

# 携帯型映像空間表示装置のための 動作と視線による視野領域抽出方法

宮下 広夢\* 林 雅樹\* 岡田 謙一†

本研究は、装着型ディスプレイにおける視野移動のための、直感的なインターフェースを構築することを目的としている。HMDは装着可能であり広い視野を持つために、モバイル機器による没入型映像環境においても高い没入感を提供できると考えられる。ジャイロセンサによる視野移動のインターフェースは直感的であるが、ユーザの眼球運動を考慮していないため、注視領域を正確かつ高速に判別できない。そこで本稿では、ジャイロセンサによるHMD表示上の視野移動に、EOG法による視線方向推定を導入することを提案した。EOG法はHMDの画面を妨げることがなく、さらにユーザに大きな負荷をかけない特徴がある。評価実験により、HMDを装着した状態での視線方向は0.37秒で推定され、精度は68.9%だったことが確認された。

## Determination of Visual Field with Motion and Gaze for Portable Display

Hiromu MIYASHITA\* , Masaki HAYASHI\* , and Ken-ichi OKADA†

This research focuses on developing intuitive interface for field-of-view (FOV) movements with a wearable display. Head-mounted displays (HMDs) are wearable and have a wide vision. Therefore, the HMDs are effective devices for creating immersive virtual environments with mobile devices. Movements of FOV are intuitive with a gyro-sensor, however, the user's gaze area is not able to determine accurately and instantly because the eye movements are unconsidered.

In this paper, Electrooculography (EOG) based gaze estimation was implemented by mounting EOG equipment on a HMD equipped with a head-tracker. EOG does not obstruct the frame of the HMD, and it allows the head to move without burdening the user with mounting devices for measurements. Assessment experiments showed time until input by the detection of eye movements was 0.37 seconds and accuracy of gaze estimation was 68.9% .

### 1 はじめに

HMDはVirtual Reality (VR)に代表されるような映像空間への没入を行うための効果的なデバイスである。その特徴として、装着型のディスプレイのためモバイル機器による映像提供に適しており、簡単な装着で広い視野を呈示できることがあげられる。HMDはヘッドトラッカーセンサーと使われることが多く、顔

や首の動きを映像空間内での視野移動に結びつけることで直感的なインターフェースを構築している。例えばHMDに三軸ジャイロセンサを内蔵し、ユーザが頭を動かした回転角だけ映像視野の角度をリアルタイムに増減させる。この操作は実空間での視野移動と同じため直感的であり、HMDによる広視野と相俟って他の携帯型ディスプレイよりも高い没入感を提供できる。しかし健全な人間の視野移動は顔の動きだけではなく、眼球運動からも構成されている。大きな視野移動では目と頭のどちらも動き、小さな視野移動であれば眼球

\* 慶應義塾大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Keio University  
† 慶應義塾大学理工学部  
Faculty of Science and Technology, Keio University

だけが動くだろう。場合によっては目と顔がまったく違う方向を向くことも起こりうる。そのため、ヘッドトラッカーしかもたない HMD はユーザの注視領域を正確かつ高速に判別できないため、ユーザの意図や興味を完全に反映した視野移動を提供できない。この問題を解決しユーザのしている方向をより正確に測定するためには、アイトラッカーの実装が必要であると考えられる。

有名なアイトラッキングの方法として、強膜反射法や角膜反射法などがある [1]。これらは、目に微弱な赤外線と光を照射し、その反射光をカメラで検出する手法である。しかしこれらはカメラと目の相対位置を固定する必要があるため、測定中はユーザは頭を動かさないという問題をもつ。さらに、HMD を装着している状態では赤外線とその反射光を HMD が遮ってしまう。また視野内のカメラや光源による気の散漫のため、VR 空間への没入を妨げてしまうことも考えられる。

