単眼時系列道路画像における路面勾配予測と障害物検出*

坂本 宜 瑞^{*1}, 中 澤 和 夫^{*2}Pitching Angle Measurement and Obstacle Detection on Slope Road
from Single Sequential Road ImageTakamitsu SAKAMOTO and Kazuo NAKAZAWA^{*3}^{*3} Department of Science and Technology, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Recently, technology of safe driving assistance is receiving a lot of attention. And recognition of ambient of road by image processing has been actively investigated. However, many of researches limit road conditions, they cannot treat off-road including uncertainly like a slope. This paper proposes the system used for recognition of obstacles on slope road. The basic algorithm is the projection to virtual plane. Using the projective transformation, it changes the taken images into that being looked down from the upper side of the road and the system detects obstacles by calculating the difference value between frames of the transformed image. This paper shows the effectiveness of above-mentioned algorithm by using the real road scene. In the result, the influence of the texture was not suffered by the proposed method which divides a slope road image and processes the projected image, and the obstacle was detected.

Key Words: Road shape Prediction, Obstacle Detection, Projective Transformation, ITS

1. 緒 言

1・1 安全運転支援 近年の自動車の急激な増加にともない、渋滞による時間の損失や環境汚染、交通事故の増加といった問題が生じている。そこで、情報技術の面から統合的なアプローチで解決を目指すITS (Intelligent Transport System) が推進されている⁽¹⁾。この交通事故原因のうち8割以上はドライバの認知・判断の誤りと分析されており、衝突事故ではドライバの対応が0.5秒早ければその半数は事故を回避できたと推定されている。これらのドライバのミスによって生じる事故に対して、人間の視覚に代わり周辺環境を認識するシステムとして、画像処理を用いた運転支援システムが注目されており、様々な研究がなされている。

1・2 障害物認識 安全運転支援システムを実現するためには、路面、車両のみを認識するだけでは情報不足であり、歩行者や道路上の落下物なども認識しなくてはならない。

代表的な手法としてテンプレートマッチでの認識が

あるが、あらかじめ用意したテンプレートにしか対応できないことや、実道路環境では非剛体障害物が存在するために適用することは難しいと言える。他の代表的な手法としてオブティカルフローを用いたものがある。しかし、オブティカルフローには検出精度や計算コストの問題があり、高精度な実時間処理には適していない⁽²⁾。その他の手法としてステレオカメラを用いた手法がある。二つのカメラによるステレオ画像の特徴をマッチングさせ、その視差から奥行き情報を求める手法である⁽⁴⁾。しかし、二画面間の対応付けの計算量が多く、実時間処理が困難になってしまう。また、オクルージョン問題もあるため、計算量が少なく精度のよい障害物検出は困難である。また、取得したステレオ画像を仮想的な道路平面に逆投影することによって障害物を検出する手法や、画像間で平面射影変換を行なうことで障害物を検出する手法が挙げられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、これらは道路面を一つの平面と仮定しているため、シーン内に勾配が生じていると誤認識が生じてしまう。また、ステレオカメラでは対象物体が遠方にあると計測精度が下がるといったことや対応づける特徴点が常に左右画像で存在しなければならないという問題点がある。単眼カメラを用いた手法では、路面と同じ法線方向を持つ平面と障害物候補平面をシーン内に配置し、追跡する手法があるが、これもまた道路面

* 原稿受付 2005年8月18日。

^{*1} 慶應義塾大学大学院理工学研究科(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 正員、慶應義塾大学理工学部。

