区分レールトレース法による線路画像からの高速レール抽出と線路形状推定

正員 笹間 宏 (鉄道総合技術研究所)
 非会員 鶴飼 正人 (鉄道総合技術研究所)
 非会員 太田 勝 (鉄道総合技術研究所)

Extracting rail loci and estimating track shapes from a railway picture
 Hiroshi SASAMA, Masato UKAI, Masaru OHTA (Railway Technical Research Institute)

Extracting rail loci and estimating track shapes from a railway picture are basic problems in applying image processing to railways, such as steering control in accordance with curvature, and guard watch on running ways. We proposed a new operator to extract the loci reflecting the figures of rails according to the position and direction of locus. A trace method is applied to the result of operator processing, in which rail loci are extracted as fractional straight lines using the Hough transformation in each divided zone. Three steps of process are introduced to decide three-dimensional track shapes. In the first step, the direction of the locus is estimated by the restrict conditions of parallel rails. The direction of a cross tie is decided in the second step based on the condition of the given superelevation, and finally the distance between the rail and the camera to take the picture is estimated in the last step from the gauge between the rails in the picture. Applying this method to real images, we have confirmed feasibility of this method.

キーワード：鉄道、線路画像、レール軌跡、レール抽出、線路形状、線路勾配、線路曲率

1. はじめに

鉄道における画像処理技術の重要な応用分野として、列車前方の線路画像から線路状況を認識し、安全確認と運転制御のために利用するという問題がある⁽¹⁾。このような応用のために、線路画像からレールを抽出し3次元的な線路空間形状を推定する問題は、鉄道における画像利用のための基本的な技術的課題である。

鉄道線路に比較的類似した道路に関するビジョンの問題については、多くの研究がおこなわれてきた。例えば、DeMenthon⁽²⁾や金谷ら⁽³⁾は、道路の局所的平面近似を仮定し、白線を基準に道路形状を推定する方法を試みている。しかし、ビデオ画像を利用する場合、解像度の制約などにより精度的な限界があり、またカメラ搭載車両の姿勢変動による解の不安定性などの問題があるので、小沢らは現実的な対応として、連続した時系列画像に適応デジタルフィルタを適用し、道路と車両の状態を同時に推定する手法を提案している⁽⁴⁾。

線路空間は道路空間と類似点が多いが、鉄道線路の曲率や勾配の変化は緩やかで、空間内設備に関する厳しい規格があること、走行車両がレールに拘束されることなど道路と異なる条件があり、これらの条件を活用してより現実的な方法の可能性がある。他方、道路ビジョンの基準となる路上白線と比較して、線路の基準となるレールは、表面が

金属鏡面の立体梁なので、視線条件により見え方の変化が大きく、レール抽出のために特別な工夫が必要となる。

筆者は、このような鉄道線路におけるビジョンの問題に対応するために、線路空間の特徴に適合した空間モデルとして、緩やかな曲率の線路中心軸曲線を折れ線近似し、線路軸に沿った線路空間を矩形断面トンネルで近似した「仮想トンネルモデル」を提案した⁽⁵⁾。また、カメラの姿勢が水平で左右レールの高低差(カント)がゼロである場合の線路形状推定方法について提案した⁽⁶⁾。

本研究においては、鉄道線路画像の特徴を分析した上で、上記の線路空間モデルをベースに線路の連続性を利用した区分的トレース方式により、線路画像の特性に適合したレール抽出法を提案する。さらに、区分的に抽出されたレール軌跡に対して、レールの平行条件、レール間隔条件、カントに関する知識などを利用し、任意のカメラ姿勢のもとでカントも考慮した3次元的な線路形状を推定する方法を提案し、実際の線路画像に適用して、この方法の特長と効果を示す。

