れる。もちろん、これらパラメータは EMD 出力の大きさに影響を与えるため、やはり EMD パラメータを何らかの方法により最適に設定する必要が生じるわけである。

3.2 節で述べたように、縦横方向のリセプタ間隔  $\Delta r$  と  $\Delta c$  は画素数が単位となり、信号遅延時間  $k_r$  はバッファによる遅延フレーム数が単位となる。したがって、パラメータは非負の整数となるため、離散的パラメータ探索空間が構成される。ところで、リセプタ間隔は縦横両方向で別々に設定することができるが、特定方向に重み付けした動き検出でなく等方向的動き検出を行うため、以下の議論ではリセプタ間隔は縦横で同じであるととし、記号  $d$  で表すことにする。以上より、求めるべき最適パラメータを  $(d^*, k_r^*)$  とすると、これらパラメータは式 (8) より求められる。

$$(d^*, k_r^*) = \max_{d \in \Omega_1, k_r \in \Omega_2} G(d, k_r)$$

$$G(d, k_r) = \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ \left| R_H^{(j,k)}(d, k_r) \right| + \left| R_V^{(j,k)}(d, k_r) \right| \right\} \quad (8)$$

ここで、 $\Omega_1$  と  $\Omega_2$  はリセプタ間隔と遅延フレーム数の範囲をそれぞれ表しており、 $R_H^{(j,k)}$  と  $R_V^{(j,k)}$  は  $\Gamma(j, k)$  の ROR に対応する ExEMD の hEMD (横方向) および vEMD (縦方向) のそれぞれの出力を表している。また、 $J$  と  $K$  は各列と行における ExEMD の総数を表している。最適パラメータ  $(d^*, k_r^*)$  を目的関数  $G$  が最大になるときに求めることができる理由は、運動方向の如何にかかわらず ExEMD 出力が最大になる時に最も動きを忠実に検出していると考えられるためである。したがって、目的関数  $G$  は hEMD と vEMD 出力の絶対値の和により構成されることになる。

最適パラメータ探索方法の手順を以下に示す。パラメータ探索空間は 3 次元であるが、パラメータ  $d$  を  $X$  軸、パラメータ  $k_r$  を  $Y$  軸、目的関数を  $Z$  軸に対応するものとして説明を行う。目的関数が描く 3 次元表面 (Hypersurface) で最も高くなった場所を探すことが探索法の主眼である。

- **Step 1** 2 種類のパラメータにより作られる  $XY$  空間を部分的に覆うパラメータペア  $(d, k_r)$  を中心とする大きさ  $2L_x - 1 \times 2L_y - 1$  のマスクを考える。このマスク上に存在する 8 個のパラメータペア

$(d - L_x, k_r + L_y)$ ,  $(d, k_r + L_y)$ ,  $(d + L_x, k_r + L_y)$ ,  $(d - L_x, k_r)$ ,  $(d + L_x, k_r)$ ,  $(d + L_x, k_r)$ ,  $(d, k_r - L_y)$ ,  $(d + L_x, k_r - L_y)$ , およびマスクの中心に位置するパラメータペア  $(d, k_r)$  に対する目的関数の値を計算する。得られた値を  $G_1 \sim G_9$  と表す。

- **Step 2**  $G_1 \sim G_9$  の中で、最大となるものを選び、これを  $G_{Max}$  と表す。

- **Step 3**  $G_{Max}$  が得られた時のパラメータペアを  $(d^+, k_r^+)$  と表すことにする。 $(d^+, k_r^+)$  を中心とした大きさ  $2L_x - 1 \times 2L_y - 1$  のマスクを新たに考える。Step 2 と同様に、9 個のパラメータペアに対する目的関数の値を計算する。これらの値を  $G_1^+ \sim G_9^+$  と表す。