E-mail: nakazawa@sd.keio.ac.jp

を一つの平面と仮定している⁽³⁾。以上のように道路勾配を考慮すると障害物の検出が困難となっている。

1・3 本論文の目的と概要 従来手法では前節で述べたような問題点が存在していることから、本論文では、道路に勾配が存在する場合でも障害物を検出できる手法を提案する。また本手法では、前述したステレオカメラを含む問題点を避けるために、単眼カメラを用いて処理を行う。本手法では取得画像を仮想平面に射影変換し、フレーム間差分によって障害物を検出する手法を基本とする⁽⁷⁾。この手法の利点としては、路面テクスチャや遠方背景の影響を受けないことがあげられるが、やはりシーン内を一つの平面と仮定しているという問題点がある。そこで、本論文では、シーン内の道路は複数平面で構成されていると考え、歪んだ射影変換画像から正確な射影変換画像の作成を行う。正確な射影変換画像とは道路上方から見下ろしたように、左右の道路境界が画像内において平行に存在する状態である。作成された画像に対してフレーム間差分処理をすることにより障害物を検出する。

以上のように、勾配のある道路幅一定のシーンに対して、道路領域を複数平面に分割し、正確な射影変換画像を作成することによって障害物を検出するアルゴリズムを提案する。

2. 平坦道路障害物検出

本論文で用いる障害物検出の基本となる手法の流れは以下のとおりである。まず単眼カメラより画像を取得した後、射影変換を行う。その画像に対して前フレームでの射影変換画像との差分を自車両の移動量を考慮してとることにより、障害物を検出する。シーン内に移動障害物が存在する場合には差分値が生じ、道路面のテクスチャは差分値は生じない。障害物の移動方向や形状に依存せず検出ができるため、道路を横断する自転車や歩行者に対してもこの手法は有効である。

2・1 射影変換 図1において車載カメラAにより図1(a)に示すような道路画像が撮像される。一方で道路面に垂直上方に設置されたカメラbでは図1(b)に示すような道路画像が撮像される。カメラA、カメラB、道路の位置関係が決まればカメラAにより撮像された画像をカメラBで撮像された画像に変換することができる。本論文ではこの変換を射影変換と呼び、得られた画像を射影変換画像と呼ぶ。図2に車載カメラによる画像と道路上方から見下ろした射影変換画像を示す。

2・2 障害物検出 前節で得られた射影変換画像より障害物を検出する。第 n フレームでの射影変換

画像を自車両の移動量だけずらし、第 $n+1$ フレームでの射影変換画像との差分値を計算する。この操作により路面上のテクスチャを除去することができる。フレーム間差分によって得られた画素毎の値を、しきい値 α により2値化をおこない(図3)、ラベル付けされた領域を構成する画素数がしきい値 β を超える領域を障害物領域とする。以上が本手法の流れである。

3. 勾配道路障害物検出

前章で述べた障害物検出手法は、対象環境を平坦な道路と限定している。そのため、道路勾配がシーン内に存在すると、正確な射影変換画像が作成できなくなってしまう。シーン内に勾配が生じていると図4に示すように勾配面上の点が仮想平面に投影されてしまうため、図5のような射影変換画像になってしまう。この状態ではテクスチャの影響を大きく受けてしまい障害物の検出が行えない。そのため、画像内道路領域を複数平面に領域分割し、それぞれで射影する必要がある。

Fig.1 Projective transformation

Fig.2 Projective transformed image

Fig.3 Difference image between frame

る。以下、2章で述べた手法に加えて、提案手法を説明する。

3・1 道路境界検出 前に述べたように正確な射影変換画像が得られているか否かは、左右の道路境界が射影変換画像内で平行に存在するか否かである。そこで、まず射影変換画像内から道路境界を検出することにより、シーン内で勾配が生じているかの判断をする。

道路形状の検出には、道路モデルを適用する方法や路面輝度情報を利用する方法があるが、前者ではモデルマッチングの計算量と用意したモデルにしか対応できない問題があるため、本論文では路面輝度情報より道路境界を検出する。道路境界を認識する従来手法としては白線を認識するものが一般的であるが、一般道においては必ずしも白線が存在するとは限らないこと、天候変化による輝度変化に弱いという欠点がある。そこで、本論文では、道路境界を車両移動可能領域とそれ以外との領域との境界とし、その境界の検出のための手法を新たに提案する。