2. 線路空間と線路画像のモデル

まず最初に、本研究において前提とした線路空間と線路撮影のモデル、およびアルゴリズム評価用画像の撮影条件を示す。

図1 地上座標系、カメラ座標系、線路空間座標系
Fig.1 Coordination of ground, railway and camera

< 2. 1 > 線路空間モデル⁽⁵⁾

鉄道線路空間は、列車走行の専用空間として、厳しい拘束条件のもとに構成されている。道路と比べてその曲率と勾配変化は緩やかであり、ほとんどの区間では曲率半径 300m 以上、勾配変化 25/1000 以内の範囲に入っている⁽⁷⁾。線路空間構造は、線路軸の左右に設置された 2 本のレールを基準として定まる。2 本のレールの間隔は一定(在来線では 1.067m、新幹線では 1.435m)であり、曲線部のカント(左右レールの高低差)もその曲率に応じて規定されている⁽⁷⁾。

仮想トンネルモデルでは、図 1 に示すように、直線および緩やかな曲線からなる線路軸を区分的に直線近似し、線路軸に沿った矩形トンネル空間を考える。

地上座標系を (x, y, z) とし、位置ベクトルを p 、方向単位ベクトルを e で表わすと、区分トンネルの線路軸基点 p_r を基準点とし、線路軸方向ベクトル e_r 、枕木方向ベクトル e_s 、電柱方向ベクトル e_t (実際の電柱方向は地面に垂直に建植され、勾配とカントにより e_t と一致しない場合がある)の直交する 3 つの方向ベクトルにより正規化された線路空間が構成される。

空間内の点 p に対する線路空間座標系表現を $(r \ s \ t)^T$ とすると、

$$p = p_r + (e_r \ e_s \ e_t) (r \ s \ t)^T \quad (1)$$

線路全体の形状は、線路軸に沿った区分線路空間を規定するベクトル集合 (p_r, e_r, e_s, e_t) の列によって定まる。本研究における線路形状決定とは、具体的には線路画像内のレール軌跡を抽出し、その軌跡から上記ベクトル集合列を求めることである。

< 2. 2 > 線路撮影モデル

次に、車上に搭載したカメラにより前方線路空間を撮影する場合の透視変換を考える。図 1 に示すように、カメラ

図2 伯備線の曲率半径と勾配の分布
Fig.2 Distribution of curvature and gradient in Hakubi line

の光学原点 p_c とし x, y, z 軸回りに α, β, γ だけ回転したカメラ座標系の軸方向ベクトル e_u, e_v, e_f を考えると、地上座標系軸方向ベクトル e_x, e_y, e_z 、カメラの回転変換行列を K として、次のように表わされる。

$$e_u = K e_x, \quad e_v = K e_y, \quad e_f = K e_z \quad (2)$$

$$K = \begin{pmatrix} \cos \gamma \sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

次に、線路空間と透視画像の変換行列 M を次のように定義する。

$$M = K (e_r \ e_s \ e_t \ p_r - p_c) \quad (4)$$

カメラによる透視変換と、地上座標系から線路空間座標系への変換を統合すると、線路軸正規化空間内の点 (r, s, t) を透視画像上の点 (u, v) に透視する変換は、次のよう表現できる⁽⁶⁾。

$$u = f(m_{11}r + m_{12}s + m_{13}t + m_{14}) / (m_{31}r + m_{32}s + m_{33}t + m_{34}) \quad (5)$$

$$v = f(m_{21}r + m_{22}s + m_{23}t + m_{24}) / (m_{31}r + m_{32}s + m_{33}t + m_{34}) \quad (6)$$

線路軸空間内の位置と姿勢が与えられれば、(4)式により変換行列 M が定まり、上式によって線路空間に配置されたレールや信号機などの各種設備の画像内映像座標を計算することが出来る。

< 2. 3 > 評価モデル線区と撮影条件

研究のための評価用の線路画像撮影を JR 西日本の伯備線において行った。伯備線は曲線の多い山間線区であり、曲線に応じた車輪操舵方式の導入が検討されているため、画像による線路形状推定へのニーズが高い。伯備線の勾配および曲線分布を図 2 に示す。

評価用画像撮影のために、カメラの姿勢と焦点距離設定に関する予備評価を行った。遠方の解像度条件とカーブにおける広視野条件を勘案して、曲線半径 300m でも 100m の

