

曲率関数・勾配関数による道路幾何構造の 3次元設計

蒔苗 耕司¹

¹正会員 博士(情報科学) 宮城大学助教授 事業構想学部デザイン情報学科(〒981-3298 宮城県大和町学苑 1)

道路の幾何構造の根幹である道路の中心線形は、現行の設計手法では線形要素の連結として考えられており、設計速度に適合した線形要素を図面上に配置する手法が用いられる。しかし、この手法は製図による設計を前提としており、高度にコンピュータを利用する場合の阻害要因ともなっている。本研究では、コンピュータ利用を前提にした設計手法として、平面線形に関しては時間-速度-曲率系、縦断線形に関しては時間-速度-勾配系として取り扱い、道路の中心線の距離 l をパラメータとしてそれぞれ曲率関数、勾配関数を定義し、これらを基にした道路の幾何構造モデルの構築手法を示した。さらに、この手法を用いた道路幾何構造の設計システムを構築し、その効用について述べた。

Key Words: highway geometry, automated design system, product model, CAD

1. はじめに

自動車の平面軌跡は、時間の経過に対する速度の変化、操舵による曲率の変化により定まる。また縦断軌跡は、時間に対する速度の変化と勾配の変化により定まる。しかし設計空間の中では、時間、速度、曲率、勾配という概念は存在しないから、設計プロセスのいずれかの時点で設計空間座標系に変換する必要がある。

これまでの設計手法では、設計作業の中での空間座標への変換を避け、あらかじめ時間-速度-曲率系、あるいは時間-速度-勾配系に適合した2次元線形要素を、平面図あるいは縦断図上で配置する手法を用いている。しかし、設計基準に適合した2次元線形要素を平面図、縦断図上に配置したとしても、それらを合成して得られる3次元道路線形が最適な道路線形である保証はなく、透視図等による評価が必要となる。

筆者は、先に道路線形設計へのコンピュータの高度利用を目的にパラメトリック曲線を適用した設計手法を提示した^{1),2)}。しかしこの場合、これまでの設計手法との関係が明確でないなどの問題があった。本研究で提案する手法は、距離 l をパラメータとする曲率関数、勾配関数を定義し、それを基に道路線形を定義することにより、コンピュータによる道路の幾何構造の自動設計を実現しようとするものである。

2. 曲率関数・勾配関数の定義

(1) 距離 l によるパラメータ化

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-速度は距離で表現できる。したがって、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-勾配系に相当すると考えることができる。ここで、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曲率関数、勾配関数と定義する。ただし距離 l は道路線形を平面に投影した曲線上の距離とし、曲率関数、勾配関数は独立した関数であるとする。

これらの関数は、現状の設計手法において平面設計・縦断設計の結果として表現される曲率図、勾配図上の曲線を意味する。すなわち、本手法は、これらの曲線を道路線形の規定関数として扱うことにより、これまでの設計手法とは逆のプロセスでの道路線形設計を試みるものである。

(2) 曲率関数

平面上を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、すなわちクロノイドとなる。したがって、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 $\Theta(l)$ として表現する。

緩和曲線に用いられるクロソイドはハンドル操作が等速で行われることを前提としており、この場合の曲率変化率は一定である。そこで、曲率変化率 $\Delta\theta$ とすれば、距離 l に対する $\Theta(l)$ は式(1)のように 1 次式で表現できる。

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

ただし、

$\Delta\theta$: 曲率変化率
 θ_s : 初期曲率

式(1)によれば、直線、円曲線の表現も可能である。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{直線:} & \quad \Delta\theta = 0, \theta_s = 0 \\ \text{円曲線:} & \quad \Delta\theta = 0, \theta_s \neq 0 \\ \text{クロソイド:} & \quad \Delta\theta \neq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

である。

連続した道路線形の場合、走行する自動車のハンドル操作は連続的に行われるから、曲率関数 $\Theta(l)$ も連続である。すなわち、 $\Theta(l)$ は連続した区分的 1 次関数として考えればよく、区間 n ($n=1,2,3,\dots$) 中の距離 l における $\Theta(l)$ は、以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} \Theta(l) &= \Delta\theta_n(l - l_{n-1}) + \Theta(l_{n-1}) \\ \Delta\theta_n &= \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{l_n - l_{n-1}} \end{aligned} \quad (3)$$

l_n : 区間 n 終点における距離 (ただし $l_0 = 0$)
 θ_n : 区間 n 終点における曲率 (θ_0 は初期曲率)
 $\Delta\theta_n$: 区間 n における曲率変化率

