

(財)日本建設情報総合センター研究助成事業
道路設計情報のモデル化に関する研究報告書

平成15年9月

道路設計情報のモデル化に関する研究

目 次

1. 研究の目的.....	1
2. 道路線形の関数化モデル.....	2
2-1 現行の道路設計における道路線形の定義.....	2
2-2 曲率関数, 勾配関数による道路線形表現.....	3
3. 道路設計情報モデルの構築.....	5
3.1 道路構造令のオブジェクト指向分析.....	5
3.2 道路設計情報モデルの構築.....	7
4. 道路設計支援システム Highway Modeling Sequencer の開発.....	10
4.1 Highway Modeling Sequencer (HMS)の開発.....	10
4.2 道路横断構成のモデリング.....	11
4.3 3次元道路幾何構造のモデリング.....	14
4.4 道路付属物のモデリング.....	22
5. 道路設計情報モデルの ITS への応用.....	26
5-1 経路情報への展開.....	26
5-2 自動制御システムへの情報の伝達.....	30
5-3 経路情報モデルに関する今後の課題.....	30
6. まとめと今後の課題.....	32

1. 研究の目的

近年のコンピュータ技術の急速な進歩に伴い、道路設計分野における CAD 技術の導入も急速に普及しつつある。またネットワーク技術の普及、建設 CALS の進展に伴い、設計情報の交換技術に関する要求も急速に高まりつつある。一方、製造業を中心として、オブジェクト指向の概念を適用し、製品の設計情報のモデル化（プロダクトモデル）が進められ、既にその実用化が図られつつある（STEP 等）。

このようなプロダクトモデルの概念を適用した道路の設計情報のモデル化に関する研究が、欧米を中心として進められており、ドイツの OKSTRA¹⁾のように既に実用化の段階に達しているものもある。一方、日本においては製図情報の電子化とその標準化に主眼が置かれ、プロダクトモデルに対する関心度は極めて低く、近年、ようやく日本道路公団による JHDM(Japan Highway Data Model)²⁾等の研究が始まった段階にある。

本研究では、道路線形の関数化モデル³⁾に基づき、道路の路線距離を基軸とした道路設計情報モデルの構築を行うとともに、その実装システムのプロトタイプを構築し、モデルの有効性・問題点について検証する。さらに道路設計情報モデルの ITS への適用についても検討する。

2. 道路線形の関数化モデル

2-1 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⁴⁾。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2-1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 2-1 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⁵⁾。

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2-2の通りである。

表 2-2 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)

2-2 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, 2-1 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. 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-速度-曲率系, 時間-速度-勾配系はそれぞれ距離-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.

$$\Theta(L) = \Delta\theta \cdot L + \theta_s \quad (1)$$

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 Δj , 初期勾配を j_s , 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.

$$J(L) = \Delta j \cdot L + j_s \quad (2)$$

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) ($n=0,1,2,3\cdots$) 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

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 2-3 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。

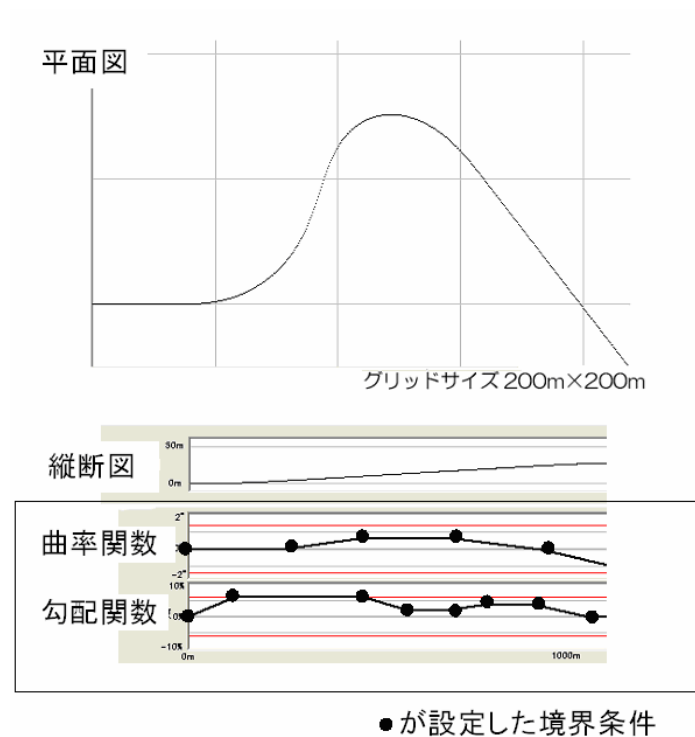


図 2-3 曲率・勾配関数による道路線形の定義の例

3. 道路設計情報モデルの構築

本研究における設計情報モデルは, 2. で示した距離を基幹情報としたパラメトリックな道路線形に基く道路設計情報モデルの構築を考える.

3.1 道路構造令のオブジェクト指向分析

道路の構成要素を整理するために, 道路設計基準である道路構造令について, オブジェクト指向分析を行い, UML(Unified Modeling Language)による構成要素(クラス)の整理を行った. 結果を示す図 3-1 に示す.

3.2 道路設計情報モデルの構築

本研究の主眼は、距離情報を基幹情報として扱った場合のモデルのプロトタイプを構築するとともに、その実装システムを構築することであり、図 3-1 に示されるような現状で規定されている全ての道路構造物を網羅し、それをモデル化しようとするものではない。そこで本研究で扱う道路の構成要素を以下の要素に限定する。

- ・車線
- ・路肩
- ・中央帯
- ・歩道
- ・道路付属物（防護柵、樹木、標識）

道路情報モデルの構築においては、これらの構成要素のパラメータ（幅員等）を定めるとともに、基幹となる距離情報との関連を示す必要がある。構築した道路設計情報モデルを図 3-2 に示す。