そこで我々は、臨床医学の分野において広く用いられている EOG 法 (Electrooculography) に注目した。EOG 法は眼球の角膜と網膜が電位的にそれぞれ正と負に偏っていることを利用した視線方向測定方法である [2]。EOG 法ではユーザの目の周囲に皿電極を貼ることで眼球の電位を計測し、その結果を解析することで実現できる。そのため我々は、HMD を装着した状態であっても EOG 法による測定は可能であり、ユーザが顔を動かすことによる影響は少なくヘッドトラッカーとの併用も可能であると考えた。本論文では、ジャイロセンサと EOG 法用の皿電極を付加した HMD を製作し、その HMD を装着し頭の動きを伴った状態における EOG 法の速さと精度を実験により測定した。

以降 2 節では眼球運動の特性および眼球運動計測手法である EOG 法について紹介する。3 節では携帯型映像空間表示装置のための動作と視線による視野領域抽出方法を提案し、そのために本研究で行った実装について述べる。4 節では評価実験の内容とその結果、および考察について述べる。最後に 5 節では本研究の結論と今後の展望について述べる。

## 2 アイトラッキング

### 2.1 視線の特性

アイトラッキングは、ユーザが今どこを見ているか、または頭の動きに伴う眼球運動を測定するための方法である。しかし視線はユーザの考えや興味など精神的な集中の対象を読み取るための非常に重要な情報であ

る [3]。例えば視線は特に本人には意識されることなく自然と興味の対象に向けられ、逆に視野外の対象は音などの別要因がない限り認識すらされない。さらに目を瞑ったままでは、掴む、触るなどの動作は、目で捉えているときと比較して極端に難しくなる。このように、アイトラッキングは眼球運動を測定するだけでなく、そこからユーザの肉体的な情報を取得できる非常に有用なツールであるといえる。

視線の移動は眼球やまぶたの運動によるもので、高速かつ長時間行っても疲労が少ないという特徴がある。眼球の動きにはいくつかの種類があるが、大きく分けて衝動性眼球運動 (saccade) と滑動性眼球運動 (smooth pursuit) に分類される [4]。衝動性眼球運動は注視対象を変更したり、高速な物体を注視するときに発生する。そのため非常に高速で、顔の動きに先んじて興味の対象へ眼球を動かすという特徴がある。滑動性眼球運動は遅く動く注視対象に追従するときに発生する。これら二つの眼球運動の選択は通常では意識されないが、気づきや反応などの本人の興味に変更される場合には衝動性眼球運動が使われる。本研究では高速で広角な視野移動における映像呈示についての問題に注目したため、特に衝動性眼球運動の測定を対象とした。

### 2.2 EOG 法

EOG 法は、眼球の電気的特性を利用した眼球運動計測手法である。眼球の角膜 (黒目部分) は、網膜に対して正の電位を有している。この眼電と呼ばれる電位は眼の周囲の皮膚に電極を貼り付けることで検出可能であり、その電位変化は眼球の回転角とほぼ比例関係にある。つまりこの眼電を測定し解析することで、視線の動きを導出できる。図 1 に EOG 法の流れを図示する。

EOG 法の特徴として、装着が簡単で眼の周囲に電極を貼るだけのため、ユーザへの負担が少ないことがある。さらに EOG 法は眼の周囲に大掛かりな装置を設置する必要がなく、後述する角膜反射法などのようにカメラを眼前に固定する必要もないので、測定中に視野を妨げることがない。

しかし、EOG 法は電位を扱うために脳波や顔筋の筋電などの影響を受けやすく、そのノイズが眼電図に顕著に現れてしまう問題がある [5]。さらに瞬目に伴う大きな上下の眼球運動をノイズとして検出してしまい、それによって大きく電位の波形が乱れ正確な視線検出ができない場合がある。そのため、EOG 法は高精度で

目指した測定や長時間の眼球運動検出には不向きであり、単発的な衝動的な眼球運動の測定などに限定して用いられることが多い。

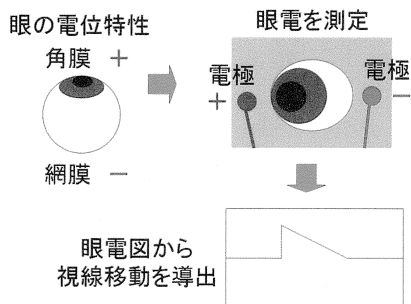


図 1: EOG 法のイメージ

### 2.3 その他の眼球運動計測手法

よく知られている眼球運動計測手法として、オプティカルレバー法、サーチコイル法、強膜反射法、角膜反射法、画像処理による手法などがあげられる [1][6]。それぞれの特徴と、HMD を装着した状態では測定ができない理由を述べる。