したがって、曲率関数 $\Theta(l)$ を規定するためには、境界条件として (l_n, θ_n) ($n=0,1,2,3,\dots$) を与えればよい。

(3) 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(4)のように表現できる。

$$J(l) = \Delta j \cdot l + j_s \quad (4)$$

表-1 前提条件となる変数

項目	変数
設計速度	v (m/s)
基本車線幅員	w_l (m)
基本路肩幅員	w_s (m)
基本横断勾配	i_0 (%)

ここで、直線の場合には $\Delta j = 0$ 、曲線の場合には $\Delta j \neq 0$ 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、区間 n ($n=1,2,3,\dots$) 中の距離 l における $J(l)$ は式(5)のように表現できる。

$$\begin{aligned} J(l) &= \Delta j_n(l - l_{n-1}) + J(l_{n-1}) \\ \Delta j_n &= \frac{j_n - j_{n-1}}{l_n - l_{n-1}} \end{aligned} \quad (5)$$

j_n : 区間 n 終点における勾配 (j_0 は初期勾配)

Δj_n : 区間 n における勾配変化率

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。

3. 道路幾何構造モデルの構築

(1) 道路幾何構造のモデル化

a) 基本モデル

本研究では、基本モデルとして非車線分離の 2 車線道路 (歩道無し) を対象とする。設計の前提条件として、表-1 の変数を定義する。

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 次元のモデル化が可能である。

b) 平面線形のモデル化

区間 n における曲率関数 $\Theta(l)$ の境界条件を基に、式(1)によりその区間における曲率変化率 $\Delta\theta$ が求まる。さらに条件式(2)により、その区間の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 に対する曲率関数の積分値、すなわち方向角 (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。それぞれの線形要素に対する計算方法は、以下の通りである。

①直線

直線の場合、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(6)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。

$$\begin{aligned} x_c(l) &= (l - l_{n-1}) \cos T(l_{n-1}) + x_c(l_{n-1}) \\ y_c(l) &= (l - l_{n-1}) \sin T(l_{n-1}) + y_c(l_{n-1}) \end{aligned} \quad (6)$$

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を Δd 、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(7)のように表現できる。

$$\begin{aligned} x_c(l + \Delta l) &= \Delta d \cos(\theta_n \cdot \Delta l + T(l_{n-1})) + x_c(l) \\ y_c(l + \Delta l) &= \Delta d \sin(\theta_n \cdot \Delta l + T(l_{n-1})) + y_c(l) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta d = \frac{2\Delta l}{\theta_n} \sin \frac{\theta_n}{2}$$

式(7)により、円曲線長に対する座標値を求めることにより、円曲線の平面形状を決定できる。

③クロノイド

クロノ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。

$$\tau = \int_0^l \Delta \theta \cdot l \, dl = \frac{\Delta \theta}{2} l^2 \quad (8)$$

ただし、式(8)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、クロノイドパラメータ A は式(9)により決定できる。

$$A = \frac{L}{\sqrt{2\tau}} \quad (9)$$

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 及びクロノイドパラメータ A を求める必要がある。

式(8)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、クロノイドの平面座標を求める公式³⁾を用いて、クロノ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。

c) 縦断線形のモデル化

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、

$$J(l) = \Delta j(l - l_{n-1}) + j_{n-1} \quad (10)$$

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。

$$\begin{aligned} h_c(l) &= \int_{l_{n-1}}^l \{ \Delta j(l - l_{n-1}) + j_{n-1} \} dl + h_c(l_{n-1}) \\ &= \frac{1}{2} \Delta j (l^2 - l_{n-1}^2) + (j_{n-1} - \Delta j \cdot l_{n-1})(l - l_{n-1}) + h_c(l_{n-1}) \end{aligned} \quad (11)$$

d) 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(12)のように表現される⁴⁾。

$$i + f = \frac{v^2}{gR} \quad (12)$$

ただし、

f : 横滑り摩擦係数

i : 片勾配

g : 重力加速度(9.81 m/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。この方法は、設計速度での走行を前提とした場合において曲率と横滑り摩擦係数が比例するため、自然であり⁴⁾、また l