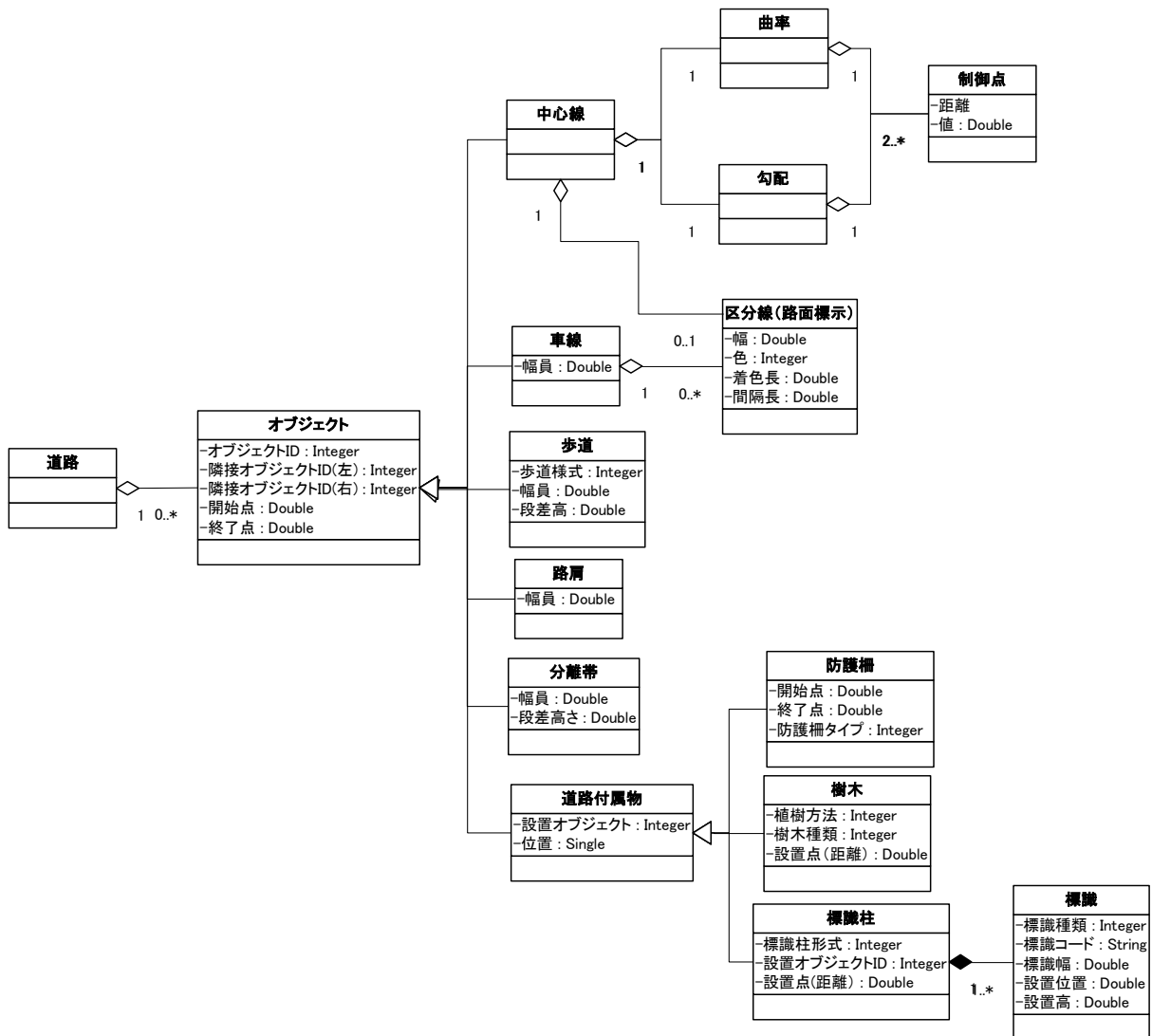


図 3-2 道路設計情報モデル

表 3-1 クラス・属性の説明

クラス	属性	説明
道路		ルートとなるオブジェクトであり、全てのオブジェクトを統括的に支配する。
基本オブジェクト		道路の基本構成要素
	オブジェクト ID	オブジェクトのシーケンシャル ID
	隣接オブジェクト ID(左)	左に隣接するオブジェクトの ID を示す
	隣接オブジェクト ID(右)	右に隣接するオブジェクトの ID を示す。
	開始点	道路線形に対する当該オブジェクトの存在開始点（距離）
	終了点	道路線形に対する当該オブジェクトの存在終了点（距離）。
中心線		曲率，勾配により規定される道路の中心線オブジェクト
	曲率	制御点の情報を有する。
	勾配	制御点の情報を有する。
制御点		曲率及び勾配の制御点
	距離	制御点の位置（距離）
	値	制御点のもつ値
車線		車線オブジェクト
	幅員	車線の幅員を示す。
歩道		歩道オブジェクト
	歩道様式	歩道の様式の情報（段差の有無等によりコード化）
	幅員	歩道幅員を示す。
	段差高さ	段差のある場合の段差の高さを示す。
路肩		路肩オブジェクト
	幅員	路肩の幅員を示す。
中央帯		中央帯オブジェクト
	分離帯幅員	中央帯のうち分離帯の幅員
	側帯幅員	中央帯のうち側帯の幅員
	段差高さ	分離帯のある場合の段差の高さ
道路付属物		道路付属物オブジェクト
	設置オブジェクト ID	当該道路付属物が設置されるオブジェクト
	断面位置	設置オブジェクトに対する付属物の断面上の位置
防護柵		防護柵オブジェクト
	開始点	設置区間の開始位置
	終了点	設置区間の終了位置
	形式	防護柵の形式（ガードレール，ガードケーブル等）

クラス	属性	説明
樹木		樹木オブジェクト
	植樹形式	植樹柵の有無等
	樹木種類	樹木の種類
	設置点	樹木の位置（距離）
標識柱		標識柱オブジェクト
	標識柱型式	標準，F型，門型等
	設置点	標識柱の位置（距離）
標識板		標識板を示すオブジェクト
	標識コード	標識内容を表すコード
	幅	標識板の幅
	設置位置	標識柱に対する設置の水平位置
	設置高	標識柱に対する設置高
	標識データ	標識の画像データの所在

4. 道路設計支援システム Highway Modeling Sequencer の開発

4.1 Highway Modeling Sequencer (HMS)の開発

3.で構築したモデルは、道路中心線の距離情報を基幹情報とした設計情報モデルであり、線形形状、横断構成要素も距離情報に従属的に定義される。従って、本モデルに基づいた道路設計支援システムの構築にあたっては、距離情報をベースとし、その上で曲率や勾配、横断構成、付属物の設置等の検討ができるシステムとすることを旨とする。システムのイメージは図 4-1 の通りである。

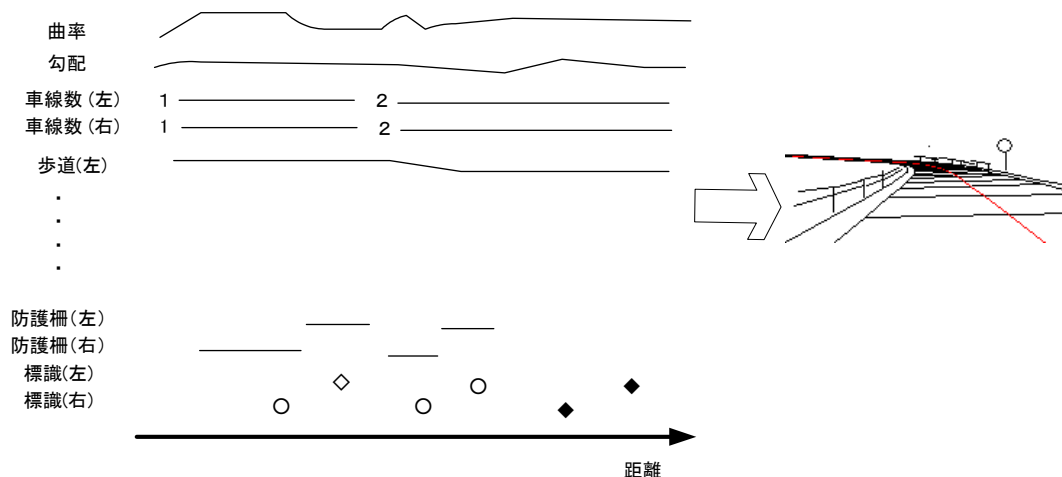


図 4-1 道路設計支援システムのイメージ

このような距離のような連続的な 1 次元情報に対してさまざまな情報を付加するシステムとして、DTM (DeskTop Music)のソフトウェアがある。これは連続的な時間軸に対して、音(MIDI)の情報を付加し、それを音楽として表現するものであり、一般に MIDI Sequencer と呼ばれる (図 4-2)。本研究におけるエディタも同様の概念を有するものであり、ここで Highway Modeling Sequencer(HMS)と呼ぶものとする。

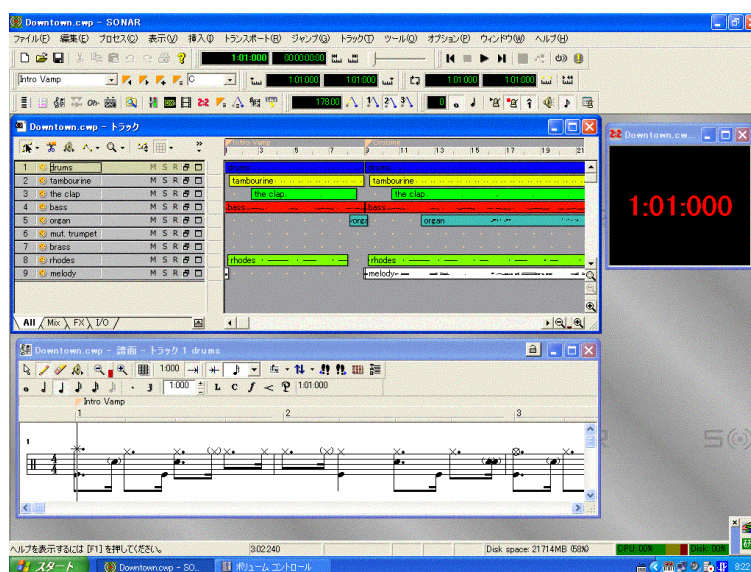


図 4-2 MIDI シーケンサの例(Cakewalk 社 Sonar2.0)

