

人の眼球と頭部の協調運動を考慮した視線推定

沖中 大和¹ 満上 育久¹ 八木 康史¹

概要：注視情報は人の意図・興味・関心を理解する上で極めて有用であり，商業施設等でそこにいる各人の注視を知ることができれば，商品に対する興味の推定や，万引き犯の検出などへの活用が期待できる．人の注視方向を得る方法として据え置き型およびウェアラブル型のアイトラッカーが一般に利用されるが，使用範囲や対象者が限定され，これらの応用には不向きである．一方，カメラによる俯瞰映像から人の頭部方向を推定し，それを注視方向とみなして用いる研究も存在するが，人の自然な注視行動において頭部方向と注視方向は一般には一致しない．そこで本研究では，単に頭部方向を計測することで注視方向とするのではなく，前庭動眼反射と呼ばれる人の注視行動において見られる頭部・眼球制御モデルを考慮して，より正確に注視方向を推定する手法を提案する．人に胴体カメラ・頭部カメラ・アイトラッカーを着用させ収集した映像データセットを用いた実験により，提案手法を適用することで，単に頭部方向を注視方向と推定するのに比べて高い精度で注視方向を推定できることを確認した．

キーワード：視線推定，アイトラッカー，Structure from Motion，眼-頭部協調運動，前庭動眼反射

1. はじめに

人は，五感（視覚・聴覚・嗅覚・触覚・味覚）を通して周囲のさまざまな情報を取り入れている．その中でも特に視覚は，これら五感から得られる情報量全体の実に 80%以上を得ていると言われる重要な感覚である．また，人は興味を持った対象に自然に目を向けるため，それを観測することは人の意図・興味・関心を知る上で非常に有用である．例えば，商業施設などで人がショーウィンドウの中のどの商品に目を向けたかが分かれば，その人の興味のある商品が分かり，その人に応じた効果的な広告提示や販売促進活動を行うことができると期待される．あるいは，ある人が商品ではなく防犯カメラや店員ばかりに視線を送っているという不自然な挙動を発見できれば，万引き犯の未然検出に活用できる可能性がある．

人の視線方向を得る際に一般に用いられるのはアイトラッカーである．アイトラッカーには，Tobii Pro TX300 や NAC EMR ACTUS，Eye Tribe 等の据え置き型のものと，Tobii Pro Glass や NAC EMR-9，Pupil Headset 等のウェアラブル型のものがあり，目的に応じて選択・利用されている．例えば，Ville ら [1] の研究では，ヒューマンコンピュータインタラクション用のデバイスとして EMR-9 を用いており，また，今野ら [2] は卓上でのコンピュータ

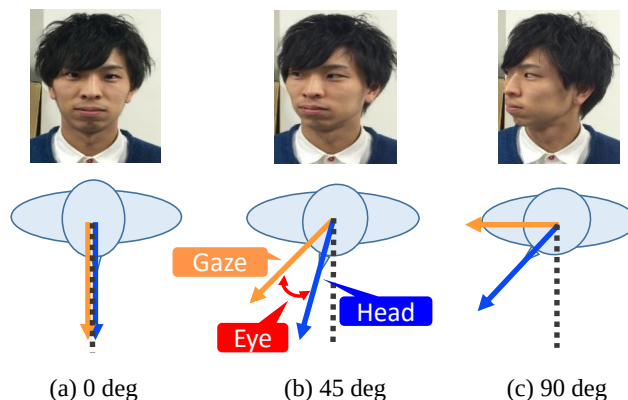


図 1: 眼球と頭部の回転による注視方向決定

操作のために据え置き型のシステムを開発している．これらの手法は眼球を直接計測しているため得られる視線方向の信頼性は高い一方，据え置き型の場合は計測が可能な範囲が非常に限定される，ウェアラブル型の場合は人がその装置を意図的に着用しなければならないなどの制約を有する．上述のような応用を考えた場合，広範囲にいる不特定多数の人の視線情報を得る必要があり，これらのアイトラッカーはいずれも，これらの応用には向かない．

一方，防犯カメラ等から得られる俯瞰映像からそのシーンを行き交う人々の注視を推定する研究 [3], [4] も存在する．これらの映像において人の目が占める面積は一般に非常に小さく眼球の向きを捉えることは不可能なことから，これらの研究では人の頭部方向をパターン認識の手法によ

¹ 大阪大学
Osaka University

り推定し、その頭部方向を視線方向とみなしている。しかし、これは図 1(a) に示すように正面方向を向いている場合のみ成り立ち、同図 (b),(c) のようにそれ以外の任意の方向を注視する際には人は頭部と眼球を回転させることでその方向を注視しており、一般に頭部方向と注視方向は一致しない。すなわち、頭部方向で注視方向を代用する方法は一般に正確な注視方向を与えない。

