ステレオビジョンを用いた車両横すべり角の計測*

松井俊樹^{*1}, 菅沼直樹^{*2}, 藤原直史^{*2}

Measurement of Vehicle Sideslip Angle Using Stereovision

Toshiki MATSUI^{*3}, Naoki SUGANUMA and Naofumi FUJIWARA^{*3} Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

In this paper, we describe about the measurement technique of vehicle sideslip angle using stereovision system. The vehicle sideslip angle is one of the vehicle state quantities. Moreover, this parameter is very important for control system of vehicles such as the dynamics stability control system. We propose measurement technique for sideslip angle using stereovision system. This technique uses the disparity and the optical flow to measure the relative movement of the vehicle. Moreover, it only uses two cameras, PC and the rate gyro. So, this measurement system can be realized inexpensive. Additionally, we propose using the predicted image based on vehicle motion model, in optical flow analysis. The result of the optical flow analysis has been improved by proposal method. It is confirmed that proposed technique can measure the movement distance and the sideslip angle by the experiment.

Key Words: Image Processing, Measurement, Automobile, Stereovision, Sideslip Angle, Prediction Image

1. はじめに

近年、交通事故の増加や都市部における道路渋滞などの問題に対し、道路交通の知能化・情報化で解決を図る高度道路交通システム(ITS)に関する研究が幅広く行われている^①。この中には、運転支援・自動運転を行う制御システムに関する研究が多く存在する。実際にこれらを使用する際には、車両の走行姿勢を示す状態量が必要となる。車両横すべり角はそのうちの一つであり、車体の向きと速度ベクトルのなす角として求められ、制御性能を左右する重要なパラメータである^②。ただし、一般的に車両横すべり角の計測は非常に難しいとされている^③。

車両横すべり角の検出手法は、対地速度を外界センサにより計測して解析する手法^{④⑤}と、ステアリング舵角やレートジャイロなどの内界センサおよび車両の運動モデルからオブザーバにより推定する手法^{⑥⑦}に大別される。前者は高精度な計測が可能であるが、これまでに提案されているものは光学式などの対地速度センサや RTK-GPS などの特殊なセンサを使用しているため、非常に高価となり一般的ではない。また、後者においては安価に実現できるものの、路面状態や乗車人数の変化がコーナリングパワーに影響を与え、推

定精度が変化することが報告されている^⑧。我々は、パラメータ変動に影響されない前者による解析手法に注目し、これを安価なセンサにより実現することを目指した。本報では、近年普及しつつある前方注視用のステレオビジョン^⑨により車両の移動量を解析し、車両横すべり角を計測する手法を提案する。具体的には、視差による3次元位置計測とオプティカルフロー解析により車両の移動量を解析するものである。また、自車両の運動が大きくても車両状態量と運動の幾何学モデルから隣接する時刻の画像を予測することで、対応点の探索範囲を拡大することなくオプティカルフローを解析する手法を提案する。なお、この計測手法で使用するのはカメラ2台、演算装置となる汎用 PC およびレートジャイロのみであるため、比較的安価に実現できる。最後に、提案手法の有効性を光学式すべり角センサとの比較実験により検証した。

2. 画像による運動解析

図1に、微小時間 Δt 内に車両がヨーレート γ 、車速 v 、車両横すべり角 β で走行した場合の車両運動の幾何学モデルを示す。このとき、 β は車両回転角 θ と並進移動量 t_x 、 t_y から

$$\beta = \tan^{-1} \frac{t_y}{t_x} - \frac{\theta}{2} \quad \text{..... (1)}$$

* 原稿受付 2005 年 1 月 18 日。

^{*1} 准員、金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192 金沢市角間町)。^{*2} 正員、金沢大学大学院自然科学研究科。

E-mail: toshi@puma.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

Fig.1 Geometrical model of vehicle movement

Fig.2 Existing technique of movement analysis

と計算することができます。式中の車両回転角 θ はジャイロの計測値から $\theta = \gamma \cdot \Delta t$ と求めることができます。よって、車両横すべり角計測のためには並進移動量を計測することが必要となる。本報では、この車両並進移動量をステレオビジョンにより計測し、その結果から車両横すべり角を求める。