HMS の開発環境は、以下の通りである。

OS: Microsoft Windows2000/XP

開発環境 : Microsoft Visual Basic6.0

OpenGL (グラフィックライブラリ)

4.2 道路横断構成のモデリング

3. で対象とした横断面の構成要素は以下の 5 つの要素である。

- ・ 中心線
- ・ 車線
- ・ 歩道
- ・ 路肩
- ・ 中央帯

これらの要素について、必要なパラメータを設定し、横断面の形状を定義する必要がある。

以下は 3.2 で定義したデータモデルを用いて、横断面を定義した例であり、定義される横断面は図 4-3 の通りである。

表 4-1 横断面定義の例 (幅員, 段差, 距離情報の単位は m)

中心線
オブジェクト ID: 001
隣接オブジェクト ID (左) : 002
隣接オブジェクト ID (右) : 002
開始点 : 0
終了点 : 200
曲率
制御点 : (0,0), (200,0)
勾配
制御点 : (0,0), (200,0)
中央帯 :
オブジェクト ID : 002
隣接オブジェクト ID (左) : 003
隣接オブジェクト ID (右) : 007
開始点 : 0
終了点 : 200
分離帯幅員 : 2.0
側帯幅員 : 0.5
段差高さ : 0.15
車線 :

オブジェクト ID : 003

隣接オブジェクト ID (左) : 004

隣接オブジェクト ID (右) : 002

開始点 : 0

終了点 : 200

幅員 : 3.0

車線 :

オブジェクト ID : 004

隣接オブジェクト ID (左) : 005

隣接オブジェクト ID (右) : 003

開始点 : 0

終了点 : 200

幅員 : 3.0

路肩 :

オブジェクト ID : 005

隣接オブジェクト ID (左) : 006

隣接オブジェクト ID (右) : 004

開始点 : 0

終了点 : 200

幅員 : 0.75

歩道 :

オブジェクト ID : 006

隣接オブジェクト ID (左) :

隣接オブジェクト ID (右) : 005

開始点 : 0

終了点 : 200

幅員 : 3.0

車線 :

オブジェクト ID : 007

隣接オブジェクト ID (左) : 002

隣接オブジェクト ID (右) : 008

開始点 : 0

終了点 : 200

幅員 : 3.0

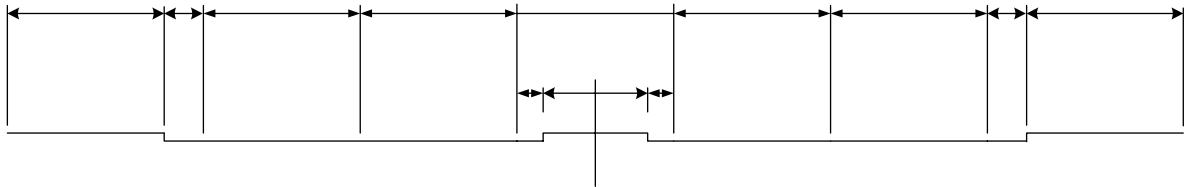
車線 :

オブジェクト ID : 008

隣接オブジェクト ID (左) : 007

隣接オブジェクト ID (右) : 009

開始点 : 0
 終了点 : 200
 幅員 : 3.0
 路肩 :
 オブジェクト ID : 010
 隣接オブジェクト ID (左) : 009
 隣接オブジェクト ID (右) : 011
 開始点 : 0
 終了点 : 200
 幅員 : 0.75
 歩道 :
 オブジェクト ID : 011
 隣接オブジェクト ID (左) : 010
 隣接オブジェクト ID (右) :
 開始点 : 0
 終了点 : 200
 幅員 : 3.0



#の後の番号はオブジェクト ID, その他の数値の単位は m

図 4-3 横断面の例

4.3 3次元道路幾何構造のモデリング

(1) 幾何構造モデリング

曲率関数，勾配関数からの3次元道路幾何構造のモデリングに関しては，基本的には蒔苗のモデルに従う．図4-4は，モデリングスキーマであり．設計者が設定すべき条件は，第1階層の設計基本条件（設計速度，設計対象車両，基本車線幅員，基本路肩幅員，基本横断勾配）及び第4階層の曲率関数・勾配関数である．

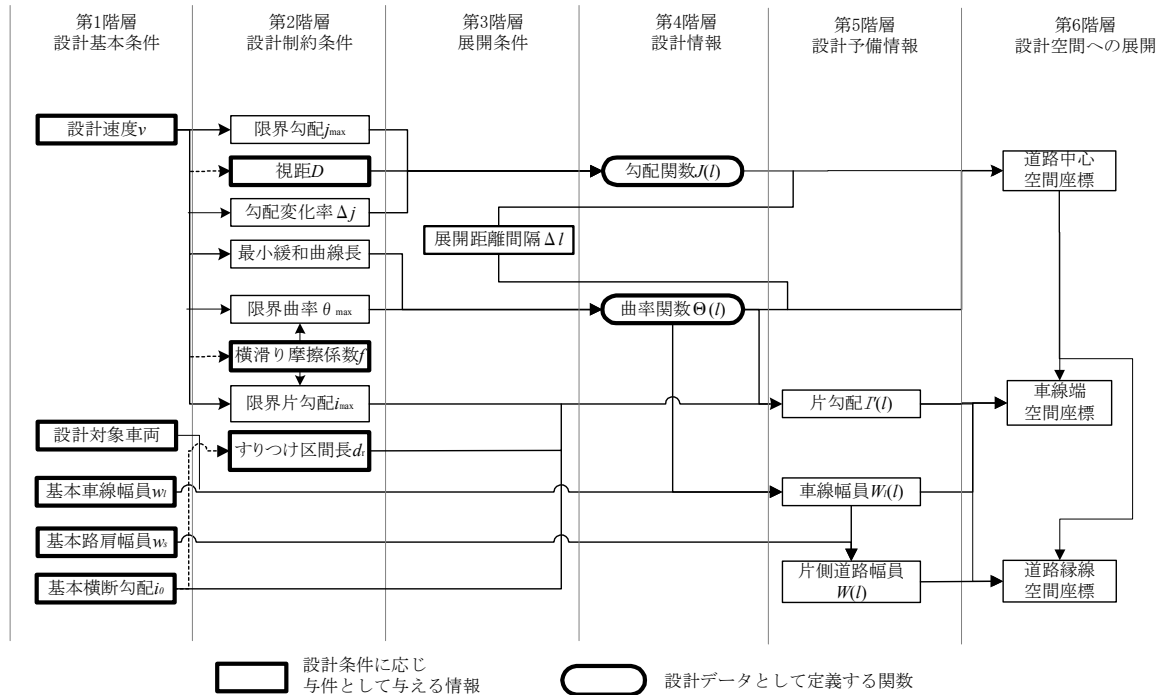


図 4-4 モデリングスキーマ

曲率関数 $\Theta(l)$ ，勾配関数 $J(l)$ における境界条件を基にすれば，距離 l の増分 Δl を定義することにより， Δl 間隔での道路線形の3次元モデルの構築が可能である．

a) 平面線形のモデリング

区間 n における曲率関数 $\Theta(l)$ の境界条件を基に，その区間における曲率変化率 $\Delta\theta$ 及び線形要素が規定される．線形要素の種類により座標計算方法は異なるから，それに応じて座標計算を行う必要がある．また次の区間における初期方向角・位置を決定するため，距離に l_n に対する方向角（接線角） $T(l_n)$ ，及び平面座標 $(x_c(l_n), y_c(l_n))$ を求めておく必要がある．

