

自動走行支援のための経路情報モデルの構築

蒔苗耕司^{*1}

^{*1}宮城大学事業構想学部デザイン情報学科

単独で自動走行しようとする自動車が必要とする情報は、操舵制御のための情報、加速・減速制御のための情報である。自動車のより円滑な自動走行を実現するためには、できるだけ前方の制御情報を得、それに基づく予見制御により、制御によるタイムラグを最小とすることが求められる。そのためには、道路情報 DB から制御情報を取得する必要があるが、制御情報と道路情報 DB とのリンクに関する研究はまだ十分に行われていない。本研究では曲率・勾配関数を応用した道路線形のモデル化を行うとともに、その経路情報への展開、さらに位置情報との関連、自動車制御システムへの伝達プロセスについて検討を行なった。

The Geometric Path Model for the Support of Automated Vehicles

Koji Makanae^{*1}

School of Project Design, Miyagi University^{*1}

The automated vehicle requires the information for steering, acceleration and braking. For smooth automated traveling, the vehicle must acquire the path information more ahead to minimize time lags of controls. Few research studies links between the information for controls and road information database. This study shows the roadway geometric and path models, relation between the model and the positioning systems, and the process to transmit the information to automated vehicles.

Keyword: roadway geometry, path model, look-ahead control, automated vehicle, UML

1. はじめに

移動する自動車が得ることができる位置情報は、現状ではGPSあるいは慣性航法装置により導かれる位置情報（緯度、経度、高度）、進行方向、移動速度等の情報である。これらの情報と車載ナビゲーションシステムに記憶されている地図情報 DB とを照合し、走行路線とその路線上の位置等の情報を得ることができる[1].

一方、単独で自動走行しようとする自動車が必要とする情報は、操舵制御のための情報、加速・減速

制御のための情報（ここでは制御情報と呼ぶ）である。制御情報を得るためには予め道路線形情報を取得する必要があり、路面に埋め込んだ磁気ネイルによる方法や画像処理による方法が開発され実験が進められている[2][3][4]. しかし、これらの方法により得られる道路線形情報は、情報取得可能範囲に限界がある。自動車のより円滑な自動走行を実現するためには、できるだけ遠く前方の制御情報を得、それに基づく予見制御を行うことにより、制御によるタイムラグを最小とすべきである。そのためには、道路

情報 DB から制御情報を取得することが考えられるが、制御情報と道路情報 DB とのリンクに関する研究はまだ十分に行われていない。

そこで本研究では、自動車の予見制御支援を目指した経路情報モデルの構築を行う。

2. 自動走行支援のための経路情報のモデル化

自動走行のための経路モデルを構築する場合、車線上の経路情報をすべてデータとしてモデリングする手法が考えられる。しかし、この方法ではモデリングの手間がかかること、経路間の関連付けが難しい（例えば内側と外側の車線とで長さが異なる）等の問題がある。

一方、路線に対する線形情報として、道路中心線形を一元的な道路線形情報とし、それを基に経路情報を必要に応じて計算により得るという方法がある。この場合には、道路設計情報からの情報構築が可能である。ただし、道路中心線形に対してどのように車線情報を展開させるか、また車両自身が得た位置情報とどのように関連させるかという問題がある。この手法を用いて経路情報のモデル化を行うにあたっては、以下についての研究開発が必要である。

- ① 道路線形情報のモデル化
- ② 経路情報への展開
- ③ 位置情報と道路情報モデルとの関連
- ④ 自動車制御システムへの情報の伝達

3. 道路線形情報のモデル化

3-1 自動制御のための道路線形情報

道路線形情報モデルを定義するにあたって、道路線形情報の取得が問題となる。取得手法として、以下の手法が考えられる。

- ① 道路設計情報から導き出す方法
- ② 地図情報データから取得する方法
- ③ 実走による実測値を適用する方法

本研究ではこれらの方法のうち①の方法を用いる。それは、道路設計における道路線形要素は、自動車の理論上の軌跡に基づくモデルであり、制御情報を抽出することに適していること、またその情報は道路設計情報から容易に取得可能である等の理由による。