オプティカルレバー法は、端に小さな鏡を取りつけたコンタクトレンズを角膜に装着し、その鏡による光線の反射光を画像解析や光電変化で検出する手法である。この手法は非常に高感度の視線検出が可能であるため、微小眼球運動や静止網膜などの研究に用いられている。しかし、コンタクトレンズを固定するために負圧をかける場合があり、角膜や細胞を傷つけてしまう悪影響が懸念されている。また眼球に光線を照射する必要もあるため、被験者への負担になると考えられる。

サーチコイル法はコンタクトレンズにコイルを取りつけ、被験者を一様な交流磁場の内に置くことで、眼球の回転に比例した誘導電流を取り出す手法である。この手法はオプティカルレバー法と同様にユーザへの負担が大きい。さらに大掛かりな装置が必要になるため、モバイル機器としての利用が現実的でない。

強膜反射法、角膜反射法はともに眼球に微弱な赤外線を照射し、その反射光を解析することで眼球の回転を測定する手法である。これらの手法は眼球からの反射光をセンサやビデオカメラで受光する必要があるため、HMD 装着状態では視野の妨げる恐れがある。また頭部の移動が大きな誤差を生むという欠点があり、十

分な固定には頭部の固定や計測装置をヘルメットに固定するなどの必要があり、ユーザへの負担が大きい。さらに眼球への赤外線照射は眼疾患を引き起こす可能性があることが指摘されている [7]。

眼球をビデオカメラで撮影し、その画像を処理することで瞳孔や虹彩を抽出することで、眼球運動の計測を行う手法もある。この手法においても、頭を動かせる場合はビデオカメラと目の相対位置を固定する必要がある。そのため視野の妨げや装置の大きさなどの影響により、HMD とカメラの併用はユーザの負担になる可能性がある。

## 3 提案と実装

本稿において我々は、携帯型映像空間表示装置のための動作と視線による視野領域抽出方法を提案する。この方法は携帯型ディスプレイとして HMD を対象とし、ヘッドトラッキングによる直感的な視野移動を視線方向推定によって補正することを目標とする。これによって、映像内の視野移動についてユーザの意識や興味をより正確かつ高速に反映できるようになると考える。

また視線方向推定の方法として、EOG 法を採用する。EOG 法は HMD の装着やその映像視野を妨げることがなく、ユーザへは電極を貼付するだけのため負担が少ないという特徴があるためである。また頭の動きによる影響は少ないと考えられるため、測定中にヘッドトラッキングを併用できることも理由としてあげられる。

### 3.1 HMD の製作

本研究では装着を単純にするためにヘッドトラッカーと EOG 法のための皿電極を付加した HMD を製作した。ベースとなる HMD には SONY 社製の Glasstron を使用した。この HMD の画面サイズは視野角にして横 28 度、縦 21 度である。顔の向きを測定するため、HMD に 3 軸ジャイロセンサである INTERSENSE 社製の InterTrax2USB を使用した。この HMD をユーザの頭部に装着することで、ユーザの顔の向きの測定が可能になる。InterTrax2USB は VR 空間描写のアプリケーションを起動しているパソコンへ直接接続できるため、ユーザの顔の向きを VR 空間での視野にリアルタイムに反映できる。

そして、EOG 法による眼球運動測定のため、この HMD に日本光電社製の皿電極を設置した。電極はユーザの両目尻と右目の上下にしっかりと貼付されるよう、

水泳用ゴーグルを介して HMD に接着固定した。ゴーグルは人間の眼の周囲に固定されるため、電極がズレなくなる利点を持つ。ここで両目尻の電極が横軸の視線を測定し、右目上下の電極が縦軸の視線を測定する。これは横軸、縦軸の視線のどちらにおいても、人間の二つの目がどんな場合でも同じ方向にしか動かないことを前提とした。なお測定の際には HMD に貼り付けた電極に加え、アースを取るために眉間と両耳たぶにも電極を貼り付ける必要があった。なおこの HMD を装着するときには、電極が貼付される位置の汚れを消毒綿で拭き取り、さらに電極に眼電を通しやすくするためのペーストを塗布する必要がある。電極が測定した電位は日本光電社製の脳波計 Neurofax によって記録した。

