

## 反射型フォトセンサを用いた

## 汎用シングルスイッチ VSN/1 の随意的まばたき検出の性能評価

## Performance evaluation of voluntary blinking detection of versatile single switch VSN/1 using a photo-reflective sensor

○ 矢島大輔（新潟大） 林豊彦（新潟大） 前田義信（新潟大） 渡辺哲也（新潟大）

若林佑子（JALSA 新潟県支部） 織田孝（JALSA 新潟県支部） 渡邊諭（エフテック株）

阿部晃（エフテック株） 山口俊光（新潟市障がい者 IT サポートセンター）

Daisuke YAJIMA, Niigata University Toyohiko HAYASHI, Niigata University Yoshinobu MAEDA, Niigata University  
 Tetsuya WATANABE, Niigata University Yuko WAKABAYASHI, Japan ALS Association Prefecture branch in Niigata  
 Takashi ODA, Japan ALS Association Prefecture branch in Niigata Satoshi WATANABE, Ftech company limited  
 Akira ABE, Ftech company limited Toshimitsu YAMAGUCHI, Niigata IT Support Center for Persons with Disabilities

*Key Words:* communication support, ALS, photo-reflective sensor, blink, single switch

## 1. はじめに

本論文は、運動機能障がい者が支援機器操作に用いるシングルスイッチについて述べたものである。筋萎縮性側索硬化症（ALS）や脳性まひなどの疾病は、患者の運動機能に障がいを生じさせる。そのため、コミュニケーションなどの社会活動や移動などの日常生活動作に支障をきたす。それを補うために、支援機器を用いた様々な支援が行われている。このとき、支援機器の操作には、随意的に行えるわずかな身体運動で操作可能なシングルスイッチを用いる。このスイッチを用いれば、パソコン、意思伝達装置、環境制御装置などの機器を自分だけで操作できるため、より自立した生活をおくることができる<sup>(1)</sup>。

現在、シングルスイッチには、指で操作するプッシュスイッチや、呼吸を用いた呼吸スイッチなど、様々なタイプのもものが市販されている。その中のひとつに「まばたき」を入力動作としたスイッチがある。まばたきや眼球運動を利用する理由は、ALSのような進行性の疾病でも、その運動は侵されにくいためである。光ファイバーを用いた市販の製品もあるが、眼電図<sup>(2)</sup>や小型ビデオカメラ<sup>(3)</sup>を用いたまばたきスイッチも研究開発されている。しかし、上記すべてのスイッチは、操作に用いる動作部位がひとつかふたつに限られるため、進行性の疾病では、疾病の進行とともにスイッチの更新が必要であった。

上記の更新問題を解決するためには、できるだけ多様な身体運動で操作できる汎用スイッチを開発する必要がある。そこで著者らは、指などの身体運動からまばたきのような小さな運動まで検出できる汎用シングルスイッチ VSN/1 を開発してきた<sup>(4)-(6)</sup>。このスイッチは、反射型フォトセンサ列を用いた非接触型である。先行研究では、周期的まばたきと随意的な長いまばたきとを識別するデータ処理法を開発し、意思伝達装置を用いたスイッチ性能評価実験を行った<sup>(4)</sup>。しかし、性能評価実験の対象が健常者のみであったため、本システムが運動機能障がい者にとって有効かどうかは未検討であった。

そこで本研究では、開発したデータ処理法を用いて、ALS患者本人によるスイッチ性能評価実験を行った。その際に、データ処理法に新たな処理を追加し、長時間の使用に対応できるよう改良を行った。2.では VSN/1 のシステムの概略

とデータ処理法の改良点、3.では ALS 患者によるスイッチ性能評価実験について述べる。4.で実験結果を示し、5.でスイッチの基本性能について論じる。

## 2. 汎用シングルスイッチ VSN/1

## 2-1 センサとその固定法

シングルスイッチは、随意的な身体運動を検出し、意思伝達装置などの支援機器への入力信号を出力する装置であ

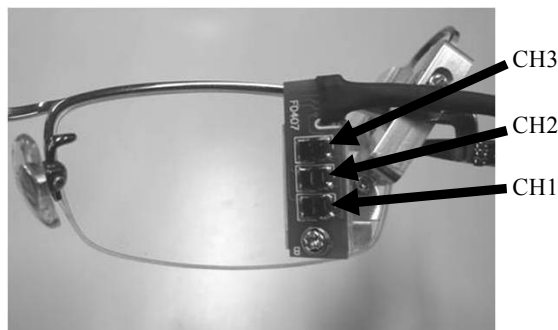


Fig. 1 Photo-reflective sensor array of VSN/1 for blinking detection fixed on an eye-glass lens, consisting of three sensors denoted as CH1, CH2 and CH3