そこで本研究では、眼球を直接計測することなく、しかし頭部方向による簡易な近似ではなく、より正確な注視方向推定を可能とする手法を提案する。この提案手法で利用するのは、人の注視行動において表れる眼-頭部協調運動 [5], [6] のモデルである。特に、ある対象から別の対象に注視が推移する（サッカード）際に見られる前庭動眼反射を考慮したモデルを用いることで、人が注視しているであろう方向を正しく推定する。この前庭動眼反射モデルは制御則で記述されるが、提案手法では頭部方向から解析的に注視方向を算出するために、このモデルをダンパー有りのバネモデルで近似している。人に胴体カメラ・頭部カメラ・アイトラッカーを着用させ収集した映像データセットを用いた実験により、提案手法を適用することで、単に頭部方向を注視方向と推定するのに比べて高い精度で注視方向を推定できることを確認した。

以下に本論文の構成を述べる。2 章では、アイトラッカーのようなデバイスを用いずに視線推定を行っている関連研究を示し、3 章では眼-頭部協調運動について詳しく説明する。4 章で頭部の運動より視線方向の推定を可能にする手法を提案する。そして 5 章ではそのモデルを用いて実験をして得た推定結果を既存手法である頭部方向を視線方向する場合と比較し、提案手法の有効性を確認する。

2. 関連研究

眼球を計測することなく注視を推定するアプローチとしてよく論じられるのは、Itti らによって提案された視覚的顕著性マップ [12] である。顕著性マップとは、人間の視覚処理を模した計算を行うことで、注意を向けやすい領域を推定して出力するものであり、入力画像に対して、その色や輝度、エッジ方向などの特徴を元に、各画素に顕著性（興味を引く度合い）を表す値を与えたものである。菅野ら [13] は、一人称視点から撮影された映像からこのモデルによって得た顕著性マップと眼球の動きの情報を組み合わせることで一人称視点における顕著性マップを用いた視線推定の性能を示している。しかし、顕著性マップはあくまでも各画素が統計的・確率的にどれだけ注意を引きやすいかを表すものであり、人間の時々刻々の視線方向を与えるものではない。

一方、視線方向を推定するための手段として、視線方向と人の振る舞いとの関係性について調査した研究がいくつか存在する。岡田らは、本研究と同様に眼球の直接計測

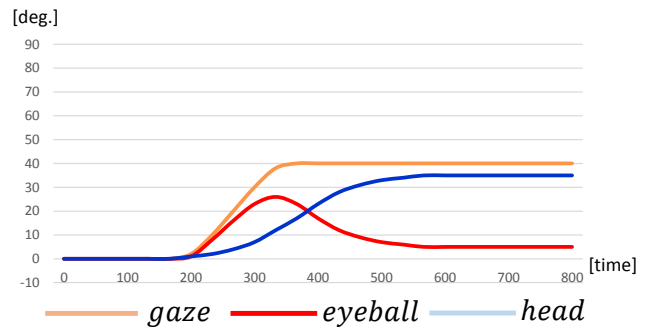


図 2: 前庭動眼反射

を行わず人の歩行動作から注視推定を行うことを目的に、注視方向と人体各部位の運動の関係性について調べている [7]。この研究では、Stahl ら [8], [9] や Fang ら [10], [11] が示した頭部方向と眼球方向の線形性に基いている。しかし、これらは、注視点を固定している状態における頭部・眼球の静的な関係であり、注視点を遷移させる際に生じる頭部・眼球の関係である前庭動眼反射等の動的な性質は考慮していない。

3. 眼-頭部協調運動

本章では眼-頭部協調運動について説明する。人は眼球運動だけではなく頭部運動も利用して視線方向を変更している。固定された注視点を見ている時、頭部と眼球の回転角度には線形の関係があることが岡田ら [7] や Fang ら [10], [11] によって示されている。また、他の注視点へと注視方向を変える時、眼球と頭部は同じ速さで遷移先の注視方向に向かって直線的に動くといった単純な動きではなく、図 2 のように複雑に連動している。このグラフからわかるように、注視点を変更しようとする瞬間、まず眼球が急速に注視の遷移方向に動き出す。この運動はサッカードと呼ばれ、注視対象の像が網膜の中心にくるようにするために行われる、人の注視点を変えるという意味にもとづく眼球運動である。その後、頭部は少し遅れて眼球の動きを追うように眼球と比べて遅いスピードで同じ方向に動いていく。これは、眼球よりも頭部は重いため速く動かないからである。やがて頭部が注視の遷移方向に動くにつれて、眼球はその頭部運動とは逆方向の運動をしている。これは前庭動眼反射 (Vestibulo-Ocular Reflex: VOR) と呼ばれる眼球運動の神経制御である。仮に頭や体の動きに伴って眼球が一緒に動いてしまうと、網膜上の外界映像が動揺してしまい、視覚の明瞭性は無くなる。そういった現象を防ぐために、神経反射的に頭の運動方向と反対方向に眼球は動いている。たしかに、図 2 より、まず先に眼球が動き出し、それを追うようにやや遅い速さで頭部が動き出しておりそれと同時に眼球は頭部とは逆方向に動き、十分時間がたった後、視線の遷移が完了する様子を観察できる。この挙動は実際の頭部と眼球の挙動にも現れる。