① 直線

区間 $n-1$ において求められた方向角 $T(l_{n-1})$ を基にすれば，式(4-1)により距離 l に対する平面座標 $(x_c(l), y_c(l))$ を求めることができる．

$$\begin{aligned} x_c(l) &= (l - l_{n-1}) \cos T(l_{n-1}) + x_c(l_{n-1}) \\ y_c(l) &= (l - l_{n-1}) \sin T(l_{n-1}) + y_c(l_{n-1}) \end{aligned} \quad (4-1)$$

②円曲線

円曲線区間 n の起点における距離を l 、次の計算点の距離を $l + \Delta l$ とする。対応する2点間の平面座標上での直線距離 Δd を、円曲線区間 n の曲率を θ_n とすれば、 $l + \Delta l$ に対する平面座標は式(4-2)から求めることができる。

$$\begin{aligned}x_c(l + \Delta l) &= \Delta d \cos(\theta_n \cdot \Delta l + T(l_{n-1})) + x_c(l) \\y_c(l + \Delta l) &= \Delta d \sin(\theta_n \cdot \Delta l + T(l_{n-1})) + y_c(l)\end{aligned}\quad (4-2)$$
$$\Delta d = \frac{2\Delta l}{\theta_n} \sin \frac{\theta_n}{2}$$

③クロソイド

クロソイド区間の起点の曲率 θ_s を 0 とすれば、区間における方向角の変化量 τ は式(8)より求められる。

$$\tau = \int_0^l \Delta\theta \cdot l \, dl = \frac{\Delta\theta}{2} l^2 \quad (4-3)$$

ただし、式(4-3)は区間起点における距離 $l=0$ とした場合である。区間長は既知であるから、区間長 L とすれば、クロソイドパラメータ A は式(9)により決定できる。

$$A = \frac{L}{\sqrt{2\tau}} \quad (4-4)$$

なお、区間 n の起点における曲率 $\theta_s \neq 0$ の場合、 A を計算するために、区間における曲率関数を外挿し、曲率 θ が 0 となる点 $l_{\theta=0}$ を導き、点 $l_{\theta=0}$ を原点とした場合の τ 及びクロソイドパラメータ A を求める必要がある。

式(4-4)を基にすれば、 Δl の増加に対する τ を求めることができるから、クロソイドの平面座標を求める公式⁶を用いて、クロソイド区間の基本形状を数値的に決定できる。求められた形状の数値データを区間起点の座標、初期方向角、初期曲率、曲率関数の正負をもとに座標変換を行えば、区間における平面線形上の座標が定まる。

b)縦断線形

区間 n における勾配関数の境界条件を区間起点 (l_{n-1}, j_{n-1}) 、区間終点 (l_n, j_n) 、勾配関数の傾き Δj とすれば、勾配関数は、

$$J(l) = \Delta j(l - l_{n-1}) + j_{n-1} \quad (4-5)$$

と表すことができる。縦断線形は勾配関数の積分であるから、区間 n における距離 l の縦断高 $h_c(l)$ は式(11)により求めることができる。

$$\begin{aligned}
h_c(l) &= \int_{l_{n-1}}^l \{\Delta j(l-l_{n-1}) + j_{n-1}\} dl + h_c(l_{n-1}) \\
&= \frac{1}{2} \Delta j(l^2 - l_{n-1}^2) + (j_{n-1} - \Delta j \cdot l_{n-1})(l - l_{n-1}) + h_c(l_{n-1})
\end{aligned}
\tag{4-6}$$

c) 片勾配の決定

曲線を走行する自動車には遠心加速度が働くが、それを緩和する目的で片勾配が設けられる。その関係式は一般に式(4-7)のように表現される⁵⁾

$$i + f = \frac{v^2}{gR} \tag{4-7}$$

ただし、

f : 横滑り摩擦係数

i : 片勾配

g : 重力加速度(9.81m/s²)

R : 曲線半径(m)

横滑り摩擦係数 f については快適性をもとに設計速度に応じた許容値が示されているから、既知として扱うことができる。

一方、道路構造令では、設計速度より低速で走行する自動車や積雪・凍結等を考慮し、道路種別及び地域特性により片勾配を制限している。ここで片勾配の制限値を限界片勾配(i_{\max})と呼ぶ。

限界片勾配をどのように適用するかについて、文献⁴⁾ではいくつかの方法を示している。ここでは、それらのうち、限界片勾配時に最大曲率となるよう片勾配と曲率とを比例させる方法を適用する。 l に対する片勾配 $I(l)$ を求めるため、まず許容できる曲率最大値 θ_{\max} (限界曲率と呼ぶ) を式(4-8)により求める。

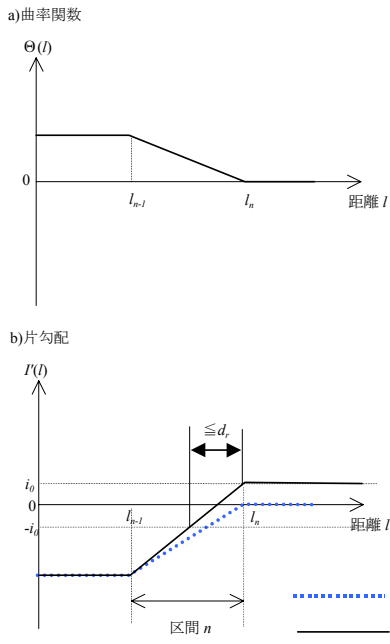


図 4-5 片勾配の排水補正(1)

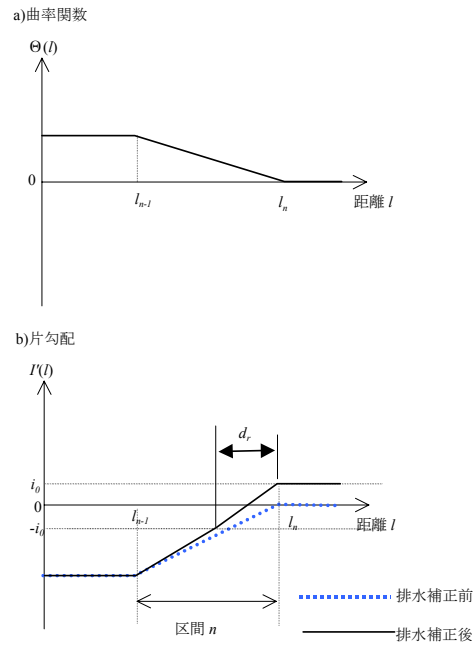


図 4-6 片勾配の排水補正(2)

$$\theta_{\max} = \frac{g(i_{\max} + f)}{v^2} \quad (4-8)$$

距離 l における片勾配 $I(l)$ は、曲率関数 $\Theta(l)$ を用いて式(14)より求めることができる。

$$I(l) = \frac{i_{\max} \cdot \Theta(l)}{\theta_{\max}} \quad (4-9)$$

式(4-9)により求められる片勾配は直線部で 0 となるが、道路構造令では路面排水を考慮した横断勾配を規定しており、直線部では所定の横断勾配とする必要がある。文献⁵⁾は、直線—緩和曲線—円曲線との接続区間において、図 4-5、図 4-6 に示すような片勾配すりつけ長に応じたすりつけ方法を例示している。ここでは、この方法を用いた排水補正モデルの例を示す。なお、モデルは一方向型横断形の道路と考え、路面は車道中心線を中心に回転する。