- **Step 4**  $G_1^+ \sim G_9^+$  の中で最大となるものを選び、これを  $G_{Max}^+$  と表す。 $G_{Max}^+$  と  $G_{Max}$  を比較して、式 (9) が成立する場合は最適パラメータペアを  $(d^*, k_r^*) = (d^+, k_r^+)$  とし、最適パラメータが得られたと判断し最適パラメータ探索を終了する。成立しない場合は、引き続き最適パラメータ探索を行う必要があるため、 $(d, k_r) = (d^+, k_r^+)$  として Step 1 へ戻る。式 (9) での  $T_h > 0$  は任意に設定する停止条件である。

$$G_{Max}^+ - G_{Max} < T_h \quad (9)$$

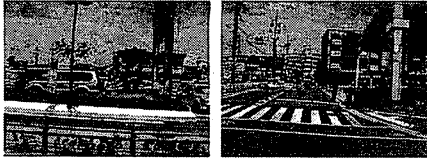
#### 5. 実験結果

図 5 は、デジタルカメラのムービー機能を使用して撮影されたビデオ画像からの代表的フレームである。25 秒程に渡り、デジタルカメラの性能である 15fps のフレームレートで幹線道路を走行する路線バスの車窓から進行方向左手側に向かって撮影した。デジタルカメラは人の手によりほぼ水平に保持されており、観察されるべき像面での動き方向もほぼ水平であり、右から左へ向かうグローバルモーションベクトルを生じることになる。

上述したアルゴリズムを Microsoft 社の DirectX パッケージに含まれる DirectShow モジュールを使い、PC<sup>(註3)</sup> 上で動作するソフトウェアに実装した。最適パラメータ検出を含む動き検出はリアルタイムで行われた。動き方向の検出結果を図 6 に示す。横軸は経過時間を表し、縦軸は検出された動き方向を表している。水平右方向の動きを 0 度として動き方向を算出しているため、図 5 においては、求めるべき方向は 180 度となる。破線で表されている結果は、EMD パラメータの内リセプタ間隔が不適切に設定された場合である ( $d=100$  ピクセル,  $k_r=1$  フレーム)。実際の動き方向である 180 度から大きくずれた方向が検出されてしまっていることが分かる。

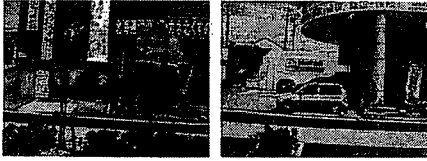
不適切に設定したりセプタ間隔の最適値を求める実験を行った。その結果は図 5 において実線で示されている。検出角度にずれはあるものの、おおむね実際の動き方向である 180 度を中心とした検出結果が得られていることがわかる。この実験

(注3) : CPU は Pentium4 3GHz, メモリは 1GB である。



(a) 5 秒経過時

(b) 10 秒経過



(c) 15 秒経過

(d) 20 秒経過

図 5 撮影ビデオのフレーム画像 (240×320 ピクセル)

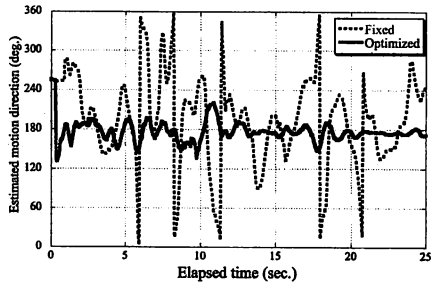


図 6 動き方向検出結果.

で得られた最適化パラメータは全撮影期間 (0~25 秒) に渡り  $d^* = 10$  ピクセルであった。パラメータが適切に設定することにより正しい結果が得られることを確認できよう。

提案するアルゴリズムを安価なハードウェアに実装した場合についても、検証を行った。20 万ゲートからなる廉価な FPGA デバイスである Spartan-3 を有する評価基板<sup>(注4)</sup>を使用して実験を行った。図 7 は、評価基板を台車に乗せた状態である。丸印で囲んである部分が CMOS センサであり、29fps のフレームレートで大きさ 88×88 ピクセルの画像を取得し、評価基板のヘッダ (IO ピン) を通して FPGA デバイスに送る仕組みである。CMOS センサは台車の進行方向に対して右方向を向いて固定されている。FPGA 内部では、提案するアルゴリズムがリアルタイムでパラメータ最適化と動き検出を行い、その結果を FPGA 内部のブロック RAM に保存し、実験終了後に評価基板から PC へ RS-232C インタフェースを通じて送信し、オフラインで PC 上で動き検出結果を解析する手順である。

パラメータの最適化について分析が容易になるよう、人工テクスチャの前で評価基板を乗せた台車を移動させ動き検出実験

(注4) : Xilinx 社製の Spartan-3 Starter Kit Board.