Fig. 2 Positioning of the sensor array relative to one of the subject's eyes by means of a 3-DOF sensor attachment secured to an eye-glass

る。以後、この入力信号を「スイッチ入力信号」と呼ぶ。はじめに、運動検出に用いた反射型フォトセンサについて述べる。この素子は、LEDとフォトトランジスタを組み合わせた電子部品で、物体から反射してきたLED光をフォトトランジスタで検出する。センサ・物体面間距離変化で出力が変化することから、スイッチのセンサ部に応用することができる。反射型フォトセンサには、縦3[mm]、横4[mm]、高さ2[mm]のフォトリフレクタ(NJL5197K-F25, 新日本無線)を用いた<sup>(4)(6)</sup>。

本研究では、上記のセンサを縦に3個配列し、専用のアタッチメントを用いて眼鏡のレンズの端に取り付けた(Fig. 1)。Fig. 1に示すように、3個のセンサを下からチャンネル1~3と呼び、それぞれCH1~3と略記する。専用のアタッチメントを用いることにより、視界を遮ることなく、センサの位置を3自由度で微調整することができる(Fig. 2)。センサを取り付けたアタッチメントの重量は12[g]で、小型ビデオカメラ<sup>(3)</sup>(26[g])よりも軽量である。

### 2-2 随意的まばたきの検出法

本節では、先行研究<sup>(4)</sup>で開発した、随意的なまばたきを検出するデータ処理法について詳しく述べる。Fig. 3はCH2から得られた実際の信号波形である。図中の区間aは目を開いている区間、区間b, d, eは周期的まばたき区間、区間cは随意的まばたき区間である。ここで随意的まばたきとは、「周期的まばたきよりも意識的にわずかに長く目を閉じるまばたき」のことである。特に強く目を閉じる必要はない。本研究では、この随意的まばたきをスイッチ入力動作とした。

次に随意的まばたきによる信号変化だけを選択的に検出する方法について述べる。はじめに、Fig. 3に示すセンサ出力電圧データを平滑化微分する(Fig. 4)。この波形から動作成分を抽出する電圧閾値を $\pm V_t$ とし、次の方法で決定した。スイッチの電源投入後2秒間分のデータの自乗平均平方根 $V_{RMS}$ を求め、便宜的にその3倍の値を閾値 $V_t = 3 \times V_{RMS}$ とした。

信号電圧の振幅が $V_t$ を越えた時刻 $t_1$ から、 $-V_t$ を下回る時刻 $t_2$ までの時間を $t_b = t_2 - t_1$ とし、「まばたき時間」と呼ぶことにする。周期的まばたきにおける $t_b$ 値は、予備実験として、健常者10名における「周期的まばたき」を3分間計測した結果、0.5[s]以下であった。そのため、「随意的まばたき」で長めに目を閉じることにすれば、まばたき時間で両者を区別できる。そこで $t_b$ の区間 $t_{min} < t_b \leq t_{max}$ を設定し、この区間内の $t_b$ 値をもつまばたきを随意的まばたきとすることにした。下限 $t_{min}$ は上で述べた理由から $t_{min} = 0.5[s]$ に設定し、上限 $t_{max}$ は便宜的に $t_{max} = 3.0[s]$ とした。 $t_b$ 値が $t_{min} < t_b \leq t_{max}$ を満たすとき、時刻 $t_2$ でスイッチ入力信号を発生させることにした(Fig. 4)。

### 2-3 データ処理法の改良点

先行研究のデータ処理法では、2-2で述べた処理を3つのセンサで並列に行い、どれかひとつでも随意的まばたきによる波形が検出されれば、スイッチ入力信号を発生させていた。しかし、3つのセンサの中には、1) 眼球の前でまぶたの開閉動作を検出しているもの、2) 常にまぶたの皮膚面を検出しているものが含まれている。まぶたの開閉動作を正確に検出するためには、使用するセンサを眼球の前に配置されているセンサのみとし、残りのふたつのセンサは使用しない方が望ましいと考えられる。以下に、まばたき検出に最適なひとつのセンサを選ぶ方法について述べる。平滑化微分後のまばたきによるデータ波形は、正負のいくつかのピークをもつ。その中の、最初の正のピークの値を $V_p$ とする。電圧閾値 $V_t$ の算出後、最初に検出した「周期的