図 2 に作成した HMD の接眼部を、図 3 にその装着例を示す。

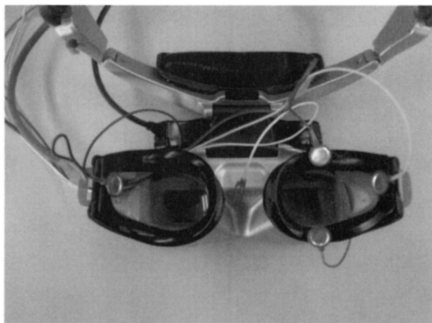


図 2: HMD の接眼部



図 3: HMD の装着例

### 3.2 眼電図への処理

本研究では、バイナリデータから眼電図への変換、フィルタリングなどの処理のため、眼電測定専用の PC から別のパソコンに眼電図の記録を移さなければならなかった。ユーザの視線はジャイロセンサの記録と眼球運動の測定結果の二つを同期させることで推定された。そのため精度の測定は可能だったが、ユーザの眼球運動を利用したリアルタイムなインタラクションは実装されていない。

眼球運動の測定結果はフィルタリング処理の後、ユーザの視線位置として出力される。

眼電図には多くのノイズが含まれているため、いくつかのフィルターでノイズ除去される必要があった。また電位がそのまま視線位置を表していないので、キャリブレーションを行った。

まず眼電のデータには脳波や筋電などのノイズが含まれている。これらのノイズは目の動きによる電位変動と比較すると、より小さく、周波数が高いという特徴がある。そこで本研究では、計算が速い一次の IIR (Infinite Impulse Response) フィルタを LPF として眼電のデータを処理することで、高周波のノイズを除去した。

また眼電には、視線をある一点で止めていると時間経過とともに 0 へ収束していくという問題がある。これは低い周波数のノイズを除去するために、測定装置で設定した時定数の影響である。注視を正確に測定できなくなるため、0 への収束を補正する必要がある。そこで、眼電のデータを微分し一定値以下の変動を排除し、視線移動である大きな変動を残すことで、この問題を解決した。ただし、この処理では高速な眼球運動である衝動性眼球運動にしか対応できない。本研究では衝動性眼球運動の測定を対象としているため、精度の測定のためのタスクは高速に視線を動かすものに限定した。

また EOG 法には、瞬目による大きなノイズがある。これは瞬目が激しい上下方向の眼球運動を伴い、まぶた周辺の筋電がノイズとして発生するものである。瞬目によるノイズは通常の眼球運動と同じ程度の電位変動を引き起こすため、IIR フィルタや収束の補正では除去できない。また、瞬目によるノイズと、高速な視線移動とが区別しにくいという問題がある。本研究では、視線入力を連続で行わず、一定の休止時間を入れ瞬目するための時間を設けることで、この問題を回避した。

また、眼電の大きさと視線の位置を対応させるため、キャリブレーションを行った。キャリブレーションの内容は、眼球運動測定前に画面の上下左右の端を数秒ずつ見ることである。画面端を見たときの眼電の大きさと、その位置への眼球の傾きを対応させ、比率を計算する。眼電の変化は眼球の回転角とほぼ比例関係にあるため、この比率によって眼電から視線位置の導出が可能になる。

以上のような処理により、眼電を測定した任意の時間における視線位置を導出した。図4に実際の眼球運動と測定された眼電図、さらに上で述べた各ノイズ除去の結果を示す。この図より、ノイズ除去によって眼電位が実際の視線の動きに近くなっていることがわかる。