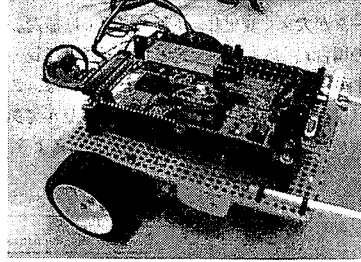


図 7 CMOS センサと台車.

を行った。実験の様子を図 8 に示す。人工テクスチャは床面に対し垂直に設置されており、このテクスチャ面と平行になるよう床の上を台車を一定速度で移動させた。CMOS センサからは水平方向 (像面内で真横) に移動する動画画像が取得されることになる。

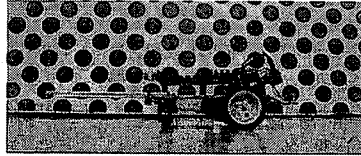


図 8 人工テクスチャと台車.

動き方向検出結果を図 9 に示す。横軸は時間経過であり、縦軸は ExEMD の規格化した出力である。実線と破線はそれぞれ hEMD (水平成分) および vEMD (垂直成分) 出力である。経過時間により水平垂直成分の比に差があることが分る。経過時間が 4 秒以降は、垂直成分にくらべ極めて大きな水平成分が検出されおり、実際の台車の動きを忠実に検出できていることが確認できよう。経過時間が 3 秒前後までは、両成分の比がそれほど大きくはない。3 秒~4 秒の間でこれらの比は増大している。つまり、方向検出結果の精度が向上していることになる。

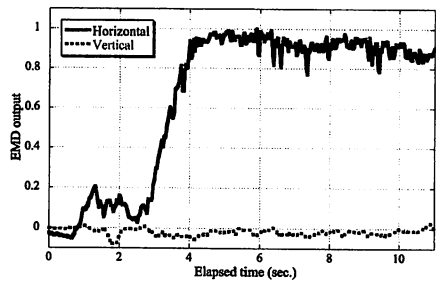


図 9 動き方向検出結果.

このような方向検出の精度向上をパラメータ最適化の視点から見てみよう。図 10 はパラメータ最適化の履歴である。リセプト間隔  $d$  および遅延フレーム数  $k_r$  の履歴はそれぞれ実線と点線で表されている。時間経過 4 秒ほどまでは最適値を求め

てパラメータが大きく変化し、4秒以降では最適な値（リセプタ間隔の場合）、あるいは一定の範囲（遅延フレーム数の場合）に収まっているのが確認できる。具体的には、この実験では、最適パラメータはリセプタ間隔が6ピクセルであり、遅延フレーム数が6~9フレームの範囲であると言える。

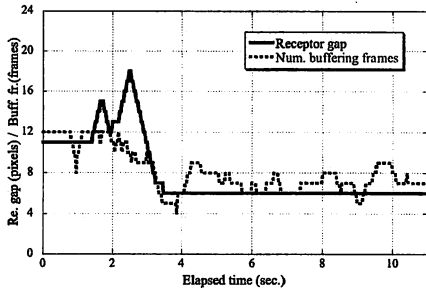


図10 パラメータ最適化過程。

台車の移動速度を約2倍にした場合に得られた結果を図11に示す。移動速度が増大したため、観察時間が約半分になっている。先ほどの実験と同様、動き方向検出の初期（2秒程まで）においては、水平成分検出のEMD出力が小さいのがわかる（図11(a)）。その後、パラメータの最適化が進んだため（図11(b)）、水平成分検出のhEMD出力が垂直成分のそれに比べ大きくなり、正確な動き方向検出が可能になっていることが分る。

