

安価でユニバーサルなハンズフリー入力装置の開発

宮坂 智哉 [札幌医科大学大学院保健医療学研究科/博士課程]
梅田 信吾 [北海道立福祉村/理学療法士]
浦島 貢 [株式会社レスピケア北海道/代表取締役社長]
石川 朗 [札幌医科大学保健医療学部理学療法学科/助教授]

背景・目的

進行したALS(筋萎縮性側索硬化症)やDMD(デュシャンヌ型筋ジストロフィー)者で、身体の運動機能が極度に低下すると、眼球や肛門などを除き、自発的な運動能力を失ってしまうLocked-in State(ロックドインステート閉じ込め状態)になる場合がある。しかし、Locked-in State者(以下対象者とする)は、自発的な運動能力を失っても無動の状態では生活するのではなく、体位交換や重力、また、車いすなどの移乗や部屋の移動など、生活の中で動きを伴う機会がある。対象者の生活動作や意思伝達を支援する目的で、残存した随意性眼球運動や視線移動を利用した入力装置がある。この入力装置には、介護者とのコミュニケーションやパソコンなどの機器操作のほか、医療ケアや身体ケアの要求、医療機器の不調など緊急事態の訴え、自分自身の安否を介護者に伝えることなど、多彩な用途があり、その用途は生活動作を伴って発生する事が多い。ところが従来の装置は完全臥床でほとんど動かない状況での使用を想定しているものが多く、実際に使用する方々の生活状況に対応していないことから、ほとんど普及していない。

眼球運動や視線を入力するには、眼電図を用いる方法、虹彩内に近赤外線を入射し、その反射光を検出する方法、眼球像を直接光検出素子で検出する方法、眼球像をビデオカメラなどで撮影し、画像処理を行う方法などがある。このうち、眼電図を用いる方法は、顔面の同じ位置の皮膚表面に電極を貼付するが必要があり、汗などで電極がはがれやすい、また使用者に苦痛を与え、長期の使用は皮膚表面に潰瘍が発生する原因となる。更に眼鏡や人工呼吸器用マスクを装着する際に電極が干渉する可能性がある。虹彩内に近赤外線を入射する方法は、長時間の近赤外線入射は使用者の眼球に不快感や疲労感を訴えることがあり、日常生活で長期間連続した使用には向かない。眼球の周辺に光検出素子を配置する方法は、顔面周辺に光学系が配置され、使用者の視界がさえぎられ、介護作業が困難になることがある。また光学系の位置決めが困難で使用が難しい。それらの方法よりも、ビデオカメラなどで眼球運動を撮影し、得られた動画像をもとに画像認識、画像処理する方法が有効と考えられる。ところが、画像情報による信号処理を用いる方法であっても、使用者から離れた位置でビデオカメラを設置して眼球を撮

影する方法では、使用者が体位交換で仰臥位から側臥位に姿勢変化したときや、介護動作で頭頸部が動いたりすると眼球の認識が困難になる。また、周辺の照度変化の影響を排除するために近赤外光源を設ける場合があるが、この場合も長時間の使用により眼球に疲労や苦痛が生じることがある。このように、従来からある視線や眼球運動を検出する装置の多くは、必ずしも対象者をはじめとする重度肢体不自由者が在宅生活する状況を考慮しているものではない。

研究者は、従来より在宅人工呼吸療法実施者と介護者との意思伝達を支援する眼球運動入力装置の試作評価を実施してきた。本研究では、それら試作の改善を進め、使用者の生活状況を考慮し、頭頸部の角度変化や肢位変化に対応し、幅広い病期、使用者の生活活動に対応可能な、より実用的な眼球運動入力装置を試作した。

更に、この試作で得られた知見を生かし、眼球運動を利用した簡便なハンズフリーパソコン入力デバイスを試作し、民生品レベルの汎用的な入力装置への応用可能性についても検討した。

内容・方法

I 重度肢体不自由者向け眼球運動入力装置の試作及び評価

1-1. 仕様の決定

試作する眼球運動入力装置の仕様を以下のように決定した。従来の装置は、ベッドで固定された肢位で1日数時間程度パソコンを使用するような使用状況を想定していると思われるものが多い。試作品は、対象者の生活状況を詳細に検討し、使用可能な範囲を拡大することを考えた。

