アイカメラの自動追尾焦点制御装置に関する研究

渡辺　真一[*]　小野　崇弘[*]　春日　恵介[*]　田中　興一[**]　宮口　孝司[**]　星野　公明[**]　丸山　英樹[**]

A Study on Homing Eye Camera System

WATANABE Shinichi[*], ONO Takahiro[*], KASUGA Keisuke[**], TANAKA Kouichi[**],
MIYAGUCHI Takashi[**], HOSHINO Kimiaki[**] and MARUYAMA Hideki[**]

抄　　録

運転者の危険予知能力に関する運転適性を測定するために開発された実映像シミュレータに搭載される、視線検出カメラ（アイカメラ）の瞳孔自動追尾システムに関する開発を行った。装置の仕様は、被験者の無意識は頭部の揺動に伴う瞳孔の動きを測定して、決定した。さらに、ステッピングモータによるサーボ機構を構築し、無意識は被験者の頭部の揺動に対して、有害な振動を発生すること無く、瞳孔を自動追尾することを確認した。また、この機構を実映像シミュレータと組み合わせ、総合実験を行った結果、視線の誤差５０mm以内で視線を検出し、精度の高い運転適性診断が可能になった。

1. 緒　　言

運転者の高齢化による運転技術の低下や、初心者等への安全運転技術に対する適切な指導には、その人の運転適性を客観的に評価する必要があり、ハンドル操作の正確さや刺激に対する反応時間等、の身体能力に関する適性や、性格に関する適性などが調べられていた。しかし、最近、危険源の発見や危険を予知する能力すなわち危険予知能力が、安全運転をするうえで重要であることが分かってきた。危険予知能力の向上は、運転教習等でも重視されている。

危険予知能力は、被験者がその状況において、注意を払うべき対象に対して、どれだけ注視しているかを、被験者の視線を測定することによって評価する。危険予知能力を測定する装置は視線を検出するカメラであるアイカメラと模擬運転装置とから構成される。しかし、市販のアイカメラは（１）高価、（２）被験者に装着することによる不快感がある、（３）測定準備時間が非常に長い、等の問題から、実用化には至っていないのが現状である。

新潟通信機㈱は、被験者に装着することなく視線を検出することのできるアイカメラと、これを搭載した模擬運転装置（実映像シミュレータ）から構成される危険予知能力評価装置を開発した。この装置は、被験者にアイカメラを装着しないため、測定に際して苦痛を与えることはない。しかし、視線の測定には、高い精度が要求されるため、被験者の眼球付近を大きく拡大する必要があるが、アイカメラが固定されているため、被験者の無意識な動きによってアイカメラの撮影範囲から瞳孔が外れ、視線検出が困難になるという問題がある。