円曲線と直線とを結ぶ緩和曲線区間 n において、区間終点（距離 l_n ）において接続する直線区間の片勾配の値があらかじめ設定した基本横断勾配 i_0 となる場合を例とする。すなわち、区間 n の終点における片勾配 $I(l_n)$ の値を、式(4-10)のように置換える。

$$I(l_n)=0 \text{ のとき } I(l_n) \leftarrow i_0 \quad (4-10)$$

基本横断勾配 i_0 から $-i_0$ までのすりつけに必要な長さをすりつけ区間長 d_r とすると、排水補正後の片勾配は $I(l)$ は、条件に応じて式(4-11)(4-12)(4-13)により求められる。

$$\left| \frac{I(l_n) - I(l_{n-1})}{l_n - l_{n-1}} \right| < \left| \frac{2 \cdot i_0}{d_r} \right| \text{ かつ } I(l_n) = i_0 \text{ かつ } I(l_{n-1}) \cdot i_0 < 0 \text{ のとき,}$$

$l_{n-1} < l \leq l_n - d_r$ のとき,

$$I'(l) = \frac{-i_0 - I(l_{n-1})}{(l_n - d_r) - l_{n-1}} \cdot (l - l_{n-1}) + I(l_{n-1}) \quad (4-11)$$

$l_n - d_r < l \leq l_n$ のとき,

$$I'(l) = i_0 - \frac{2 \cdot i_0}{d_r} (l_n - l) \quad (4-12)$$

それ以外の場合

$$I'(l) = \frac{I(l_n) - I(l_{n-1})}{l_n - l_{n-1}} \cdot (l - l_{n-1}) + I(l_{n-1}) \quad (4-13)$$

一方、文献³⁾では単純な2車線道路のみを対象としていたが、今回、開発するシステムでは中央分離帯の存在する多車線道路のモデリングも対象とする。中央分離帯の存在する場合の回転軸の設定については、それぞれの車道中心線に回転軸をとる方法を用いた(図4-7)。

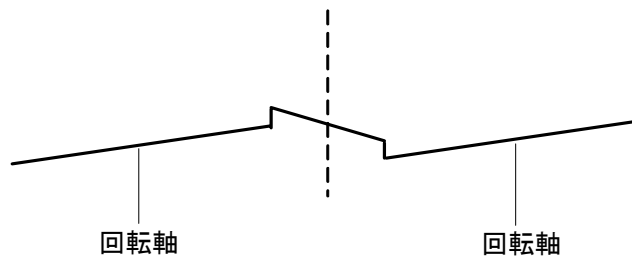


図 4-7 分離道路における回転軸

d)車線幅員

車線幅員は曲率 θ の関数であると考え、距離 l における車線幅員 $W_l(l)$ を式(4-14)(4-15)により求める。

普通自動車の場合：

$$W_l(l) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{\Theta(l)^2} - 64} + 1.25\right)^2 + 64} + 1.25 - \sqrt{\frac{1}{\Theta(l)^2} - 64} - 2.5 + w_l \quad (4-14)$$

セミトレーラの場合：

$$W_l(l) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{\Theta(l)^2} - 28.09} + 1.25\right)^2 + 28.09} + 1.25 - \sqrt{\frac{1}{\Theta(l)^2} - 109.09} - 2.5 + w_l \quad (4-15)$$

ただし、基本車線幅員 w_l .

$$W_l(l) \geq w_l.$$

基本モデルである非車線分離2車線道路では、基本路肩幅員 w_s を加えた片側道路幅員 $W(l)$ は、式(4-16)のように表現できる。

$$W(l) = W_l(l) + w_s \quad (4-16)$$

e)幾何構造モデル

曲率関数 $\Theta(l)$ 、勾配関数 $J(l)$ が規定されれば、距離 l に対する Δl 毎の道路中心線の3次元座標 $(x_c(l), y_c(l), h_c(l))$ 、方向角（接線角） $T(l)$ 、道路幅員（片側） $W(l)$ 、片勾配 $I(l)$ が自動的に定まる。片勾配の回転軸を道路中心線とすれば、式(4-16)(4-17)により道路縁線の座標を求めることができ、道路の幾何構造モデルを設計空間に構築できる。

道路縁線(左)座標($x_l(l)$, $y_l(l)$, $h_l(l)$)

$$\begin{aligned}x_l(l) &= W(l) \cdot \cos(T(l) + \frac{\pi}{2}) + x_c(l) \\y_l(l) &= W(l) \cdot \sin(T(l) + \frac{\pi}{2}) + y_c(l) \\h_l(l) &= h_c(l) - W(l) \cdot I'(l)\end{aligned}\tag{4-16}$$

道路縁線(右)座標($x_r(l)$, $y_r(l)$, $h_r(l)$)

$$\begin{aligned}x_r(l) &= W(l) \cdot \cos(T(l) - \frac{\pi}{2}) + x_c(l) \\y_r(l) &= W(l) \cdot \sin(T(l) - \frac{\pi}{2}) + y_c(l) \\h_r(l) &= h_c(l) + W(l) \cdot I'(l)\end{aligned}\tag{4-17}$$

(2)曲率関数・勾配関数の制約

(1)においては、曲率関数、勾配関数の決定において何の制約も考慮されていない。しかし、実際の設計では走行の安全性、快適性等を考慮した設計基準が定義されており、曲率関数と勾配関数の設定は制約を受ける。これらの制約は、設計システムのインターフェース上で行われる。

a)限界曲率

設計条件として、設計速度 v 、片勾配限界値 i_{\max} 、許容横滑り摩擦係数 f が与えられれば、式(4-18)により限界曲率 θ_{\max} が求まる。したがって、 $\Theta(l)$ は式(26)の条件により規定される。

$$\Theta(l) \leq \theta_{\max}\tag{4-18}$$

f 値については、道路構造令の最小曲線半径の規定条件として用いられている数値を用いればよい。

b)最小緩和曲線長

最小緩和曲線長は 3 秒間の走行距離以上に規定されている。すなわち、区間 n の曲率関数は、その境界条件の定義において式(4-19)により規定される。

$$\theta_{n+1} - \theta_n \neq 0 \text{ のとき, } l_n > l_{n-1} + 3v\tag{4-19}$$

c)縦断勾配

道路構造令では、縦断勾配に関する基準値は設計速度に応じた最大縦断勾配として与えられているが、この値は、車種毎、ギヤ毎に求められた自動車の登坂性能を基に総合的に判断して定められた値であって、設計速度との間で明確な関係式を有していない。対象車種を限定すれば、駆動力-走行抵抗の計算値を得ることも可能であるが、現行の設計基準と適合しない。そこで、ここでは道路構造令における縦断勾配基準値を示す数表から導いた式(4-20)を基に、最大勾配値 j_{\max}

を規制する.

$$\begin{aligned} v \geq 16.7(\text{m/s}) \text{ のとき, } j_{\max} &= \frac{8 - 0.18v}{100} \\ v < 16.7(\text{m/s}) \text{ のとき, } j_{\max} &= \frac{11 - 0.36v}{100} \end{aligned} \quad (4-20)$$

なお、縦断勾配の特例値については考慮していない.

d)縦断曲線長

道路構造令では縦断曲線長 L について、衝撃緩和、視距確保、視覚上の問題等を考慮した基準が定められており、これらについての算定式は式(29)の通りである⁵⁾.

$$\begin{aligned} \text{凹型曲線: } L &\geq \frac{V^2 |i_1 - i_2|}{360} \\ \text{凸型曲線: } L &\geq \frac{D^2 |i_1 - i_2|}{398} \\ \text{最小縦断曲線長: } L &\geq 3v \end{aligned} \quad (4-21)$$

ここで、

V :設計速度(km/h)

D :視距(m)

$|i_1 - i_2|$: 縦断勾配の代数差(%)

v :設計速度(m/s)

これらを基に、勾配関数の境界条件に対する規制条件を求めると式(4-22)の通りである.

$$\begin{aligned} j_n > j_{n-1} \text{ のとき, } \Delta j &\leq \frac{1}{3.6v^2} \\ j_n < j_{n-1} \text{ のとき, } \Delta j &\leq \frac{398}{100D^2} \\ j_n \neq j_{n-1} \text{ のとき, } l_n - l_{n-1} &\geq 3v \end{aligned} \quad (4-22)$$

