

赤外線パターン光投影三次元画像計測技術に基づく顔向き推定 Estimation of Face Direction base on 3-D Image Measurement Technique using Infrared Pattern Projection Technique

辻野 和広[†] 許 陳[†] 盧 存偉[†]
Kazuhiro Tsujino, Xu Chen, Lu Cunwei

1. まえがき

自動車は現代の生活に欠かせない乗り物であると同時に交通事故が大きな社会問題となっている。図1は警視庁の平成24年度中の交通事故発生原因の統計である。警視庁の統計による自動車の交通事故の主な原因を分類すると、58.4%は安全運転義務違反となっている。そのうち、安全不注意が30.5%、脇見運転が16.6%を占めている^[1]。

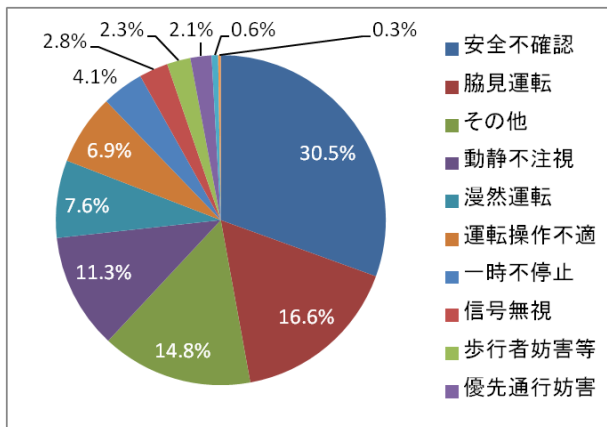


図1.原付以上の運転者の主な法令違反別交通事故件数
(警視庁・平成24年中)

このような問題を未然に防ぐためには、運転者が意識的に安全運転を心掛けること必要があるが、身体的要因や心理的要因により必ずしも安全な運転が維持できるとは限らない。そのため客観的な方法で運転状況を判定し、運転者に警告するシステムが求められている。

脇見運転において近年では、外部から脇見運転をしているかどうかを定量的に計測・評価する手法が提案されている。主に脇見運転の判断方法としては2つあり、1つは運転者の視線方向による判定方法、もう1つは顔向きによる判定方法である。このような情報は視覚的に判別可能な情報であるため、画像処理による脇見運転の判定手法が提案されている。

松木達はドライバーの顔画像から視線方向の推定を行う手法を提案した^[2]。この手法はドライバーの顔の二次元カラー画像を撮影し、目の虹彩や瞳孔の位置から視線を検出する手法であり、脇見運転だけでなく瞼等の状態から眠気などを同時に判定することができる。しかし、この手法は視線推定のみで顔向きの推定は行っていないため、顔向きを含めた脇見の判定を考える必要がある。

また、春日井達はドライバーの顔画像から顔向きの推定を行う手法を提案した^[3]。この手法はドライバーの顔の

二次元カラー画像を撮影し、目や口といった顔の主要パーツを抽出して、その位置関係から顔向きを検出する手法である。提案手法は実用化を行っており、車内環境でも安定して顔向き推定を行うことができる。しかし、顔向き推定を行える範囲が約±15°程度と狭いため、安全確認等による顔向き変動への対応が難しい。

上記のような二次元カラー画像を用いた手法には2つの問題が挙げられる。1つは画像強度が照明環境によって大きく変化するため、安定した画像解析を行うには撮影と処理の二段階で明るさを調整する必要がある。この問題は、照明環境の急激な変化によって、一時的に明るさが適切な画像が撮影できずに計測が困難になる可能性がある。もうひとつは顔向きの幾何学変換によって画像上の顔の主要パーツの特徴や形状が変化するため、顔向き角度の大きさの影響を受けにくい手法が必要である。この問題は、特に顔向き角度の変化が大きい場合、顔向き推定に用いる特徴である目や口等のパーツがオクルージョン(Occlusion: 隠れ)によって見えなくなり、顔向き推定が難しくなる可能性がある。