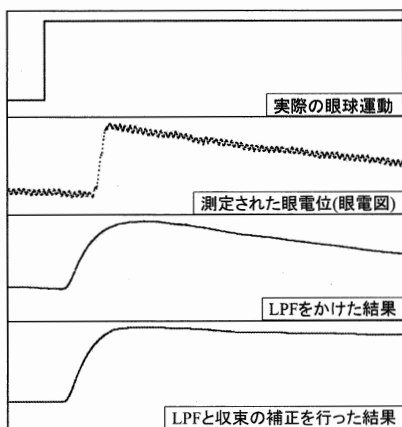


図4: 眼電図とフィルタリングの結果

## 4 評価実験

本研究では、3.1節で述べたHMDの性能を評価するために、評価実験を行った。予備実験では、HMDを装着した状態でのEOG法による視線方向推定の精度を確認した。本実験では、被験者にジャイロセンサによる視野移動が可能にしたVR空間没入を行ってもらい、そのときの視線方向推定とヘッドトラッキングのそれぞれの精度と速さを測定した。さらに、各種センサが付加されたHMDを使用することによって映像空間への没入に影響がないかを調査するため、アンケートを実施した。実験期間は2007年12月25日~2008年1月9日で、21歳~25歳の学生10人(男性:9人、女性:1人)に対して行った。

### 4.1 予備実験

#### 4.1.1 実験内容

予備実験は視線検出の精度を確認するために、以下のような手順で行った。

- 1 : HMDを装着し、キャリブレーションを行う
- 2 : 3秒間HMD上に何も表示しない
- 3 : HMD上に小さなターゲットを表示し、3秒間ターゲットを注視する
- 4 : 2と3を、計10回繰り返す

注視するターゲットは毎回画面内のランダムな位置に表示される。実験では精度を算出するために、視線入力の手動判定を設けた。HMD表示画面を中心から等角度で分割し、ターゲットと視線推定位置が同じ領域に収まっているかで判断する。正確にターゲットを注視できるように、実験中はエリアの境界線は見えないようになっている。例として入力判定を8分割したイメージを、図5に示す。

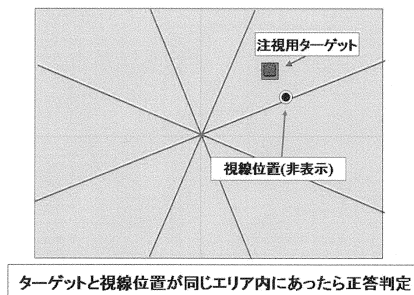


図5: 正答判定(8分割の例)

#### 4.1.2 実験結果および考察

予備実験の結果を、図6に示す。横軸は分割数で、大きくなるほど細かく視線を推定できることを示す。また縦軸は視線推定の正答率を示している。この図により、分割数が増えるにつれ精度が下がっていることがわかる。一般に視線入力システムは90%程度の精度があれば実用上問題ないとされる[8]。しかしこのデバイスで90%の精度を得ようとする場合、4以下の分割数にしなければならないことがわかる。4つはあまりにも少なく、他の視線入力インターフェースの研究では5~10個程度のターゲット数を確保している。この精度の

原因として、非リアルタイムの解析によって視線位置のフィードバックが不可能である点が考えられる。つまり、自分の視線を客観的に把握できないため、周辺視野と視野の中心の区別がつけられず、微妙な調節ができないと考えられる。また、電極をゴーグルに貼付してHMDに固定しているため、余計な圧力が電極とユーザの肌にかかっている恐れがある。そこで、将来的にリアルタイムで視線検出を行うことをふまえ、実用的なターゲット数で現状68.9%の精度を持っている8分割に着目する。スクリーン上への8つのターゲット表示は、上下、左右、斜め方向への視線移動のため直感的でわかりやすいことも理由としてあげられる。よって次の本実験ではVR空間内に8つの選択肢を表示し、その視線入力精度を確認する。

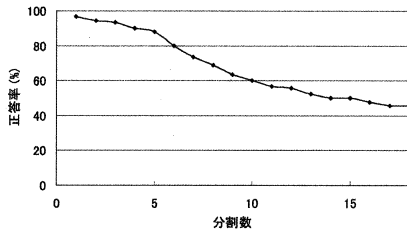


図 6: 予備実験における視線検出の精度

## 4.2 本実験

### 4.2.1 実験内容

本実験では実際にHMDによるVR没入を行い、頭を動かした状態での視線推定の精度と速さを測定した。手順を以下に述べる。

- 1 : HMDを装着し、キャリブレーションを行う
- 2 : 2秒間の休憩
- 3 : 表示された白い球体の方向へ顔を向け、1秒間維持する(図7)
- 4 : 球体の色が変化する
- 5 : 八つの注視ターゲットのうち球体と同色のものを注視する(図8)
- 6 : 2~5を、計10回繰り返す