なお、道路構造令では、道路の幾何構造の設計基準として、上述以外に視距及び合成勾配があげられているが、ここでの制約条件には含めない。それは、前者では、道路構造、周辺の地形、道路構造物等の状況により判断されるべきものであり、車線の道路構造を直接的に規定する条件ではないこと、また後者では、基準の運用において曖昧さが許容されており、明確な数値関数として定義できないこと、曲率関数・勾配関数のどちらかを修正するかは設計者の判断に委ねられるべきものであること等の理由による。

4.4 道路付属物のモデリング

(1)防護柵

防護柵については、ガードレールあるいはガードケーブルの2種類を対象とする（図4-8）。

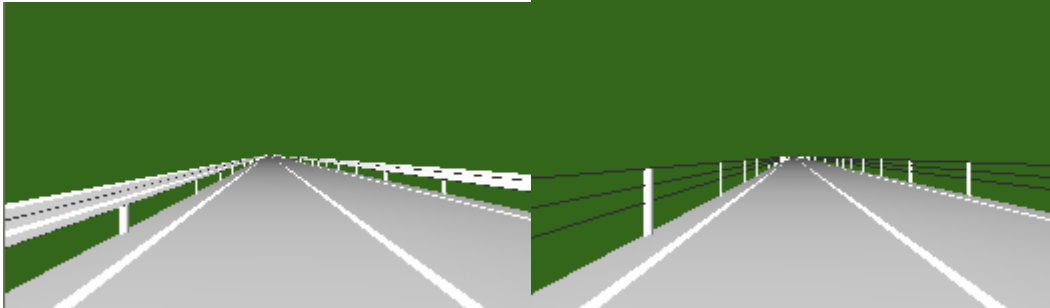


図4-8 ガードレール(左)とガードケーブル

防護柵のモデリングにおいては、これらが連続的な構造物であることを考慮し、左右それぞれの車線について、型式（ガードレールかガードケーブルか）をまず定め、開始点及び終了となる距離情報を設定することにより、自動的に形状生成を行うようにした。

(2)樹木のモデリング

樹木については、属性として植樹方法、樹木種類、設置点の3つが定義されている。今回のシステム構築にあたっての条件は以下の通りである。

- ・植樹方法：今回は考慮しない（植樹柵を設けない）
- ・樹木種類：今回は1種類に限定
- ・設置点：樹木の設置位置（距離情報）

なお樹木には、間接モデルを用いた簡易なモデルを適用した（図4-9）。

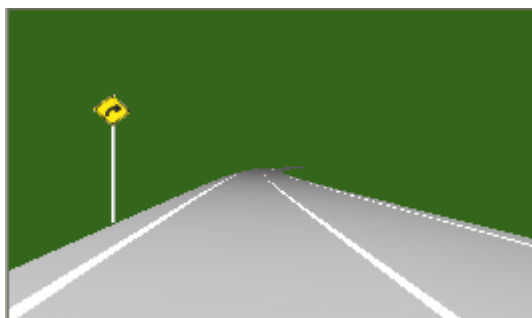


図4-9 樹木モデル

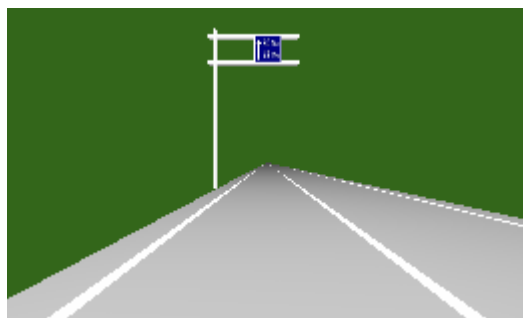
(3)道路標識

道路標識は、標識柱オブジェクトとそれに付随する標識板オブジェクトにより構成される。標識柱オブジェクトは、標識柱型式（標準標識柱，F型標識，門型標識），標識位置（距離情報）を定義することにより，路端に設置される（表 4-10）。

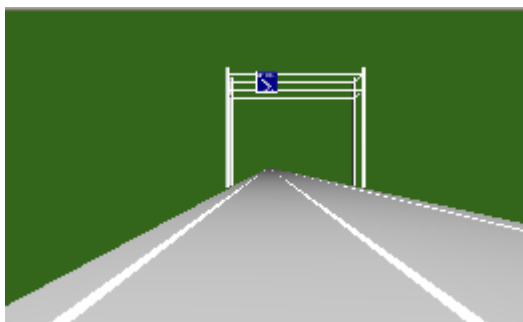
システム上，標識板オブジェクトは標識表示内容を示す表示データ（多くの場合，画像データ）とのリンクを有しており，予め選択した型式の標識柱に取り付けられる仕組みとなっている。



(標準標識柱)