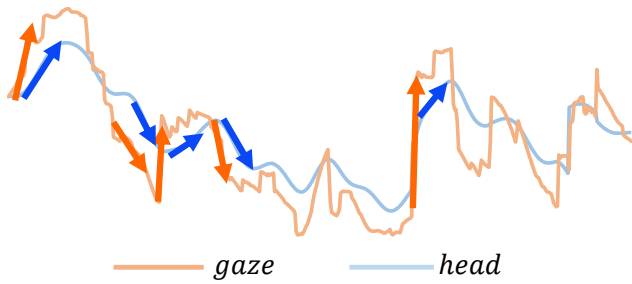


図 3: 実際の頭部方向と注視方向に現れる前庭動眼反射

図 3 は実際に観測した眼球角度と頭部角度の変化のであるが、この様子を観察するとたしかに、まず先に視線が注視点に向けて変化し、その変化に対して少し遅れて動き出し視線の変化よりもやや遅い速度で頭部が注視点の方向へ動いていることがわかるという眼球と頭部の挙動のペアが多く見られる。

人の頭部と眼球は以上のような複合運動をしており、これらの関連性は眼-頭部協調運動と呼ばれている。人間は反射的に眼-頭部協調運動を行っており、この運動を考慮することで視線推定を行うことができると考えた。その手法を次の章で説明する。

4. 眼-頭部協調運動を考慮した視線推定

本章では第 2 章で説明した眼-頭部協調運動を考慮して行うことのできる手法を提案する。一連のシーケンスに対して各フレームにおける頭部方向から最も高い精度で視線方向を求めることのできるモデルを提案する。このモデルとして人間の眼-頭部協調運動の関係を表現できるモデルを提案し、頭部運動をそのモデルへの入力とすることで、出力として視線の推定方向を得る。

4.1 視線推定モデル

図 2 に見られる、視線方向の変化に対して、頭部方向が時間差を持って引っ張られるように動く挙動はまるでバネの弾性のようなものである。そこで、2 球がバネに繋がれたモデル(図 4)を考え、オレンジ色の球を視線方向、青色の球を頭部方向の動きに見立てる。オレンジの球は大きさや質量、球が受ける力は考慮しないものとし、一方、青の球はバネに繋がれたオレンジ色の球の動きによってのみ力を受け引っ張られ、また、頭部角度は視線角度と比べて変化の速度が遅いため、青の球は速度に比例する粘性抵抗を受けるものと定義する。

まずオレンジ色の球を持って素早く動かす。するとバネの弾性により最初は青色の球は動かずバネのみが伸びる。しばらくするとバネに引っ張られて青色の球が動き出す。この動きは人は注視点を変え始める時の視線方向と頭部の動きの関係と一致している。また、オレンジ色の球を動かすことを止めたとき、それにやや遅れて青色の球も止ま

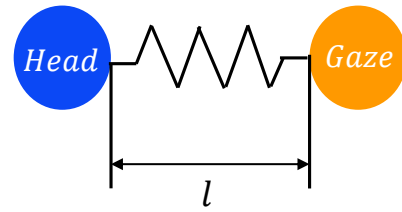


図 4: 提案モデル (静止状態)

damper: $\lambda X'(t)$

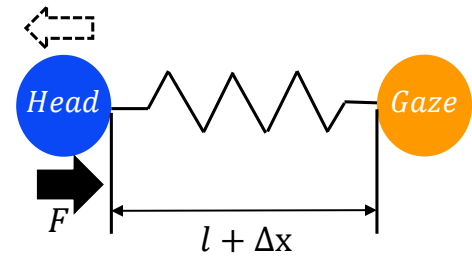


図 5: 提案モデル (Gaze が変動した場合)

る。これらの動きは、たしかに図 2 に示した視線方向と頭部方向の動作に近い挙動となっている。なので、このモデルを元に視線推定を行うことで眼-頭部協調運動を考慮した視線推定を行うことができる。

そこで、この 2 球の関係を物理式を用いることで表す。バネの自然長を l 、図 5 のようにバネの伸びを Δx とし、粘性係数 λ を使って速度に比例する粘性抵抗を考慮することによってオレンジ色の球を動かしたときの青色の球に関する運動方程式は、(1) と表せる。 $g(t)$ と $h(t)$ はそれぞれ、オレンジ色と青色の球の位置を位置を表す連続関数とした。

$$F = mh''(t) = k\{g(t) - h(t) - l\} - \lambda h'(t) \\ \iff g(t) = ah(t) + bh'(t) + ch''(t) + d \quad (1)$$

この線形式を頭部運動から視線角度を推定する視線推定モデルとして定義する。

4.2 視線推定モデルの係数の決定

前節で提案した視線推定モデルは、フレーム数 T の一連のシーケンスに対して以下のような行列式 (2) に変更できる。

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h'_1 & h''_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_T & h'_T & h''_T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 h_t , g_t は時刻 t における $h(t)$ と $g(t)$ の値を表す。 $(h(t) = [h_1, h_2, \dots, h_T], h'(t) = [g_1, g_2, \dots, g_T])$

そして、(2) に対して行列 $\mathbf{A}$ (3) を定義し、両辺に左から逆擬似行列 $\mathbf{A}^+$ を左からかけることで最小二乗的に係数 a, b, c, d を求める (4)。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} h_1 & h'_1 & h''_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_T & h'_T & h''_T & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \mathbf{A}^+ \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_T \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし、人の眼球は、極めて短い時間だけ他の方向に向くことがあるなど、一般に非常にノイズの多いシグナルである。そのため、シグナル全体に対して単純に最小二乗的に係数を求めた場合、外れ値の影響にひっぱられて正確な係数を求めることができない可能性がある。そこで、本研究ではこのような外れ値を除外して適切な係数を算出するために RANSAC ベースのアプローチを実装した。具体的な処理手順を以下に示す。