VR空間上に表示する球体の色と位置は、毎回ランダムになっている。手順3では、画面中央のリングに球体が収まるように、視野を移動することがタスクに

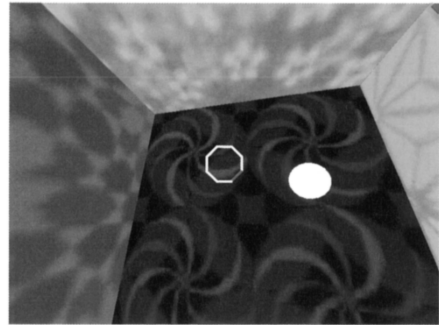


図 7: 頭による視野移動用ターゲット

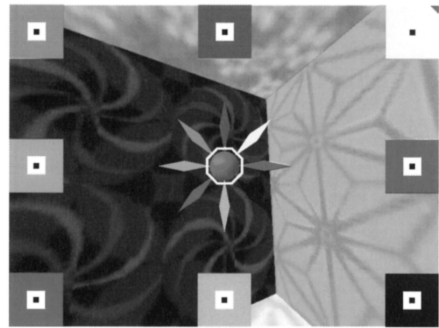


図 8: 注視用ターゲット

なっている。誤差2度以下でリング内にターゲットが1秒間収まっていると、手順4に移行する。なお、ジャイロセンサを用いた視野移動で精度を保ちつつストレスのない操作が誤差2度以下で実現できていたため、2度までのずれを許容した。

予備実験により8方向の視線推定に着目したため、HMD画面の8方向に注視用のターゲットを表示した。手順5では、VR空間上の球体と同じ色の注視用ターゲットへ視線を向けることがタスクとなっている。ターゲットへの注視を補助するため、中央付近の周辺視野(およそ2度)の範囲内に各色の矢印を配置した。

また、HMD装着の負担やVR空間への没入感を調査するために実験後被験者に7段階のアンケートに答えてもらった。

#### 4.2.2 実験結果および考察

図9に、本実験における視線入力精度を示す。本実験ではターゲットを8個表示しているが、正答判定を拡大縮小することで、各分割数での正答率を算出している。まず予備実験と同様に、分割数をあげるにつれて精度がさがってしまうことがわかる。予備実験の結果から採用した8分割に着目すると、予備実験での68.9%よりも少ない48.7%になってしまっている。よって結果的に、顔を動かさないとときと比較して精度が下がってしまうことがわかった。精度が下がってしまった原因としては、顔を動かすことで頭部に固定したHMDがずれてしまっていたと考えられる。HMDにはゴーグルを介して眼電測定用の電極が接着固定されているため、頭の動きに伴うHMDの小さな揺れが電極のずれを誘発してしまったりと考えられる。電極のずれによって皮膚-電極間のインピーダンスが変化してしまい、眼電位の大きなノイズとして測定されてしまったと考えられる。ヘッドトラッキングは高い精度であり、視線推定のデバイスを付加する事による悪影響はないといえる。

頭や眼球の動き始めからターゲットへの到達までの速度は、それぞれ頭の動作による視野移動が1.74秒、視線方向推定が0.37秒であった。EOG法は非常に早い段階で視線の移動を検出していることがわかる。2.1節で述べたように眼球は高速に動き、EOG法による測定もその利点を損なっていないことが確認できた。

また、本実験後のアンケート結果を図10に示す。これは提案システムによるVR空間没入を体験した被験者に、それぞれの入力について図に示すような質問をし、「1:まったく思わない」から「7:とても思う」の7段階で評価してもらった結果である。この図から「直感的な操作だった」、「VRへの高い没入を感じた」の2点において、高い評価を得ていることがわかる。

