

装用を感じさせない眼球運動計測装置の開発

Eye-movement measurement system with low level of mental workload



星野 聖 (Kiyoshi HOSHINO, Dr. Med. Sci. and Dr. Eng.)

筑波大学 教授

(Professor, University of Tsukuba)

電子情報通信学会 ロボット学会 生体医工学会

受賞: Laval Virtual Award (フランス) (28 Mar. 2013) Laval Virtual Award (フランス) (10 April, 2014) ISER International Conference (台湾)にて Best Paper Award (26 Dec. 2015)

著書: 星野 聖, 以後直樹: “手指の画像データベース化と産業応用,” 三次元画像センシングの新展開, エヌ・ティー・エス, (編) 岩堀祐之, 3-4, 2, pp.327-336, 2015 K.Hoshino: "Hand Gesture Interface for Entertainment Games," ed. R.Nakatsu, M.Rauterberg, and P. Ciancarini, Handbook of Digital Games and Entertainment Technologies (ISBN: 978-981-4560-52-8), Springer, pp.1-20, 2015 星野 聖, 富田元将: “第3章 第9節 超小型軽量メガネ型眼球運動計測装置の開発と安全運転支援への応用,” ドライバ状態の検知・推定技術と運転支援・自動運転への応用, 技術情報協会, (編) 村上謙吉, 3, 5, pp.297-303, 2016 研究専門分野: 生体情報工学 医用工学 ヒューマンインターフェース ロボティクス

あらまし 本稿では、スマートグラス程度の大きさと重さで、かつ頭部への強固な計測装置固定が要らないため、長時間のモニタリングが可能で、しかも、ゴーグル等による背景光遮光も要らない、高精度の眼球運動計測システムについて紹介する。中心となる技術は、ほとんど明るさを感じないくらいの、ごく微弱な青色光を眼球白目部分に照射し、それにより濃淡コントラストを向上させた血管映像を、高速かつ高精度に追跡する技術である。これにより、装用を感じさせずに、昼夜を問わず、長時間の眼球運動計測が可能となる。カメラの画質も、VGA程度の解像度があれば十分な高精度推定ができるため、超小型カメラでのシステム実装が可能である。システム評価実験では、通常程度の仕様のPCを用い、周辺の光環境を変えた場合でも、処理速度60 fps以上で、平均誤差0.24度以下での高精度の眼球回旋計測が可能であった。

1. 背景

1.1 視線計測

眼球の垂直水平運動計測(すなわち視線追跡)は、装置装用者の興味の対象や程度などを検出できる。視線計測で一般的に用いられる方法は、角膜反射法と瞳孔法である。前者は、集光点を角膜に照射し、眼球と角膜の回転中心が異なることを利用した虚像(ブルキンエ像)の移動を利用する。原理的には高精度な計測が可能であるが、その分、測定中の頭部とカメラとのずれに弱く、カメラが少し動いただけでも視線が動いたと誤認識されやすい。そのため、ベルト等による強固な頭部固定が不可欠であった。後者は、カメラで瞳孔を撮像する方式のため、眼球とカメラの位置関係には頑強であるが、瞳孔映像を楕円近似するため、瞳孔映像が眼瞼(まぶた)や睫毛で遮蔽されやすく、装置装着者は意図的に眼をしっかりと見開き、水平か上方を見ている状態が望まれた。なお、前者のブルキンエ像を用いる方法でも、後者の瞳孔映像を用いる方法でも、後述する眼球回旋運動は計測できない。

他方において、眼球は水平垂直に動くだけではない。例えば、頭部を左右に傾けると、それと逆方向に眼球が回旋し、頭部や体躯が傾いても視界が傾かないようにする。また、回転する映像を観視した場合でも眼球回旋は起きる。車酔いや宇宙酔い、映像酔いや3D(立体映像)酔い、あるいは、それらに伴う目眩(めまい)や気持ち悪さが生じている場合、眼球回旋運動が生じていることが多いため、眼球回旋運動は不快感の生理的指標としても利用可能である。