3-2 現行の道路設計における道路線形の定義

道路設計において、道路線形は平面線形と縦断線形という2つの線形により構成される。通常、道路線形は道路中心線の線形を示す。

a)平面線形

道路の平面線形は直線と円曲線、それらを円滑に接続するための緩和曲線という3つの要素により構成される。緩和曲線には一般に距離に対して曲率が比例するクロソイド曲線が適用される。これらの線形要素は、表-1 に示すようにそれぞれ異なったパラメータにより形状が定義される。

表-1 平面線形要素とパラメータ

線形要素	パラメータ
直線	距離(L)
円曲線	曲線半径(R) 曲線長(L)
緩和曲線	クロソイドパラメータ(A), 曲線長(L)

これらの線形要素から自動車の等速走行を前提に、操舵に関する情報を得ることができ、直線はハンドル角 0 度とした場合、円曲線はハンドル角を一定にして、クロソイドは自動車がハンドルを等速で回転させた場合の理論上の軌跡と合致する。

b)縦断線形

道路の縦断線形は直線と緩和曲線により構成される。緩和曲線には一般に2次曲線が適用されるが、表現上、曲線半径(R)が用いられる。これらを定義するパラメータは表-2 の通りである。

表-2 縦断線形要素とパラメータ

線形要素	パラメータ
直線	勾配、距離(L)
緩和曲線	曲線半径(R;放物線を曲線半径で表現) 距離(L)

3-3 曲率関数、勾配関数による道路線形表現

現行の道路設計における道路線形は、(1)に示したように線形要素毎に異なったパラメータにより定義されており、これらの道路線形要素から道路線形に対し連続的に制御情報を得ることは容易ではない。著者は先に道路設計における道路線形の定義手法として、道路線形を曲率関数、勾配関数としてパラメトリックに表現する手法を示した[5]。本研究においても同様の手法の適用を考える。

a)パラメータ距離 L の定義

自動車の等速走行を前提すれば、 $L = vt$ (ただし L : 距離, v : 速度, t : 時間) であるから、時間一速度一曲率系, 時間一速度一勾配系はそれぞれ距離一曲

率系，距離-勾配系と考えることができる。それぞれの系において道路線形の距離 L をパラメータとした関数を定義する。

b)曲率関数

等速で走行する自動車において，ハンドルの角度が一定であれば，その軌跡の曲率は走行距離に関わらず一定であり，直線あるいは円曲線となる。一方，運転者がハンドルを等角速度で回転させながら走行する場合には，その軌跡の曲率は走行距離に比例して増加あるいは減少する曲線，すなわちクロソイドとなる。これらの線形要素の連続である平面線形は，時間あるいは距離に対する曲率の関数として考えることができ，ここで距離 L に対する曲率変化を示す関数を曲率関数 $\Theta(L)$ とする。現行の道路設計において用いられている全ての線形要素（直線，円曲線，クロソイド曲線）は，曲率関数において1次関数として表現できる。

$$\Theta(L) = \Delta\theta \cdot L + \theta_s \tag{1}$$

ただし，

$\Delta\theta$: 曲率変化率

θ_s : 初期曲率

連続した道路線形では，曲率関数 $\theta(L)$ は連続した区分的1次関数と考えることができ，曲率関数を定義するためには，その境界条件 (L_n, θ_n) ($n=0,1,2,3 \dots$) を与えればよい。

c)勾配関数

現行の設計手法において，縦断線形要素は直線，縦断曲線で構成され，縦断曲線には一般に放物線が用いられている。したがって，縦断線形の微分である勾配は1次式で表現され，ある区間における勾配変化率を，初期勾配を，起点 $l=0$ とすれば，勾配関数 $J(l)$ は式(2)のように表現できる。

$$J(L) = \Delta j \cdot L + j_s \tag{2}$$

ここで，直線の場合には $\Delta j=0$ ，曲線の場合に $\Delta j \neq 0$ である。

平面線形と同様に縦断勾配も連続的であるから，勾配関数 $J(l)$ は連続であり，区分的に1次関数として取り扱うことができる。したがって，勾配関数 $J(l)$ は境界条件 (L_n, j_n) ($n=0,1,2,3 \dots$) により規定できる。