境界の検出には境界を線として認識する手法や面と面の境界として認識する手法が挙げられる。従来手法ではシーンに応じてしきい値を設定する必要があるが境界の方向性が限定されてしまうという欠点がある。そこで本論文では、最小全域木(MST:Minimum Spanning Tree)を用いた領域分割によって道路境界検出を行なう手法を提案する⁽⁸⁾。MSTとは、全ての空間上の点を全体の重みが最も小さくなるように連結させる手法のことである。これを画像問題に置き換えると、画像の各画素をノードとし、ノード間の輝度差を重みとしたMSTを作成する。作成されたMSTに対してノード重みがしきい値以上の辺で領域を分断することにより領域分割を行う(図6)。この手法の利点としては、画素毎に領域を

拡張していくので境界の方向性に影響を受けないことや、移動可能領域とそれ以外の領域で輝度値が類似していたとしても、別々の領域として分割することができる。また、MSTを適用した領域でノード重みの累積分布を作成することで適宜しきい値を算出することができるが挙げられる。以下その処理の手順について述べる。

MSTを用いた道路境界検出法であるが、まず、初期道路境界探索領域を図7(a)のように画像下部に定め、その中で初期領域分割を行う。これは、画像内に勾配が生じていたとしても、自車両周辺では境界の変移が少なくなるためである。領域分割を行った結果、自車両に近い方向であり、ある程度面積が大きい領域を道路領域と判断し、そのほかの領域との境を道路境界とする。初期領域での結果を図7(b)に示す。次に初期領域内の境界方向を考慮し図7(c)のように次段階小領域を設定する。次領域でのノードを全て連結させた後、前段階での切断しきい値± σ でそれぞれ領域分割をする。道路領域判定は前段階での道路領域と重なっている部分が多い領域を次領域における道路領域とする。そして次領域での境界検出を行った後、それぞれで前段階との比較をし、道路境界が滑らかに変化しているときのしきい値を選択する。それにより小領域内に背景など輝度変化が大きい領域が含まれた場合でも、適切にしきい値を選択することが可能となる。以下にアル

Fig.6 Minimum spannig tree

Fig.4 Projective transformation on slope road

(a) Input image

(b) Projected image

Fig.5 Projective transformed image on slope road

(a) First MST area

(b) Region splitting

(c) Next MST area

(d) Road bound detection

Fig.7 Method of road bound detection

ゴリズムをまとめる。

- ① 初期探索領域内でMSTを作成し、境界を検出
- ② 前領域での境界の方向性より次小領域を設定
- ③ MST作成後、前切断しきい値 $\pm\gamma$ で複数の領域分割画像を作成
- ④ 前段階と境界を比較し、類似したものを選択
以下②～④繰り返し

とする。終了条件は領域が画像上部に達した、もしくは道路境界検出に失敗した場合とする。図7(d)に結果画像を示す。検出した境界に対して二次関数近似をし、滑らかな曲線として結果を得る。

3・2 道路面予測 前節で述べたように、障害物検出をするために正確な射影変換画像を作成する必要がある。つまり、道路境界が実際に上方から見下ろした道路境界状態を予測し、それに合わせて画像を再変換させる必要がある。

考えられる手法としては、モデルを用意する方法や幾何計算により求める方法があるが、いずれも計算量の多さや様々な状況に対応しづらいという欠点がある。そのため、本論文では、カメラ位置と空間上の点の拘束条件を基にし、弾性エネルギーモデルを射影変換画像に適用することで路面予測を行う手法を提案する。この拘束条件は、図4のように仮想平面上に投影された勾配面上の点は、カメラ中心とその点を結んだ直線上

Fig.8 Moving line of congruent points

Fig.9 Elasticity model

に存在するということである。射影変換画像に対して弾性モデルを適用する場合には、道路境界線上の各点はその直線状のみにしか動くことができないという拘束になる(図8)。

次に弾性モデルについてであるが、左右の境界線が平行であり、かつ道路yaw角の変化がなめらかであることを考慮し、図9(a)のような道路境界線に左右独立弾性モデルを適用する。左右のモデルが独立であるので、モデルを構成する各点は左右で独立に与えることができる。