①対象者

四肢体幹頭頸部の運動機能、発話機能が低下して自らの意思伝達が困難になっている方で、そのうち眼球運動に随意性があり、自分の意思で動かせる方とした。

②使用目的

他者とのコミュニケーション、身辺介助の要求、医療ケアの要求、パソコンの操作、生活支援機器および環境制御装置の操作、人工呼吸器など医療機器の異常発生時など身辺危機発生時における救援の要請、使用者の不安や安否の訴えなどとした。これは研究者が在宅訪問で直接療養者や家族介護者からニーズを聞いたもので、単にパソコンなどの機器操作のためだけではなく、身近な介護者に様々な要求を訴えたいというニーズが多かったものであり、その代表的な使用目的を挙げたものである。

③使用可能な時間及び期間

使用可能時間は覚醒時における生活活動実施時で1日

10時間程度を、使用期間は最低でも3年以上継続して使用できることを想定した。理由は、自分の要求を身近な介護者に伝えることは日中の生活活動下で発生するので、決められた時間帯ではなく、日中の覚醒時全般に対応することを考慮したことによる。使用期間については、運動機能が低下する前から使用方法習得をスムーズに行うようにするために早期から使用する機会があること、人工呼吸器装着により、運動機能が極度に低下してからの生活期間が延長されていることを合わせて、数年間単位の使用期間を想定した。

④使用時の肢位

使用時の肢位は、仰臥位、セミファーラー位（ベッド上で背を起し、膝を軽度屈曲した安楽肢位）、左右側臥位、座位とした。また頭頸部は自由に動くことを想定した。加えて人工呼吸器用マスクや、眼鏡を頭部及び顔面に装着する場合に対応することにした。これらの条件は、対象者は自立的な運動は困難であるが、重力や介助で他動的に動くことによる。肢位は、苦痛の緩和、褥創発生の予防、無気肺の予防のため、ベッド上では仰臥位のほかセミファーラー位、左右側臥位をとることがある。また、車いすに移乗し、寝室や居間で座位で過ごすことがある。また、頭頸部の自立保持は困難であり、肢位を保持しても、重力や介護作業で、容易に頭頸部は動き、頭頸部を固定保持するのは対象者に苦痛を伴うことから、より自然な状態での使用状況を考えた。

⑤介護者の状況

機器の準備、設置および設定全般は介護者が行う。介護者全てが機器の操作に慣れているとは限らないこと、また日常生活の家事、生活活動の中に介護作業があり、機器の設置や設定はその介護作業の中で行うことになる。よって、可能な限り設定や設置を容易にし、キャリブレーションや精密な調整を少なくすることを考えた。

⑥社会環境

本開発品のような対象者の意思を伝達する装置は、一般に障害者手帳などの日常生活用具給付で利用する。給付額は各市町村によって異なるが、意思伝達装置一式で47万円が給付されることが多い。一式でパソコンや汎用の入力装置、障害者向けソフトウェアなどを全てそろえる必要がある。よって本開発品は仮に商品化した場合、一式の中の一オプションとして利用できる程度のコストにすることを考えた。

1-2. 動作原理

設定した仕様をもとに、本開発品の眼球運動を検出する方法を検討した。検出方法は、使用者の多様な肢位及び頭頸部の角度変化に対応するため、小型ビデオカメラをヘッドユニットを介して使用者の眼球周辺に設置し、眼球周辺を接写したビ

デオ動画をを用いた。撮影フレームに常に拡大した眼球動画をを入れ、画像認識をせずに直接映像信号から眼球の運動を検出した。眼球運動の検出はソフトウェアによる画像処理をせず、眼球動画を出力するモニタ上に光センサを配置し、眼球動画の虹彩像を暗部、強膜像を明部として、その明暗差を検出して眼球運動を検出する方法とした。具体的な手順を以下に示す。

1. 使用者の眼球をCMOSモノクロビデオカメラで撮影する。
2. 光センサを設置したモニタに眼球動画を映す。
3. 光センサに、眼球中立位の際の眼球虹彩（黒目）像が入るように、眼球移動後は光センサに眼球強膜（白目）像が入るように眼球像の位置を調整する。調整はカメラ位置、画面反転切り替えを組み合わせ、あるいはそれら単独で調整する。
4. 眼球を任意方向へ移動し、光センサが明部を検出し、明るさに比例した電圧を発生する。出力は検出回路に入力され、設定した比較電圧よりも高い電圧値のとき、制御回路へ意思伝達信号を出力する。