図3 画像内のレール始端部存在範囲とレール姿勢角
Fig.3 range of rail locus and direction in picture

可視距離を確保するために、焦点距離 $f=0.018\text{m}$ とし、線路中心上 2.56m のカメラ位置と、チルティング角 $\alpha=0.11$ ラジアン の姿勢条件で撮影した。

3. 線路画像からのレール軌跡の抽出

線路空間モデルに基づいた区分的折れ線近似により、線路画像からレール軌跡を抽出する方法を提案する。具体的には、以下に述べるように、レール映像の特性に合ったレール抽出オペレータを適用し、区分的な Hough 変換を利用したトレース方式で、レール軌跡を求める。

< 3. 1 > レール映像の特長

鉄道の場合は、カメラ搭載車両がレールに拘束されるため、画像内のレールの位置や姿勢の実現範囲が制約を受ける。前記の伯備線撮影条件において線路勾配が $\pm 25/1000$ 、曲率半径が左右 300m の範囲で変化した場合の線路中心上に設置したカメラ画像内レール軌跡の変動範囲を図3に示す。画像内レール軌跡始端部の存在範囲が限定され、また、始端部位置に応じた軌跡姿勢角も、線路空間モデルと撮影モデルに基づいて推定出来る。

レールは固有の断面形状を持った立体梁であるため、カメラに対する相対姿勢によって見え方が異なる。したがって、カメラとの相対位置や姿勢を考慮したレール抽出方法が必要となる。

また、レール表面が車輪により研磨され金属鏡面となって

図4 画像内のレール上および近傍輝度分布
Fig.4 Distribution of brightness on rail and near zone

図5 レールトレース処理のフロー
Fig.5 Flow of rail tracing process

いるため、画像内レール表面には周辺の情景が映りこむ。図4は、伯備線テスト画像の直線部分において、レール表面上最高輝度とその近傍領域の輝度の平均値および標準偏差を、カメラからの距離に対してプロットしたものである。伯備線画像の分析の結果、カメラからおよそ 25m 前方（対レール視線入射角約 0.1 ラジアンに対応）までは、空の反映によりレールと周辺の輝度差が大きく、レールの弁別が容易だが、 50m 近辺になると天空以外の反映により、輝度差によるレール抽出は難しくなる。また、曲線ではさらに条件が悪くなることがわかった。

< 3. 2 > 区分レールトレース処理

上記のレール映像特性を考慮すると、近距離部においては、比較的容易に正確なレールの抽出が可能で、遠距離部にいくほどそれが難しくなる。従って、画像下端の近距離部から画像上方の遠距離部に向かってレールをトレースする方式がレール抽出方として実際的であるという結論を得た。

具体的なレールトレースのフローを図5に示す。まず初期設定として、画像内のレール始端点の位置と姿勢の推定を

Hough 変換投票空間 \$(\theta, \rho)\$

図6 前段条件による条件の相対化と処理範囲の限定

Fig.6 Elimination of range to examine for trace

行う。次に、トレース処理ループに入る。ループ内においては、前段において求められた区分レールの終端点を新たな始端点とし、外挿的にレール軌跡の存在し得る限定された領域に対して、レール抽出オペレータを適用する。その結果に直線検出 Hough 変換を施して、区分領域内において最も適合性の高いレール軌跡線分を定める。さらに、4章に述べる方法により、得られた左右レール軌跡線分から軌道面の位置と姿勢の推定を行う。一連のループ処理の後、最後に得られた区分レール軌跡が滑らかになるように接続処理を行う。

1) 始端部処理 トレース処理の最初の区分領域処理では、前段の結果が利用できないので、初期条件を作成する必要がある。画像下端におけるレール位置と姿勢に関しては、図3のように左右レールの存在範囲が限定されているので、左右それぞれのレール存在範囲に 3.3 節にのべるレール抽出オペレータを施して、その評価値が最大になる位置をレール始端点とする。

また、車両がレールに拘束されており、近距離の範囲ではレール曲率が一定であると仮定すると、画像内レール位置から、画像内レール姿勢角が図3下部のグラフのように推定できるので、これを画像内レール姿勢の初期値とする。