このような問題に対しては、パターン光投影三次元画像計測による手法が有効であると考えられる^{[4][5]}。この手法は計測対象物体に計測用のパターンを照射し、その様子をカメラで撮影し、撮影画像に映ったパターンの幾何学関係や強度関係から三次元座標を計測する手法である。この手法は高速かつ広範囲の三次元座標の取得できるので、顔の三次元座標の取得に有効である。しかし、一般的なパターン光投影計測手法は可視光のパターンを用いるため、運転者の運転を阻害する可能性がある。また、可視光パターンは車内の照明変化によってコントラストが低下し、手法によってはパターンの抽出やパターンのアドレス検出が不安定になる可能性がある。そのため、赤外線等のように運転者への影響や照明環境の影響が少ないパターンを用いる必要がある。また、顔向き推定においては、鼻等の大きな形状特徴を持つパーツが存在するため、それらの形状を検出することにより顔向き推定が可能であると考えられる。しかし、顔向きの変化が大きい場合には、それらのパーツを識別できるような手法を検討する必要がある。

上記問題を解決するために、本研究では3本のライン状赤外線パターン投影三次元画像計測技術に基づく顔向き推定手法を提案する。計測用パターンに赤外線を用いてパターン投影と撮影を行うことで、照明環境の影響の少ない三次元計測を行う。3本のライン状のパターン光の使用により、計測時間の短縮と確実な顔の形状計測の両立を目指す。また、三次元計測で得られた顔の形状から顔向きを推定することで、照明環境や顔向き変化に対して安定した顔向き推定を目指す。顔向き推定に用いる特徴には、顔の部位の中で形状特徴が大きく、顔の中心が分

[†] (社) 電子情報通信学会, IEICE

かりやすい鼻領域を用いることで、広範囲の顔向き推定を実現する。

2. 赤外線パターン光投影計測による顔向き推定

提案手法は大きく2つの要素に分けられる。1つは三次元座標の計測手法であり、もう1つは三次元座標から顔向きを推定する手法である。2.1節では赤外線パターン光投影三次元画像計測について述べ、2.2節では鼻領域の三次元画像計測結果を用いた顔向き推定手法について述べる。

2.1 赤外線パターン光投影三次元画像計測

本節では赤外線パターン光投影手法による三次元画像計測手法について述べる。図2は提案システムの構成図である。

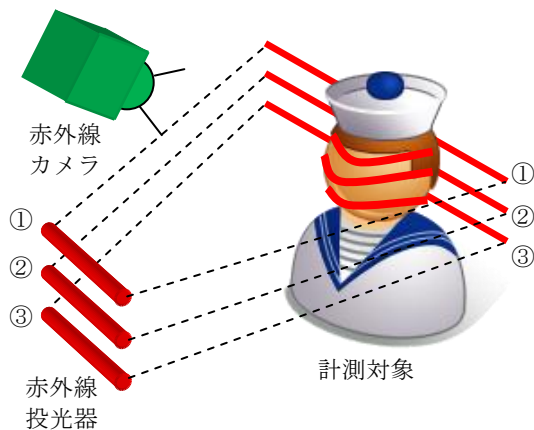


図2.提案システムの構成イメージ

提案システムは赤外線投光器と赤外線カメラにより構成される。赤外線投光器を用いて赤外線パターンを計測対象に投影し、その様子を赤外線カメラで撮影する。得られた観測パターン画像からパターンを抽出し、抽出したパターンの位置情報と、赤外線カメラと赤外線投光器の位置関係から三角測量の原理によりパターンが投影されている領域の三次元座標を計測する。図3は三次元計測の流れである。詳細は以下に述べる。