そこで、本研究では、被験者の無意識な動きに対して、アイカメラが瞳孔を自動追尾する瞳孔自動追尾システムを開発することによって、この問題を解決した。

2. 視線測定の方法

図１に、視線測定の方法を示す。外光の影響を軽減させるため、眼球周辺に LED を用いた赤外線投光器により赤外線を照射する。

*　新潟通信機株式会社
** 研究開発センター

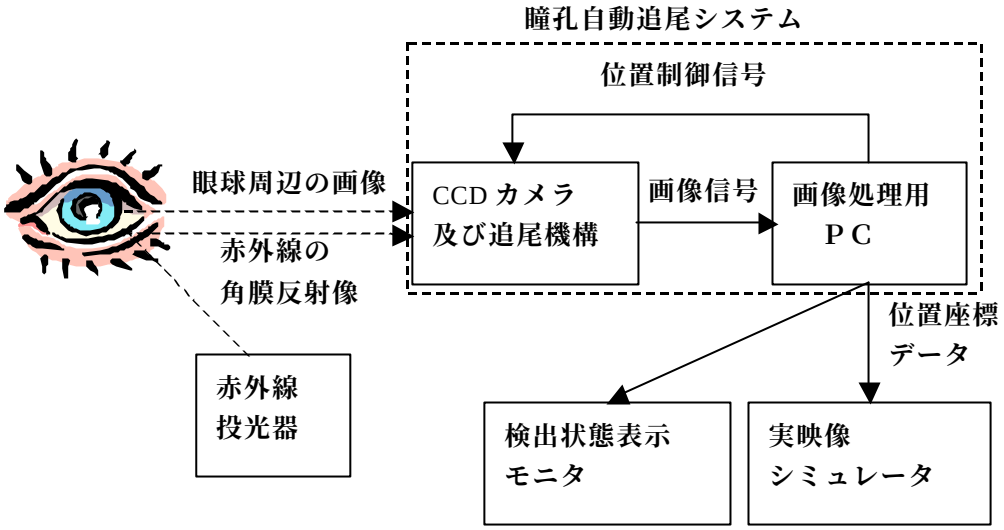


図１　視線測定の方法

眼球表面は涙で濡れており、角膜表面は鏡面である。また、赤外線投光器からの直接反射光は反射の法則に従って CCD カメラに到達するが、角膜表面形状が球形であるので、角膜表面での反射角度は、眼球の回転方向によらず一定であり、瞳孔の回転に対する基準となる。同時に、赤外線投光器によって照らされた眼球周辺部の形状が、CCD カメラによって撮影される。CCD カメラのレンズ部には、900nm 以下の波長をカットするフィルターがセットされ、赤外線のみを受光する。眼球周辺部の形状は赤外線の反射率と CCD の受光感度の積に比例したグレイスケールによって、画像信号化される。画像信号は、NTSC 信号化され、画像取り込みボードから PCI バスを介して、画像処理用 PC に送られる。

数値化された画像データから、画像処理ライブラリを用いて、瞳孔と赤外線投光器の直接反射光（プルキニエ像）の範囲を求める。検出に用いた画像処理ライブラリーには、閾値、面積、真円度、座標範囲等を用いている。検出した瞳孔とプルキニエ像の走査線方向とその直角方向の最大及び最小値の中点を中心座標として求める。

視線の位置は、画面の複数点を注視することによって計測された瞳孔とプルキニエ像の中心座標の相対位置を線形近似することによって求める。視線の位置は実映像シミュレータに送られ、危険予知能力評価に用いられるとともに、画像が検出状態表示モニタに表示される。

瞳孔自動追尾システムは、数値化された瞳孔位置によって、CCD カメラに取り付けた追尾機構をフィードバック制御することによって瞳孔を自動追尾する。

3.　瞳孔自動追尾システムの運動仕様

3.1　実験方法

瞳孔自動追尾システムに必要な仕様を求めるため、実映像シミュレータを操作しているときの被験者の無意識な動きを測定した。瞳孔の移動量は，既存の画像処理された瞳孔の位置座標をテキストデータで書き出して解析した。

パン方向（ｘ方向）は水平方向のカメラの回転を、チルト方向（ｙ方向）は鉛直方向のカメラの回転として，CCD カメラの画素データを基に，実際の瞳孔位置を算出した。また、被験者の体格の違いを考慮した追尾カメラに必要な可動範囲の仕様を決定した。

3.2　実験結果

図２は瞳孔位置測定の一例である。横軸は時間を、縦軸に瞳孔の位置を示している。瞳孔の移動は、高速で移動する部分とゆっくり移動する部分に分けることができる。高速で移動する部分は、座り直しや首の回転によるもので、ゆっくり移動する部分は、無意識な頭部のによるものである。測定結果から、瞳孔の最高移動速度は約 50mm/s であった。瞳