(2) 区分領域 Hough 変換 各区分領域毎のレール線分抽出は、次式にもとづく標準的な直線抽出 Hough 変換による。

図7 レール姿勢による画像内レールの見え方

Fig.7 Size of rail in a picture corresponding with the direction

図8 軌道の基本構成

Fig.8 Structure of a rail base

$$\rho = u \sin \theta + v \cos \theta \quad (7)$$

区分領域内の各点\$(u,v)\$にレール抽出オペレータを適用し、その結果の値を(6)式に基づいて\$(\theta, \rho)\$空間に投票する。その結果、最も得票の多かった\$(\theta, \rho)\$の組により、この区分領域のレール軌跡線分を決定する。

なお、トレース法固有の工夫として、図6に示されるように、前段の検出線分の位置と姿勢に基づいて、画像内のレール抽出処理領域と Hough 変換投票領域を限定する方式を採用した。このような画像空間と投票空間の処理範囲の限定により、Hough 変換処理の問題点である処理時間の負担を大幅に軽減することが出来た。

さらに、前段の位置・姿勢\$(\theta_0, \rho_0)\$を規準点として左右レールの投票空間を擬似正規化し、左右投票結果を重ね合わせて、前段に対する相対的な位置・姿勢の変化を判定することができる。これにより、レールトレース処理の弱点となる分岐部において、左右独立に判定すると誤ったトレースを行う場合にも、図10の例のように正しいトレースを可能にすることが出来る。

< 3. 3 > レール抽出オペレータ

3. 1 節に述べたレール映像の特徴に適合したレール抽出手段として、以下に述べるレール抽出オペレータを新たに提案する。

線路画像内のレール映像は、カメラとレールの相対位置や姿勢により変化するが、明るいレール表面とその両側

(a) 原画像

(b) レール抽出オペレータ適用結果

(a) 左右独立処理による誤りトレース結果例

(c) 区分 Hough 変換投票結果

(d) レールトレース結果

図9 レール抽出処理例

Fig.9 An example of rail extracting and rail tracing

の影の部分の基本パターンとなる。しかし、立体形状に対する視線方向により画像内のレール見え方が変化するので、安定にレール軌跡を抽出するには工夫が必要である。そこで、次のようなレール抽出オペレータを考える。

u 方向および v 方向の輝度変化を抽出する一次差分オペレータを $\Delta_u(u,v)$, $\Delta_v(u,v)$ とし、画像内レール軌跡が u 軸となす角度 θ が $-1/2\pi < \theta < 1/2\pi$ の場合は垂直方向の差分走査を、 $1/2\pi < \theta < 3/2\pi$ の場合は水平方向の差分走査を採用する。図8に示すように、規格上のレール間隔は左右レールの内側間隔で規定されており、左右レールにより抽出すべきエッジの側面が異なる。そこで、画像内レール映像の u 方向と v 方向の幅 δ_u , δ_v を考慮して、次のようなレール抽出オペレータ $\Psi(u,v)$ を導入する。

$-1/2\pi < \theta < 1/2\pi$ の場合

$$\text{右レール: } \Psi_v(u,v) = \Delta_v(u, v - \delta_v) - \Delta_v(u, v) \quad (8)$$

$$\text{左レール: } \Psi_v(u,v) = \Delta_v(u, v) - \Delta_v(u, v + \delta_v) \quad (9)$$

$1/2\pi < \theta < 3/2\pi$ の場合

$$\text{右レール: } \Psi_u(u,v) = \Delta_u(u - \delta_u, v) - \Delta_u(u, v) \quad (10)$$

$$\text{左レール: } \Psi_u(u,v) = \Delta_u(u, v) - \Delta_u(u + \delta_u, v) \quad (11)$$