2.1 画像による運動解析手法 まず、画像全体の各画素において、視差とオプティカルフローによりフレーム間における3次元での動きを解析する。視差とオプティカルフローを使用した周辺環境の運動解析手法は、加賀美らによって提案されている¹⁰⁾。これは図2に示すように、各時刻における画像で視差とオプティカルフローを解析し、これらの情報からフレーム間における運動解析を行うものである。任意の点 p_{t-1} において、画像座標 (u_{t-1}, v_{t-1}) と視差 d_{t-1} から3次元位置 $(x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1})$ が解析できる。また、オプティカルフローにより、対応点 p_t を求めることができる。この対応点の3次元位置 (x_t, y_t, z_t) も同様に画像座標 (u_t, v_t) と視差 d_t から解析することができる。これにより、フレーム間での各点における移動量を求めることができる。

2.2 視差とオプティカルフローの解析 次に、視差とオプティカルフローの解析方法について述べる。これらの解析手法は主に、特徴点ベースの手法と領域ベースの手法に分類される¹¹⁾。一般的な特徴点ベースの解析手法では、濃淡エッジ等の特徴を抽出してこれらの特徴点に対してのみ対応関係を求めるため、疎な結果が得られる。対して領域ベースの解析手法では、特に解析対象を限定せずに濃度パターンから対応点の探索を行うため、特徴点ベースの解析手法に比べて密

な結果が得られる。我々は、運動解析を路面などの絶対的に静止している領域に対して行うことにより、自車両の運動を解析することとしている。つまり、解析対象の大半が特徴量の乏しい領域である。このことを考慮すると、特徴点ベースの解析手法では計測に失敗する可能性が高くなる。そこで、領域ベースの解析手法であるブロックマッチングを採用し、評価関数にはSAD(Sum of Absolute Difference)を採用した。さらに、左右画像や時系列画像を解析する際に発生する輝度差を抑えるために、マッチングの前処理としてLoGフィルタを適応した。以上の処理により得られた視差解析結果を図3に示す。輝度が高いほど視差が大きく、距離が近いことを示している。なお、虫食いの部分はマッチングに失敗し、視差が得られなかった部分である。これに対し、オプティカルフローの解析においてはいくつかの問題が発生した。この問題について、図を用いて詳しく説明する。

車両が走行した場合に得られる隣接した時刻における画像の模式図を図4に示す。t-1フレームにおいて、マッチングを行うためのテンプレートブロックA~Cが与えられているとする。このとき、tフレームにおいて、探索領域はa~cで設定される。この条件でマッチングを行った場合、ブロックAは位置a'と一致することとなり問題は発生しない。次に、一定間隔で設置されているラバーボール等を含んだブロックBについて考えてみる。本来ならば、対応点b'と対応するはずが、この場合では探索領域に入ってきた一つ先のラバーボールの位置bとマッチングしてしまう。また、ブロックCにいたっては対応点c'が探索領域に存在しないことにより、マッチングに失敗してしまう。

Fig.3 Example of the disparity image

Fig.4 Example of time series images

ことになる。ブロック C のような場合には、探索領域を拡大することによりある程度対応可能である。しかし、ブロック B のようなケースには対応できない点と、処理時間が増加してしまう点から好ましくない。この問題の原因となるのは自車両の運動であり、高速で運動した場合などにはより顕著にその影響が現れてくる。ただし、自車両の運動は図 1 で示す幾何学モデルで表すことができ、必要な状態量もセンサにより計測することが可能である。我々はこの点に注目し、視差解析結果と幾何学モデル、および各種車両状態量から隣接する時刻での予測画像を作成し、この画像を使用して運動解析を行う手法を 3 章で提案する。

3. 車両運動を考慮した予測画像による運動解析

本章では、我々が提案する予測画像による運動解析手法について説明する。3.1 では、提案する予測画像を使用した移動量解析手法の流れを述べ、3.2 では 3 次元位置解析結果と車両運動の幾何学モデルから、隣接した時刻の画像における画素の運動を予測する手法について述べる。最後に、3.3 では解析結果を基にした車両横すべり角の推定手法について述べる。