まばたき」のデータから、3つのセンサでそれぞれ $V_p$ を求める。その中で $V_p$ が最大になるセンサを、眼球の前に配置されたセンサとして選択した。このとき、3つの $V_p$ の中の最大値を $V_{max}$ とする。

次に、新しく設定した電圧閾値 $V_{pth}$ について述べる。連続して数分間スイッチを使用した際、まぶたの動揺や眼球運動などにより、まばたき時以外でも信号電圧の振幅が電圧閾値 $V_t$ を越えることがあった。まばたき時間 $t_b$ は、信号電圧の振幅が $V_t$ を越えた時点から測定することから、まばたき時以外のタイミングで $V_t$ を越えれば、誤動作する可能性がある。そのような波形は、 $V_p$ がまばたき時に比べてとても小さいという特徴があった。そこで誤動作を減らすために、新しく電圧閾値 $V_{pth}$ を設定した。 $V_{pth}$ は $V_{max}$ を用いて、便宜的に $V_{pth} = V_{max} / 2$ とした。この閾値を用いて、 $V_t$ を越えた波形が $V_p \geq V_{pth}$ を満たすときのみ、随意的まばたきの候補とした。

## 3. ALS患者によるスイッチ性能評価実験

### 3-1 目的

実験の目的は、開発したデータ処理法がALS患者にとって有効であるか検証することである。先行研究では、VSN/1と自動走査ソフトウェアを用いて、パソコンに文字を正しく入力できるかを検証し、スイッチの性能を評価した<sup>(4)</sup>。この手法では、被験者が自動走査ソフトウェアに十分慣れている必要がある。しかし、ALS患者には、自動走査ソフトウェアの使用歴が長い人もいれば、ほとんど使用経験がない人もいる。後者の人では、実験前に十分練習してもらう必要があるが、被験者への負担が非常に大きい。そこで、

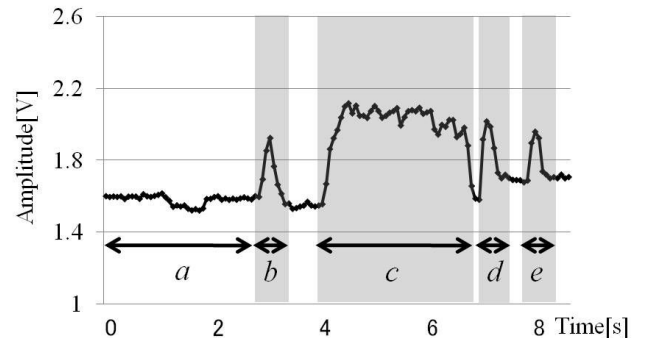


Fig. 3 An example of signal waveform obtained from the photo-reflective sensor

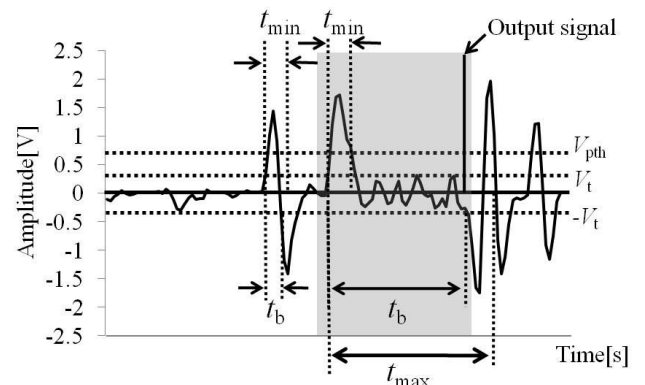


Fig. 4 A waveform obtained by differentiating the original one shown in Fig. 2 and temporal parameter  $t_b$  defined by using an amplitude threshold  $V_t$ . Other thresholds  $V_{pth}$ ,  $t_{min}$  and  $t_{max}$  are used for distinguishing voluntary blink from other ones.

