鉄道線路画像のための空間と画像のモデル*

笹 間 宏^{*1}

Space and Picture Models for Machine Vision in Railway

Hiroshi SASAMA

In this paper, space and picture models for machine vision in railway were developed. The railway space is modeled as an imaginary rectangular tunnel including the construction gauge. The walls of the imaginary tunnel are mapped with wall pictures representing wayside facilities and a background landscape. The wall pictures are quasi-normalized along the railway axis. Using the model, we can transform a point in a wall picture into a point in a perspective picture taken by a camera. Consequently, the wall picture and the perspective picture can be transformed, each from the other. We can estimate the mapping error corresponding to deviations between the actual point and the wall. Additionally, some applications showing the effects of this model are illustrated.

Key Words: Image Processing, Railway, Machine Vision, Space Model, Picture Model, Imaginary Tunnel, Mapping Picture

1. はじめに

これまで、自律移動ロボットや自動車の自動運転のための道路画像に関する研究は多く行なわれて来た⁽¹⁾~⁽⁴⁾。しかし、鉄道のための線路画像に関しては、線路勾配と曲率推定⁽⁵⁾や線路消失点抽出⁽⁶⁾などの個別的研究がなされているのみで、線路空間と画像のモデルに関する本格的な研究は行われていない。

鉄道においては、列車前方線路状況確認や線路周辺の設備検査に線路画像を利用するニーズがあるが、そのためには、軌道面を基本に電柱や架線などの上部構造を含む空間全体のモデルが必要となる。コンピュータグラフィックスの分野では、空間内の物体の形状を表すサーフェスモデルとその表面上のテクスチャデータにより3次元画像を生成しており、カメラから得られた透視画像から物体形状データとテクスチャデータを推定し、空間画像を生成する試み⁽⁷⁾なども有るが、そのまま線路空間に適用するには、現実の線路空間のモデル化と画像生成処理の負担が大き過ぎる。

鉄道線路空間の特長は、長大なレールに沿った連続空間であり、これを線路空間の基本条件であるレールを基準にした地上設備の建築限界を断面とした一種のトンネル空間とみなすことができる。

また、線路設備管理のための軌道や電力設備の管理図としては、線路軸に沿って展開された連続図面を用いている。そこで、この線路空間固有の条件を生かし、これをできるだけ単純化し、「建築限界を包含し、矩形面で構成される線路中心軸に沿った仮想トンネルと、その表面にマッピングされた壁面画像の集合」として、線路空間と線路画像のモデル化を行うこととした。

本論文においては、まず鉄道線路空間の特長に適合した空間モデルとして「仮想トンネルモデル」を提案する。次に、この空間モデルを基準に、ビデオカメラで撮影された線路透視画像上の点と仮想トンネル壁面上の点の対応関係、この関係を利用した仮想壁面画像の生成、壁面正射影画像と比較したひずみみ評価について述べる。最後に、このモデルを活用した応用例として、線路画像の擬似正規化圧縮と画像再生、および透視変換を受けた画像上での軌道面相互相関への応用例を示す。

* 原稿受付 1996年10月17日。

*¹ 正員、(財)鉄道総合技術研究所 (〒185 国分寺市光町2-8-38)。

Fig. 1 Construction gauge, rolling stock gauge and imaginary tunnel section

Fig. 2 Imaginary tunnel model and coordinate vectors according to rail center axis

Fig. 3 4 types of projecting onto a tunnel wall along rail center axis

2. 線路空間と線路画像のモデル

2.1 仮想トンネルモデル

線路空間に関する基本的な制約条件として、走行する車両と地上設備が相互に接触しないように、地上設備と車両の相互の不可侵領域を規定した建築限界と車両限界がある。レールや枕木、電柱や架線などの線路周辺設備は、この建築限界の境界面近傍に設置されている。したがって、線路空間はこの建築限界を断面形状とした一種のトンネル空間であるとみなすことができる。

建築限界の形状は若干複雑であるが、大部分の線路周辺設備は、建築限界に外接する矩形の外側に設置されている。そこで幾何学的に扱い易い現実的な断面形状として、図1に示すように、単線あるいは複線の建築限界を包絡する矩形断面の仮想トンネルを考える。

線路形状の基準となるレール中心軸の曲率と勾配変化は、道路などと比べて緩やかである。そこで、図2のようにこれを区分的に折れ線近似することとし、

各区間の線路軸原点の位置ベクトルを g_w 、線路軸方向の単位ベクトル e_r とし、線路軸と直交する枕木は水平に設置されているとすると、枕木方向の単位ベクトル e_q と、線路軸および枕木に直交する電柱方向の単位ベクトル $e_{q'}$ が定まる。厳密にはレール曲率に応じて左右レール高低差カントが設定されているので、必要な場合はカントを考慮して、枕木方向ベクトルを設定する。