- (1) 一連のシーケンスからランダムに n フレーム取り出し、(2) を作る
- (2) 上記の手順で係数 a, b, c, d を求める
- (3) 入力した頭部方向と 2 で求めた係数を用いて視線推定の方向計算
- (4) その値と実際に計測した視線方向との誤差が x 以下のフレーム数をカウントし、 x 以上のフレームの値は外れ値とみなす。
- (5) そのカウント数が過去最大の場合、そのときの外れ値を持つフレームにフラグを立てておく。
- (6) 1-5 の作業を m 回繰り返す、最終的にフラグが立っているフレームの値を外れ値とみなす。
- (7) 6 で決定した外れ値をもつフレーム以外のフレームを用いて (2) により係数 a, b, c, d を計算する。

最終的に採用された係数を視線推定モデルの係数として決定し、このモデルを使って視線推定を行っていく。なお、本論文に示す実験では $n = 5$, $m = 1000000$, $x = 10$ とした。

5. 実験

第 3 章で説明した視線推定モデルを使って視線方向を推定し、その精度を確かめる。そのために眼球と頭部の動き、そして頭部角度の基準として用いるための胸部方向を事前に計測した。本章ではそれらの角度を計測をする環境と手法を説明し、計測されたデータを使った視線推定結果を示す。

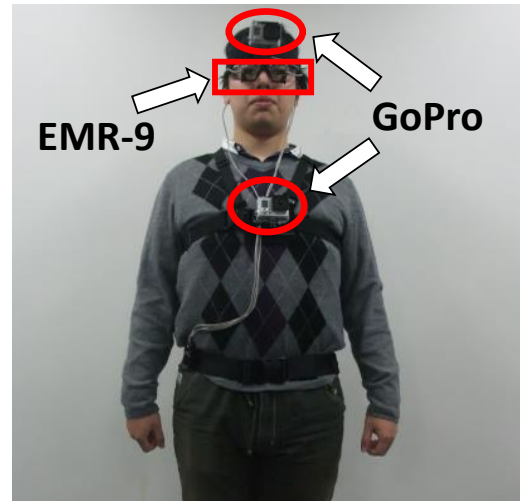


図 6: 被験者が着用する装置構成

5.1 実験環境・計測装置

本研究の目的は、街中で行動する人の視線方向を推定することである。そのため、被験者には実環境に近い環境で自然な振る舞いをしてもらい頭部運動と眼球運動を計測する必要がある。そこで被験者には大阪大学吹田キャンパスの商業施設で買い物をしてもらい、買い物中の眼球、頭部、胸部の運動を計測した。

頭部や胸部のような体の動きを計測する手法としては、VICON などのように環境側に多数のカメラを設置し、人に光学マーカーを貼ることで姿勢推定を行うモーションキャプチャシステムを使う手法が考えられる。しかし、商業施設内で実験を行うため商品棚などがあり、被験者の行動を外部観測する際の障害物が多くある。カメラから被験者に取り付けられた観測点が隠れてしまったら正確に動きを計測することができない。もちろん、すべての遮蔽を無くすようにカメラをさらに増加させれば原理上問題は解消できるが、そのようなアプローチは現実的ではない。

一方、カメラを体に取り付け、そのカメラで撮られた一連のシーケンスの画像群に対して SfM (Structure from Motion) による 3 次元復元を行うことで取り付けられたカメラの世界座標系での 3 次元位置とカメラ姿勢を得ることができ、それを座標変換することによって時時刻々変化する運動を計測する手法がある [14]。この手法では、体が商品棚で遮蔽されるといったことが問題にならない。本研究では、こちらの手法がより適切と考え採用した。

そこで、被験者にはウェアラブルカメラ (GoPro HERO3) を頭部と胸部に装着し、そのカメラで撮られた映像を使ってそれぞれの運動を計測した。さらに、被験者に装着型アイトラッカー (NAC EMR-9) を装着させ、実際の視線運動を計測した。ウェアラブルカメラを頭部と胸部に、さらにアイトラッカーを被験者に装着した様子を図 6 に示す。