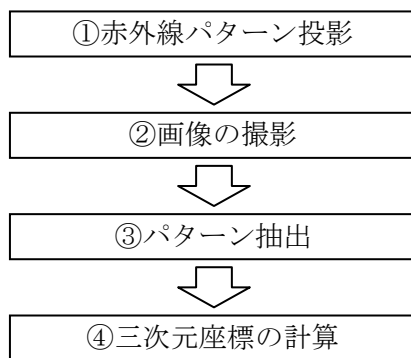


図3.三次元計測の流れ

①赤外線パターン投影

赤外線パターンを生成し、赤外線パターンを計測対象である顔に投影する。提案手法では鼻領域を含む水平ラインの三次元形状から顔向きを推定するので、水平のス

リットパターンが鼻領域に当たるように調整する。しかし、投影パターンが1本の場合、頭の位置の変化によってパターンが鼻領域から外れてしまう可能性がある。この問題はスリットパターンの投影本数を増やすことで解決できるが、本数が少ないほど高速かつ安定して抽出できるため、本研究では3本のスリットパターンを投影して計測を行う。図4は提案システムで撮影した画像であり、(a)は普通の可視光カメラで撮影した観測パターン画像であり、(b)は赤外線カメラで撮影した観測パターン画像である。赤外線カメラを用いることで、ドライバーの運転を妨げないパターン投影が行えていることが分かる。また、パターンのコントラストが十分に高く、照明変化の影響を受けにくいパターン投影が行えていることが分かる。

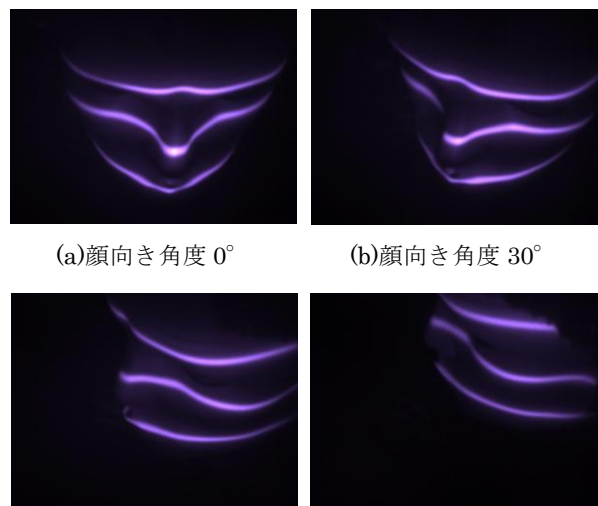


(a)普通のカメラ画像 (b)赤外線カメラ画像

図4.提案システムの観測パターン画像

②画像の撮影

赤外線パターンを投影した状態で、赤外線カメラにより画像を撮影する。図5は各顔向ききの観測パターン画像であり、(a)~(d)はそれぞれ顔向き角度が0°、30°、60°、90°である。角度によらず、鼻領域にコントラストの高いパターンが投影されており、0°においては鼻領域の特徴がはっきりと分かるが、角度変化が大きくなるほど鼻領域の判定に工夫を要することが分かる。



(a)顔向き角度0° (b)顔向き角度30°

(c)顔向き角度60° (d)顔向き角度90°

図5.各顔向ききの観測パターン画像

③パターン抽出

観測パターン画像から、投影されているスリットパターンを抽出する。パターンの抽出方法には様々な手法があるが、本研究では適応閾値二値化手法によりスリットパターンの抽出とノイズ除去を行った。

図 6 は赤外線パターンの抽出結果であり、(a)~(d)はそれぞれ顔向き角度が 0°, 30°, 60°, 90° である。それぞれのパターンの抽出は問題なく行われており、十分なパターンの幅と強度を確保できていることが分かる。