本検出方法の有効性は以下のとおりである。

- ①ヘッドユニットで眼球周辺を拡大撮影し、動画の撮影フレームを固定することで、眼球運動の複雑な画像認識、画像処理を必要としない。よって光センサと検出回路の単純な検出部で眼球運動が検出可能となる。
- ②検出部をモニタ側に設置することで、ヘッドユニットの光学系はビデオカメラのみである。ヘッドユニット装着は使用者の負担になるが、ヘッドユニットが軽量化でき、カメラの位置合わせが容易となり、使用者、介護者の負担を最小限にしている。
- ③センサを画面上に平面的に固定するので、光学系を安定に、かつ自由に配置できる。
- ④眼球周辺を直接光センサで検出するよりも、画面上で検出したほうが眼球像の明暗のダイナミックレンジが圧縮され、光量とセンサ出力の直線性が良好となる。例えば眼球周辺の照度が0～50,000Lxに変化する際のモニタ画面照度は50～300Lxであり、そのときの光センサの電圧出力変化は、照度変化に対して直線的に変化し、検出が容易となる。

1-3. 装置・回路構成

①装置構成及び試作コスト

装置（図1）は使用者の眼球運動を拡大撮影するヘッドユニット（図2）と、眼球運動動画を検出し意思伝達信号を発する装置本体（図3）の構成とした。ヘッドユニットは頭部に装着するバルクロ付キリングと、重量10gの小型CMOSモノクロビデオカメラ、それらを連結固定するアームの構成とし、総重量は60gとした。装置本体は4インチ液晶

モニタの画面上に1個の光センサを配置する構成とし、モニタ背面に検出回路、制御回路、出力回路を実装(図4)した。これらの試作にかかった部品コストは約45,000円だった。

②電気信号回路

ビデオモニタ上の光センサの電圧出力は、検出回路(図5)を通り、意思伝達信号に変換される。変換した信号はシーケンサボード(図6)に入力される。シーケンサボードから、機器操作用出力信号と意思伝達用信号を出力する。回路は4インチ小型液晶モニタの背面に実装した。このうち、シーケンサボードは、川原強電子研究所製の連枝PIC1684F用シーケンサボードを採用した。パソコンを制御に用いないことで、装置の小型化、持ち運びを容易にした。加えてパソコン入力デバイスに使用したとき、仮にパソコンがハングアップしても意思伝達信号を発することで他者に支援を求めることが可能である。

③制御ソフトウェア

シーケンサボードは、専用のラダープログラムソフトでシーケンスプログラムを構築し、プログラムをシーケンサボードにダウンロードして使うものとした。ソフト設計及びダウンロードにはパソコンを必要とするが、ダウンロード以後はシーケンサ単独で動作する。プログラムの書き換えは1,000回以上可能であり、装置に実装したままプログラムをダウンロードし、そのまま実行可能である。

制御プログラムは、検出部からの信号を受け、機器操作用出力信号、及び意思伝達用出力信号を、タイマーとオンディレイ回路を組み合わせで出力する構成とした。機器操作用出力信号は0.1秒から0.3秒間連続で検出回路からの入力があるときに出力され、青LEDが点灯し、出力1に接点信号を出力する。検出回路からの信号がOFFになると出力はOFFになる。意思伝達信号は1秒から3秒間連続で検出回路からの入力があるとき、機器操作信号とは独立して出力され、赤LEDが点灯し、音源ボード(図5)にONTリガ信号を出力して「ピン」音を発し、出力2に接点信号を出力する。検出回路からの信号が消えると音源ボードにOFFトリガーを出力して「ボン」音を発し、全ての出力はOFFとなる構成とした。

結果・成果

装置試作後、健常者により基本的な動作及び特性を確認した。

2-1. 装置の動作

以下の手順で設置し、動作の確認をした(図7,8)。

1. 介助者は、使用者の頭部にヘッドユニットを装着する。
2. 介助者はカメラのビデオケーブルを装置本体のビデオ

入力端子に接続し、装置本体の電源を投入する。

3. 使用者は眼球を中立位、ないしは安静時でもっとも安楽な位置に眼球を保つ。
4. 介助者は眼球の虹彩像が検出用センサ内に入るように、カメラ位置を調整する。
5. 使用者は眼球を任意の方向に動かす。
6. 動かした後、眼球の位置を0.1～0.3秒間(プログラムでタイミング設定可)保持すると青LEDが点灯し機器操作用の接点信号が出力する。
7. 更に1.0～3.0秒間(プログラムでタイミング設定可)保持し続けると赤LEDが点灯し、意思伝達用の信号が出力し、装置本体から「ピン」音が発する。
8. 眼球を元の位置に戻すと、2つの出力はOFFとなり、装置本体から「ボン」音が発する。