d)曲率関数・勾配関数による道路線形定義の例

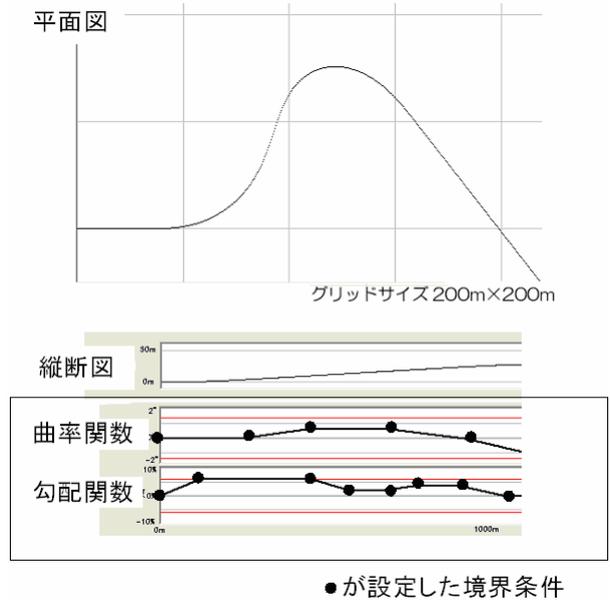


図-1 曲率・勾配関数による道路線形の定義例

自動車の走行制御情報としての曲率関数・勾配関数の適用は，道路線形を異なる線形要素に分割することなく，距離 L をパラメータとして，一元的に定義することができる利点を有している。

図-1 は，道路中心線の距離に対する曲率，勾配の境界条件を下段の2つのグラフのように定めた場合に，空間展開された平面線形，縦断線形を示した例である。

4. 経路情報への展開

3.の道路線形情報モデルは，道路中心線の情報モデルを示すものである。これらから経路情報を得るためには，道路中心線と経路との関連をモデル化する必要がある。

道路横断面において経路を表現するモデルを構築する場合，以下の3つの方法が考えられる。

- ①経路のみを抽出したモデルとする。
- ②道路構造モデルのみをモデルとする。
- ③経路，道路構造双方のデータをもたせる。

①②③の方法の特徴を表-3 に示す。

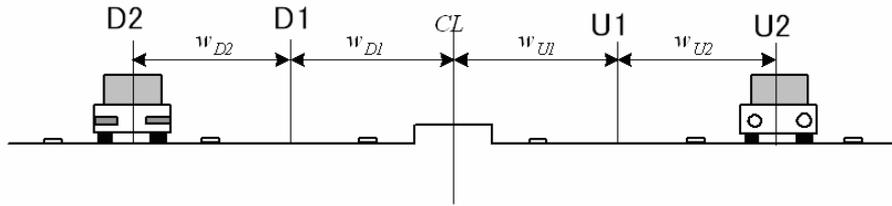


図-2 道路横断面のモデル化

表-3 横断面モデルの比較

モデル	データの汎用性
①経路のみ	<ul style="list-style-type: none"> データモデルは単純である。 データの汎用性に劣る。
②道路構造のみ	<ul style="list-style-type: none"> データの汎用性は高い。 経路情報自体は情報として有しておらず、利用側での計算が必要。
③ ①②の両方	<ul style="list-style-type: none"> 必要なデータを取り出すことは容易。 データ構造が複雑になり、データ更新が煩雑になる。

設計情報からの応用を考慮すると②の手法が有効と考えられるが、今回はより簡易に有効性を検証するため、最もデータモデルの単純な①のモデルを適用する。したがって横断面図上において、道路中心線と各経路との関係をモデル化することにより、リンクの構築が可能となる。

(1)非分離道路の場合

非分離道路の場合、道路の基準線は1本の道路中心線CLに集約できる。2車線道路の場合には、上下2方向の経路が1つの横断面に存在するが、ここで上り方向の経路をU、下り方向の経路をDとし、道路中心線CLからそれぞれの経路の距離をW_U、W_Dと定義する。