モデルに対してのエネルギーの与え方であるが、以下のエネルギーを設定する(図9(b))。まず、モデルの滑らかさと連続性を示すために内部エネルギーとして

- ① 3制御点間の角度 θ_i から求められるエネルギー

$$E_{\theta_i} = \theta_i^2 \quad (1)$$

- ② 2制御点間の角度変化から求められるエネルギー

$$E_{\Delta\theta_i} = (\theta_i - \theta_{i-1})^2 \quad (2)$$

- ③ 2制御点間の距離 l_i から求められるエネルギー

$$E_{l_i} = (l_i - l_c)^2 \quad (3)$$

を設定する。ただし l_c はばねの自然長である。①、②はモデル自体の滑らかさを表す。③は $i-1$ 番目が動いた方向に i 番目の対応点が力を受けることを示す。本来であればモデル全体に影響を与えるべきであるが、簡単化のために $i-1$ 番目のみの影響を受けるものとする。次にモデルの移動方向を決めるエネルギーを定める。平行性を保つための内部エネルギーとして

- ④ 左右モデルの水平性をあらわすエネルギー

$$E_{\phi_i} = \phi_i^2 \quad (4)$$

- ⑤ 左右モデルの距離をあらわすエネルギー

$$E_{c_i} = (c_i - c_c)^2 \quad (5)$$

④、⑤ともにモデル構成点を左右のモデルが平行となるような力を発生する。モデルの下端は位置を固定とし道路幅の基準とする。また、上端では①、②の内部エネルギーは考慮しない。これら内部エネルギーを最小とするように対応点の移動を行なう。各点はカメラから離れる、近づく、とどまるの3つの移動が考えられるので全ての対応点を同時に探索する場合、点の個数を n とすると計算回数は 3^n となり処理時間の増加につながってしまう。そこでそれぞれ独立にエネルギーを計算することにより計算回数を $3n$ 回と抑えられる。複数回この全体の計算をすることで左右の境界線が平

行かつ滑らかになるように道路面の予測を行う。また、予測路面に対して二次関数近似をする。

3・3 自動領域分割平面射影変換 前節までにより、歪んだ射影変換画像における道路境界の検出と正確な道路境界の予測を行った。そこで、歪んだ道路境界を予測された道路境界に変換する操作をする。ここで、幾何的に勾配量を求め勾配平面ごとに逆射影変換する方法と、勾配平面を直接仮想平面に平面射影行列をもとに投影する方法が挙げられる。しかし、前者の手法では計算が煩雑になるという欠点がある。そこで本論文では後者の手法を用いる。平面射影行列とは、異なる視点から得られた画像を関係付ける行列のことであり、平面射影変換は以下の(6)式に示す。

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{H} \mathbf{m}_i' \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{m}_i' = [u_i', v_i', 1]^T$ と $\mathbf{m}_i = [u_i, v_i, 1]^T$ は点 i の変換前後の画像座標であり、 $\mathbf{H}$ は 3×3 の平面射影行列で以下のように表される。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (7)$$

平面射影行列の導出には、変換前・変換後とで対応点が最低4点必要となる。本論文では平面射影行列を前節までの情報をもとに算出する。前節図8で示したように、カメラ座標と道路境界点の関係により、変換前画像点 $\mathbf{m}_i'$ とカメラ座標とを結ぶ直線上に $\mathbf{m}_i$ は存在する。その点同士を4組以上の N 組の点を取得し、平面射影行列を算出する。まず式(6)より、

$$\begin{aligned} u_i u_i' h_7 + u_i v_i' h_8 + u_i h_9 &= u_i' h_1 + v_i' h_2 + h_3 \\ v_i u_i' h_7 + v_i v_i' h_8 + v_i h_9 &= u_i' h_4 + v_i' h_5 + h_6 \end{aligned} \quad (8)$$