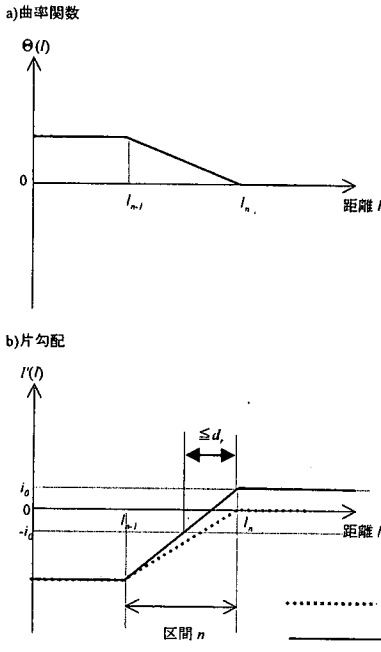


図-1 片勾配の排水補正(1)

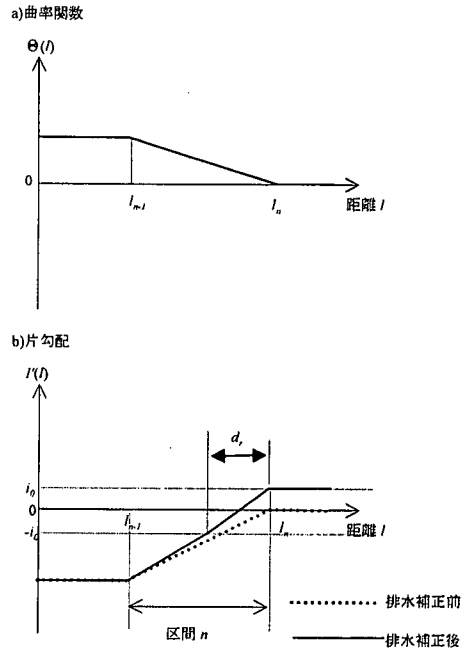


図-2 片勾配の排水補正(2)

に対する単純な 1 次関数により片勾配が計算できる利点がある。

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(13)により求める。

$$\theta_{\max} = \frac{g(i_{\max} + f)}{v^2} \quad (13)$$

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。

$$I(l) = \frac{i_{\max} \cdot \Theta(l)}{\theta_{\max}} \quad (14)$$

式(14)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⁴⁾では、直線-緩和曲線-円曲線との接続区間において、図-1、図-2 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³⁾の道路と考え、路面は車道中心線を中心に回転するものとする。

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(15)のように置換える。

$$I(l_n)=0 \text{ のとき } I(l_n) \leftarrow i_0 \quad (15)$$

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(16)(17)(18)により求められる。

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

$$I(l_n) = i_0 \text{ かつ } I(l_{n-1}) \cdot i_0 < 0 \text{ のとき,}$$

$$l_{n-1} < l \leq l_n - d_r \text{ のとき,}$$

$$I'(l) = \frac{-i_0 - I(l_{n-1})}{(l_n - d_r) - l_{n-1}} \cdot (l - l_{n-1}) + I(l_{n-1}) \quad (16)$$

$$l_n - d_r < l \leq l_n \text{ のとき,}$$

$$I'(l) = i_0 - \frac{2 \cdot i_0}{d_r} (l_n - l) \quad (17)$$

それ以外の場合

$$I'(l) = \frac{I(l_n) - I(l_{n-1})}{l_n - l_{n-1}} \cdot (l - l_{n-1}) + I(l_{n-1}) \quad (18)$$

なお、ここで挙げた排水補正は単純なモデルを例示したに過ぎず、実際には様々な場合が生じることから、より詳細なモデル化の検討が必要であろう。

e) 車線幅員の決定

曲線部における車線幅員の拡幅量 ε は、文献⁴⁾では式(19)(20)により導いている。

普通自動車の場合：

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\sqrt{R_c^2 - 64} + 1.25\right)^2 + 64} + 1.25 - \sqrt{R_c^2 - 64} - 2.5 \quad (19)$$

セミトレーラの場合：

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\sqrt{R_c^2 - 28.09} + 1.25\right)^2 + 28.09} + 1.25 - \sqrt{R_c^2 - 109.09} - 2.5 \quad (20)$$

ただし、 R_c ：道路中心線の曲線半径(m)。

曲率 $\theta = 1/R_c$ であることから、ここで車線幅員は曲率 θ の関数であると考え、距離 l における車線幅員 $W_f(l)$ を式(21)(22)により求める。

普通自動車の場合：

$$W_f(l) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{\Theta(l)^2} - 64} + 1.25\right)^2 + 64} + 1.25 - \sqrt{\frac{1}{\Theta(l)^2} - 64} - 2.5 + w_1 \quad (21)$$