3.1 予測画像を使用した運動解析 まず、予測画像を使用した運動解析手法について述べる。すでに時刻 t と $t-1$ における視差画像は解析済みであるとする。まず、任意点の時刻 t における 3 次元座標 $P_t(x_t, y_t, z_t)$ は視差と画像座標から求めることができる。次に、3.2 で述べる手法により隣接する時刻における移動先 $P_p(x_p, y_p, z_p)$ を全画素について予測し、予測画像を作成する(図 5①)。ただし、これは運動モデルにより予測したものであり、本来の画像に対してモデル誤差やセンサ誤差などの影響を含んでいる。そこで、予測画像と $t-1$ の画像間でフロー解析を行い、このズレを求める(図 5②)。つまり、車両運動による大変動を幾何学モデルにより吸収し、残る誤差やその他の影響による小変動をフローにより吸収するというアプローチである。これにより、予測座標 P_p に対応する 3 次元座標 $P_{t-1}(x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1})$ を求めることができ、最終的には P_t と P_p 、そして P_{t-1} の位置関係を用いて図 5③のように

Fig.5 Proposal technique of movement analysis

本来の対応関係を求めることが可能となる。

3.2 画素の移動量予測と画像の予測 次に、ステレオ視による 3 次元位置解析結果と車両状態量により、隣接した時刻の画像間において任意の画素がどのような位置関係にあるかの予測手法について述べる。

まず、時刻 t , $t-1$ における視差が解析済みであり、それぞれの時刻におけるカメラと道路面との幾何学関係が解析できているものとする²²。なお、この幾何学関係から車両運動が図 1 に示す平面運動で記述できるような位置解析結果を補正している。各時刻における車両座標系 Σ_{t-1} , Σ_t から観測した同一点の 3 次元座標をそれぞれ $(x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1})$ 、および (x_t, y_t, z_t) と仮定すると、

$$\begin{pmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ z_{t-1} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & t_x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

という関係が成立する。ここで、 t_x , t_y は図 1 の幾何学モデルから

$$\begin{cases} t_x = 2 \frac{v}{\gamma} \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \left(\frac{\theta}{2} + \beta \right) \\ t_y = 2 \frac{v}{\gamma} \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \left(\frac{\theta}{2} + \beta \right) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

と計算できる。ここで、未知のパラメータである車両横すべり角 β が含まれているが $\theta/2$ に対して十分小さい点、予測された移動量は誤差を含んでいることを仮定している点から $\beta=0$ とする。なお、それぞれの画素における 3 次元位置は視差画像から求めることができ、これらの計算を画像全体において行うことで、予測画像が作成できる。ただし、遠方では位置解析の信頼性が低いと、予測は行わないこととした。

求めた移動量予測結果を利用して予測画像を作成する前に、どちらの時刻における予測画像を作成するかについて考える。まず、図 6 に予測画像の例を示す。中段に示す画像が予測対象となる画像であり、上段が前の時刻の画像から予測したもの($\Sigma_t \Rightarrow \Sigma_{t-1}$)、下段が先の時刻から予測したもの($\Sigma_{t-1} \Rightarrow \Sigma_t$)である。なお、右列はそれぞれの画像の一部を拡大表示したものである。走行状態において、自車両は前進している場合が大半であることを考慮すると、前の時刻から画像を予測することで、下段のように広い範囲で画素の移動を予測することができ、利用できる情報量が増える。しかし、これは画像を拡大することと等価であり、中段の対象画像に対して画像がぼやけてテキストチャが減少

Fig.6 Example of prediction image

Fig.7 Example of obstacle detection

する、エッジ部における情報があいまいになるといった不具合が発生していることが右列の画像から確認できる。これに対して先の時刻から画像を予測する場合は、上段のように予測可能な画素数は減るが、ぼけは少なくマッチングに対してさほど大きな不具合は発生しないことが確認できる。よって、後者による予測をおこなうこととした。

これとは別に、画像変換を行わずに予測された移動画素周辺において探索領域を設定し、フロー解析を行う手法が考えられる。この手法は、画像変換を必要としない利点を持つが、画像内での回転や拡大・縮小といった「見え」の変化への対応が困難である。これは、移動量が多い場合や近距離の領域においてより顕著にあらわれる。我々は、計測精度の高い近距離の領域での計測が不安定になることを大きなデメリットと考え、予測画像による解析手法を採用することとした。