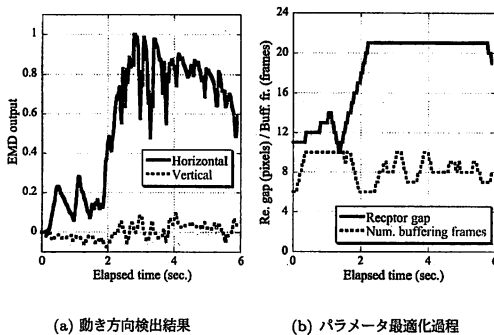


図11 高速の場合。

図10と図11(b)から、得られた最適パラメータが台車の移動速度を反映していることが分る。具体的に述べると、遅延フレーム数が低速時に比べ高速時はおおよそ2~3フレーム増加している。遅延フレーム数が増加すればその分被写体は多くの距離を移動するため、この動きを捉えるためにはリセプタ間隔も増加する必要がある。速度は2倍ほどに上昇しているため、遅延フレーム数の増加とあいまってリセプタ間隔は2倍以上に増加する必要がある。図11(b)から、確かに最適なりセプタ間隔は低速時にくらべ2倍以上に増加しており、パラメータ最適

化は速度変化にも対応して実行されることが確認できる。これまでに述べた実験環境と実装条件の異なる2種類の実験から、パラメータ最適化による動き検出の精度向上を検証することができた。

## 6. まとめ

この技術報告では、動き検出を高速で実行可能な動き検出器であるElementary Motion Detector (EMD)のパラメータ最適化アルゴリズムを提案した。EMDを規定する2つのパラメータ、リセプタ間隔と遅延フレーム数に着目し、これらパラメータを最適化することにより動き方向の推定精度向上を試みた。自然画像および人工テクスチャを用いた実験により、パラメータ最適化により動き方向検出の精度が向上することを検証した。提案したアルゴリズムは低価格なFPGAデバイスであるSpartan-3に実装され、リアルタイムでパラメータの最適化を行いながら動き方向検出ができることを示した。

謝辞 本研究は、平成17年度科学研究費を使い行われました。著者一同、この援助に深く感謝いたします。

## 文献

- [1] B. Horn, *Robot Vision*, MIT Press, 1986.
- [2] A. Tekalp, *Digital video processing*, Prentice-Hall, 1995.
- [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] E. Buchner, "Behavioural analysis of spatial vision in insects," in *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Photoreception and Vision in Invertebrates*, M. Ali, ed., pp. 561-621, NATO Advanced Study Institute, Plenum, 1984.
- [5] D. O'Carroll, S. Laughlin, N. Bidwell, and R. Harris, "Spatio-temporal properties of motion detectors matched to low image velocities in hovering insects," *Vision Research*, pp. 3427-3439, 1997.
- [6] M. Egelhaaf and A. Borst, "Transient and steady-state response properties of movement detectors," *Journal of Optical Society of America A*, pp. 116-127, 1989.
- [7] E. Nakamura, T. Nakamura, K. Sawada, "Fast local motion estimation algorithm using elementary motion detectors," *Proc. SPIE Vol. 5150*, pp. 1491-1502, 2003.
- [8] E. Buchner, "Elementary movement detectors in an insect visual system", *Biol. Cybernetics*, vol. 24, pp. 85-101, 1976.
- [9] M. Egelhaaf and A. Borst, "Transient and steady-state response properties of movement detectors", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 6, pp. 116-127, 1989.
- [10] J. Zanker, "Theta motion: a paradoxical stimulus to explore higher order motion extraction", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 3, pp. 553-569, 1993.
- [11] Z. Lu and G. Sperling, "Three-systems theory of human visual motion perception: review and update", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 18, pp. 2331-2370, 2001.
- [12] E. Nakamura, M. Ichimura, and K. Sawada, "Fast global motion estimation algorithm based on elementary motion detectors", *proc. IEEE ICIP 2002*, vol. 2, pp. 297-300, Rochester, NY, 2002.