F型標識柱



門型標識柱

図 4-10 識柱及び標識

4.5 HMS のユーザーインターフェース

構築したHMSのユーザーインターフェースを図4-11示す。

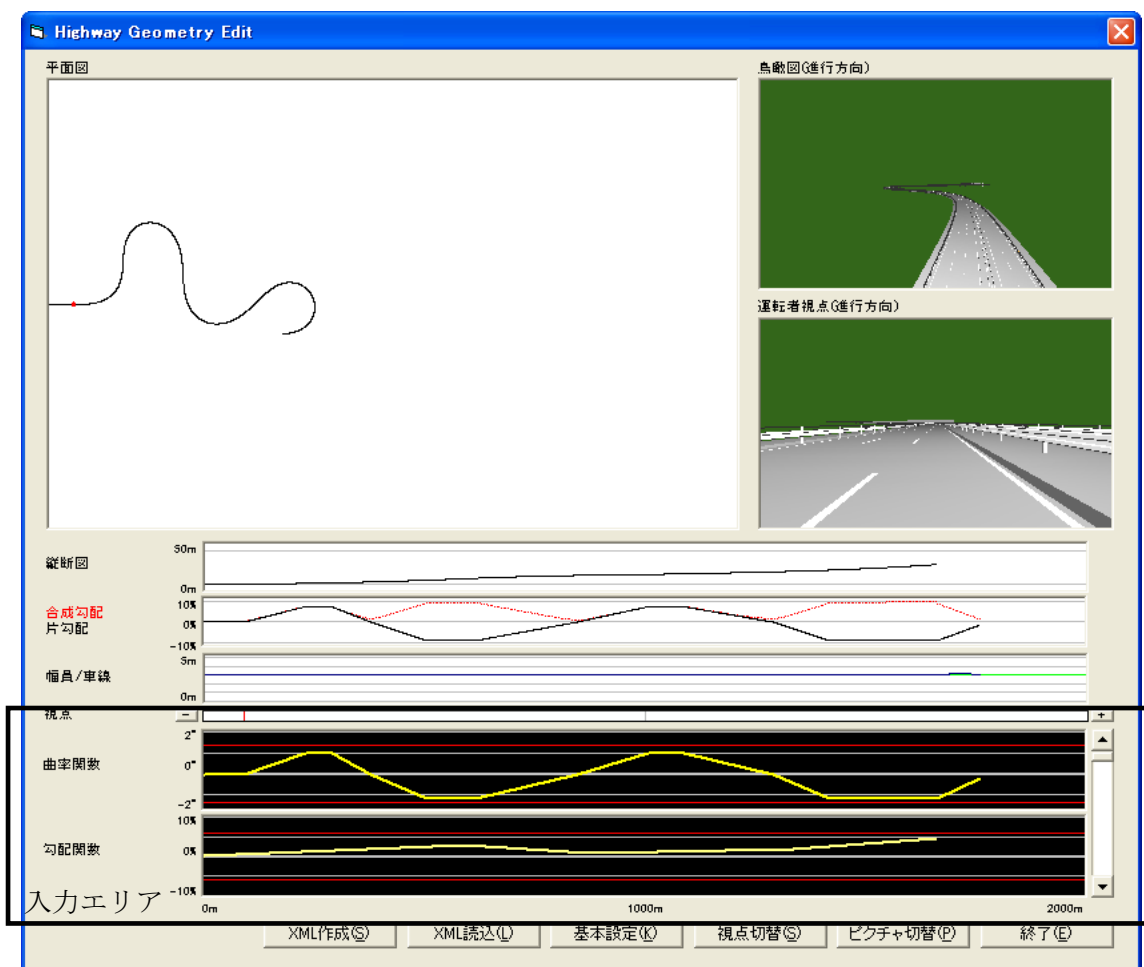


図 4-11 HMS のインターフェース

画面下部の背景が黒色のウィンドウが入力ウィンドウである。入力項目とその設定値を表示した画面を図4-1に示す。入力項目は、以下の項目である。

- ・曲率関数，勾配関数，車線数（左）（右），防護柵（左）（右），歩道幅（左）（右），分離帯幅，樹木（左）（右），標識（左）（右）

これらの項目に対する入力値に従い，図4-11のインターフェース上に平面図，縦断面図，あるいは透視図として表現される仕組みとなっている。また路線を通して固定的な設定条件については，基本設定画面で設定できるようにした（図4-12）。

また，システムとして構築したデータは，XML形式として保存される。

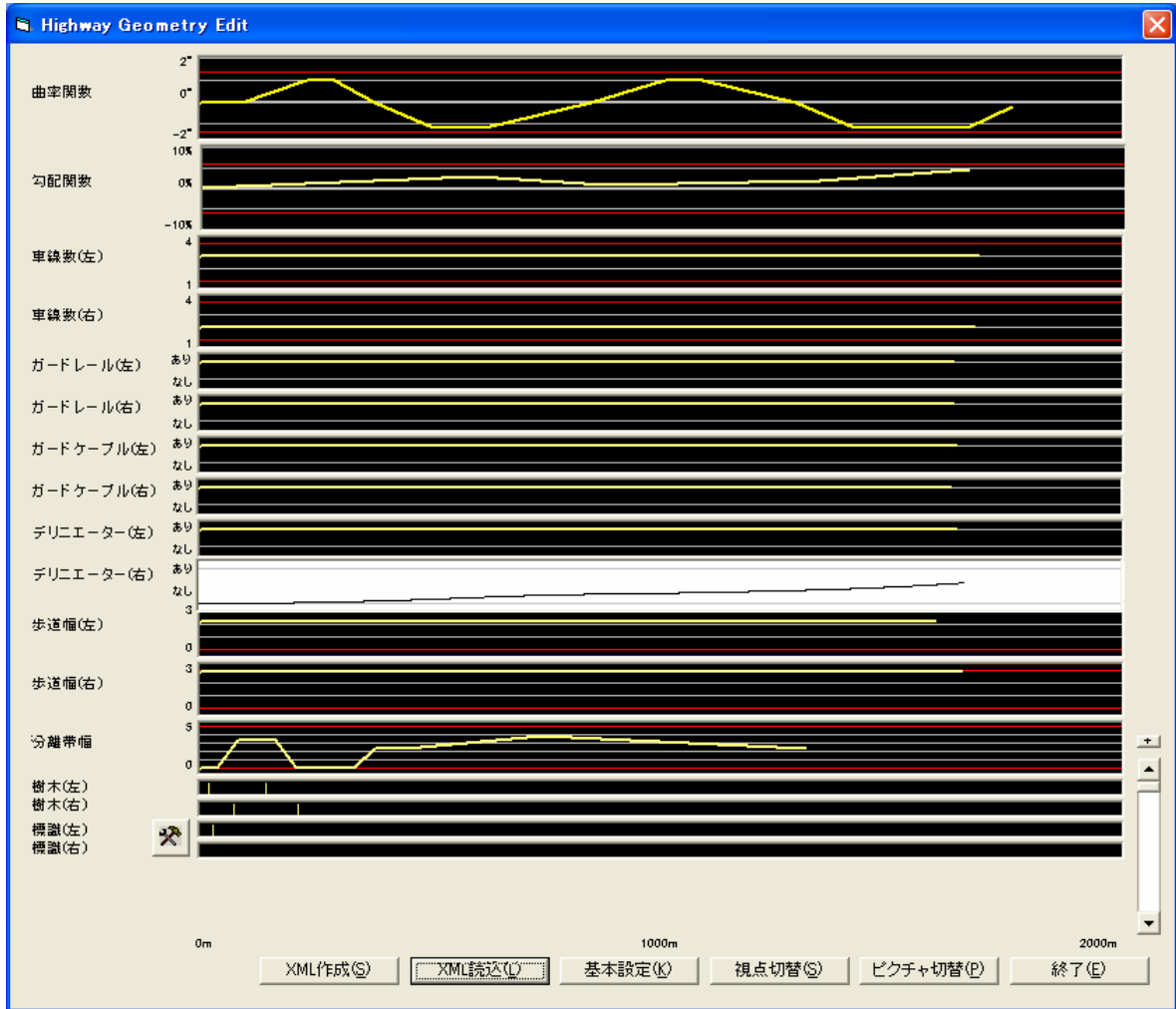


図 4-11 HMS 条件設定画面

The screenshot displays the 'Highway Geometry Edit' window with the following settings:

設計速度	14	運転者視点図視点高さ	1.2	歩道高さ	0.15
基本横断勾配	0	運転者視点図視距	55	ライン幅	0.15
基本車線幅員	3	鳥瞰図視点高さ	20	中央線(破線)長	3
基本路肩幅員	0.75	鳥瞰図視距	200	中央線(破線)間隔	5
横滑り摩擦係数	0.14	すりつけ長(片勾配)	40	車道分線(破線)長	2
最大片勾配	0.1	すりつけ長(車線)	20	車道分線(破線)間隔	3
最大勾配	0.0596	すりつけ長(中央分離帯)	45	すりつけ線(破線)長	2
最大曲率	0.687549354067	セミレーラ設定	普通自動車	すりつけ線(破線)間隔	2
最大分離帯幅	4.5	中央分離帯高さ	0.2	デリニエーター間隔	20
最小分離帯幅	1	中央帯側帯幅	0.3	支柱間隔	2
最小区間長	1				

View and Line Type Selection:

- 視点設定: 左視点 右視点
- 中央線種: 白実線 白破線 橙実線
- 中央分離帯種: 中央分離帯(ノーマル) 中央分離帯(ガードレール)

Buttons: 設定変更(E), 閉じる(C)

図 4-12 HMS 基本設定画面

5. 道路設計情報モデルの ITS への応用

5-1 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5-1に示す。

表 5-1 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1に対して定義すればよい。すなわち、 (L_n, W_{Un}) 及び (L_n, W_{Dn}) ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)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_{Dn}) (ただし、 $n = 0, 1, 2, 3 \dots$) 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。