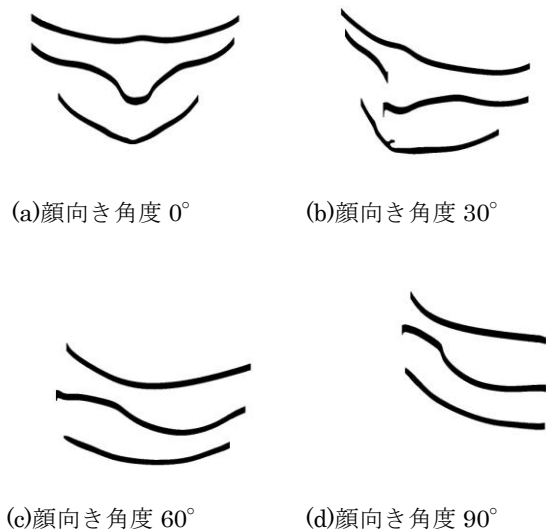


図 6.赤外線パターンの抽出結果

④三次元座標の計算

抽出パターン画像を用いてパターンが投影されている領域の三次元座標を計算する。垂直ステレオにおいては、抽出したパターンの垂直方向の中心座標の実際の角度 (x_1, y_1) と、赤外線投光器の実際の投影角度 (x_2, y_2) を用いて、三角測量の原理を用いて中心座標の三次元座標 (X, Y, Z) を計算する。計算式には式(1)(2)(3)を用いた。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_1}{f} \right) \quad (1)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y_2}{f} \right) \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{d}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

但し、 d は基線長でカメラと投光器の間の距離、 f はカメラのレンズ焦点距離である。

図 7 は三次元座標の計算結果を X-Z 平面にプロットした画像であり、(a)~(d)はそれぞれ顔向き角度が 0°, 30°, 60°, 90° である。これにより鼻領域の三次元座標を取得できる。

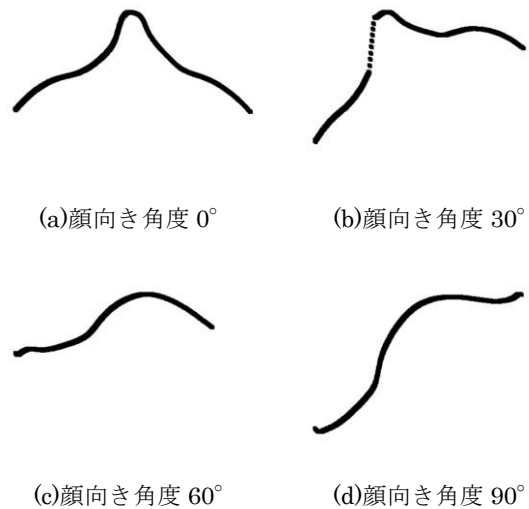


図 7.各顔向ききの三次元計測結果

2.2 鼻領域の三次元計測結果を用いた顔向き推定

本節では鼻領域の三次元計測結果から顔向きを推定する手法について述べる。

まず、2.1 節で述べた三次元座標から顔向きの推定する際の 2 つの問題について述べる。1 つは得られた三次元座標点群は投影したスリットパターンの数に比例しているため、鼻形状をよく表わすパターンをどのように判定するかである。

もう 1 つは三次元座標点群からどのように鼻頂点を抽出するかである。

上記問題を解決する手法として次の手順により解決を目指す。まず、鼻領域を通るパターンの判定を安定化するために、パターンのアドレスを検出する。その後、鼻領域のパターンを判定して抽出し、そのパターンから鼻頂点を仮検出する。その後、検出した鼻頂点と推定した頭部の回転中心から、顔向き角度を推定する。図 8 は顔向き推定の流れである。詳細は以下に述べる。

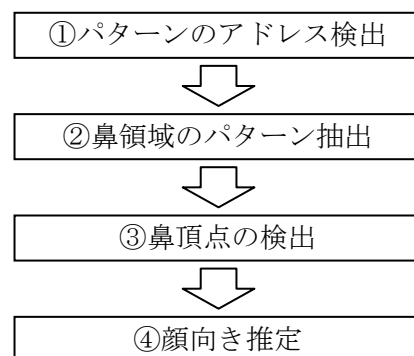


図 8.三次元計測の流れ

①パターンのアドレス検出

観測パターン画像から抽出された各パターンと、投影された 3 本のパターンの位置関係を対応させるためにパターンのアドレスを検出する。アドレス検出は以下のように行う。