この基点ベクトル g_w を基準点とし、方向単位ベクトル e_q 、 $e_{q'}$ により張られる面として、軌道面を構成することができる。さらに、仮想トンネル断面形状に基づいて左右側壁面と天井面の基点を定め、それぞれの面を張る方向単位ベクトルを $e_{q'}$ 、 e_q 、 e_r の中から選べば、仮想トンネルを構成する各壁面が形成される。

2.2 仮想壁面画像モデル 仮想トンネルモデルのもとで、図2に示されるように、トンネルを構成する各壁面上に、壁面近傍の設備と背景を投影し

Fig.4 Coordinate systems of ground, camera, perspective picture, and imaginary wall plane

た壁面画像を考える。この壁面画像としては、線路軸 r 方向およびこれと直交する枕木軸 q 方向に関する壁面への投影方式により、図3に示すような4タイプが考えられる。

- ① r 軸方向、 q 軸方向の両方向ともに壁面に直交する方向から平行投影された画像（正射影画像）
- ② r 軸方向は壁面直交方向からの平行投影、 q 軸方向は中心投影の画像（線路軸正規化画像）
- ③ r 軸方向は壁面斜め方向からの平行投影、 q 軸方向は中心投影の画像
- ④ 壁面を透視面として、 r 軸方向、 q 軸方向の両方向とも中心投影画像

この4つの投影方式において、壁面近傍の点はほぼ同じ位置に投影されるが、壁面から離れた点は、それぞれ異なった点に投影され、投影方式に応じた固有の投影ひずみを生じる。

①の完全正射影画像は幾何学的には最も基本的な正規化画像であるが、四方の壁面を考えると、壁面の内側は隣接壁面にダブって投影され、壁面の外側では投影されない領域が生じてしまうという問題がある。これに対して、②の画像では、線路空間全体を過不足なくカバーできるので、線路画像情報を集約した線路軸方向の正規化画像として適している。設備管理のために、このような画像をラインセンサの移動走査によ

り撮影するシステムが開発されている⁽⁸⁾。

①および②の壁面画像を得るためには、それぞれ特殊な撮影手段が必要となる。これに対して、③及び④の画像は、車上のビデオカメラにより撮影された透視画像を変換することにより得られる。そのための具体的な方法とその性質、および正射影画像と比較してのひずみについて以下に述べる。

3. 仮想壁面と透視画面

3.1 仮想壁面と透視画像の相互座標変換

車上に搭載されたカメラにより撮影された前方線路の透視画像から、仮想壁面上に投影された図3の④に対応する壁面画像を推定する問題を考える。

本論文における座標系はすべて左手系とし、図4および表1に示すように地上座標系 (x, y, z) を基準に、カメラの光学原点の位置ベクトルを $g_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ とし座標軸を x, y, z 軸回りに α, β, γ だけ回転した3次元座標系 (a, b, c) をカメラ座標系とする。

また、仮想トンネルは矩形壁面の集合により形成されており、各壁面は、地上座標系位置ベクトル $g_w = (x_w, y_w, z_w)^T$ を原点とし、線路方向 r 軸およびそれに直交する枕木方向 q 軸の方向を与える単位ベクトル $e_q = (x_q, y_q, z_q)^T$, $e_r = (x_r, y_r, z_r)^T$ により張られているとする。

地上座標系位置ベクトル $g = (x, y, z)^T$ の点をカメラ

(a) An imaginary tunnel based on the extracted rails

(b) Wall pictures transformed from the picture (a)

Fig. 5 An imaginary tunnel based on the extracted rails and wall pictures transformed from the railway picture

座標系位置ベクトル $k = (a \ b \ c)^T$ で表現すると、

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$$T = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

図4に示すように、カメラの透視変換により、カメラ座標系位置ベクトルで $k = (a \ b \ c)^T$ と表される点が、光軸 c 上でカメラ原点から焦点距離 f の位置を原点とし、カメラ座標系の a , b 軸に平行な u , v 軸によって構成される2次元の透視面の座標系のもとで、2次元ベクトル $p = (u \ v)^T$ と表される点に透視されるとすると、

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ f \end{pmatrix} = f/c \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (2)$$

点 g が壁面上にある場合、その壁面座標系で表した2次元位置ベクトル $w = (q, r)^T$ とすると

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = q \begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{pmatrix} + r \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} \quad (3)$$

上記の変換を複合し、壁面上の点を透視画像上の点に透視する変換は、次のように表される。

$$c \begin{pmatrix} u \\ v \\ f \end{pmatrix} = f \ M \begin{pmatrix} q \\ r \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\text{ただし} \quad M = T \begin{pmatrix} x_q & x_r & x_w - x_c \\ y_q & y_r & y_w - y_c \\ z_q & z_r & z_w - z_c \end{pmatrix}$$