被験者に商業施設にて買い物動作をしてもらう際、被験者には購入する商品の指定のみを行い、移動経路や滞在時

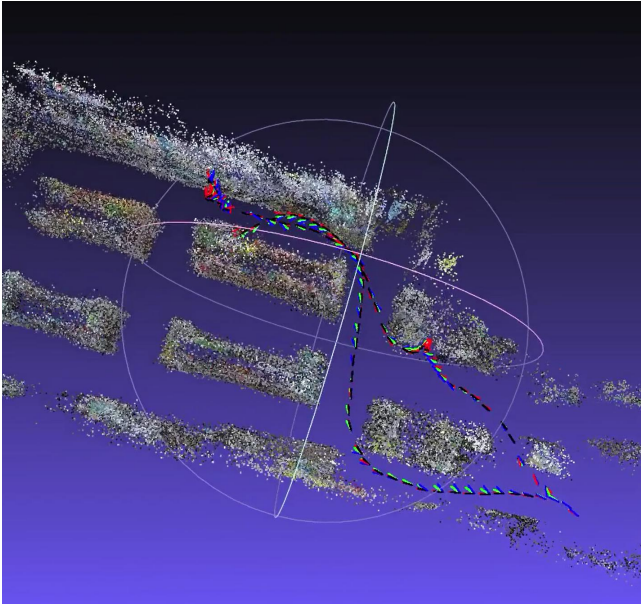


図 7: Structure from Motion による環境とカメラモーションの復元

間、注視するターゲットなどの制限はしなかった。そのため、商業施設内を被験者ごとに自由に行動し、実験中にアイトラッカーや頭部・胸部カメラで撮影された映像を使って Structure from Motion によって 3 次元復元を行い、それぞれのカメラ位置とカメラ姿勢を得た。そこで得たカメラ姿勢を座標変換することによって、胸部方向に対する頭部方向を獲得し、さらにアイトラッカーの注視点座標情報より視線方向を獲得した。3 次元復元によって得たカメラ位置とそれぞれの角度情報を図 7、図 8 に示す。これからわかるように、被験者は自由な経路を、曲がる、振り返る、といった動作をしながら一連の買い物動作を行った。

5.2 分析方法

これらのデータに対して、水平方向に関しては頭部方向と視線方向は胸部方向を基準に、視線方向は頭部方向を基準にして、右側を正、左側を負としてそれぞれ角度を定義し、垂直方向に関しては上側を正、下側を負としてそれぞれ角度を定義した (図 9)。

頭部角度、胸部角度、視線角度のデータに対して、第 3 章で説明した手法を使って視線推定のモデルの係数を求め、そのモデルに頭部方向を入力として与えた出力を視線推定結果とする。そして、実際に計測して得た視線方向と視線推定モデルを使った推定結果、頭部方向を視線方向とした推定結果を折れ線グラフにして定性的に、また、視線推定モデルを使った推定結果と頭部方向を視線方向として推定した結果にたいして実際に計測して得た眼球方向との誤差ヒストグラムをとり、誤差絶対値の平均を求めることで定量的に評価し、提案手法の有効性を確認する。

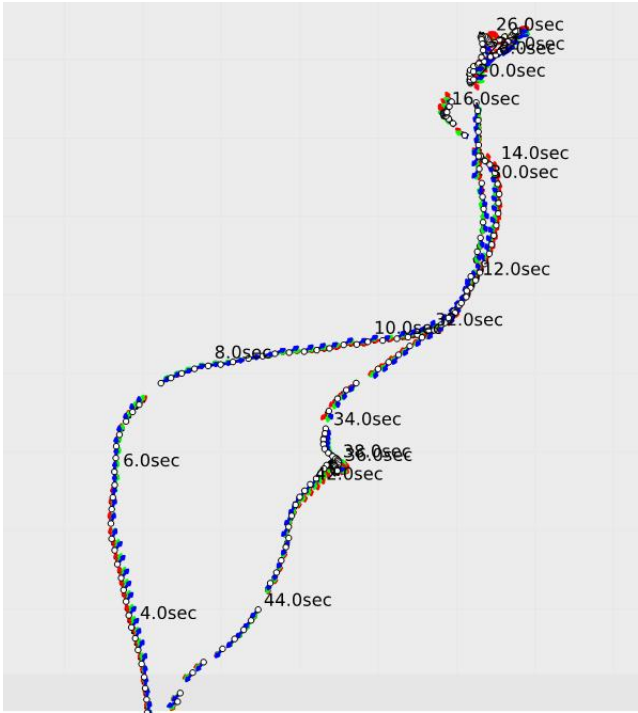


図 8: 胸部方向・頭部方向・注視方向の復元

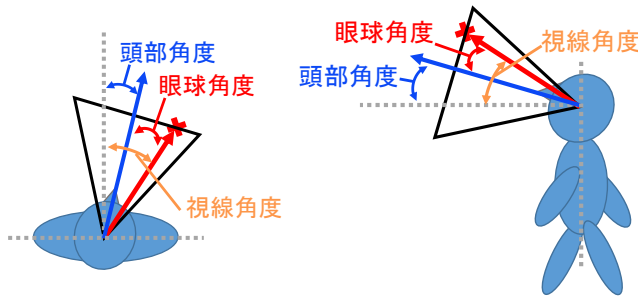


図 9: 頭部角度・眼球角度・視線角度の定義

表 1: 誤差平均 (水平方向)