まず、抽出パターンをラベル付けし、観測されたパターンの本数を取得する。パターンが 3 本観測されている場合、画像を走査し、垂直位置にパターンが 3 本ある位置を検出する。パターンの上下の位置関係は変化しないので、上から順番にパターンアドレスを割り振る。鼻付近の形状変化や投影パターンの誤抽出等の要因により、一部の走査ラインに、4 本以上のパターンが観測される場合がある。この場合、どのパターンでも 3 本のパターンのいずれかに属するパターンの可能性があるため、各パターンの大きさと位置関係から、対応するパターンに置き換えるか、もしくはノイズとして除去する。図 9 はパターンのアドレス検出結果であり、A は 1 番目のパターン、B は 2 番目のパターン、C は 3 番目のパターンである。(a)~(d) はそれぞれ顔向き角度が 0°、30°、60°、90° である。

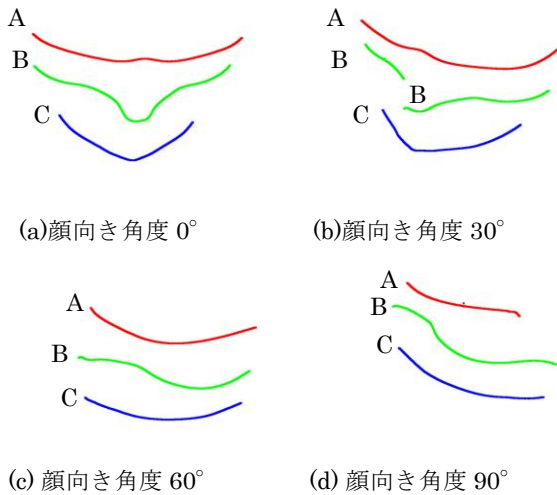


図 9.パターン抽出画像のアドレス検出結果

②鼻領域のパターン抽出

本研究では逐次走査と凹凸比較に基づく鼻領域抽出手法を提案する。

3 本のパターンの中から鼻領域を通るパターンを抽出する。まず、鼻領域の特徴として、鼻の凸部分と鼻と頬の間の凹部分があることが挙げられる。そこで、各パターンの三次元座標から凸部分と凹部分を検出し、検出した凹部分と凸部分の組み合わせから、次の優先順位で鼻領域を通るパターンを抽出する。

図 10 は凹凸部分の検出原理図である。

凹凸部分の検出は、平面領域は一次微分の値が定数、二次微分の値が 0 になることを利用し、差分を用いたフィルタ処理により行う。具体的には、画像を走査して注目点から左右 N 点の三次元座標を取得する。取得した三次元座標点群に差分フィルタを適用し、形状情報を仮検出する。その後、仮検出した形状が広範囲に連結していれば、その領域を凹凸部分として判定する。その後、連結部分を円で近似し、凹部分であるか凸部分であるかを判

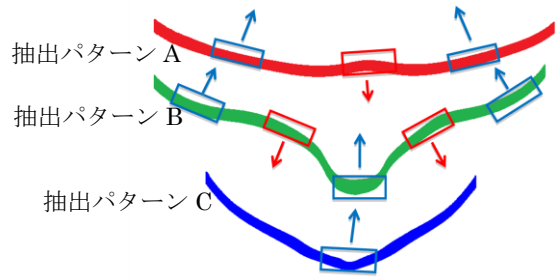


図 10.凹凸部分の検出原理

定する。差分フィルタと凹凸判定にはそれぞれ式(4)(5)を用いた。

$$d(n) = \sum_{n=1}^N \{P(n+1) + P(n-1) - 2P(n)\} \quad (4)$$

$$g(n) = \begin{cases} 1 & d(n) > th \\ 0 & -th \leq d(n) \leq th \\ -1 & d(n) < -th \end{cases} \quad (5)$$