したがって、行列 M の各要素を $\{m_{ij}\}$ 、その逆行列 M^{-1} の各要素を $\{n_{ij}\}$ とすると、壁面上の点の座標 (q, r) が与えられれば、次式によって透視画面内の対応点の座標 (u, v) が定まる。

$$\begin{aligned} u &= f(m_{11}q + m_{12}r + m_{13}) / (m_{31}q + m_{32}r + m_{33}) \\ v &= f(m_{21}q + m_{22}r + m_{23}) / (m_{31}q + m_{32}r + m_{33}) \end{aligned} \quad (5)$$

逆に透視画面内の点の座標 (u, v) が与えられれば、壁面内の対応点の座標 (q, r) が定まる。

$$\begin{aligned} q &= (n_{11}u + n_{12}v + n_{13}f) / (n_{31}u + n_{32}v + n_{33}f) \\ r &= (n_{21}u + n_{22}v + n_{23}f) / (n_{31}u + n_{32}v + n_{33}f) \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式により線路透視画像の各画素を仮想壁面上にマッピングすることにより、透視画像から壁面画像への変換ができる。その例を図5に示す。このままでは遠方部で解像度が不十分であるので、動画像の複数フレーム画像を用いた一様解像度の変換法については3.3に述べる。逆に、壁面画像から透視画像への変換は(5)式を用いたマッピングによる。

2 長さや角度の変換 次に、仮想壁面と透視画面上の長さや角度が、どのように相互に変換されるかについて調べる。前節の(6)式を u, v により偏微分すると、次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} \partial q / \partial u &= \{(n_{12}n_{31} - n_{11}n_{32})v + (n_{13}n_{31} - n_{11}n_{33})f\} / (n_{31}u + n_{32}v + n_{33}f)^2 \\ \partial q / \partial v &= \{(n_{11}n_{32} - n_{12}n_{31})u + (n_{13}n_{32} - n_{12}n_{33})f\} / (n_{31}u + n_{32}v + n_{33}f)^2 \\ \partial r / \partial u &= \{(n_{22}n_{31} - n_{21}n_{32})v + (n_{23}n_{31} - n_{21}n_{33})f\} / (n_{31}u + n_{32}v + n_{33}f)^2 \\ \partial r / \partial v &= \{(n_{21}n_{32} - n_{22}n_{31})u + (n_{23}n_{32} - n_{22}n_{33})f\} / (n_{31}u + n_{32}v + n_{33}f)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Fig.6. Transformation of length and direction in a perspective picture and a wall picture

Fig.7 Wall picture transformed from moving pictures and pictures regenerated from it

透視画面上の画素に対応する微小矩形領域と壁面上の対応矩形領域の関係は図6のようになり、評価計算例のように、距離 r に応じて α/∂ の項が大きくなり、 r 軸方向の解像度が悪くなることがわかる。

この式を用いて壁面に沿った解像度評価を行うことができる。

$$\begin{aligned}\Delta q &= \partial q / \partial u \cdot \Delta u + \partial q / \partial v \cdot \Delta v \\ \Delta r &= \partial r / \partial u \cdot \Delta u + \partial r / \partial v \cdot \Delta v\end{aligned}\quad (8)$$

① Picture from the first position
and a reference wall element

② Picture from the second position
after moving

Fig. 9 Correlation between two pictures with a wall element under perspective transformation

ずみとなる。このひずみは、壁面からの距離 δ_w および線路軸方向の位置座標 r によって変化する。 r 軸方向のひずみ量 δ_r の評価計算例を図 8 (b) に示す。また、対象物体の壁面からの距離 δ_w が予め判っている場合は、(12) 式によってマッピング位置をずらすことにより、正射影画像を得ることができる。

5. モデルの応用

以上述べた仮想トンネルと壁面画像のモデルを導入することにより、ビデオカメラによる透視画像と線路軸に沿った擬似正規化画像との相互座標変換が可能となった。以下にその応用例を二つ示す。

5.1 線路走行画像の圧縮と再生制御 図 7 に示す動画画像から変換された連続壁面画像は、従来から鉄道において用いられてきた設備管理図に対応するもので、線路周辺情報を線路軸に沿って効率的に表現した画像形態である。したがって、これ自体設備管理などに有効に利用できる。

さらに、透視画像から壁面画像への変換は可逆である。したがって、仮想トンネル壁面にマッピングされた壁面画像図 7 (a) は、(4) 式によってもとの透視画像に逆変換され、図 7 (b) のような線路透視画像が得られる。動画画像から変換された一様解像度の連続壁面画像の場合には、逆変換において投影方向の差により遠方で若干ひずみが生じるが、人間がおよその線路周辺を判定するためには充分利用できる。