ALS患者での性能評価実験では、自動走査ソフトウェアを用いず、意図的なスイッチ入力およびスイッチ入力信号の出力だけを考慮することにした。具体的には、視覚刺激が与えられた時に被験者が随意的まばたきを行い、その結果として正しくスイッチ入力信号が出力されるかどうかを検証した。次の3-2から3-4で実験系と評価法について詳しく述べる。

### 3-2 実験条件

Fig. 5に実験風景を示す。被験者はALSと診断された76歳の男性1名とした。障がいの等級は「上下肢不自由2級」である。詳細は「筋委縮性側索硬化症による一上肢の機能の全廃、および左下肢の機能の著しい障害」である。まばたきや眼球運動は正常に行うことができる。測定姿勢は被験者が楽に姿勢を維持できる「椅座位」とした。実験場所は被験者の自宅とした。使用した眼鏡は、被験者が日頃使用しているものとした。アタッチメントの設置位置は、右側眼球の右前方とし、かつCH2のセンサが両眼の中心を結ぶ軸上になるようにした。被験者が前方を注視したとき、センサは右眼視野の外側境界に位置していた。センサ検出信号のサンプリング周波数は15[Hz]とした。被験者のパソコン使用歴は20年であるが、最近はほとんど使っていない。シングルスイッチおよび自動走査ソフトウェアは、見たことはあるが、実生活で使ったことはないとのことである。

### 3-3 実験方法

3-1で述べたように、スイッチ入力のトリガとして被験者に視覚刺激を与える。Fig. 6に視覚刺激のための表示画面を示す。画面上には、黒の背景の中央に円領域が描画されており、円領域の色が赤→緑→赤→…と一定の周期で交互に切り替わる。スタート時の色は赤とし、表示時間は赤色が5秒、緑色が10秒とした。視覚刺激画面の作成にはVisual C++ (Microsoft)を用いた。

被験者には、「円領域が赤色から緑色に切り替わった直後に随意的まばたきを1回行う」ように指示した。これを1試行と呼ぶ。これを連続して12試行を行い、これを1セッションとした(約3分間)。一日で3セッションを行い、さらに日を変えて3回行った(合計9セッション)。一日の3セッション間には5分程度の休憩時間を入れた。随意的まばたき以外に被験者に与えた教示は次の4つとした：1) 1セッション中は周期的まばたきを自由に行ってよい、2) 1セッション中は円領域を注視し続ける、3) まばたきを行う際は目を強く閉じない、4) 1セッションを開始してから2秒間はまばたきをせず円領域を注視し続ける。スイッチ入力信号の発生を被験者に知らせるために、発生時にパソコンからブザー音を出力した。操作練習は次のように行った。練習にもFig. 6の専用画面を用いた。被験者には1セッション12試行を連続して行ってもらい、セッション中の全ての随意的まばたきが正しく検出されるまで練習を繰り返した。センサ位置の調整は、実験開始から3セッション終了時まで行わなかった。実験中、測定と同時に被験者の右目をビデオカメラで撮影した(Fig. 2)。実験に先立ち、被験者には実験内容を文書および口頭で詳しく説明し、すべて了解をいただいた。

### 3-4 評価法

随意的まばたきの判別性能を評価するために、まず身体運動による「入力」と、それによる信号波形の判別結果、すなわち「出力」について考える。入力には、随意的まばたき、周期的まばたき、それ以外(無運動も含む)の3種類がある。一方、出力には、スイッチ入力信号が出力された場合と出力されなかった場合の2通りしかない。全事象は、入出力のすべての組み合わせであるから、全部で6事

象となる(Table 1)。各事象の出現回数を $n_1 \sim n_6$ で表す。また、 $n_6$ のみ測定不可能なため除外し、 $n_1 \sim n_5$ を用いて以下の5つの評価パラメータを定義する。

- 1) 正動作率 =  $\{(n_1+n_4)/(n_1+n_2+n_3+n_4+n_5)\} \times 100[\%]$
- 2) 誤動作率 =  $\{(n_3+n_5)/(n_1+n_2+n_3+n_4+n_5)\} \times 100[\%]$
- 3) 無動作率 =  $\{n_2/(n_1+n_2+n_3+n_4+n_5)\} \times 100[\%]$
- 4) 正入力率 =  $\{n_1/(n_1+n_2)\} \times 100[\%]$
- 5) 除去率 =  $\{n_4/(n_3+n_4)\} \times 100[\%]$

これらの値をセッション毎に算出した。ここで、正動作率は、随意的まばたきと周期的まばたきを正しく識別できた割合を表す。誤動作率は、周期的まばたきの際と、まばたき時以外にスイッチ入力信号が出力された割合を表す。無動作率は、随意的まばたきを行ったにもかかわらず、スイッチ入力信号が出力されなかった割合を表す。正入力率は、全12回の随意的まばたきの内、随意的まばたきと正しく識別された割合を表す。除去率は、1セッション中に行った周期的まばたきの内、周期的まばたきと正しく識別された割合を表す。