これより N 組の点に拡張すると

$$\mathbf{B} \mathbf{h} = 0 \quad (9)$$

ただし、

$$\mathbf{h} = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5 \ h_6 \ h_7 \ h_8 \ h_9]^T$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} u_1' & v_1' & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 u_1' & -u_1 v_1' & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_1' & v_1' & 1 & -v_1 u_1' & -v_1 v_1' & -v_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n' & v_n' & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_n u_n' & -u_n v_n' & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & u_n' & v_n' & 1 & -v_n u_n' & -v_n v_n' & -v_n \end{bmatrix}$$

となり最小二乗法により $\mathbf{h}$ を求め、その結果平面射影行列 $\mathbf{H}$ が求められる。しかし、平面射影変換は画像を1枚の平面と仮定し、別の平面に射影する操作であ

るため、シーン内の路面が複数の平面で構成される場合には正確な射影画像を得ることができない。そこで、変換前の画像において路面を自動的に複数に分割し、それぞれで射影変換行列を求め、射影変換を行う必要がある。本論文では以下のようにして領域分割を行なう。

例として図10(a)のように対応点が得られたとする。まず、画像下部の対応点4組を選択する。その4組から平面射影行列を計算し、結果として得られた変換後の対応点と変換前の予測点との差 d_i を求める。

$$d_i = \mathbf{m}_i - \mathbf{H} \mathbf{m}_i' \quad (10)$$

そして同様に領域内に含まれる n 個の点の二乗誤差の平均は、

$$e = \sum_{i=1}^N d_i^T d_i / N \quad (11)$$

となり、この誤差 e があるしきい値以下であれば、選択

Fig.10 Region splitting projection

Fig.11 Correct obstacle detection

Fig.12 Wrong obstacle detection

Fig.13 Success sample(1)

Fig.14 Success sample(2)

Fig.15 Failed sample

した4組で構成された領域内の点は同一平面であると、しきい値以上であれば複数平面で構成されていると考える。もし、同一平面であったのであれば図10(b)のように対応点の組を拡張し、再び平面射影行列を求

Table1 Coefficient and constant of elasticity energy

	① θ	② $\hat{\theta}$	④ φ
Coefficient	4.00	6.00	7.00
	③ f	⑤ C (farthest)	⑥ C (farther)
Constant	0.03	0.08	0.03

Table2 Results of obstacle detection

	Scene	Trial	Mistake of road boundary detection	Mistake of road shape prediction
With white line	1	3	0	0
	2	6	1	0
	3	2	2	0
Without white line	4	3	0	1
	5	7	1	0
	6	6	2	0

める。複数平面であったのであれば誤差がしきい値を超えるまでの平面を同一平面とし、図10(c)のように領域を設定し探索を継続する。この操作を対応点全て選択されるまで繰り返し、複数平面分割を行う。そして分割された平面ごとに射影変換をし、正確な射影変換画像を作成する。以下にアルゴリズムをまとめる。

① 初期領域として画像下部対応点4組を選択

② 対応点4組で平面射影行列を計算。領域内の平均二乗誤差 e がしきい値以下であれば③へ。しきい値以上であれば④へ

③ 領域を画像上部に向かい拡張。②へ

④ 誤差がしきい値を超えるまでの領域を一つの平面とし、改めて対応点4組を選択。③へ

となる。このように領域分割し、それぞれで平面射影変換をする。結果画像を図10(d)に示す。

3・4 障害物検出 自動領域分割平面射影により正確な射影変換画像の作成後、フレーム間差分をとることにより障害物の検出をする。フレーム差分画像を図11(a)に示す。この画像に対してラベリング処理をし、ある一定の面積の領域を障害物領域とする。結果画像を図11(b)に示す。また、比較として図12(a)および(b)に分割平面射影を行なわなかった場合での障害物検出結果を示す。図11では前方車両下部に障害物領域として検出されているが、図12ではその手前の路面のサイン上に誤検出が生じている。

以上のように画像取得、射影変換射影変換、道路境界検出、路面予測、自動領域分割平面射影変換、フレーム間差分の操作を行なうことにより、シーン内に勾配が生じていたとしても影響を受けることなく障害物の検出が可能となる。