具体的な画像内のレールの u 軸方向の幅 δ_u および v 軸方向の幅 δ_v は、図7に示されるように、実レールの表面幅を d (標準的な 50N レールの場合は $d=65\text{mm}$) とすると、前段の軌道面の位置と姿勢から、(5),(6)式を利用して次のように算定することが出来る。

$$\delta_u = |(\partial u / \partial s) - (\partial v / \partial s)(\partial v / \partial r) / (\partial u / \partial r)| d \quad (12)$$

$$\delta_v = |(\partial u / \partial s)(\partial u / \partial r) / (\partial v / \partial r) - (\partial v / \partial s)| d \quad (13)$$

4. レール軌跡に基づく線路形状推定

前章で述べた方法により得られた区分領域ごとのレール軌跡線分に対して、左右レールの平行条件、カント条件、軌道間隔条件を利用して、対応する軌道面の線路軸基点 p_r 、線路軸方向ベクトル e_r および枕木方向ベクトル e_s を求める方法について述べる。

従来の方法においては、カントおよびカメラの光軸周りの回転角を近似的にゼロとした簡易的な方法が提案されていた⁽⁶⁾。しかし、実際の線路においては曲率半径 300m の場合、約 1/10 程度のカント勾配があるので、本研究においてはカントを考慮した方法を提案する。

< 4. 1 > 線路軸方向ベクトル e_r の決定

透視変換においては、全ての平行線群は共通の消失点を持つ。従って、光学原点から透視面上の消失点に向かう方向ベクトルは、その共通の方向ベクトルを代表するものとなる。したがって、左右レールの消失点と光学原点を結ぶ直線方向ベクトルが線路軸方向を与える。

図11において、Hough 変換により得られた透視画像内の左右レール軌跡線分の基点を $q_1(u_1, v_1)$, $q_2(u_2, v_2)$ とし、この左右レール線分の延長上の交点によって与えられる消失点を $q_r(u_r, v_r)$ とする。この各点に対応する3次元位置ベクトル p_{1r} , p_{2r} , p_{ir} は、(2)式によって与えられるカ

(b) 左右融合処理による正常トレース結果例

図10 左右レール融合による分岐部処理例

Fig.10 Result of fusion process of both rail

図11 透視面と線路軸直交面

Fig.11 Perspective plane and perpendicular plane to rail axis

カメラ座標系軸方向ベクトル e_u, e_v, e_f を用いて、

$$P_{i1} = p_c + u_1 e_u + v_1 e_v + f e_f \quad (14)$$

$$P_{i2} = p_c + u_2 e_u + v_2 e_v + f e_f \quad (15)$$

$$P_{ir} = p_c + u_i e_u + v_i e_v + f e_f \quad (16)$$

これより、カメラ光学原点 p_c から P_{i1}, P_{i2}, P_{ir} への方
向ベクトル e_1, e_2, e_r が定まり、光学原点から左右レール
消失点への方ベクトル e_r が線路軸方向ベクトルとなる。

< 4. 2 > 枕木方向ベクトル e_g の決定

次に、線路軸に直交する枕木方向 e_g について考える。一般の場合、枕木方
向は画像内のレール軌跡のみから決定することはできない。そこで、画像内
枕木エッジを利用する方法と線路曲線に対するカント設定の知識を利用する
方法について述べる。なお、線路軸方向ベクトル e_r 、枕木方向ベクトル e_g
が定まると、この2つのベクトルと直交する電柱方向ベクトル e_e は自動的に
定まる。

図11に示すように、光学原点 p_c から透視面上の左レール始端点 P_{i1} へ
のベクトルを延長し、実際の線路空間内の左レール上の対応点を P_{g1} とする。
この P_{g1} を含み線路軸方向ベクトル e_r と直交する線路軸直交平面 g を仮定し、
この平面上で e_2, e_r に対応する投影点を P_{g2}, P_{gr} とする。三角形 $\Delta P_{g1} P_c P_{gr}$
と三角形 ΔP_{g2}

$P_c P_{gr}$ は直角三角形となり、光学原点から平面 g まで距離を λ とすると、

P_{g1}, P_{g2} は次のように定まる。

$$P_{g1} = p_c + \lambda / (e_1 \cdot e_r) e_1 \quad (17)$$

$$P_{g2} = p_c + \lambda / (e_2 \cdot e_r) e_2 \quad (18)$$

画像内の区分レールの左右始端点 P_{i1}, P_{i2} が自由に選ばれた場合には、画
像内右レール始端点 P_{i2} に対応した実レール点は線路軸直交平面上の P_{g2} と
一致するとは限らない。