3.3 車両横すべり角の計測 前節までの手順で各画素における3次元位置の対応関係をそれぞれ求めることができた。車両回転角の影響を除去した自車両の並進量は、式(2)を変形した次式と図1に示した車両回転角 θ から求めることができる。

$$\begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

車両横すべり角は、この結果と式(1)から計算することができる。実際には、画像全体で式(4)により並進移動量を計算して、その結果をヒストグラム化する。その後、ピーク値をその時刻における移動量として採用し

Table1 Specification of stereovision system

Image sensor	1/3 inch Progressive scan CCD
Baseline length	360 [mm]
Focal length	6 [mm]
Image size	320×160 [pixel]
Base block size	8×8 [pixel]
Search block size (Disparity)	49×8 [pixel]
Search block size (Optical flow)	19×19 [pixel]

Fig.8 Example of prediction image

(a) Frame t and frame $t-1$ (b) Predicted image and frame $t-1$

Fig.9 Example of analyzed movement distance on image

ている。ただし、ヒストグラムに結果を投票する際に先行車両などの自車両の運動とは関係のない部分が多く含まれると、計測ミスが起ってしまう可能性が高い。そこで、我々が前報で提案した障害物検出アルゴリズム⁴⁾によりこのような可能性のある画素を決定し、その画素での結果は投票しないこととした。このアルゴリズムによる障害物抽出例を図7に示す。

4. 検証実験

提案手法の有効性を確認するために、検証実験を行った。使用した動画は、晴れの夕方に実験車両を一般道と金沢大学構内の駐車場で走行して撮影したものであり、オフラインで解析した。なお、表1に実験で使ったステレオビジョンシステムの詳細を示す。

4.1 予測画像の作成と移動量解析 3.1で述べた手法で推定した画像を図8に示す。この際、使用した速度は車速パルスから得られた速度であり、ヨーレ

ートはシリコンセンシングシステムズジャパン社製シリコン振動ジャイロ SGN-100-20 の出力を 12bit A/D コンバータで測定したものを使用した。上段が時刻 $t-1$ の画像、中段は時刻 t の画像、そして下段が予測画像である。なお、予測画像の虫食い領域は視差が計算できなかった部分、視差の信頼性が低い遠方部分である。左の画像は約 50km/h で、右の画像は約 30km/h で道路に沿って走行中のシーンである。図中には、路面マーカや特徴となる部分に破線を引いてある。どちらにおいても提案手法により予測した画像は、ほぼ一致していることがわかる。次に、画素の移動量解析結果を図 9 に示す。(a)は時刻 t と $t-1$ の画像から解析した結果、(b)は予測移動量と推定画像および時刻 $t-1$ の画像から解析した結果である。解析は、それぞれ図 8 と同一のシーンで行った。まず、(a)の結果では、遠方では解析できているが、ある距離より近い部分で移動量が解析できなくなっていることがわかる。これは、近距離ほど画像内における画素の移動量が大きく、対応点が探索範囲から飛び出してしまったためである。走行速度の低い右の結果では画像の半分程度の領域で解析できているが、速度の高い左の解析結果では約 1/6 程度の領域でしか解析できていない点からも明らかである。対して提案手法で解析した(b)の結果では、速度に関係なく左右両方の画像において、画素の運動を予測できたほとんどの部分で解析出来ている事がわかる。これにより、マッチングを行う際に自車両の運動が大きな場合でも予測画像を使用することで、探索範囲を広げることなく正しい解析ができるといえる。

4.2 移動量解析結果の比較 ここでは、小野測器社製 非接触車速計 LC-761 システム (以下: 光学式センサ) の出力を 12bit A/D コンバータで計測した値と提案手法により計測した移動量から求めた値について、縦横方向の各速度と車両横すべり角について比較を行う。図 10(a)に、この実験において走行した 2 つの速度レンジの異なるコースを示す。左側が駐車場で行った低速域での結果、右側が一般道で行った中速度域の結果である。コース上の数字はその位置における時刻を示している。(b)には縦方向速度、(c)には横方向速度、そして(d)には車両横すべり角の計測結果を示す。

(b)の縦方向速度についてであるが、提案手法により計測された値は若干のばらつきはあるものの、光学式センサの値とよく一致している。次に、(d)の横方向速度について考える。こちらもばらつきが見られるものの、光学式センサの計測値と一致している。ただし、破線で囲んだように左図の 30 秒と 58 秒、右図の 35 秒付近において大きな誤差を持っている。これについ