道路中心線に対する経路の平面的情報を定義するためには、W_U、W_Dの変換点（起終点を含む）を距離Lに対して定義すればよい。すなわち、(L_n, W_{U_n})及び(L_n, W_{D_n}) (n=0,1,2,3...)により定義できる。

道路横断面における経路の高さを求めるためには、路面の横断勾配に関する情報をモデルに加える必要がある。路面の横断勾配は、道路線形の曲率と連動した関数として自動的に定めることも可能であるが、ここでは既存の道路での適用を考慮しデータとして定義する。横断勾配については、道路中心線を基準として上下線一体となって回転する場合及び中心線

を基準として上下線が異なる勾配を有する場合がある。したがって、ここでは上下線を異なる変数により定義する。上り線の横断勾配をI_U、下り線をI_Dとする。ただし道路中心線からそれぞれ水平・外向きに0%を取り、それより上となる場合を正として定義する。横断勾配を定義するためには、横断勾配の変換点を距離Lに対して定めればよく、(L_n, W_{D_n}) (ただし、n=0,1,2,3...)により定まる。

2)分離道路の場合

中央分離帯で分離された4車線以上の道路の場合、同一の道路断面に4つ以上の経路が存在する。これらの経路と道路中心線との位置関係を定義するにあたって、以下の2つの方法が考えられる。

①すべての経路について道路中心線からの距離により定義する。

②隣接する経路間の距離により定義する。

手法①では容易に経路を定義することができるが、それぞれの経路間の関連性を得ることができない。すなわち、走行車両が車線変更を行う場合にどの車線に移るべき車線情報を得ることが難しいという問題がある。そこで、本研究では手法②を採用する。この場合、経路情報に、隣接する経路が何かというトポロジを定義する必要がある。

図-2の通り、道路中心線寄りから上り方向の経路をU₁, U₂, ..., U_n、下り方向の経路をD₁, D₂, ..., D_nとする（ただしnは方向別の経路数）。道路中心線CLからU₁間の距離をW_{U0}、U₁-U₂間の距離をW_{U1}、U_{n-1}-U_n間の距離をW_{U_{n-1}}とする。同様にCLからD₁間の距離をW_{D0}、D₁-D₂間の距離をW_{D1}、U_{n-1}-U_n間の距離W_{D_{n-1}}とする。

経路情報は、(内側隣接経路, 幅員, 外側隣接経路)であり、上り経路U₁の経路情報は(CL, W_{U0}, U₁), U₂の経路情報は(U₁, W_{U1}, U₃), U_nの経路情報は(U_{n-1}, W_{U_{n-1}}, NULL)等と表現できる。ただしNULLは空文字を示す。同様に下り経路についてもD₁の経路情報は(CL, W_{D0}, D₁), D₂の位置情報は(D₁, W_{D1}, D₃), D_n