(1) 画像内枕木エッジによる方法

画像内の枕木エッジが抽出される場合には、枕木エッジ上の点を P_{i1}, P_{i2}
として用い、線路軸直交平面上の P_{g1}, P_{g2} は枕木上の点となり、枕木方
向ベクトル e_g は、 $P_{g2} - P_{g1}$ の方向ベクトルとして、次のように求められる。

$$e_g = \left(\frac{[1/(e_2 \cdot e_r)] e_2 - [1/(e_1 \cdot e_r)] e_1}{|[1/(e_2 \cdot e_r)] e_2 - [1/(e_1 \cdot e_r)] e_1|} \right) \quad (19)$$

(2) カント設定ルールによる方法

線路画像から枕木エッジを抽出することは困難な場合が
多い。そこで、左右レールの高低差 (カント: k [mm]) に
関する設計ルールを知識として利用する方法を考える。カ

ント k は、線区の条件に応じたルールにより線路の曲率半
径により定められている⁽⁷⁾。従って、レールトレス法に
おける前段までの処理結果により、曲率および勾配の推定
値が与えられる場合は、これを用いてカント量 k を推定し、
これを利用する方法が考えられる。

このカント量 k に対して、線路軸直交面内で水平面に対
して枕木方向のなすカント角 κ は、線路軸の勾配角を θ と
して、次のようになる。

$$\kappa = \tan^{-1} \{ k / (1067 * \cos \theta) \} \quad (20)$$

なお、実際の線路においては、勾配の値はほとんど 25/1000
以下なので、画像処理による座標精度を考えると、 θ がゼ
ロと近似しても問題は少ない。

図11に示すように、線路軸直交平面内にあって、水平方向を示す水平方
向ベクトル e_{gh} を考える。4.1節により定まる線路軸方向ベクトルを $e_r = (x_r,$
 $y_r, z_r)^T$ とすると、 e_{gh} は e_r との直交条件と単位ベクトル条件から次のように
定まる。

$$e_{gh} = \begin{pmatrix} z_r / \sqrt{x_r^2 + z_r^2} \\ 0 \\ -x_r / \sqrt{x_r^2 + z_r^2} \end{pmatrix} \quad (21)$$

$P_{g1} - P_{gr}$ と $P_{g2} - P_{gr}$ の方向ベクトルを e_{g1}, e_{g2} とし、図に示すように、 P_{gr}
と P_{g2} を結ぶ直線上で、 P_{g1} から水平方向 e_{gh} に対してカント角 κ をなす点を
 P_{gk} とすると、この点が実際の線路空間における P_{g1} に対する右レールの対
応点となる。

次に、 P_{gr}, P_{g1}, P_{gk} よりなる三角形を考えると、各頂点の内角

$\theta_{gr}, \theta_{g1}, \theta_{gk}$ は、次のように表わすことが出来る。

$$\theta_{gr} = \cos^{-1}(e_{g1} \cdot e_{g2}) \quad (22)$$

$$\theta_{g1} = \cos^{-1}(-e_{g1} \cdot e_{gh}) - \kappa \quad (23)$$

$$\theta_{gk} = \pi - \theta_{gr} - \theta_{g1} \quad (24)$$

三角形 P_{gr}, P_{g1}, P_{gk} に正弦定理を適用すると、次の関係が導かれる。

$$|P_{gk} - P_{gr}| / \sin \theta_{g1} = |P_{g1} - P_{gr}| / \sin \theta_{gk} = |P_{gk} - P_{g1}| / \sin \theta_{gr} \quad (25)$$