2-2. 装置の基本特性

300Lxの蛍光灯室内照明下において、頭頸部は全領域の角度で動作を確認した。また、仰臥位、左右側臥位、座位のほか、立位も含めた各肢位について動作を確認した。また、頭頸部中立位状態で周囲照度を変化させた場合、40～5,000Lx(暗い寝室から日中居間で過ごすまでを想定)、3,000～20,000Lx(居間で自然光が入射してくることを想定)の範囲で動作を確認した。なお、周囲の照度変化には、モニタ画面のコントラストを調整して対応した。更に眼鏡や人工呼吸器マスクの装着下において動作を確認した。

2-3. 装置の応用的使用

①特殊な肢位、顔面装着具併用下での使用(図9,10)

本開発品はヘッドユニットを装着する方式のため、頭頸部が動いても検出に制限がない特徴から、例えば仰臥位から側臥位に体位変換したり、柔らかい枕に頭部を設置して、頭部が次第に沈んでも誤動作を発生せずに眼球運動を検出することができた。また本開発品は、使用者が眼球動画像を逐一モニタしなくても操作できるため、装置本体は任意の場所に設置することができた。よってカメラや装置本体の設置場所を自由に選定できた。またヘッドユニットのカメラ取り付けアームを湾曲させており、眼鏡や人工呼吸器マスクを併用して装着することを可能とした。従来製品は、遠方からビデオカメラで、あるいはヘッドマウントディスプレイなど非接触ではあるが仰臥位(仰向け)やセミファラー位(仰向けで頭頸部、上半身を起こし、膝を屈曲する安楽肢位)で、頭頸部をほぼ固定した状態で使用者の眼球周辺を撮影して使用するものが多く、この場合、介護ケアや重力などで頭頸部が動いたり、体位交換で顔の向きが変わると使用できなくなり、そのつど設定やキャリブレーションを必要とし、使用者や介護者に大きな負担を与えていた。

②パソコン操作の操作(図11)

試作品の機器操作出力端子から、障害者向け入力デバイスインタフェースに配線接続し、パソコンを操作した。パソコンを操作するには、パソコンのモニタ画面をみるのに必要な眼球移動角度よりも大きい角度で機器操作信号を出力するようにカメラ位置を調整した。健常者による評価ではA4ノートパソコンを1m離れた位置から操作する場合、眼球運動角度を中立位から15度以上動かしたときに信号を発するように調整すると、パソコンのモニタを見回しても入力の手動作は発生せずに使用できることを確認した。約0.2～0.3秒間眼球位置を保持することでパソコンに入力信号を送り、相手呼びたいときは1秒～1.5秒間眼球位置を継続して保持することで意思伝達信号を送ることが可能なことを確認した。また、使用者が眼球動画を逐一モニタしなくても操作できる特性を生かし、パソコンの操作のみに眼球移動を集中して行うことができた。

2-4. 課題点

屋内での照明の消灯・点灯や、急に窓から日光が射してきたときなど、周囲照度が急変すると誤作動が起きることがあった。これはモニタの照度変化のみでセンサを検出しているので外乱の影響を受けてしまうからである。モニタ画面のコントラストを調整することで対応できるが、過渡的な変化には対応できなかった。外乱防止のための機構をセンサ及び検出部で設ける必要がある。また、カメラ位置を合わせ、装置本体を設置すると、療養生活環境を考えると、その後の再調整は手間がかかった。カメラ以外にセンサ部分の位置調整を容易にすることで、調整箇所を増やすことを検討する。また、移乗や移動を伴う場合、装置本体やカメラはバッテリー駆動になると都合がよいことがわかった。また、併用する医療機器の影響を確認したうえで、無線カメラの利用も検討する。

内容・方法

II 眼球運動ハンズフリーパソコン入力デバイスの試作及び評価

障害者向けの入力装置開発で得た知見を生かし、汎用の入力デバイスへの技術転換の可能性を検討する目的で、眼球運動を入力源とした簡便なハンズフリー入力デバイス(図12)の試作を実施した。