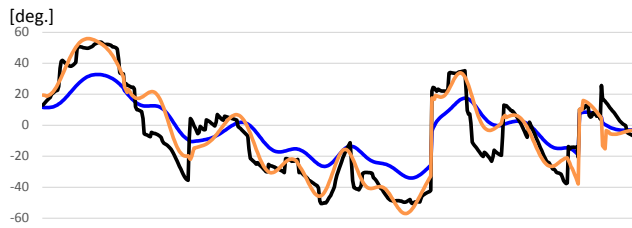
	頭部方向との差	推定視線方向との差
誤差平均 [度]	11.6	7.9

5.3 モデルの有効性の評価

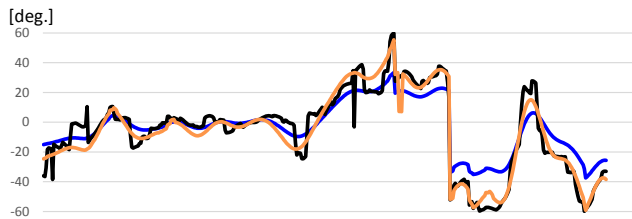
5.3.1 水平成分

横軸に時間、縦軸に角度をとったグラフ (図 10) を載せる。実際の視線方向を黒色、提案手法で推定した視線方向はオレンジ色、頭部方向を視線方向と推定した場合の推定方向を青色の線でそれぞれ表した。

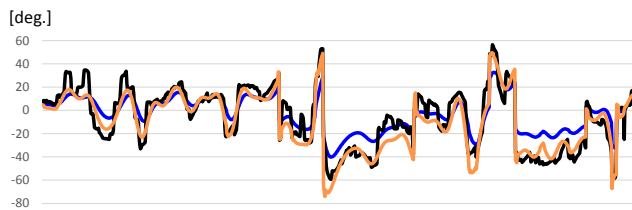
実際に計測した眼球方向に対する誤差を提案手法と頭部方向を視線方向とみなす既存手法についてそれぞれとり、グラフに表したシーンをすべて使ってヒストグラム化 (図 11) した。図 11(a) が、頭部方向を視線方向とみなした場合の真値との誤差ヒストグラム、同図 (b) が、本研究で提案したモデルを用いて推定した場合の真値との誤差ヒストグラムである。また、絶対値誤差の平均をとる (表 1) ことで定量的に精度の評価を行う。



(a) 被験者 A

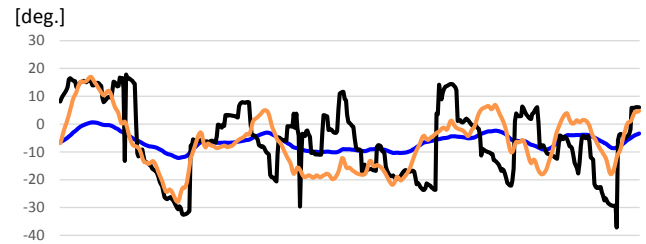


(b) 被験者 B

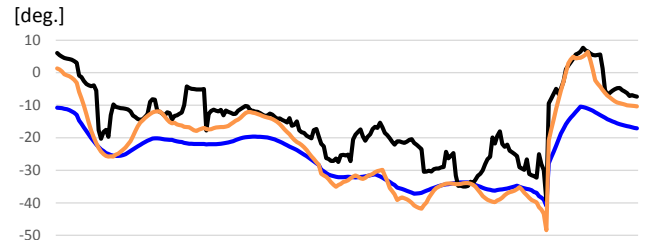


(c) 被験者 C

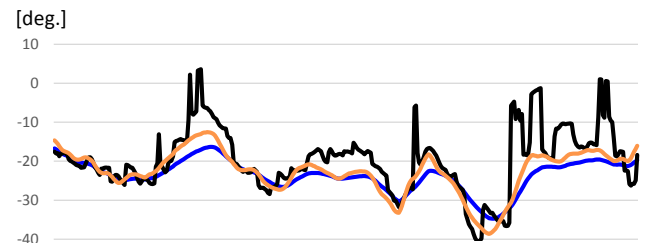
図 10: 水平方向に関するモデル回帰



(a) 被験者 A

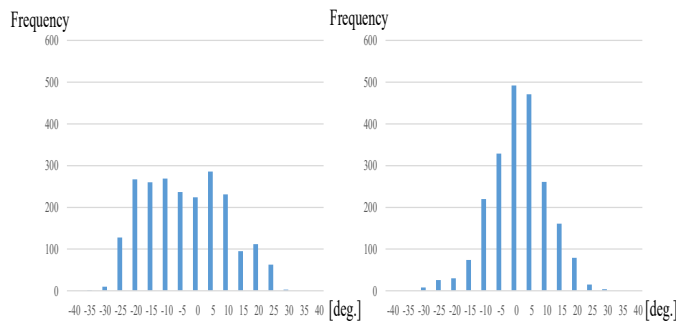


(b) 被験者 B



(c) 被験者 C

図 12: 垂直方向に関するモデル回帰



(a) 頭部方向との差

(b) 推定視線方向との差

図 11: 誤差ヒストグラム (水平方向)

グラフより、たしかに青線で表した頭部方向を視線方向とする既存手法と比べてオレンジ色の線で表した視線推定モデルを用いた推定結果は、黒線の実際の視線方向の動きの特徴を捉えている。また、絶対値誤差平均を提案手法と既存手法と比較すると既存手法に比べて約 30% 向上した。これより、眼-頭部協調運動をバネに繋がれた 2 球にみたてた私の提案する視線推定モデルを用いた視線推定は既存手法と比べてより高い精度で視線を推定できた。

この結果から、水平方向において、眼-頭部協調運動を 2 球がバネに繋がれたモデルに見立てることは正しく、そのモデルを元に提案した視線推定モデルは視線推定において有効であることが確認できた。