1.2 眼球回旋計測

医用目的では、無意識に発生する眼球回旋運動(眼振)を計測することにより、めまいの検出に利用可能である。めまいの原因を大別すると、(1)動脈硬化等による大脳の病変、(2)メニエール病、急性前庭神経炎、良性頭位発作性めまいなどの耳鼻科の病気、(3)脳卒中、脳血栓、腫瘍が原因の脳幹や小脳の異常、(4)血圧、貧血、低血糖症が原因の全身状態異常、(5)うつ病、他が原因の精神的な異常(自立神経系を含む)に分類されるため、高精度の計測は診断にも有効である。ところが、現在の診断・計測装置では、大がかり

装用を感じさせない眼球運動計測装置の開発

Eye-movement measurement system with low level of mental workload

な装置、暗室、顎台、頭部への強度の装置固定などが
必要で、患者やユーザへの負担が大きすぎる。

このような眼球回旋運動計測には、虹彩紋理（虹彩
にある放射状の模様）を追跡することで求める方法が
大半である。ところが、照明環境により瞳孔直径は変
化し、それに伴って虹彩紋理パターンの形や位置も変
化する。報告の中には、解像度 640 × 480 画素程度
の眼球映像において、誤差が 0.1 度以下での計測が可
能であると主張するものもある。しかし、誤差 0.1 度
以下の精度を出すためには、虹彩が変形しないよう
にゴーグル等により背景光を遮光することが不可欠
であった。

1.3 本研究の目的

すなわち、従来の視線および眼球回旋の計測では、
頭部への装置固定と遮光用ゴーグルとが不可欠である
ため、低負荷の長時間計測が不可能であった。しかし、
星野らは、ゴーグルによる背景光遮蔽と、ベルト等
により装置を頭部に強く固定する必要がなくなる新
手法について検討を行ってきた。眼球運動計測ユニ
ットがとにかく小型かつ軽量になると、バスやトラ
ック等の長距離ドライバに長時間装着してもらえ
るようになるし、耳鼻咽喉科めまい外来患者にと
って負荷の少ない眼振診断が可能となったり、ホル
ター心電計のように常時装着して、低負荷で長時
間の眼球運動モニタリングも可能となったりする。
さらには、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）
内部に搭載して、眠気、体調不良、眼精疲労、光
感受性発作などの検出も期待できる。

そこで本稿では、非常に微弱な青色補助光を装
置装着者の眼球に照射することで、眼球の白目（結
膜および強膜）にある血管像の濃淡コントラストを
強調し、これにより、計測装置の頭部への強度固
定とゴーグル等による背景光遮光とを不要にし、
そして同血管像をトラッキングすることで、眼球回
旋と視線を高精度に計測する手法を紹介する。

2. システムの構成

2.1 基本構成

星野らは、何種類かの眼球運動計測プロトタイプ
機を試作しているが、ワイヤレス超小型カメラを
軽量で簡易なメガネフレームに固定した、ベルト
等による頭部への

固定が不要な眼球回旋計測装置をまずは紹介す
る[1]。

小型カメラ（5.8G Wireless Mini Camera--TE60）
はカラーであり、ビデオ送信ユニットも含めた大
きさは 33 × 10 × 10 mm、画角が 90 度、解像
度が VGA (640 × 480 pixel) 相当である。カメ
ラ素子と送信ユニットとが単四電池 3 個で駆動さ
れる。メガネフレームには、近赤外および青色の 2
種類の LED を設置した。瞳孔および虹彩の部分
には近赤外線 LED を照射し、瞳孔と虹彩の濃淡
コントラストを強調するようにした。外側白目領
域には青色 LED を照射して、白目と血管の濃淡
コントラストを強調するようにした。それぞれの
光強度は、近赤外光は瞳孔を明瞭に撮像できる程
度の強さ、青色光は装用者がまぶしさや視覚的な
不快感のない程度に明るくした。電池の重さは 45
g を除くと、装置の重さは 85 g である。

ソフトウェアの基本構成について説明する。本
手法において追跡するのは、画像上における結膜血
管端の位置である。しかし、最終的に求めたい値
は眼球回旋角度である。そこで、第一に瞳孔の輪
郭（すなわち虹彩の内縁）に沿った楕円極座標系
を求める。赤外線照射された場合、他の領域と比
べて瞳孔領域では画素の濃淡値が小さくなるた
め、上述した赤外線照明と 2 値化処理とにより、
瞳孔領域を抽出する。得られた瞳孔領域の輪郭
に対して、最小二乗法を用いて楕円近似を行い、
極座標系を設定する。