1-1. 仕様の決定

①対象者

パソコンが利用でき、眼球運動に障害のない方とした。

②使用目的

パソコンの入力

③機能

マウス左クリック入力など、1chの入力とする。

④コスト

装置はマウスやジョイスティックの入力デバイスの代替、あるいは補助的な用途となるので、それらの市販品の価格を参考に1,000～2,000円とする。

1-2. 動作原理

以下のとおりである。

①使用者の眼球をUSBビデオカメラで撮影する。

②USBビデオカメラソフトを立ち上げ、眼球動画をモニタ画面の任意の箇所に表示する。

③光センサを眼球動画が映るパソコンのモニター上に設置する。

④光センサに、眼球中立位のときの眼球虹彩(黒目)像が入るように、眼球移動後は光センサに眼球強膜(白目)像が入るように眼球像の位置を調整する。調整はカメラ位置や使用者の肢位を変化させて、あるいはそれら単独で調整する。

⑤眼球を任意方向へ移動し、光センサが明部を検出し、明るさに比例した電圧を発生する。出力は検出回路に入力され、設定した比較電圧よりも高い電圧値のとき、マウス回路へ入力信号を出力する。

1-3. 装置・回路構成

眼球運動入力装置で製作した光センサ・検出回路に加え、USBカメラ、カメラ撮影ソフト、USBマウス回路を組み合わせた(図13)。1台あたりの試作コストは光センサ・検出回路が2,000円、USBカメラ及び撮影ソフトウェアが約2,000円、USBマウスが約1,000円で、計約5,000円とした。

結果・成果

ノートパソコンのモニタ上部にUSBカメラを設置し、カメラ撮影ソフトを立ち上げた。動画エリアをパソコンモニタの右下部分に設置し、その画面上にセンサを配置した。使用者の眼球を映し、虹彩像がセンサ内に入るように画像を調整した。使用者は眼球を任意の方向に動かし、センサ内に強膜像が入ったときに左ボタンクリック信号が入力されることを確認した。

課題点としてソフトウェアでビデオ再生をしたため、動画の再生速度が遅く、クリックのタイミングが遅れた。このとき使用したパソコンの仕様および性能は、OSはWinXP、CPUセレロン750MHz、メモリー320Mbであった。今回は開発品のセンサ及び検出部位外は市販品の回路及びソフトウェアを流用し、試作コストを安くすることができたが、この構成で実用的な動作を期待するならば、使用するパソコンを高性能にしないといけない。よって普及帯価格のパソコンで、安定して動画を再生するようにならないと低価格での普及は難しい。また、カメラを非接触にしたので、使用者はカメラに視線を合わせる必要があり、パソコン操作の自由度が損なわれる。これに対応するには、カメラのレンズを広角にして撮影フレームに常に顔面を入れ、かつ小さくなった眼球の動きを検出する必要がある。よって、専用のビデオカメラと画像処理ソフト

トウェアが必要となり、開発コストが大きくなる。ヘッドユニットにカメラを装着することで眼球動画像を安定して撮影することはできるが、パソコンを操作するのにヘッドユニットをいちいち装着するメリットを出すには、さらに機能を向上させる必要があると思われる。

今後の展望

従来の眼球運動や視線入力装置が、連続臥床でほとんど動かない方の使用を想定しているのと比較して、本開発品は自由な頭頸部角度で、様々な肢位で眼球運動を検出できることが確認された。ことから、従来よりも多くの生活活動の場面で使用できる可能性が得られた。現在、対象となる患者さんに試用していただく臨床評価の準備を進めている。周辺照度変化などの対策を実施し、臨床評価へとつなげていく予定である。

また、眼球運動の検出部を応用し、ハンズフリーのパソコン入力デバイスとして、パソコンに入力することが可能であることが確認された。しかし、汎用の入力デバイスとして利用するには今回の評価で確認された問題を解決していく必要がある。一方では、4,000円程度で市販されている安価なWebカメラの付属ソフトで、画像に変化があった場合に警報やメールを送付する機能を持たせているものがあり、このことから、センサ及び検出部をソフト化し、更に低価格化にできる可能性がある。また、これらを複合させて、肢体不自由者がパソコンを操作するだけに機能を特化するならば、安価なフレキシブルアーム付きWebカメラをヘッドユニットに装着することで更に低コストの眼球入力デバイスを試作できる可能性があり、引き続き開発を継続する。