アンケート結果から、研究の目標としていた直感的な操作と高い没入感の提供は実現できたといえる。しかし提案システムは、疲労が大きくなってしまおうという欠点があることがわかった。アンケート時のコメントでは、主に視野を確保するための姿勢や、視野移動の上半身の動作に対して疲労を感じた、という意見が多かった。疲労のために長時間のVR空間への没入が不可能になってしまうのは、インターフェースとして問題である。よって提案システムはVR空間没入のために効果的であるが、精度と疲労度に関して改善が必要であることがわかった。

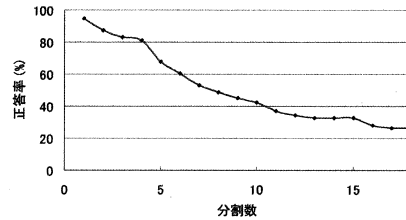


図9: 本実験における視線検出の精度

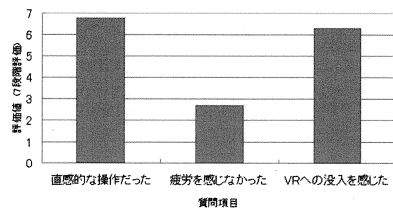


図10: HMDの使用とVR空間没入の評価

## 5 おわりに

HMDは映像空間への没入を行うための効果的なデバイスであり、装着型であるためにモバイル機器との併用にも適している。HMDにヘッドトラッカーを付加することで直感的な視野移動の操作が可能になり、より高い没入感やユーザビリティを提供できる。しかし頭の動きのみを視野移動に対応させた場合、人間特性の影響からユーザの意識や興味の対象を正確かつ高速に描写できていなかった。そのため我々はHMDによる映像視野提供において、ヘッドトラッキングによる直感的な視野移動を視線方向推定によって補正することを目標とした。

そこで本研究では眼球運動計測手法のひとつであるEOG法に着目した。EOG法はHMDの装着を妨げることがなく、さらにユーザへの負担も少ないという利点があったためである。我々はHMDによる映像提供をしながらの動作と視線による視野領域抽出を提案し、そのためにジャイロセンサとEOG法のための皿電極を組み込んだHMDを製作した。

そしてそのデバイスを装着した状態における視線推定の精度などを調査するために、実験を行った。その結果視線推定は頭の動作よりも高速に実行できるが、精度について大きく劣っていることがわかった。精度はインターフェースとして利用できる可能性はあるが、現

状では不十分であり改善が必要である。

今後は視線方向推定の精度を高めるためにデバイスの改良とフィルタの追加と変更が必要であると考えられる。また、HMD への映像表示や眼電の解析などの全ての処理をモバイル機器で行う必要がある。さらに視線移動による視野移動操作を実現するために、眼電のリアルタイムな取得と解析を実装していきたい。

## 6 謝辞

本研究は総務省、SCOPE の支援により行われた。

## 参考文献

- [1] 日本視覚学会 (編): 視覚情報処理ハンドブック: 朝倉書店, 2000
- [2] 久野悦章, 八木透, 藤井一幸, 古賀一男, 内川嘉樹: EOG を用いた視線入力インターフェースの開発: 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.5, pp. 1455-1462, 1998
- [3] 阿部清彦, 大井尚一: 画像解析による強膜反射法を用いた簡易視線入力システム I: 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会, pp184, 2001
- [4] 坂下祐輔, 藤吉弘巨, 平田豊: 画像処理による 3 次元眼球運動計測: JSEM 日本実験力学会特集号, Vol.6, No.3, pp 236-243, 2006
- [5] 太田拓臣, 板倉直明, 坂本和義, 廣瀬卓: 交流眼電図を用いた視線入力インターフェース: 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.103, No.522, pp37-42, 2003
- [6] A.T. Duchowski: Eye Tracking Methodology. Theory and Practice: Springer, London, 2002
- [7] 石原忍, 鹿野信一: 小眼科学 改訂第 22 版: 金原出版, 1991
- [8] 伊藤和幸, 数藤康雄, 伊福部達: 重度肢体不自由者向けの視線入力式コミュニケーション装置: 電子情報通信学会論文誌D, Vol.83-D1, No.5, pp495-503, 2000