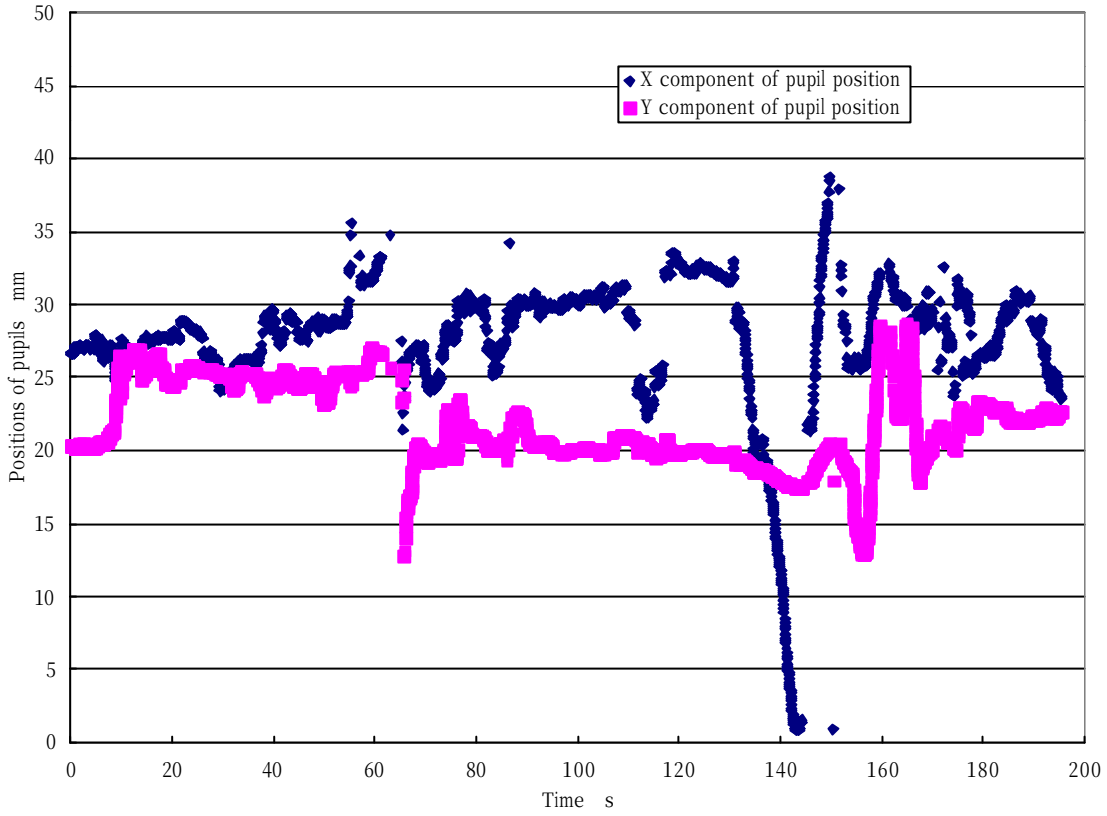


図 2　瞳孔位置測定の一例

孔自動追尾システムは、最高速度の 2 倍の 100mm/s の頭部の揺動を追尾可能とした。実験によって決定した、自動追尾システムの仕様を表 1 に示す。

表 1　自動追尾システムの仕様

角速度	15 deg/s
パン角	±45 °
チルト角	55 °
駆動トルク	0.45mkgm^2
寸法（高さ×幅）	150mm×200mm 以内

4.　追尾機構部の製作

瞳孔自動追尾システムの追尾機構部の外観を図 3 に示す。このシステムは、バイポーラステッピングモータに対する駆動シーケンスを発生させる PWM 電源内蔵の IC を用い、TTL オープンコレクタ出力されるパルス列を受信して、2 軸のステッピングモータドライバーを設計・製作し、パン及びチルト方向の姿勢制御に必要なサーボ機構を構成した。