5.3.2 垂直成分

水平成分と同様に、横軸に時間、縦軸に角度をとったグラフ (図 12) を載せる。実際の視線方向を黒色、提案手法で推定した視線方向はオレンジ色、頭部方向を視線方向とした場合の推定方向を青色の線でそれぞれ表した。

水平成分と同様に、実際に計測した眼球方向に対する誤差を提案手法と頭部方向を視線方向と推定した場合のそれぞれに対してとり、グラフに表したシーンをすべて使ってヒストグラム化 (図 13) した。図 11(a) が、頭部方向を視線方向とみなした場合の真値との誤差ヒストグラム、同図 (b) が、本研究で提案したモデルを用いて推定した場合の真値との誤差ヒストグラムである。また、絶対値誤差の平均をとる (表 2) ことで定量的に精度の評価を行う。

グラフの結果より、頭部方向を視線方向とした場合と比べて視線推定モデルを用いた推定結果は実際の視線方向の動きの特徴を捉えているとは言えず、絶対値誤差平均を比較しても、推定の精度の向上は確認できなかった。

これらの結果より垂直方向においては、提案したモデルの有効性は確認できず、頭部方向を視線方向とする場合でも精度よく推定できる事がわかった。これは、眼の形が正方形ではなく横長であるため、縦方向の眼球の動きは横方向と比べ小さく、視線方向の変化は頭部の動きに依存して

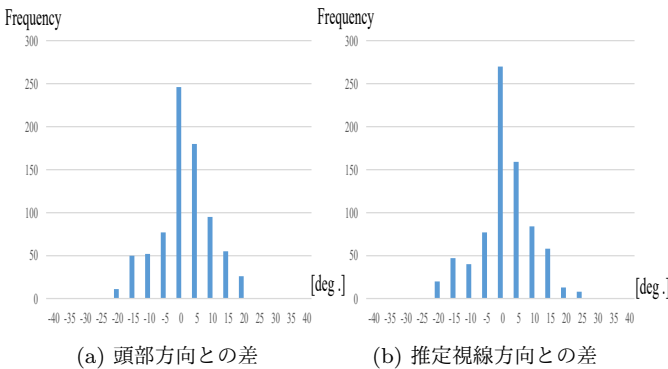


図 13: 誤差ヒストグラム (水平方向)

表 2: 誤差平均 (垂直方向)

	頭部方向との差	推定視線方向との差
誤差平均 [度]	7.9	6.8

表 3: 交差検定による性能評価

被験者	学習	テスト	頭部方向との差	推定視線方向との差
A	シーン 1	シーン 2	9.2	7.7
	シーン 2	シーン 1	9.7	8.2
B	シーン 3	シーン 4	22.2	16.8
	シーン 4	シーン 3	14.9	9.9
C	シーン 5	シーン 6	15.6	10.9
	シーン 6	シーン 5	12.9	9.5

いると考えられる。そのため、提案した視線推定モデルを用いた推定結果と頭部方向をそのまま視線方向とみなす推定結果に差が生じなかった。

5.4 交差検定による性能評価

前節より、水平方向において提案した視線推定モデルの有効性が確認できたため、実験で得た同一被験者の 2 シーンのデータのうち一方を学習データとして用いて視線推定モデルの係数を求め、もう一方をテストデータとして視線推定を行う。学習データとテストデータを入れ替えた推定も行い、この検証を被験者 3 人分、計 6 パターン行った。実際に計測した視線方向との絶対値誤差の平均を、頭部方向を視線方向とした場合と提案した視線推定モデルを使って推定した場合において求たものを表 3 に示す。

すべてのパターンの推定において、視線推定モデルを使った推定結果の絶対値誤差の平均は頭部方向を視線方向とした場合の絶対値誤差の平均よりも小さくなっており、学習データとテストデータが同一被験者である場合においても視線推定の精度の向上を確認できた。このことから、ある被験者において事前に学習を行い、視線推定モデルの係数を求めておけばその被験者の頭部の動きから視線の推定をより高い精度で推定することができると言える。

5.5 考察

眼-頭部協調運動を考慮した視線推定は、水平方向では提案した視線推定モデルの有効性を確認でき、そのモデルを使うことで既存手法と比べて精度は上がり、また、垂直方向では視線推定モデルを使うことによる変化は見られなかった。その理由として人間の目の形状が関係していると考えられる。人間の目は縦の長さより横の長さが大きい。そのため眼球の運動範囲は水平方向は大きく、垂直方向は小さいと言える。このことを考えると、水平方向は眼球運動の範囲が大きいため注視中における眼球運動の依存度が高く、頭部と眼球の連動性は大きいと考えられるので単純に頭部方向を視線方向とするよりも眼-頭部協調運動を考慮した推定の方が高い精度で視線の推定ができたと考えられる。一方、垂直成分は眼球運動の範囲が小さく、注視において眼球運動よりも頭部運動への依存度が高いと考えられるため、眼-頭部協調運動を考慮した推定の精度は単純に頭部方向を視線方向として推定した場合の推定精度とさほど変化がなかったと考えられる。