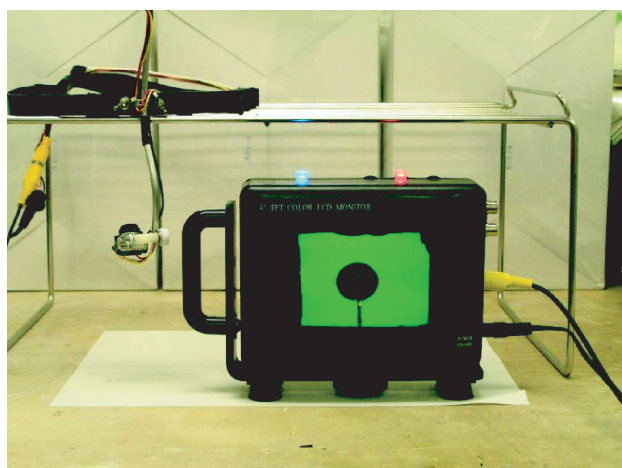


図1 眼球運動入力装置全体図

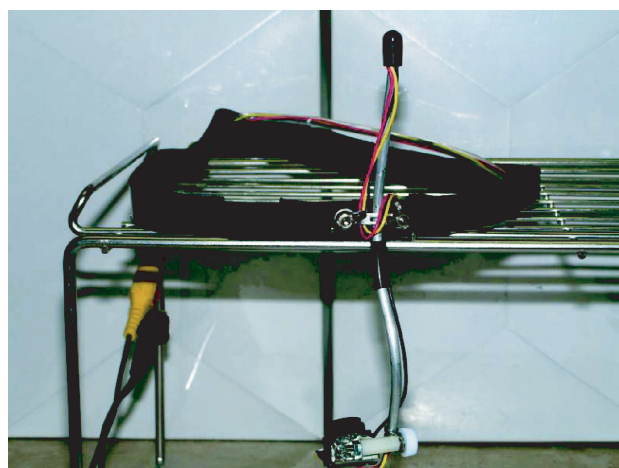


図2 ヘッドユニット

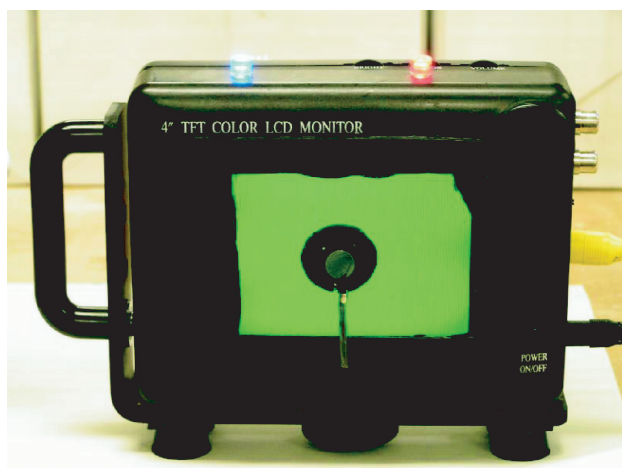


図3 装置本体

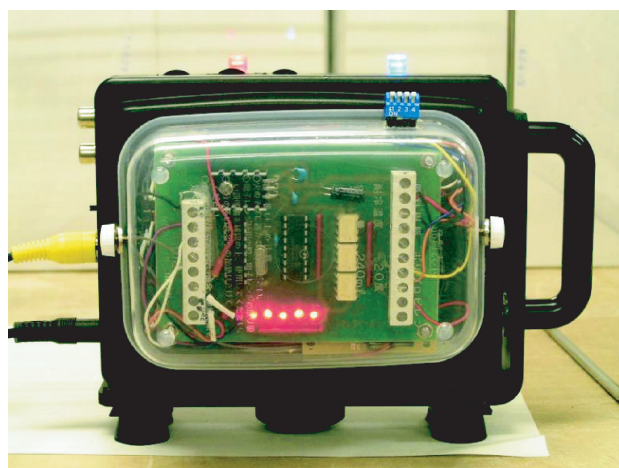


図4 装置本体背面図

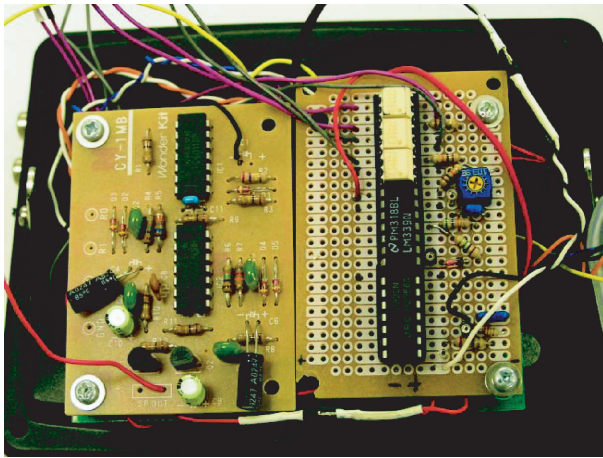


図5 検出回路(右)音源ボード(左)