第二に、追跡すべき結膜血管端を選択する。瞳
孔中心から眼球の外側に向かって、虹彩外縁に存
在する結膜血管端を選択し、テンプレート画像と
する。結膜血管は、背景である強膜（すなわち白
目領域）と比べて、画素の濃淡値が小さくなる
ため、2 値化処理を行うことで簡単に抽出する
ことができる。

第三に、テンプレートマッチングによる結膜血
管端の追跡を行う。しかし、追跡すべき血管端
の位置の変化は、眼球回旋により生じるだけで
なく、眼球の水平垂直運動すなわち視線移動に
よっても生まれる。眼球は球体と見なして良い
ので、視線の移動によって変化する成分は、瞳
孔輪郭あるいは虹彩輪郭の長軸や短軸の変化と
見なして良い。テンプレートマッチングにより
得られた 2 次元画像上の結膜血管端の位置から、
視線移動成分を差し引き、極座標系へ変換する
ことで、

装用を感じさせない眼球運動計測装置の開発

Eye-movement measurement system with low level of mental workload

眼球回旋角度を求めることができる。

また、高速カメラを用いた虹彩紋理を使わない眼球回旋運動計測装置の例も紹介する[1][2]。同装置は、モノクロ CMOS カメラ (FFMV-03MTM-60)、赤外線 LED、青色 LED をゴーグル(廉価な防塵マスクを改変)に固定して眼球の撮像を行う。赤外線 LED はカメラ下方に設置し、眼窩に向けて照射する。照射された赤外光によって、瞳孔と虹彩のコントラスト、虹彩パターンの濃淡が強調される。また、青色 LED はゴーグル右目部位に設置し、右眼球の外側白目領域に向けて照射し、白目と血管領域のコントラストの強調を行う。

まず、虹彩の輪郭を二値化処理により求め、虹彩輪郭に接している結膜血管の端点を検出する。複数検出された血管端のなかで、上下の瞼からほぼ等距離にあ

る結膜血管端を1つだけ選出し、テンプレート映像を取得する。次に、図1のスクリーンショット部分で示すような、眼球中心とほぼ同じ高さで虹彩と白目を跨ぐ概ね矩形の領域において、テンプレート映像と原画像のテンプレートマッチングを行い、追跡を行う血管端を検出する。この青色領域は、回旋方向に対して±30度の幅を持っており、瞳孔の上下左右運動に追従して移動する。テンプレートマッチングの範囲を青色領域に限定することで、高速かつ正確なトラッキングを行うことができる。