但し、 \mathbf{P} は三次元座標、 n は注目点、 $d(n)$ は差分量の合計値、 $g(n)$ は判定結果で 1 は凸判定、0 は平面判定、-1 は凹判定、 th は判定用の閾値である。

凹凸判定を行った後、凹凸の数とその組み合わせにより鼻領域を通るパターンを判定する。図 11 は鼻領域を通るパターンの優先順位であり、詳細を以下に述べる。

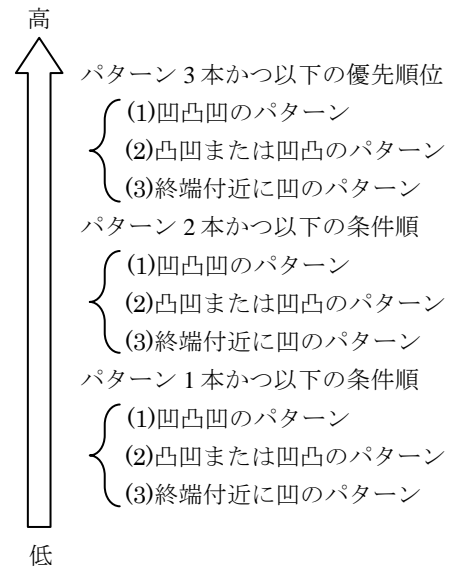


図 11.鼻領域パターンの優先順位

(1)まず、1 か所の凸部分があり、その周囲に凹部分が 2 か所あり、それ以外に凹凸部分がない場合、鼻領域を通るパターンかつ正面を向いている可能性が高いといえる。

(2)次に、1 か所の凸部分があり、その付近に凹部分が 1 か所あり、その反対方向が遮断されている場合、鼻領域を通るパターンかつ斜めを向いている可能性が高い。

(3)最後に、凸部分が終端部分または存在せず、その付近に凹部分が存在する場合、鼻領域を通るパターンかつ横を向いている可能性が高い。

これらの条件を各パターンに適用し、各パターンの優先順位が異なる場合、優先順位の最も高いものを、鼻領域を通るパターンと判定する。優先順位が同条件の場合、パターンの位置や凹凸の位置等により判定する。

以上の処理により鼻領域を通るパターンを判定する。図12は鼻を通るパターンの抽出結果であり、(a)~(d)はそれぞれ顔向き角度が0°、30°、60°、90°である。