## 4. 実験結果

3-4で述べた各評価パラメータの一日の代表値は、3セッションの平均値とした。総合的な評価値は、三日間の代表



Fig. 5 Experimental setup

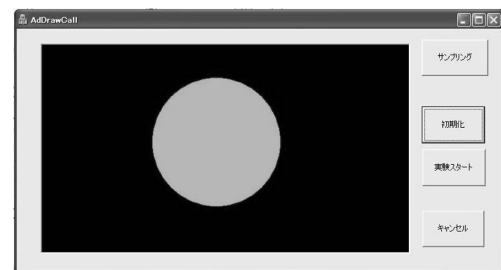


Fig. 6 Visual stimulation for triggering the voluntary blink displayed on a computer screen: The color of a circular region changes from red to green as a trigger to start the blink.

Table 1 Counting of several events defined as a combination of input motion and output of the switch

| Input \ Output  | Switch output |              |
|-----------------|---------------|--------------|
|                 | On            | Off          |
| Voluntary blink | $n_1$         | $n_2$        |
| Periodic blink  | $n_3$         | $n_4$        |
| No blink        | $n_5$         | Unmeasurable |

値の平均値と標準偏差のふたつとした。その値は、正動作率では  $97.3 \pm 0.28[\%]$ 、誤動作率では  $2.2 \pm 0.47[\%]$ 、無動作率では  $0.5 \pm 0.33[\%]$ 、正入力率では  $95.4 \pm 3.21[\%]$ 、除去率では  $97.5 \pm 0.53[\%]$ であった。各評価パラメータの日間変動については、t検定の結果、有意な差は見られなかった。

Fig. 7に、誤動作率の原因となった周期的まばたきの波形の一例を示す。Fig. 7-(a)の区間 *a, c, d* で見られた単峰性波形は、1回の周期的まばたきによるもの、区間 *b* で見られた双峰性波形は、連続したふたつの急速な周期的まばたきによるものである。同図(b)に、Fig. 7-(a)の波形に平滑化微分処理を行った後の波形を示す。区間 *b* の双峰性波形では、周期的まばたきにもかかわらず、スイッチ入力信号が出力された。

### 5. 考察

はじめに、*VSN/1* の基本性能について論じる。先行研究<sup>(4)</sup>における性能評価の結果は、正動作率が  $94.9 \pm 2.05[\%]$ 、誤動作率が  $1.8 \pm 1.56[\%]$ 、無動作率が  $3.3 \pm 1.30[\%]$ であった。その実験系は本研究とは異なるため、本実験結果を評価する際の参照値とみなすことにする。本研究で得られた正動作率、誤動作率および無動作率は、先行研究と同程度であった。特に正動作率は高く、 $97[\%]$ 以上であった。今回新しく導入した正入力率および除去率は、ともに  $95[\%]$ 以上であった。すなわち、随意的まばたきと周期的まばたきを高い確度で識別することができた。以上より *VSN/1* は、ALS患者でも健常者と同じように正確かつ容易に操作できると考えられる。

4.で述べたように、誤動作および無動作がわずかに観測された。その原因について論じる。誤動作が生じた際の信号波形は、すべてFig. 7-(a)の区間*b*のような波形であった。この双峰性波形は、連続したふたつの急速な周期的まばたきによるものであった。この連続したふたつのまばたきは、Fig. 7-(b)に示すように、平滑化微分処理によって完全に融合し、ひとつの双峰性波形になっていた。そのため、まばたき時間 $t_b$ が長くなってしまい、その結果、随意的まばたきと誤判別されていた。防止対策としては、1) 信号のサンプリング周波数の上昇、2) 平滑化微分処理に用いるデータ点数の減少のふたつが考えられる。無動作が生じた原因は、随意的まばたきの $V_p$ が $V_p < V_{pth}$ となったためであった。そのため、随意的まばたきを行ったにもかかわらず、それを認識できなかった。しかし、無動作率は $0.5[\%]$ と十分小さな値だったため、再度入力動作を行えば、実用上特に問題ないと思われる。