これより枕木ベクトル $P_{gk} - P_{g1}$ は、次のように定まる

$$P_{gk} - P_{g1} = |P_{g1} - P_{gr}| (\alpha e_{g2} - e_{g1}) \quad (26)$$

ただし、 $\alpha = \sin \theta_{g1} / \sin \theta_{gk}$

従って、と枕木方向ベクトル e_g は次のように定まる。

$$e_g = (\alpha e_{g2} - e_{g1}) / |\alpha e_{g2} - e_{g1}| \quad (27)$$

図 12 画像内線分位置誤差による推定線路軸の位置と方向の誤差
Fig.12 Rail axis error by line position error in image

図 13 画像内線分角度誤差による推定線路軸の位置と方向の誤差
Fig.13. Rail axis position by line angle error in image

図 14 伯備線線路画像に対する線路形状推定処理例
Fig.14 Example of estimation for an image of Hakubi line

< 4. 3 > 線路軸基点 p_r の決定

最後に、軌道間隔条件により線路軸基点 p_r を定める。左右レールの間隔 d は線路空間の基本寸法として既知である。この条件より実際の線路軸直交面までの距離 λ を定めることが出来る。

直交面内左右レール間隔は、(19)式と(26)式より次のように表わすことが出来る。

$$|p_{gk} - p_{gl}| = \lambda \left[\frac{1}{(e_1 \cdot e_r)} |e_1 - e_r| + \alpha |e_{g2} - e_{g1}| \right] \quad (28)$$

この直交面内左右レール間隔が線路軸直交面上においてレールの間隔 d (在来線では $d=1.067\text{m}$) と等しいという条件から λ が次のように定まる。

$$\lambda = d / \left(\frac{1}{(e_1 \cdot e_r)} |e_1 - e_r| + \alpha |e_{g2} - e_{g1}| \right) \quad (29)$$

この λ を用い、線路軸直交面上の左右レールの中点として、 p_r が次のように定まる。

$$p_r = p_c + [\lambda / (e_1 \cdot e_r)] e_1 + 0.5 d e_s \quad (30)$$

この p_r を基点として、線路方向ベクトル e_r と枕木方向ベクトル e_s を用いて区分軌道面が構成され、これを順次接続することにより、連続した線路形状が形成される。

< 4. 4 > 誤差評価と処理実験

一般のビデオカメラによって撮影された線路画像を用いる場合には、光学系の歪みや解像度の制約などがあり、画像から得られる3次元情報の精度には限界がある。従って、Hough 変換によって得られる (θ, ρ) の値には誤差を含むと考えなければならない。具体的に前述の伯備線撮影条件による直線部線路画像内の距離 30m 位置の区分線路において、画像内の左側レールの線分位置誤差 $\Delta \rho$ および姿勢誤差 $\Delta \theta$ に対する線路軸位置ベクトル誤差 $(\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z)^T$ と線路軸方向ベクトル誤差 $(\Delta e_x, \Delta e_y, \Delta e_z)^T$ の計算例を図 12、図 13 に示す。

このような誤差があるため、区分軌道面を順次計算して並べた場合、レール中心軸が完全に接続された折れ線になる保証はなく、ある程度分離した線分列が生成される。そこで、その線分列をできるだけスムーズに接続するために、3次元空間内の相い接する線分の終端と始端の中点を二つの線分の接合点とする方式を採用した。これにより、線路中心軸は連続した折れ線となる。

車輪操舵制御の導入が検討されているモデル線区の伯備

線路画像を用いて処理実験を行った。その結果の一例を図 14 に示す。車輪の操舵制御においては、当面は左右カーブ存在に対するオンオフ的な操舵が考えられており、そのための左右カーブの判定には充分利用可能であることが分かった。

実際の操舵制御では、カーブに進入する前にカーブの存在を知ることが重要であり、処理速度がポイントとなる。そこで、<3.2>に述べた方法により、本処理実験では処理負担の大きい Hough 変換の処理範囲を画像全体の 1/40 に限定し、Hough 変換投票空間も 1/312 に限定した結果、旧式の EWS (SPARC10) において 2.2 秒/画面の処理速度を得た。従って、最近の計算機の性能向上を考えればリアルタイム制御への適用は十分可能であるとの見通しを得た。