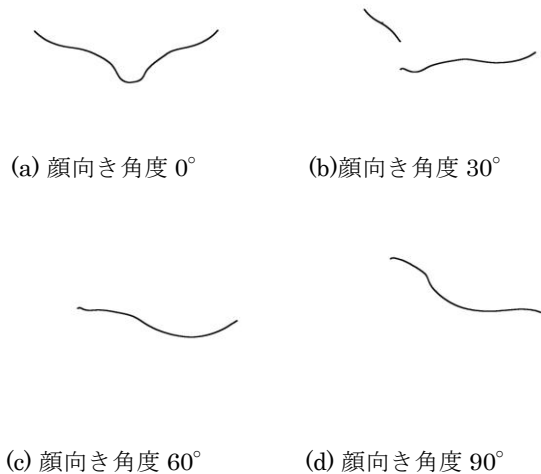


図12.鼻領域パターンの抽出結果

③鼻頂点の検出

鼻領域を通るパターンから鼻頂点を検出する。鼻頂点の検出方法は正面を向いている場合とそうでない場合の2種類に分けて判定する。

図13は鼻頂点検出の原理図であり、(a)は正面の場合、(b)は横向きの場合の例である。

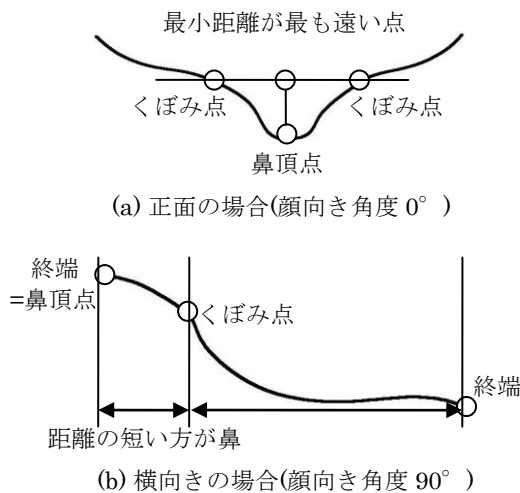


図13.鼻頂点検出の原理図

正面の場合、パターン形状には1か所の凸部分とその周囲に2か所の凹部分が存在し、その凸部分は鼻領域である可能性が高い。そこで、2か所の凹部分からくぼみ頂点を検出し、そのくぼみ頂点を通る直線と凸部分の各座標までの距離を計算し、最も距離が遠い点を鼻頂点とする。

正面でない場合、パターン形状には1か所以下の凸部分とその近傍に1か所の凹部分が存在し、凸部分もしくは凹部分に該当する領域の距離が十分に近ければその領域は鼻領域である可能性が高い。そこで、その鼻領域の境界部分を鼻頂点とする。

図14は鼻頂点の検出結果であり、(a)~(d)はそれぞれ顔向き角度が0°、30°、60°、90°である。

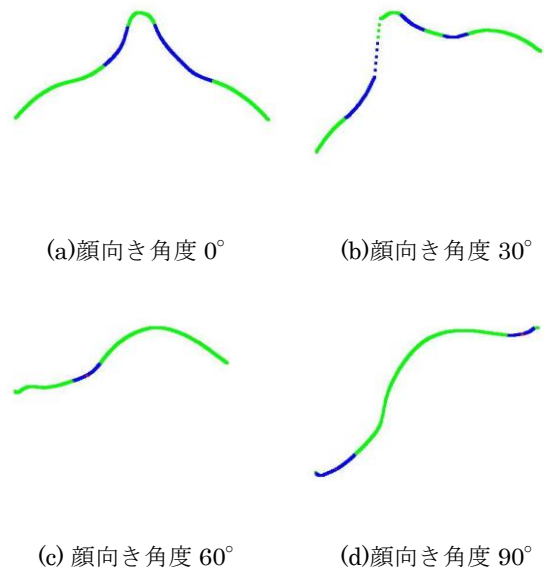


図14.鼻頂点の検出結果

④顔向き推定

検出した鼻頂点と推定した頭部の回転軸を用いて顔向き角度を推定する。頭部の回転軸は、計測で得られた三次元座標の最小二乗円により推定する。回転角度が0°の時の回転軸と計測時の回転軸を重ね合わせ、鼻頂点の位置から回転角度を計算する。計算方法は式(6)が最小となるときに角度θ、平行移動量tを求める。

$$\sum_{n=1}^N (\mathbf{P}_\theta(n) - \mathbf{P}_0(s(n)) - \mathbf{t}) \rightarrow \min \quad (6)$$

但し、 \mathbf{P}_0 は角度0°のときの三次元座標、 \mathbf{P}_θ は角度θ°のときの三次元座標、nは注目点、Nはデータ点数、s(n)は $\mathbf{P}_\theta(n)$ に最も近い点である。

3. 顔向き推定実験

提案手法の有効性を検証するために、顔向き角度の推定実験を行った。

実験方法としては室内環境でマネキンを回転ステージに置き、回転ステージの回転量を真値、計測結果を測定値として比較を行い、誤差について検証する。回転角度は10°刻みで-90°~90°までの範囲で計測を行った。