この逆変換におけるカメラ位置や姿勢条件は、(4)

式の行列 M に含まれるカメラの位置と姿勢のパラメータにより自由に設定できる。したがって、カメラ位置を線路軸 r に沿って順次移動させながらこの処理を行えば、自由に設定されたカメラ位置・姿勢とフレーム間隔条件のもとで、線路走行動画画像を再生することができる。図 7 (b) は (a) の壁面画像を用い、カメラの位置を $r=140\text{m}$, 160m , 180m と移動しながら逆変換により線路透視画像を再生したものである。

すなわち、動画画像からの壁面画像変換は、動画画像圧縮の機能を持っている。この方法による再生画像は、オリジナルの線路画像に対して、遠方領域が若干ひずむため可逆変換にはならないが、元の動画画像とは独立に再生画像のフレーム間隔を制御ができるため、簡易な線路走行シミュレーションの映像などに利用できる。

5.2 壁面相互相関 走行車両からの線路動画画像において、線路空間内のある設備要素は、車両の移動によって位置や姿勢が変化し、さらにその位置に応じた透視変換を受ける。したがって、そのまま 2 枚の画像の対応領域の相互相関をとっても、適正な相関値は得られない。そこで、仮想トンネルモデルのもとに透視画像と壁面画像とを対応させる (4) 式を介して、2 枚の画像の間の相互相関をとれば、対応する領域間で高い相関値を得ることができる。

図 9 の例は、移動車両から撮影された 2 枚の線路画像において、①の画像内の軌道面踏み切り部分の壁面要素を基準画像とし、②の画像内の矩形領域を線路軸

に沿って移動させながら(4)式を介して相関値を計算したものである。2画面間移動量に対応した位置で相関が最大になり、その位置関係から2枚の画像間のカメラ移動量を推定することができる。

6. まとめ

鉄道における実用的なマシンビジョンを実現するために、鉄道線路空間の特殊性を生かして、できるだけ簡略化した空間および画像のモデルとして「仮想トンネルモデル」と「壁面画像モデル」を提案した。

このモデルでは線路空間を線路軸に沿った矩形断面トンネルで近似し、画像情報源を壁面上の2次元画像に縮退させることにより、幾何学的な取り扱いを容易にした。

次に、仮想トンネルモデルのもとで、車上カメラによる線路透視画面と仮想壁面との相互座標変換式を導いた。これにより、2次元線路透視画面と3次元空間内の壁面座標の対応が一意に定まり、線路透視画像と壁面画像の相互変換や、2次元線路画像による3次元空間処理が可能となった。

さらに、透視画像内の微小領域寸法と角度に対応した壁面上の対応領域寸法と角度の相互変換式を導いた。これは、解像度などの線路撮影条件の評価などに利用できる。

ただし、このようなモデルの単純化により、壁面から離れた物体に関しては、平行投影の壁面画像と比べて壁面画像の投影位置に誤差を生じる。そこで、壁面から離れた点に対して生じる投影位置の誤差の評価

法を示した。なお、軌道面上設備や建築限界近傍設備に関しては、この誤差は少ない。

最後にこのモデルの応用例として、壁面画像から逆変換により線路透視画像を再生した例により、仮想壁面画像が線路動画像の圧縮の機能を持っていることを示し、さらに2枚の透視画像に対する壁面上での相関計算例で、透視画像上における3次元空間画像処理の効果を示した。

本論文では、提案したモデルの基本的な性質と応用例を示したが、今後はさらに、線路画像から3次元レール形状を推定し、それをベースにモデルを自律的に形成することが重要な課題であると考えている。

最後に、本研究に対してご指導頂いた東京大学工学部の藤村貞夫教授と東京工科大学の木村幸男教授に感謝いたします。

参考文献

- (1) 全, ほか, 信学論 Vol. J71-D, No. 9, 1988. 9, pp1709-1717
- (2) 金谷, ほか, ロボット会誌 Vol. 8, No. 4, 1990. 8, pp31-36
- (3) D. DeMenthon, ほか, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation May 1990, Cincinnati, OH, pp1337-1341
- (4) 丹波, ほか, 信学論 Vol. J75-D-11, No. 3, 1992. 3, pp490-499
- (5) 笹間, 3次元画像工学コンファレンス'93, 1993. 7, pp179-184
- (6) 鶴飼, 第5回情報処理学会全国大会, 1992. 10
- (7) 笹間, ほか, 23回画像工学コンファレンス, 1993. 12, pp329-332
- (8) 笹間, ほか, 鉄道総研報告, Vol. 7, No. 4, 1993. 4, pp19-26