装置はチルト機構をベースに構築されており、必要回転範囲の広いチルト方向に対して大きな可動範囲を確保することができた。

これとは別に、ＤＣモータ駆動による方法も検討・試作したが、小型モータやロータリーエンコーダが高価であり、また低速での

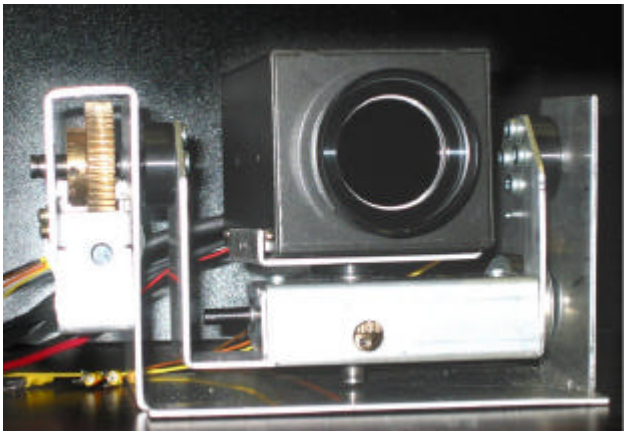
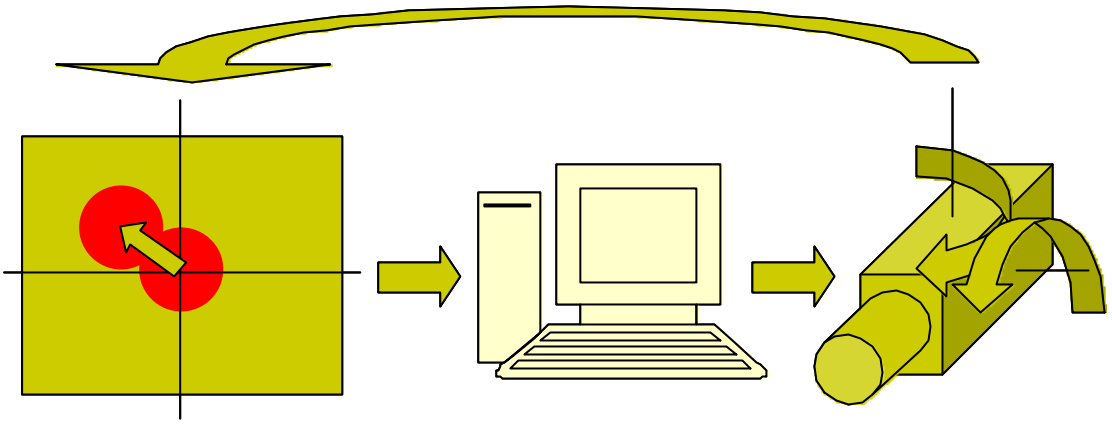


図 3　追尾機構部の外観



1/30秒間隔で撮像中心に
対する瞳孔中心位置を検出

瞳孔位置に比例する
デジタル信号を送出

瞳孔中心を撮像中心
に一致するようにカメラ
がパン・チルトする

図 4　制御の流れ

トルクが非常に低くなる、安価な DC モータではブラシの寿命が短い、ブラシによるノイズが制御系に悪影響を与える可能性がある、等の理由で、ステッピングモータの方が有利と判断した。

制御方法を図 4 に示す。(a)カメラに写った瞳孔の画像処理から瞳孔の中心位置を計算し、パソコンのデータバスを介して計算したパルスをステッピングモータコントローラに送る。（b）ステッピングモータコントローラは設定した加減速度および速度でパルスをステッピングモータドライバに送る。（c）パルスモータが指定どおりに回転する。カメラが移動することによって、画素上の瞳孔位置が変わり、再度ステップ(a)に戻る。この動作は画像中心付近の設定した画素の範囲に瞳孔が入るまで繰り返す。

図 5 にフィードバック制御におけるブロック線図を示す。$\varepsilon_x(k)$ および $\varepsilon_y(k)$は k 番目のサンプリング時の瞳孔中心位置の画面中心からの x および y 方向の距離である。伝達関数 Gx および Gy によってパルス数に変換される。Gx は次式で表される。

$$G_x = \frac{P}{EN} + \frac{D}{EN}\left(\boldsymbol{e}_x(k) - \boldsymbol{e}_x(k-1)\right) \quad (1)$$