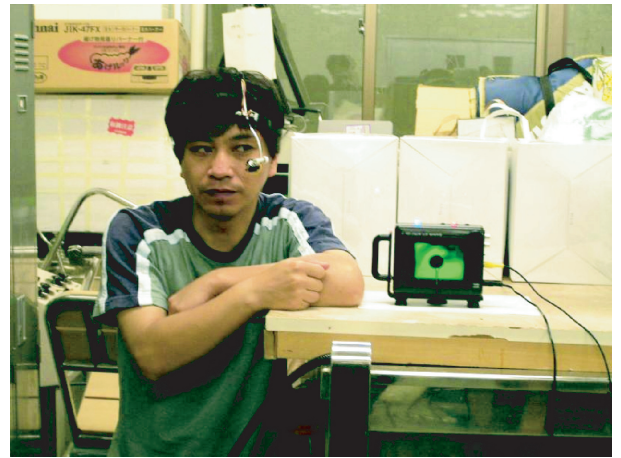


図8 装置の操作.眼球外転位(スイッチON)

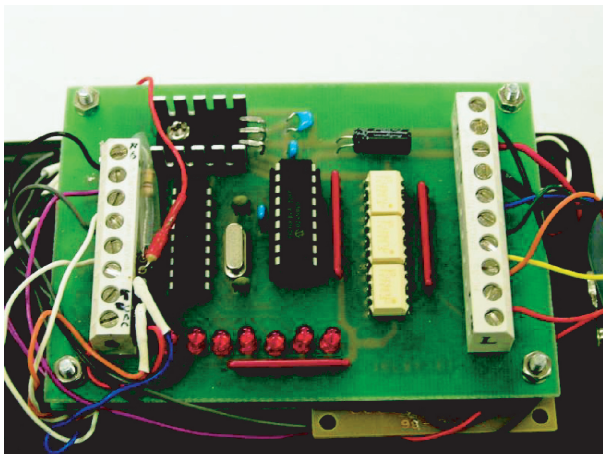


図6 シーケンサーボード



図9 側臥位、眼鏡、人工呼吸器用マスク装着.眼球中立位(スイッチOFF)

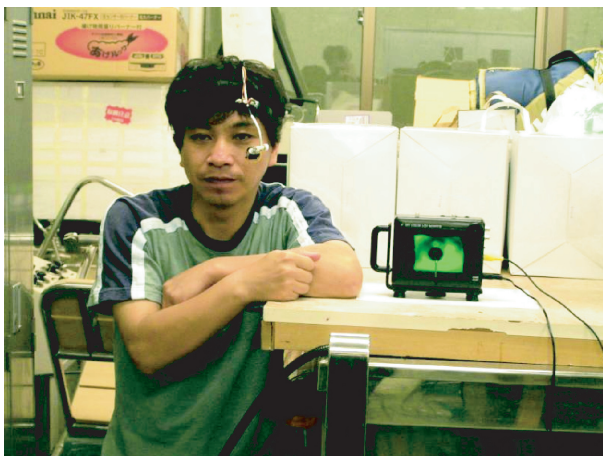


図7 装置の操作.眼球中立位(スイッチOFF)

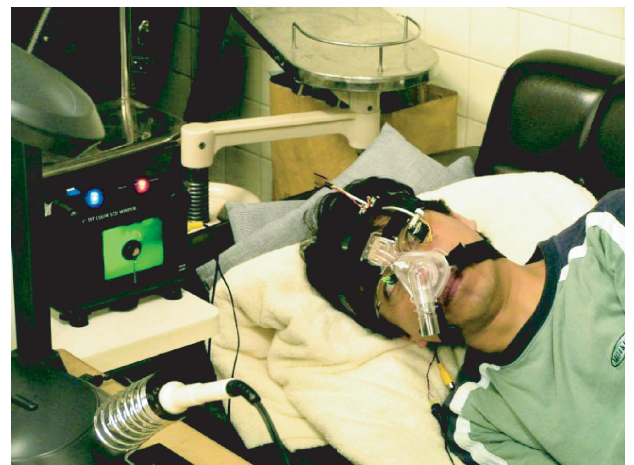


図10 側臥位、眼鏡、人工呼吸器用マスク装着.眼球外転位(スイッチON)