2.2 専用ハードウェア

眼球運動計測装置の専用ハードウェアについては、図2のような基板ブロック図の構成を設計した[2][3]。

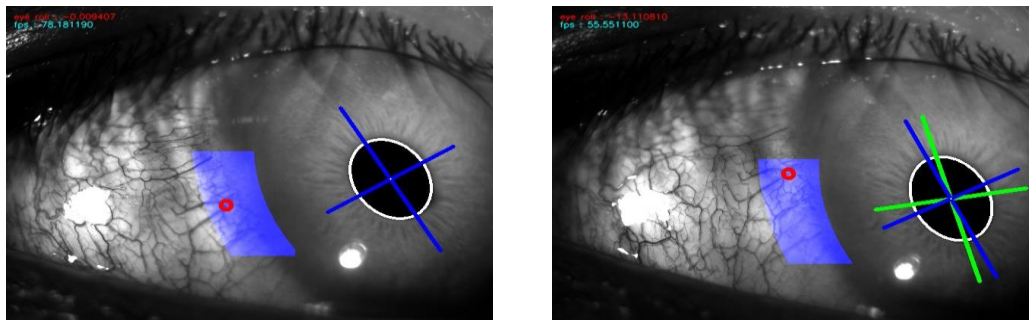


図1 虹彩輪郭に接している結膜血管の端点検出による眼球回旋運動推定の動作例

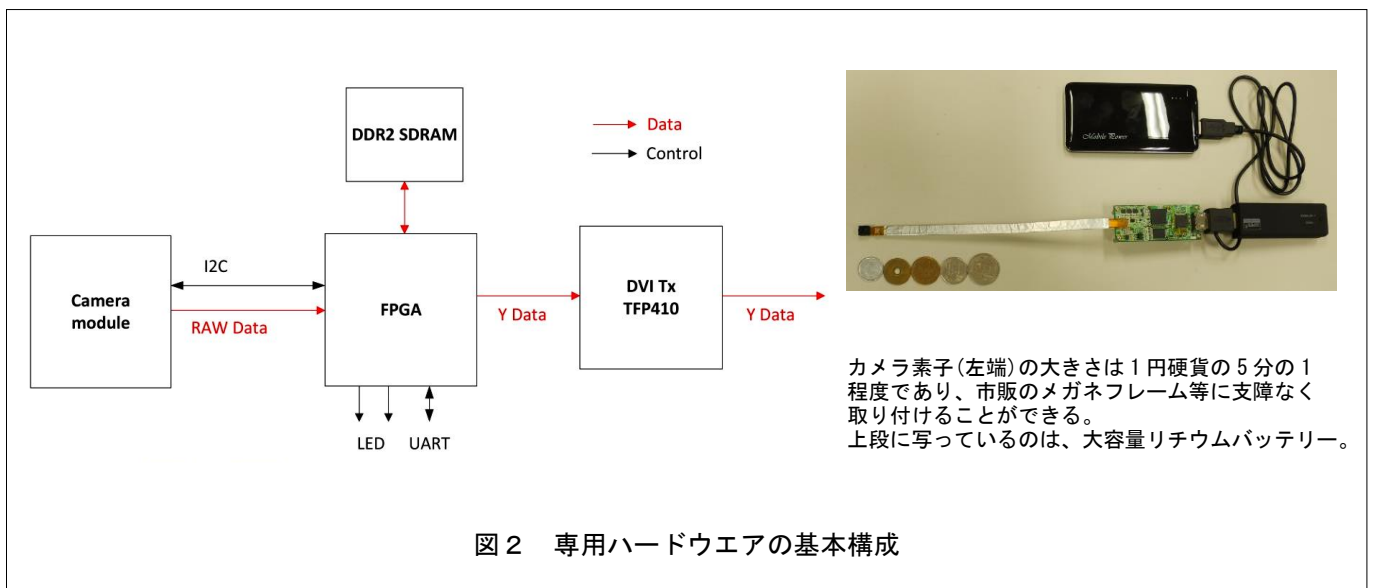


図2 専用ハードウェアの基本構成

装用を感じさせない眼球運動計測装置の開発

Eye-movement measurement system with low level of mental workload

カメラの焦点距離 20 mm、画角 90 度程度、解像度 VGA、撮像速度 90 fps、無線通信である。同構成では、小型カメラモジュールの映像を SDRAM と FPGA で受け、HDMI（フルハイビジョン）で無線通信ユニットへ出力する。撮像素子の解像度が VGA なので、HDMI では最多で 6 枚の VGA 画像を一度に無線通信でき、90 fps の VGA 画像が転送できる。

2.3 ビデオスタビライズ

装着した装置がユーザの頭部や体の動き、あるいは、装置の自重によりずれた場合でも正確な眼球運動計測が行えるよう、次のような映像ブレ防止機能（ビデオスタビライズ制御）を搭載した[2][3]。

カメラを設置したメガネフレームが正しく装着された状態で眼球画像を撮像し、これを基準画像とする。基準画像である 1 枚目の眼球画像に対して、目尻部分と目頭部分の矩形抜き出しを行って 2 つの特徴点を求め、かつ後述する基準に従って 3 番目の特徴点を決定する。そして、2 枚目以降の眼球画像に対しては、1 枚目の画像から作成したテンプレート画像をもとに、目尻と目頭の位置と 3 番目の点を求め、Affine matrix を計算する。基準画像と 2 枚目以降画像の 2 組の 3 点位置から、Affine 変換により 2 枚目以降の眼球画像を基準画像の位置に戻すようにした。ここで、3 番目の点については、目尻と目頭との 2 点間の距離が拡大・縮小するのに利用できるように、基準画像と変換画像（すなわち、2 枚目以降の画像）の双方において、3 点で作る三角形がなるべく相似形になるように設定した。また、この三角形は二等辺三角形で、3 番目の点が目頭に近い側で決定するようにした。