5. まとめ

本研究においては、独自の線路空間モデルのもとに、線路画像からレール軌跡を抽出し、その軌跡にもとづいて線路の三次元的な形状を推定する方法を提案した。その結果次のような結果を得た。

- (1) 線路軸の区分的直線近似にもとづいて、手前の線路から遠方に向かって順次線路空間の 3 次元形状を推定していく区分的レールトレースの方法を提案した。この方法により、手前区間の計算結果から推定される条件を活用して、線路空間の特殊性やレールの立体形状などに対応できるモデルベースのアプローチが可能となった。
- (2) 線路画像におけるレール映像の特徴を分析し、レールの見え方のモデルをベースにしたレール抽出オペレータを提案した。このオペレータを適用した結果に対して、トレース前段のレール位置と姿勢を規準にし、Hough 変換処理の対象となる画像空間と投票空間を限定し、処理時間の大幅な節減を実現した。また、この前段の位置と姿勢を規準とした擬似正規化のもとに、左右レールの処理を融合することにより、レール分岐部のトレース誤りを改善することができた。
- (3) これまで、カメラの回転とレールのカントがゼロという近似仮定のもとに、線路形状が計算されていたのに対して、このような近似仮定のない一般的な条件のもとに、画像内枕木エッジを用いるか、カントに関する知識を活用して、軌道面の 3 次元位置と姿勢を推定するアルゴリズムを導いた。これにより、カントの大きな山間線区における姿勢変動のある車上カメラに対する処理も可能となった。

本論文で提案した線路空間の特徴を活かした線路ビジョンの方法は、今後実用的な応用システムを構築するに有効な手段を与えるものと考えられる。今後の課題としては、画像上での誤差に対する線路形状誤差発生機構を明らかにし、応用上許容される誤差に対応した適用条件を明確にすること、線路上を走行する列車搭載カメラの位置・姿勢変動に連動した線路形状推定モデルの構築などがある。

(平成 10 年 5 月 25 日受付, 平成 10 年 11 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 笹間宏:「鉄道における画像技術応用の現状」, 鉄道総研報告, Vol.7, No.11, 1993.11, pp.1-8
- (2) D.DeMenthon: "A zero-bank algorithm for inverse perspective of a road from a single image," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1987, pp.1444-1449
- (3) 金谷健一, 渡辺一成:「局所平面近似による道路形状復元」, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.4, 1990.8, pp.31-36
- (4) 丹波伸行, 千葉昌孝, 小沢慎治:「連続道路画像からの車両姿勢角の推定」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-D-II, No.3, 1992.3, pp.490-499
- (5) 笹間宏:「鉄道線路ビジョンのための平面と曲線の判定」, 3次元画像工学コンファレンス'93, 1993.7, pp.179-184
- (6) 笹間宏:「鉄道線路画像のための空間と画像のモデル」, 日本機械学会論文集, Vol. 63, No.613-C編, 1997.9, pp.158-165
- (7) 技術要覧, 日本国有鉄道技術開発室編, 1984, pp.120-122

笹間 宏 (正員)1944 年 6 月 24 日生まれ。1969 年 3 月東京大学大学院産業機械工学科修士修了, 同年国鉄入社, 鉄道技術研究所において貨物輸送自動化の研究に従事, その後(財)鉄道総合技術研究所において画像処理の応用システムの開発に従事, 機会学会, 計測自動制御学会会員。

鶴飼 正人 (非会員)1961 年 3 月 12 日生まれ。1984 年 3 月東京工業大学制御工学科卒業, 同年国鉄入社, 鉄道技術研究所を経て, (財)鉄道総合技術研究所に移行し, 画像処理の応用システム研究開発に従事, 計測自動制御学会, 情報処理学会, ファジー学会会員

太田 勝 (非会員)1964 年 9 月 17 日生まれ。1989 年 3 月日本大学大学院電子工学専攻博士課程前期課程修了, 同年(財)鉄道総合技術研究所入社, 1994-96 年東日本旅客鉄道(株)安全研究所に出向, 主に鉄道における画像システムの研究開発に従事, 電子情報通信学会, 情報処理学会会員