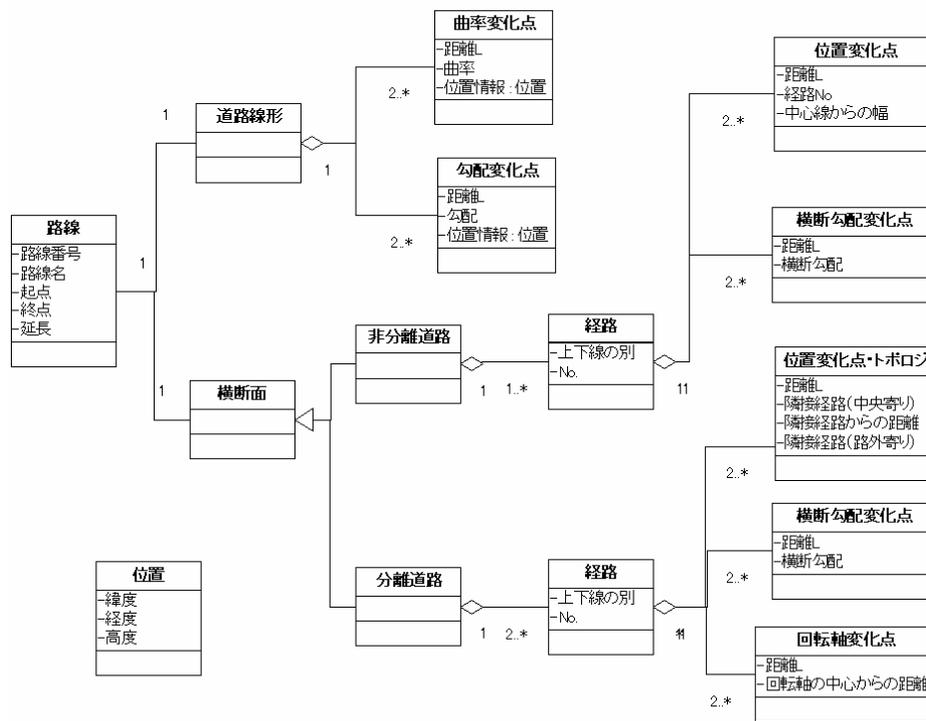


図-5 経路情報データモデル (UML)

の経路情報は $(U_{D-1}, W_{UD-1}, \text{NULL})$ 等と表現できる。これらについても距離 L に対する変換点のみを定義する。

分離道路における横断勾配については、設計により勾配を付するための路面の回転軸が異なる。この問題に対しては、上下方向それぞれに対し、道路中心線に対する回転軸の位置を定義すればよい。

これらの情報に基づき、複数の経路に関する空間座標、操舵のために必要な曲率、横断勾配、主に加減速のために必要な縦断勾配の情報を容易に得ることができる。

図-4 は、非分離の2車線道路を例として経路を導いた例である。道路中心線 CL 及び D, U の2本の経路が描かれている。

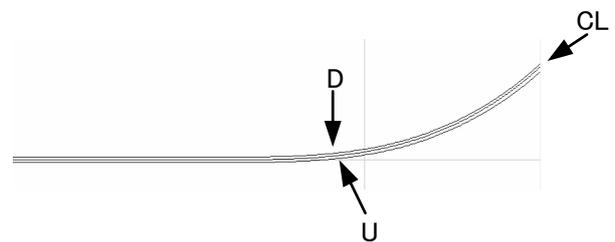


図-4 経路の導出例
(非分離2車線道路の例)

5. 位置情報と経路情報モデルとの関連

走行する自動車が取得し得る位置情報は、GPS をベースとした緯度・経度情報である。一方、4. で構築したモデルにおいては、位置情報は路線の距離 L をベースとしている。両者を関係させるためには、緯度経度情報を経路情報モデルに埋め込むか、ある

いは地図情報 DB をベースとして経路情報モデルを空間に展開する方法がある。前者の方法によれば地図情報 DB とのマッチングを必要とせず、計算が比較的容易である利点がある。一方、後者の方法によれば、データマッチングに時間がかかること、また両者の整合時の誤差が懸念される等の問題がある。このような点を考慮して、本研究では前者の手法を用いることとする。

4. の経路情報モデルへの緯度経度情報の埋め込みは、線形を導くための要素である曲率変化点、勾配変化点の2点に対して行う。これにより経路情報を空間展開する際に、緯度・経度の情報も比較的高い精度で得ることができる。

4, 5の定義に従い作成した経路情報モデルスキーマを示すUMLクラス図を図-5に示す。

6. 自動制御システムへの情報の伝達

本システムを適用した場合の自動制御システムに対する情報伝達のプロセスを図-6に示す。

まずGPSによる位置情報の取得が行われ、緯度・経度・高度等の情報を取得する。求められた緯度経度情報に基づき、現在、どの路線の上にいるか、またその路線上の位置(距離 L)はどこかを調べる。路線上の位置がわかれば、前方の曲率や縦断勾配、路面の横断勾配等の情報取得が可能となる。進行方向前方にあたる線形について、今後予想される操舵・加減速のための制御量を予測する。その量に基づき、実際の制御を行う。その操作が適正に行われたかの評価(例えば車両が車線内にいるかどうか等)を行い、必要であれば補正制御を行う。目的地に達していなければ、位置情報取得に戻るという流れになる。