6. おわりに

本論文では、眼-頭部協調運動と呼ばれる眼球と頭部の関連運動を考慮した頭部方向から視線方向を推定する視線推定モデルを定義し、そのモデルを用いて視線推定を行った。注視点を変更しようとする瞬間にまず初めに眼球が急速に動き出し、その後遅れて頭部が同じ方向に動き出す様子や、頭部が注視の遷移方向に動くにつれて眼球がその運動方向とは逆方向の運動する様子から、それらの眼球と頭部の運動をバネに繋がれた 2 球の運動にそれぞれ見立て、この 2 球の関係を表す物理式を視線推定のモデルとした。そのモデルに頭部方向を入力として与え、出力として視線の推定結果を得た。その推定結果と既存手法の頭部方向を視線方向に対して実際に眼球を計測して得た視線方向に対する誤差をとって評価したところ、水平成分においては頭部方向を視線方向とする既存手法と比べて提案した視線推定モデルを使うことで高い精度で視線方向の推定を行うことができた。一方、垂直成分においては既存の手法とさほど推定精度は変わらなかった。

本研究はまだ初期段階であり、今後多くの課題を残している。1 つは、現在はシーンごとに係数を求め、推定を行っているが、その係数は個人ごとに差があるのかどうか、また同じ行動をしていれば異なる被験者でも似た値になるのかどうか、といった個人内・個人間のモデルの一貫性に関する調査が不足している。実用的で信頼性の高い注視推定手法へと展開するために、この調査は必須である。今後、より多くの被験者データを収集し、この点について取り組む予定である。2 つ目の課題として、モデルの妥当性に関する検討とより妥当なモデルの提案である。本論文で用いたバネモデルでは、2 球がバネの自然長よりも近づいた時

に、眼-頭部協調運動には発生しない反発力を生じることになるが、実際の眼-頭部協調運動にはそのような力は存在しない。さらに、今後の展望として、本論文で得られたモデルを防犯カメラ等の俯瞰映像に適用させるいくことも重要な課題である。

謝辞

本研究では、独立行政法人日本学術振興会の「研究拠点形成事業 (A. 先端拠点形成型)」の助成及び科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (CREST) の支援のもとに推進された。

参考文献

- [1] V.Rantanen, T.Vanhala, O.Tuisku, P-H.Niemenlehto, J.Verho, V.Surakka, M.Juhola and J.Lekkala: A Wearable, Wireless Gaze Tracker with Integrated Selection Command Source for Human-Computer Interaction, *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, Vol. 15, No. 5, pp. 795–801 (2011).
- [2] 今野秀威, 後藤敏行, 竹上 健: 両眼の位置検出を利用した多次元操作インタフェースの検討, 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 4, pp. 518–525 (2007).
- [3] S.O.Ba and J.-M.Odobe: Visual focus of attention estimation from head pose posterior probability distributions, *Multimedia and Expo, 2008 IEEE International Conference*, pp. 53–56 (2008).
- [4] S.O.Ba and J.-M.Odobe: Recognizing visual focus of attention from head pose in natural meetings, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 39, pp. 1886–1893 (2009).
- [5] 前迫孝憲, 小池敏英: 地磁気センサによる眼-頭部協調運動の測定について, *Japan Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*, Vol. 11, No. 2, pp. 69–76 (1993).
- [6] G.M.Jones, D.Guitton and A.Berthoz: Changing patterns of eye-head coordination during 6 h of optically reversed vision, *Experimental Brain Research*, Vol. 69, pp. 531–544 (1988).
- [7] T.Okada, H.Yamazoe, I.Mitsugami and Y.Yagi: Preliminary Analysis of Gait Changes that Correspond to Gaze Directions, *Proc. of the International Joint Workshop on Advanced Sensing/Visual Attention and Interaction (ASVAI2013)*, pp. 788–792 (2013).
- [8] Z.C.Thumser, B.S.Oommen, I.S.Kofman and J.S.Stahl: Idiosyncratic variations in eye-head coupling observed in the laboratory also manifest during spontaneous behavior in a natural setting, *Experimental Brain Research*, Vol. 191, pp. 419–434 (2008).
- [9] J.S.Stahl: Amplitude of human head movements associated with horizontal saccades, *Experimental Brain Research*, Vol. 126, pp. 41–54 (1999).
- [10] Y.Fang, M.Emoto, R.Nakashima, K.Matsumiya, I.Kuriki and S.Shioiri: Eye-Position Distribution Depending on Head Orientation when Observing Movies on Ultrahigh-Definition Television, *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 3, pp. 149–154 (2015).
- [11] Y.Fang, R.Nakashima, K.Matsumiya, I.Kuriki and S.Shioiri: Eye-Head Coordination for Visual Cognitive Processing (2015).
- [12] L.Itti, C.Koch and E.Niebur: A Model of Saliency-Based Visual Attention for Rapid Scene Analysis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 20, No. 11, pp. 1254–1259 (1998).
- [13] Y.Sugano, Y.Matsushita and Y.Sato: Appearance-Based Gaze Estimation Using Visual Saliency, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 35, No. 2, pp. 329–341 (2013).
- [14] T.Shiratori, H.S.Park, L.Sigal, Y.Sheikh and J.K.Hodgins: Motion capture from ody-mounted cameras, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4 (2011).