4. 総合実験

4・1 実験環境 アルゴリズムの有効性を示すために実際の勾配のある道路シーンを撮影し実験を行った。車載カメラを自家用車内部に路面より高さ

1050mmの位置に水平に設置し、このカメラにより一般道路走行中の動画を記録した。そしてソフトウェアによって100msごとに320×240画素の256段階モノクロ画像に変換した。画像処理環境はCPU Pentium R 2.8GHz、メモリ1024MBのPCによっておこなった。弾性エネルギーにおける各重み係数は経験的に得た値を入力している。表1に各係数をまとめる。また、フレーム間差分処理での自動車移動量は、最終的なシステムを考えた場合に車速センサから直接得られるため、手入力により与えてある。

4・2 実験結果 図13から図15は実験結果を示す。(a)は入力画像、(b)は初期の水平道路に対する射影変換画像、(c)は複数平面分割後に求められた射影変換行列により修正された画像、(d)はフレーム間差分画像を示す。図13はシーン内路面が下り勾配となっているが、これに対しても正しい射影変換画像を作成し、テクスチャの影響をうけることなく障害物検出ができています。図14ではシーン内に自動二輪車が存在している場合であるが、これに対しても障害物検出ができています。次に失敗例を図15に示す。これは道路境界がうまく検出できなかったため、後の路面予測に影響を与えてしまったためである。白線のない環境では影や立体物の影響により、道路境界を正しく得ることができないシーンが多々あった。そのため、白線のない環境では検出精度が低くなっている。全体としては成功率は77.7%となった。表2に処理結果を示す。また、処理時間であるが、射影変換画像作成に27ms、道路境界検出に40ms、道路面予測に30ms、自動領域分割平面射影に67ms、障害物検出に35msとなっており、全体の処理に約200ms要する。通常の人々の反応時間は平均で750msであり、十分な処理時間であるといえる。

5. 結 言

実際の道路環境において、従来手法では考慮されていなかった勾配変化を含んだ道路においても路面を領域分割し、それぞれ射影させることで障害物を検出で

きる手法を提案した。代表的な道路環境で実験を行い、本手法によって勾配変化の含まれている道路においても路面テクスチャに影響されず、障害物を検出可能なことが分った。

本論文では、射影変換画像作成時に遠方点では画素のぼやけが生じてしまう。そのため、遠方ではMSTがうまく作成できないといった問題がある。また、交差点や分岐などにより道路境界が検出できなくなる場合に対応できないという問題もある。より安定した障害物検出をおこなうために、良好なMSTの作成が今後の課題となる。

文 献

- (1) Home of Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j.html>
- (2) Yachida, M., Computer Vision (in Japanese), (1995), p.184, MARUZEN
- (3) Okada, R., et al., Obstacle Detection based on Virtual Plane Tracking using Single Camera Mounted on Vehicle, Technical Report of IEICE. PRMU2001-89, (2001), pp.29-36.
- (4) Moriya, T. et al., Collision Avoidance System for Urban Traffic, Technical Report of IEICE. ITS2001-53, (2002), pp.13-18.
- (5) Onoguchi, K. et al., Obstacle Location Estimation Using Planar Projection Stereopsis Method, The IEICE Transactions on Information and System, D-II Vol. J81-D-II No.8, (1998), pp.1895-1903.
- (6) Okutomi, M. et al., Road-Region Detection by Computing Homography Matrix Using Stereo Image, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 18 No.8, (2000), pp.1105-1111.
- (7) Iwasa, M. et al., Vehicle Front Scene Watching Using a Single Camera for Urban Traffic, Technical Report of IEICE. ITS2002-71, (2003), pp.167-171.
- (8) Tsunoda, N. et al., Image Segmentation by Adaptive Thresholding of Minimum Spanning Trees, The IEICE Transactions on Information and System, D-II Vol. J87-D-II No.2, (2004), pp.586-594.