特徴点抽出とテンプレートマッチングは、誤検出を少なくするため、また、処理の高速化のため、目尻と目頭が存在すると推定される領域に処理範囲を限定した。特徴点抽出方法は Harris エッジ検出器を使用した。さらに、テンプレートマッチングにおいて、一致度が低い場合はエラーとして処理するようにした。

同手法によれば、眼球運動計測装置が固定されるメガネフレームが顔面からずれた場合でも、通常使用程度のフレームのずれなら支障なく眼球回旋運動が計測できた。

3. 暗環境下での計測

3.1 ハードウェア

本章の目的は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着し、輝度の低い映像コンテンツを観視している時でも、あるいは、夜間の自動車運転時においても、眼球回旋運動を高精度に計測できるようにすることである。そこで、暗環境下で眼前に置かれたモニター以外からは、眼球とその周囲に光が照射されない状態での眼球回旋運動計測を目指す[4]。そのため、提案システムは、カラーボードカメラ (MS-54)、赤外線 LED、青色 LED、映像コンテンツ提示用のモニターを用い、厚紙で手作りした簡易なゴーグル型 HMD の内部にそれら電子部品を内蔵し、実験を行った。

カラーボードカメラは、眼球と同じ高さで、眼球から 20 mm 離れた正面から目尻側へ 50 度の方向に設置し、主に眼球の黒目と目尻側の白目領域とを撮影した。赤外線 LED は、カメラの下方に設置し、眼球に向かって照射することで瞳孔領域を強調した。青色 LED は、眼球と同じ高さで、眼球から 70 mm 離れた正面から目尻側へ 70 度の方向に設置し、眼球の白目領域に光量 0.2 mcd の微弱な青色光を照射した。その目的は、第 2 章で述べたように、白目領域に存在する血管像の濃淡コントラストを強調するためである。

眼球から 4.5 cm 離れた位置に 4.7 インチのモニターが設置され、映像コンテンツを提示した。本実験では、画像解像度 720 × 480 pixel、撮像速度 59.94 fps で眼球回旋運動計測を行った。