図15はシステムの外観である。



図15.システムの外観

またシステムに使用した装置は以下のとおりである。

- ・産業用 USB2.0 カラーカメラ
解像度 1024×768, RGB8bit カラーで撮影
画素サイズ 2.2μm×2.2μm
- ・レンズ
固定焦点レンズ(焦点距離 6mm)
レンズ前面に可視光カットフィルタを装着
- ・赤外線パターン投光器
林時計工業 Luminar Ace LA-100 IR
- ・回転ステージ
シグマ光機 SGSP 33-200

表1は顔向き推定実験結果のまとめである。

顔向き角度は -90° から 90° までの範囲で変化し、その際の顔向きの推定誤差は、平均は 5.1° 、最大は 7.0° であり、大きな角度変化でも顔向きを推定できることが分かった。現状では $\pm 20^{\circ}$ 以内と $\pm 70^{\circ}$ 以上の計算精度が高く、一方で $\pm 40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ の範囲内において計測精度が低下している。この原因として、鼻と頬の間の凹みの片方がオクルージョンになっており、かつ、鼻の先端が広く撮影されているため、鼻頂点の位置が精度よく検出しづらいことが原因として挙げられる。この問題に対しては今後、鼻形状を解析する等により鼻頂点をより高精度に検出することが考えられる。

4. まとめ

本研究では従来手法が持つ運転者の広範囲の顔向き推定が難しい問題を解決するために、3本のライン状赤外線パターン投影三次元画像計測による顔向き検出を行う手法を提案した。具体的には、照明環境の影響を受けずに

広範囲の角度検出を行うために、ラインパターンによる鼻領域の三次元画像計測を行った。また、ラインパターンに赤外線を用いることで、照明環境の影響を軽減し、かつ運転者の運転を妨害しない計測が行える。また、鼻頂点を高速かつ安定に行うために3本のラインパターンを使用し、3次元座標から鼻領域を安定して検出するために逐次走査と凹凸比較に基づく鼻領域抽出手法を提案した。提案手法は顔向きが $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ までの顔向き推定を行えることを示した。また、顔向きの推定誤差は平均 5.1° 、最大 7.0° であり、実用レベルの計測精度が得られた。

今後の課題として、本研究ではマネキンをを用いた計測を行っているため、実際の人物を自動車内で計測実験を行い、安定した顔向き検出が可能かどうかの検証等が挙げられる。

参考文献

- [1] “平成24年度中の交通事故の発生状況”, 警視庁, 2013.
<http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/anzen/sub5.htm>
- [2] 松木裕二, 志堂寺和則, 植草理“開眼率計測を用いた運転者の反応時間の遅延予測に関する研究”, 自動車技術会論文集, Vol.41-6, pp.1445-1450(2010)
- [3] 春日井純也, 林健, 内藤剛, 小川健一, 石黒博, 鈴木智晴, 齋木俊佑, 三輪守孝 (アイシン精機), 大上健一, 魚住重康 (トヨタ自動車), 安藤道典, 白木伸征 (豊田中研), “こだわりの新技術 顔向き検知システム”, アイシン技報, Vol.11, pp.15-19(2007)
- [4] 井口征二, 佐藤宏介, “三次元画像計測”, 昭晃堂, 1990
- [5] 長元気, 盧存偉, “投影パターン自動調節に基づく実用型全自動3次元計測システム”, 電気学会論文誌 C, Vol.127, No.4, pp.561-567 (2007)

表1.顔向き推定実験結果

真値	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
計測値	0°	10°	20°	35°	47°	57°	65°	72°	79°	91°
誤差	0°	0°	0°	5°	7°	7°	5°	2°	-1°	1°
真値	-	-10°	-20°	-30°	-40°	-50°	-60°	-70°	-80°	-90°
計測値	-	-9°	-19°	-27°	-45°	-56°	-65°	-74°	-82°	-90°
誤差		1°	1°	3°	-5°	-6°	-5°	-4°	-2°	0°