$\varepsilon_x(k\text{-}1)$は、一つ前のサンプリング時における瞳孔中心位置の画面中心からの x 方向の距離である。P および D はそれぞれ比例動作および微分動作に関する定数であり、EN より小さい。第 2 項は、瞳孔の速い動きに対応するためである。パルス数 n_x は

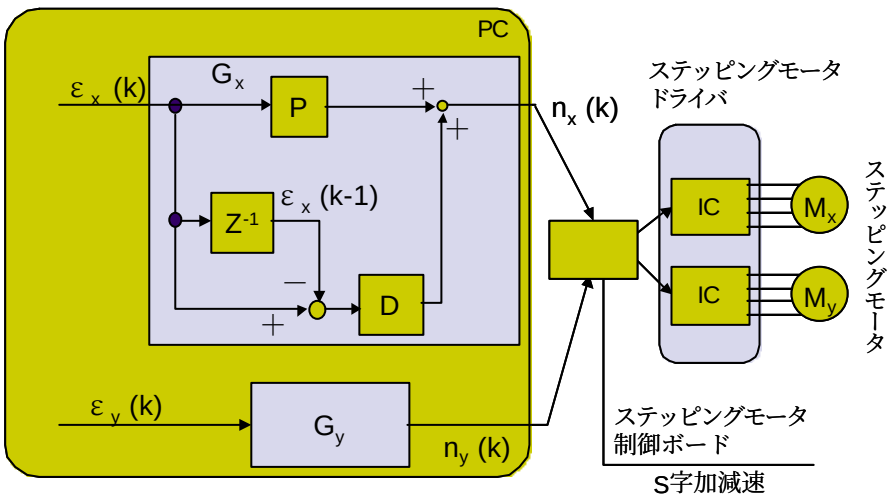


図 5　ブロック線図

$$n_x = G_x e_x \qquad (2)$$

である。同様にｙ方向に関しても計算する。

機構部の剛性が低く、振動に対する減衰が不十分である場合、機構に振動が発生し、安定した視線測定ができないが、要求された仕様に対して有害な振動は発生せず、機構が十分な剛性と減衰特性を有しているといえる。

瞳孔自動追尾システムはこのサーボ機構によって、通常の無意識な頭部の揺動であれば、特別な目印をつけることなく、アイカメラが自動的に瞳孔を追跡することが可能になった。

最後に、瞳孔自動追尾システムと実映像シミュレータを組み合わせ、運転適性試験を複数の被験者に対して行い、無意識な頭部の揺動に対して十分な視線の検出が可能であることを確認した。頭部の揺動に対する視線の誤差は５cm 以内に抑えることができた。

5. 結　　言

（１） 該 PC の瞳孔を検出するソフトウェアー内で、画素数および移動速度に比例するステッピングモータへのパルス数を計算する制御アルゴリズムを構築した。

（２） バイポーラステッピングモータに対する駆動シーケンスを発生させる PWM 電源内蔵の IC を用い、TTL オープンコレクタ出力されるパルス列を受信して、2 軸のステッピングモータドライバーを設計・製作し、パン及びチルト方向の姿勢制御に必要なサーボ機構を構成した。

（３） 衝撃を低減させる S 字加減速動作を付与し、パン及びチルト方向の合速度を制御速度とするクラス命令によってパルス列を発生させるボードを採用した。

（４） ステッピングモータによる、カメラを搭載するに十分な剛性を有し、制御に伴う振動によって自励振動が発生しないために十分な高固有振動数と減衰特性および幅広い体型の被験者に対して測定するための可動範囲を有するパン・チルト運動機構を設計・製作し、上記ソフトウェアー及び電子回路とともにサーボシステムを構築し、被験者の瞳孔を自動追尾するシステムを完成した。

これらを、模擬運転シミュレータとして総合的に動作させ、被験者の運転適性を判定するシステムを構築した。