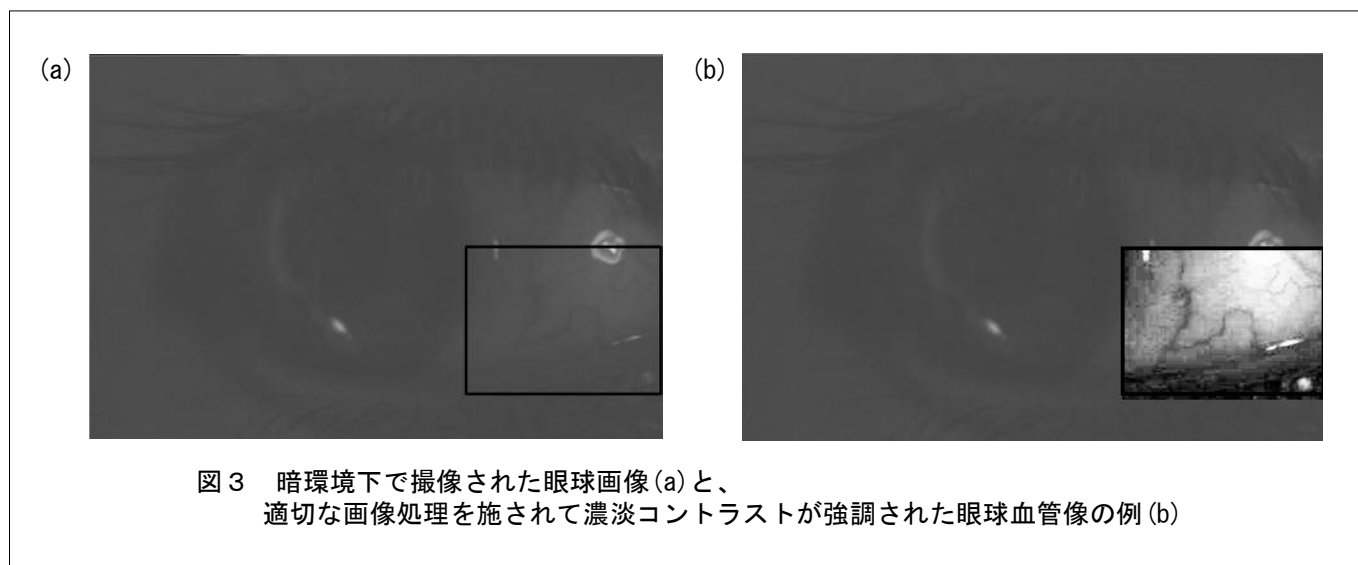
3.2 画像処理

暗環境下で撮像された眼球画像、もしくは HMD 等で遮光された状態で低輝度の映像コンテンツを観視している場合には、図 3(a)に例示するように、眼球の白目領域（強膜および結膜）と、そこに存在する血管像は不明瞭にしか写らない。黒色枠内における輝度値のヒストグラムを求めると、輝度値の度数が偏って分布しており、そのため血管像と白目領域と血管像との濃淡コントラストが小さく、血管像を適切に抽出するのが簡単ではない。

そこで、詳細説明は省略するが、適切な画像処理を行うことで、この問題の解決を図る。すると、図 3(b)

装用を感じさせない眼球運動計測装置の開発

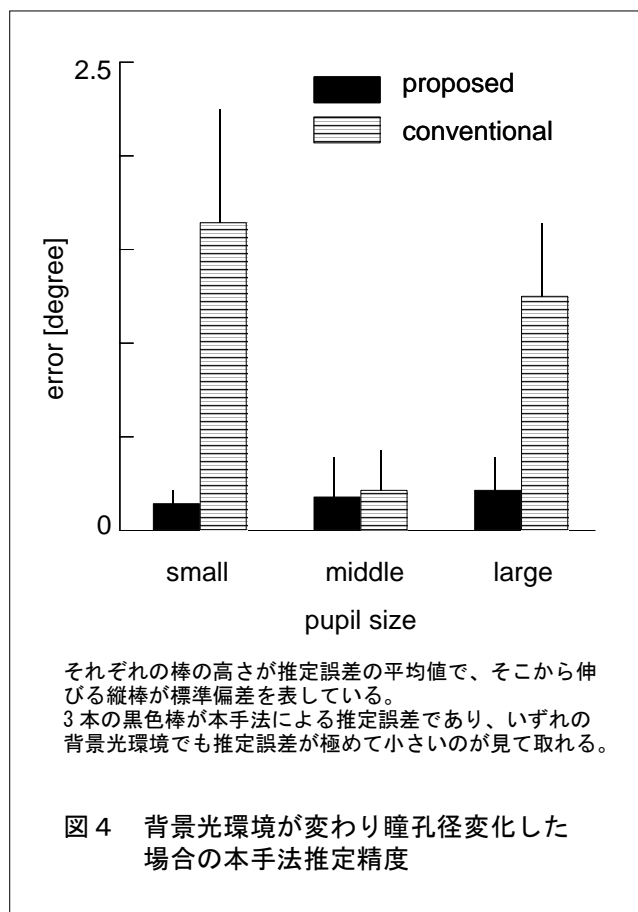
Eye-movement measurement system with low level of mental workload