ては、3 次元位置解析に失敗していることが原因であった。3.2 で述べたように、提案手法では道路面とカメラとの幾何学関係を解析し、フレーム間での運動を平面運動で記述できるよう位置解析結果を補正している。この解析を行うには、画像中に道路面が映っている必要がある。誤差が発生した部分においては、奥行き方向に道路面が十分に映っておらず、この関係を導出することができなかった。これにより、正しく補正を行うことができずに計測に失敗していた。(c)と(d)からは横すべり角誤差の発生パターンが横方向速度と非常に似ていることがわかる。つまり、横方向速度の計測精度を向上させることで、車両横すべり角計測のさらなる精度向上を図ることができると考えられる。

なお、これら一連の処理を行うために必要な時間は、Pentium4 2.8GHz、メモリ 512MB の汎用 PC で約 200msec 前後であった。制御システムで使用することを考慮すると、最低でも 100msec 程度に抑える必要がある。

4.3 既存の計測器との比較 前述したように既存の計測機器として、本報内で使用した光学式センサや複数の RTK-GPS を使用したものが挙げられる。これらは高精度に計測が可能であるものの、導入には数百万円オーダーのコストが必要となるため、一般車両への搭載は現実的ではない。これに対して、提案する計測手法に必要なコストは現状で数十万円オーダーであるが、将来的には普及帯までコストを抑えることが可能であると思われる。また、障害物検出用などのステレオビジョンをすでに導入している場合には、新たにセンサを追加する必要がないことも利点の一つとなる。ただし、天候や照度変化に対するロバスト性の検討、計測精度の向上、処理時間の短縮が今後の課題である。

5. おわりに

本論文では、前方注視用のステレオビジョンを用いた車両横すべり角の計測手法について提案した。また、実環境下での実験を行うことで提案手法の有効性を確認することができた。最後に、本論文の内容は以下のようにまとめられる。

- (1) 比較的安価なステレオビジョンとヨーレートジャイロにより、自車両の移動量を解析して車両横すべり角を計測する手法を提案した。
- (2) フロー解析において、自車両の運動が大きい場合でも予測画像を使用するにより、探索範囲を拡大することなく移動量を解析する手法を提案した。
- (3) 実環境下において高精度に計測可能な既存センサとの比較を行い、提案手法の有効性と現状での問題点を確認した。

Fig.10 Example of experiment

文献

- (1) 例えば, 日本機械学会, RCI41 ITS-AVCS(知的交通システムにおける先進車両制御システム)に関する研究分科会研究報告書, (1998)
- (2) 安部, 自動車の運動と制御, 山海堂, (2003)
- (3) 堀, 電気と制御で走る近未来車両に関する研究, FEDレビュー, Vol.3, No.4, (2004)
- (4) 株式会社 小野測器, CL-761 システムカタログ
- (5) 福庭, 吉本, 高橋, 吉岡, GPSによる車体横滑り角計測技術の開発, 自動車技術会 2001 年春季学術講演前刷集, No.5-01, (2001)
- (6) 山口, 浅野, 天野, 車体横すべり角推定法の開発, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.36, No.1, pp31-38, (2001)

- (7) 井上, 堀, 車体横すべり角 β を推定する線形オブザーバに関する考察, 計測制御学会第2回制御部門大会, pp29-31, (2002)
- (8) 神永, 内藤, 適応オブザーバを使用した車両の横滑り角推定, 自動車技術会 1998 年春季学術講演前刷集, No.982, pp.231-234, (1998)
- (9) 十川, 堀, 瀬田, ADA用ステレオ画像認識装置の開発, スバル技報, Vol.27, pp29-35, (2000)
- (10) 岡田, 青山, 加賀美, 稲葉, 井上, 三次元フローを用いた人込みにおけるロボットの障害物回避, 第5回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp214-219, (2000)
- (11) 松山, 久野, 井宮, コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, pp123-137, (1998)
- (12) 菅沼, 藤井, 藤原, ステレオビジョンを用いた三次元路面解析に基づく障害物検出, 第3回 ITS シンポジウム 2004 講演論文集, pp301-306, (2005)