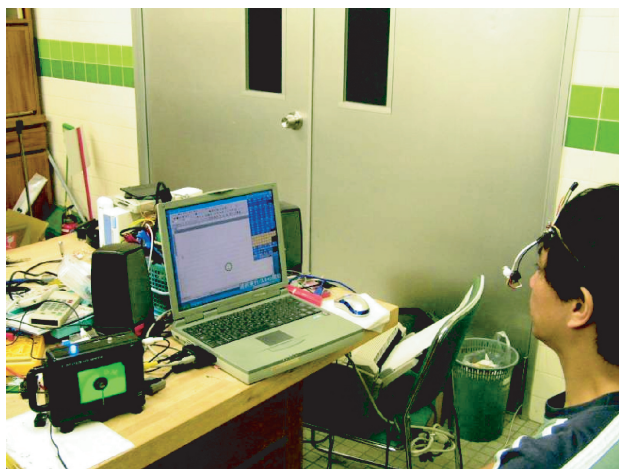


図11 パソコンの操作

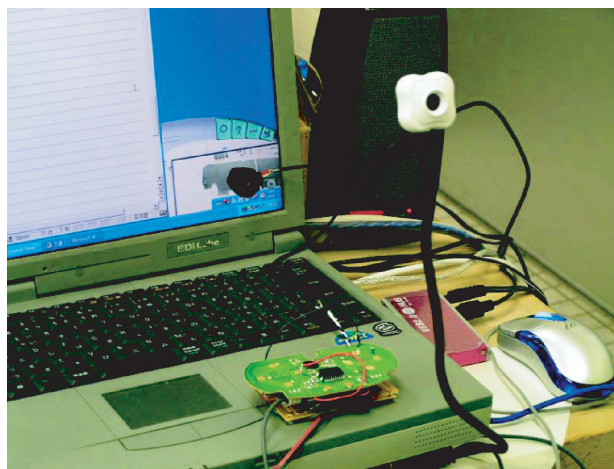


図13 パソコンハンズフリー入力装置回路、センサ周辺図

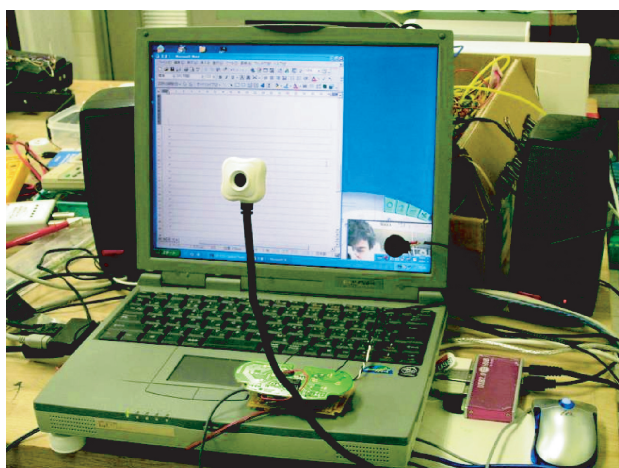


図12 パソコンハンズフリー入力装置全体図

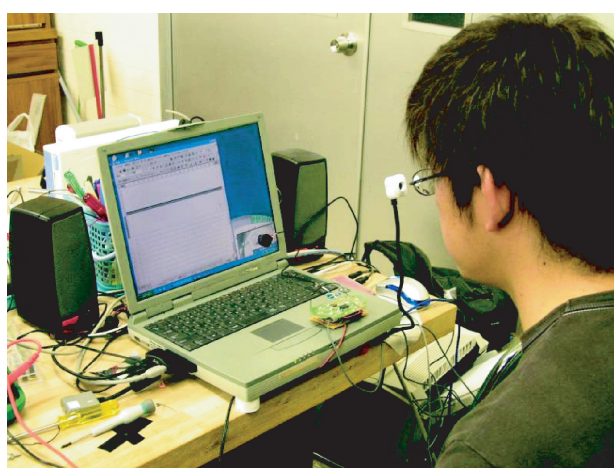


図14 パソコンへの入力