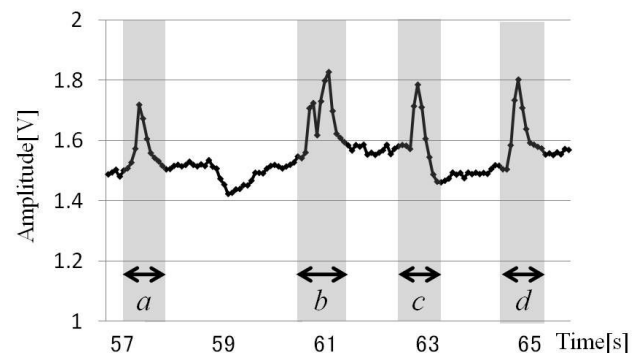
最後に*VSN/1*の汎用性について論じる。ALSは進行性の疾病であり、はじめは四肢に運動障がいが見ることが多い。一方、最後まで残りやすい随意運動は、表情やまばたき、眼球運動など顔面の運動が多い。最終的に残る随意運動は「左右方向への眼球動作」ないし「上眼まぶたの挙上」が多いと報告されている<sup>(7)</sup>。*VSN/1*はすでに先行研究で、指運動を検出する非接触型の近接スイッチとして利用できることが実証されている<sup>(6)</sup>。このように、*VSN/1*は、指運動でもまばたきでも操作できるため、汎用性が高いシングルスイッチと考えられる。しかし、上記の最終的に残りやすい随意運動である「左右方向への眼球動作」や「上眼まぶたの挙上」には、まだ対応できていない。その中で眼球運動は、今回の実験でもそれによる波形変化が観測されたことから、入力動作として利用できる可能性がある。その具体的な検出法の開発が今後の課題のひとつである。ALS患者は運動機能に個人差が大きいことから、ALS患者の被験者を増やすことも今後の課題である。

### 謝辞

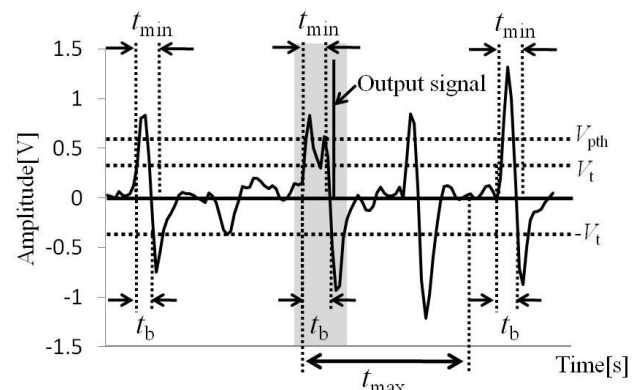
実験にご協力いただいた被験者の方々に深く感謝いたします。

### 参考文献

- (1) e-AT 利用促進協会監修, 福祉情報技術II-生活を支援する技術編-, pp. 21-22, 73-95, ローカス, 2003.
- (2) 大矢哲也, 小山裕徳, 川澄正史, 斎藤正男, 重度肢体不自由者における眼球運動を用いた新しい意思伝達支援装置の開発, 豊田研究報告, no. 62, pp. 253-259, 2009.
- (3) 竹原一行, メガネに取り付けた超小型ビデオカメラで検出したまばたきで制御する重度肢体不自由者向け代替キーボード, 第8回情報科学技術フォーラム講演論文集, vol. 3 K-007, pp. 533-539, 2009.
- (4) 矢島大輔, 林豊彦, 渡辺哲也, 前田義信, 若林佑子, 渡辺諭, 阿部晃, 山口俊光, 反射型フォトセンサを利用した汎用シングルスイッチ*VSN/1*の随意的なまばたき検出法の改良, 第7回生活支援工学系学会連合大会講演要旨集, pp. 63-64, 2009.
- (5) 中村拓郎, 林豊彦, 中村康雄, 若林佑子, 渡辺諭, 反射型フォトセンサを用いたALS患者向け汎用シングルスイッチのまばたき検出特性, 信学技報 WIT2006-125, vol. 106, no. 612, pp. 115-120, 2007.
- (6) 呉東麗, 林豊彦, 中村康雄, 若林佑子, 渡辺諭, 反射型フォトセンサ列を用いた汎用シングル・スイッチの操作性評価, 信学技報 MBE2007-123, vol. 107, no. 541, pp. 73-76, 2008.
- (7) 南雲浩隆, 本間武蔵, 鳴海俊明, 日野創, 前田眞治, ALS患者のためのスイッチの適合と導入, 作業療法ジャーナル, vol. 43, no. 12, pp. 1298-1305, 2009.



(a) An example of signal waveforms caused by periodic blinks, observed in periods from “a” to “d”



(b) The waveforms obtained by differentiating the original one shown in (a)

Fig. 7 An example of malfunction resulted from a signal waveform caused by a periodic blink