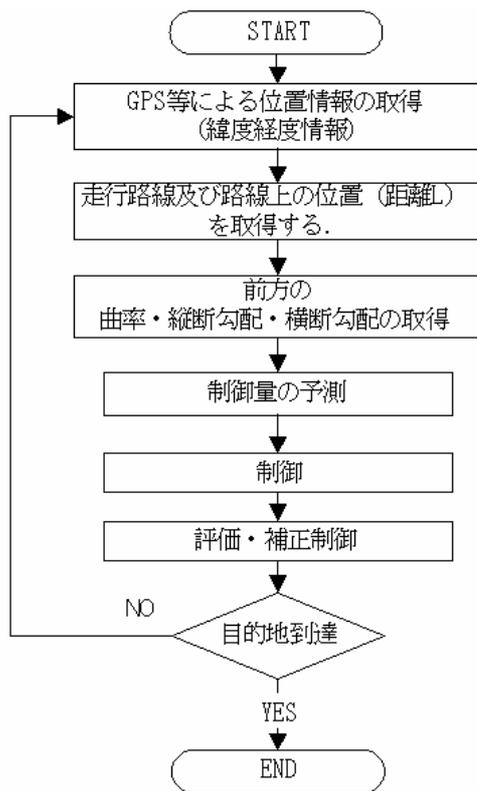


図-6 制御システムフロー図

7. むすび

本研究では、自動走行を行う自動車を得るべき道路線形情報をいかにモデル化すべきかについて検討を行い、モデルの構築を行った。経路情報モデルの

構築には曲率関数・勾配関数を応用し、設計情報からの流用を可能なものとした。またGPS等の位置情報と関連させる方法、自動制御システムへの情報伝達プロセス等について検討を行なった。

今後の課題として、まずモデルのより詳細な検証が必要である。現在のモデルは基本的な道路構造は定義可能であるが、路線途中での車線数の増減等については、明確なルールを定めていない。より詳細な検討を行い、複雑な道路構造をも再現できるようなモデルへと発展させていくとともに、プロトタイプシステムを構築し、検証を行う必要がある。

またもうひとつの課題として、位置情報の精度の問題がある。現状では位置情報取得のためにGPSを使用しているが、D-GPSにおいても位置精度は1~5m[6]の精度しか得ることはできない。さらに地下道やビル街の道路の走行においては、GPSとジャイロを併用した位置測定が必要となり、厳密な制御を行うには十分な精度が得られないのが現状にある。今回、開発した情報モデルでは必ずしも厳密な空間座標が必要なのではなく、路線上の走行位置(距離 L)が得られればよい。このような問題に対し、GPS以外の方法による位置特定の方法についての検討も必要であると思われる。具体的にはRFIDタグ等の無線や赤外線通信の技術、画像処理による標識認識技術[7]等を応用する等により、精度を高める方法を模索していく必要がある。

謝辞

本研究の一部は、(財)日本建設情報総合センターの研究助成を受けて実施したものです。

参考文献

- [1]角本繁編著・Kiwi-W コンソーシアム：カーナビゲーションシステムー公開型データ構造KIWIとその利用方法，共立出版，2003.
- [2]Whelan, R.: Smart Highways, Smart Cars, Artech House Publishers, 1995.
- [3]PIARC Committee on Intelligent Transport, Artech House Publishers, 1999.
- [4]松下温・屋代智之：ITSと情報通信技術，裳華房，2003.
- [5]蒔苗耕司：曲率関数・勾配関数による道路幾何構造の3次元設計，土木学会論文集, No.639/IV-46, pp.13-22, 2000.
- [6]厳網林：GISとその応用，日科技連，2003.
- [7]蒔苗耕司・菅野照：画像処理技術を用いた新たな道路標識システムの提案,第1回ITSシンポジウム2002 Proceedings, ITS Japan, pp.137-142, 2002.