に例示するように、同じ眼球画像の場合でも、白目領域と血管像との濃淡コントラストが大きくなり、血管像が強調される。

4. 推定精度

従来法の「虹彩の濃淡パターン」(虹彩紋理)を用いる方法と、「白目血管映像の端点」を追った本手法とでは、例えば、精度が格段に異なる。図4は、第2章で述べた手法により、眼球回旋運動推定を行った結果である。瞳孔径が小・中・大(すなわち、周囲の光強度が強・中・弱)の場合の本手法(黒色棒)と、従来手法(横線棒)との計測誤差をプロットした。同図から、背景光強度が変化し瞳孔径が変わっても、本手法の精度がきわめて良好なのが見て取れる。平均誤差 0.24 度以下での眼球回旋計測が可能であり、計測限界である分解能付近の値となった。従来手法は、まばたきにより一部でも映像が遮蔽されると、推定精度が格段に低下するだけでなく、瞳孔径が変化すると虹彩紋理の位置や形も変化するため、光環境も厳密に統制する必要があったが、本手法では、虹彩付近でかつ瞳孔中心から真横にある血管映像を特に用いるため、まばたきや視線移動により遮蔽されにくく、背景光変化の影響も受けなため、昼夜を問わず計測が可能である。なお、推定誤差を求めるための真値(ground truth; グラウンドトゥルース)は、実験者がフレームごとに目視により求めた眼球回旋角度である。



さらに、画像読み込みと回旋角度算出処理を並列化させることにより、画像読み取り速度を 16.6 ms (60 fps) に設定しても異常なく動作するため、本システムの処理速度は 60 fps か、それ以上の速さであった。

装用を感じさせない眼球運動計測装置の開発

Eye-movement measurement system with low level of mental workload

5. まとめ

超小型で超軽量な眼球運動計測装置であるなら、例えば、長距離ドライバのよそ見や居眠りの検出、突然の体調不良の検出と予測などが期待できる。また、どこを見て運転しているかなども、安全運転の観点から極めて重要である。例えば、2015年度の情報では、バス 58,793 台、タクシー243,247 台、商用トラック 1,399,418 台の合計 1,701,458 台が国内に保有されており、バス運転者数 74,644 人、タクシー運転者数 371,245 人、商用トラック運転者数 1,399,418 人（トラック 1 台 = 1 運転者と仮定）の合計 1,845,307 人が自動車運転に従事している。自動車運転者、特に長距離・長時間ドライバの運転状態や体調のモニタリングは、極めて重要である。

また、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）は、IT 戦略に革命を起こすであろうハードウェア・ブレイクスルーの一つと見なされているが、世界中の 2016 年の HMD 出荷台数が約 1,000 万台だったのに対して、2020 年には 1 億 1,000 万台にも達するとの予想がある。それに伴って、映像酔い、3D 酔い、VR 酔いが大きな問題になることも予想され、ユーザや装着者に生体負担を与えないようにしつつ、体調や心理状態を長時間モニタリングする仕組みが必要となる。

本稿では、スマートグラス程度の大きさと重さで、かつ頭部への強固な計測装置固定が要らないため長時間のモニタリングが可能で、しかも、ゴーグル等による背景光遮光も要らない、高精度の眼球運動計測システムについて紹介した。中心となる技術は、ほとんど明るさを感じないくらいの、ごく微弱な青色光を眼球白目部分に照射し、それにより、濃淡コントラストを向上させた血管映像を高速かつ高精度に追跡する技術である。これにより、装用を感じさせずに、昼夜を問わず長時間の眼球運動計測が可能となる。カメラの画質も、VGA 程度の解像度があれば十分な高精度推定ができるため、超小型カメラでのシステム実装が可能である。システム評価実験では、通常程度の仕様の PC を用いて周辺の光環境を変えた場合でも、処理速度 60 fps 以上で平均誤差 0.24 度以下での高精度の眼球回旋計測が可能であった。

参考文献

- [1] 中込広幸, 星野 聖: “結膜血管端検出による高速高精度眼球回旋計測,” 信学論 (D), J96-D, 4, pp.876-884, 2013.
- [2] K.Hoshino and H.Nakagomi: “High-accuracy measurement of rotational eye movement by tracking of blood vessel images,” 36th Intl. Conf. IEEE Engng. in Medicine and Biology Society, 19870778, pp.6339-6344, 2014.
- [3] K.Hoshino, N.Ono, M.Tomida, N.Igo: "Measurement of rotational eye movement with blue light irradiation," Proc. 3rd Intl. Conf. on Biomedical and Bioinformatics Engineering, pp.50-54, 2016.
- [4] K.Hoshino and N.Ono: “Measurement of eyeball rotational movements in the dark environment,” WACV2017 Workshop on Human Activity Analysis with Highly Diverse Cameras, pp.75-80, 2017.

この研究は、平成 25 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 26 ~ 27 年度に実施されたものです。