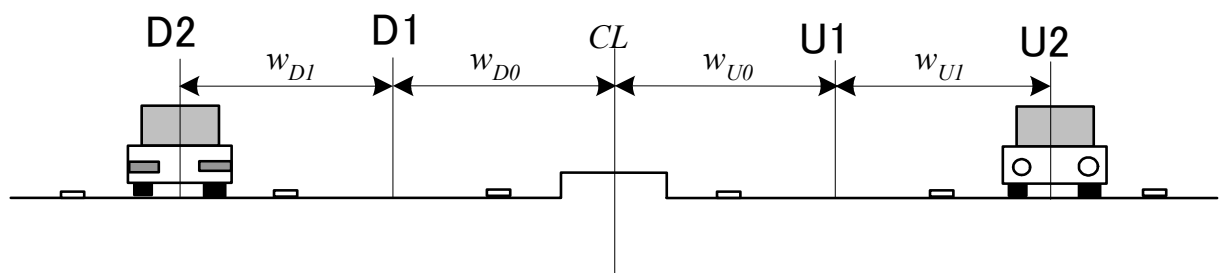


図 5-2 道路横断面のモデル化

図 5-2 の通り、道路中心線寄りから上り方向の経路を U_1, U_2, \dots, U_n 、下り方向の経路を D_1, D_2, \dots, 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 U_1 間の距離を W_{U0} 、 U_1-U_2 間の距離を W_{U1} 、 $U_{n-1}-U_n$ 間の距離 $W_{U_{n-1}}$ とする。同様に CL から D_1 間の距離を W_{D0} 、 D_1-D_2 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 U_1 の経路情報は (CL, W_{U0}, U_1) 、 U_2 の経路情報は (U_1, W_{U1}, U_3) 、 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 D_1 の経路情報は (CL, W_{D0}, D_1) 、 D_2 の位置情報は (D_1, W_{D1}, D_3) 、 D_n の経路情報は $(U_{D-1}, W_{UD-1}, NULL)$ 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 5-3 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。

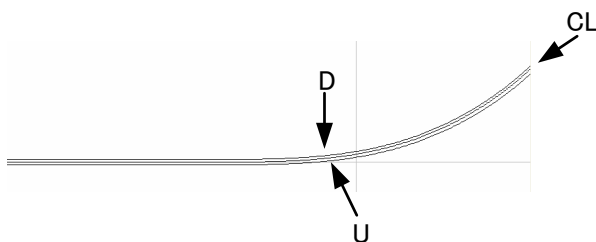


図 5-3 経路の導出例
(非分離 2 車線道路の例)

(3)位置情報と経路情報モデルとの関連

走行する自動車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，5-1 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．

5-1 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．

5-1 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 5-4 に示す．

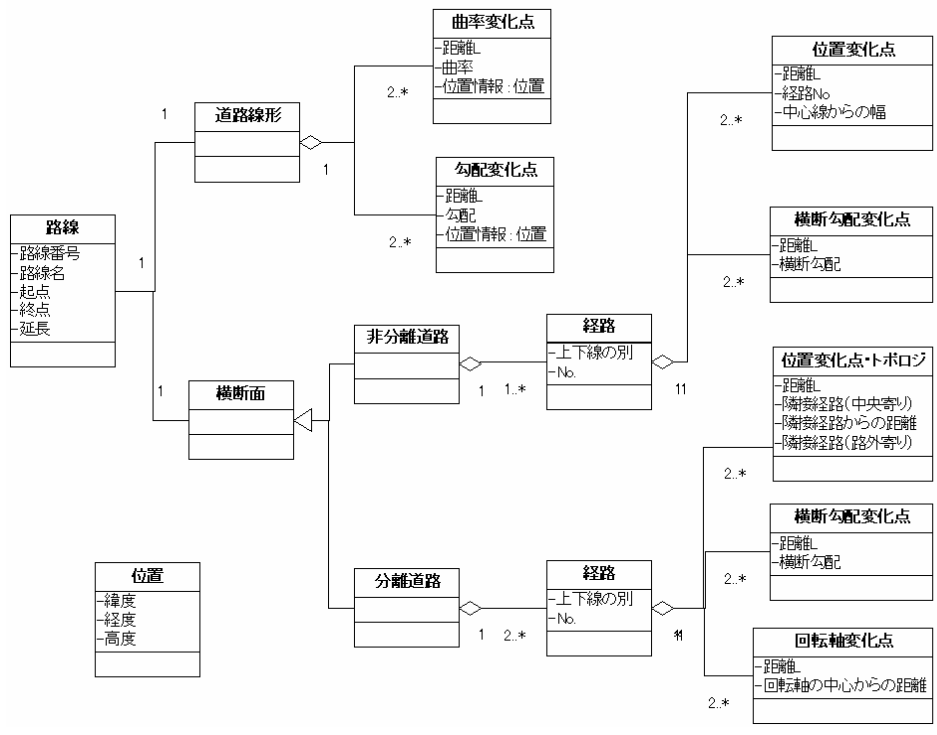


図 5-4 経路情報データモデル (UML)

5-2. 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 5-5 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。

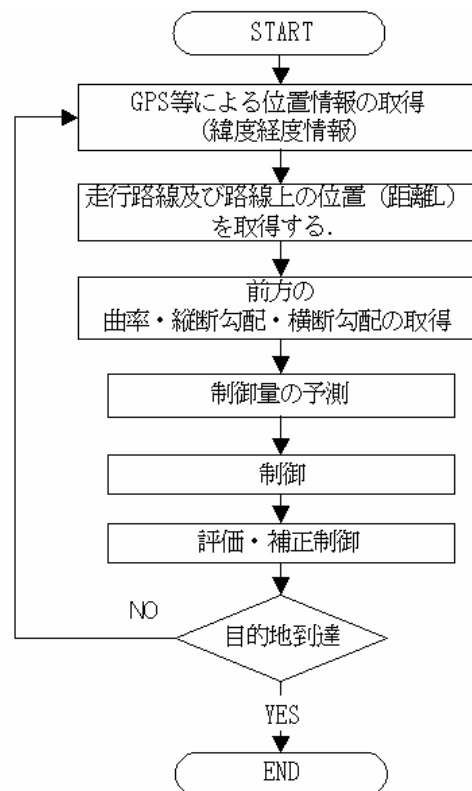


図 5-5 制御システムフロー図

5-3. 経路情報モデルに関する今後の課題

本研究では、自動走行を行う自動車が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1~5m⁷⁾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とジャイロと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⁸⁾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。

6. まとめと今後の課題

本研究では、曲率関数、勾配関数により表現された道路線形を基盤情報とした道路設計情報のモデル化を行った。さらにこの設計銃砲モデルを用いた道路設計支援システムとして、HMS (Highway Modeling Sequencer) の開発を行い、モデルの有効を検証した。さらに本モデルの応用分野として、本研究では ITS の一分野として、自動車の自動運転制御のための経路情報モデルとしての応用の可能性を示した。

本研究で構築したモデルでは、特定の要素に限定したモデル化を行ってきたが、今後はより現実への適用が可能なモデルへの発展を目指し、今回、構築した設計情報モデルのさらなる検証及び開発を進めていく必要がある。

またプロダクトモデル等の新たな情報モデルを設計に適用しようとする場合、現行の設計プロセスがその障壁となる可能性もある。新たな情報モデルを適用した場合の設計手法及び設計基準のあり方についても検討していく必要がある。

文 献

- 1) OKSTRA Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen, <http://www.okstra.de/>,2003.
- 2) 山崎元也・本郷廷悦・千葉洋一郎：Japan Highway Data Model 構築の基礎研究，土木情報システム論文集 Vol.10, 33-42, 2001.
- 3) 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.
- 4) ローレンス，H.：道路の線形と環境設計，中村英夫・中村良夫編訳，鹿島出版会，1976.
- 5) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，日本道路協会，1983.
- 6) 日本道路協会：クロソイドポケットブック，日本道路協会，1961.
- 7) 巖網林：GIS とその応用，日科技連，2003.
- 8) 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.

助成研究者紹介

まかなえ こうじ
蒔苗 耕司

現職：宮城大学事業構想学部デザイン情報学科助教授
(博士(情報科学) 東北大学)

主な著書：○○○○○ (○○出版社 平成○○年)
「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. 他

まさき ひでかず
政木 英一

現職：国際航業(株)国土空間サービス事業本部CITグループ
(博士(学術) 埼玉大学)

主な著書：
「橋梁形状検索型データベースシステムに関する基礎的研究」
土木学会土木情報システム論文集 Vol. 4, pp. 41-48, 1995. 他

ちば よういちろう
千葉 洋一郎

現職：(株)トリオン 企画開発部長
(技術士(建設部門))

主な著書：
「Japan Highway Data Model構築の基礎研究」(共著)
土木情報システム論文集Vol. 10, 33-42, 2001. 他