セミトレーラの場合：

$$W_f(l) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{\Theta(l)^2} - 28.09} + 1.25\right)^2 + 28.09} + 1.25 - \sqrt{\frac{1}{\Theta(l)^2} - 109.09} - 2.5 + w_1 \quad (22)$$

ただし、基本車線幅員 w_1 、

$$W_f(l) \geq w_1.$$

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_3 を加えた片側道路幅員 $W(l)$ は、式(23)のように表現できる。

$$W(l) = W_f(l) + w_3, \quad (23)$$

f) 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(24)(25)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 $(x_l(l), y_l(l), h_l(l))$

$$\begin{aligned} x_l(l) &= W(l) \cdot \cos\left(T(l) + \frac{\pi}{2}\right) + x_c(l) \\ y_l(l) &= W(l) \cdot \sin\left(T(l) + \frac{\pi}{2}\right) + y_c(l) \\ h_l(l) &= h_c(l) - W(l) \cdot I'(l) \end{aligned} \quad (24)$$

道路縁線(右)座標 $(x_r(l), y_r(l), h_r(l))$

$$\begin{aligned} x_r(l) &= W(l) \cdot \cos\left(T(l) - \frac{\pi}{2}\right) + x_c(l) \\ y_r(l) &= W(l) \cdot \sin\left(T(l) - \frac{\pi}{2}\right) + y_c(l) \\ h_r(l) &= h_c(l) + W(l) \cdot I'(l) \end{aligned} \quad (25)$$

(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ける制約は考慮されなかった。しかし、実際の設計では走行の安全性、快適性等を考慮し、曲率関数と勾配関数は制約される。これらの制約条件は、設計システム上のインターフェース上で規制される条件である。

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(13)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。

$$\Theta(l) \leq \theta_{\max} \quad (26)$$

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(27)により規定される。

$$\theta_{n+1} - \theta_n \neq 0 \text{ のとき, } l_n > l_{n-1} + 3v \quad (27)$$

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(28)を基に、最大勾配値 j_{\max} を規制することにした。

$$\begin{aligned} v \geq 16.7(\text{m/s}) \text{ のとき, } j_{\max} &= \frac{8 - 0.18v}{100} \\ v < 16.7(\text{m/s}) \text{ のとき, } j_{\max} &= \frac{11 - 0.36v}{100} \end{aligned} \quad (28)$$

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⁴⁾。

$$\begin{aligned} \text{凹型曲線: } L &\geq \frac{V^2 |i_1 - i_2|}{360} \\ \text{凸型曲線: } L &\geq \frac{D^2 |i_1 - i_2|}{398} \\ \text{最小縦断曲線長: } L &\geq 3v \end{aligned} \quad (29)$$

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(30)の通りである。

$$j_n > j_{n-1} \text{ のとき, } \Delta j \leq \frac{1}{3.6v^2}$$

$$j_n < j_{n-1} \text{ のとき, } \Delta j \leq \frac{398}{100D^2} \quad (30)$$

$$j_n \neq j_{n-1} \text{ のとき, } l_n - l_{n-1} \geq 3v$$

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。しかし、設計上、これらに関する配慮は必要であり、設計システムがこれらに関する情報を提供する必要がある。

4. 幾何構造モデルのスキーマ

上述の幾何構造モデル構築のスキーマは、図-3の通り表現できる。スキーマの各階層を説明すると次の通りである。

第1階層は、設計道路の最も基本となる情報であり、設計速度、設計対象車両、基本車線幅員、基本路肩幅員、基本横断勾配が定義される。

第2階層は、線形を定義する曲率関数、勾配関数を規定する条件である。これらは設計速度を基に自動的に定義できるものと、設計者が定義すべき情報とに分けられる。

第3階層は、曲率関数、勾配関数の展開条件を規定する条件を示すものであり、展開を行う距離間隔 Δl が定義されればよい。

第4階層は、設計者により定義される幾何構造の根幹となる曲率関数、勾配関数の定義データであり、それぞれの関数の境界条件の情報である。

第5階層は、第4階層で規定された道路線形を基にした幾何構造を規定するための予備的データであり、自動的に導かれる。

第6階層は、第4・第5階層で規定されたデータに基づく道路幾何構造の設計空間への展開の結果である。

上述のように、設計者は第1～3階層に関するデータを初期的に与え、第4階層の曲率関数・勾配関数を規定すれば幾何構造は自動的に定められることになる。ただし、実際の設計への適用を考えた場合には、路面の排水性、視距の確保等の問題により、片勾配・路肩幅員に関しては、設計者の判断に頼らざるを得な

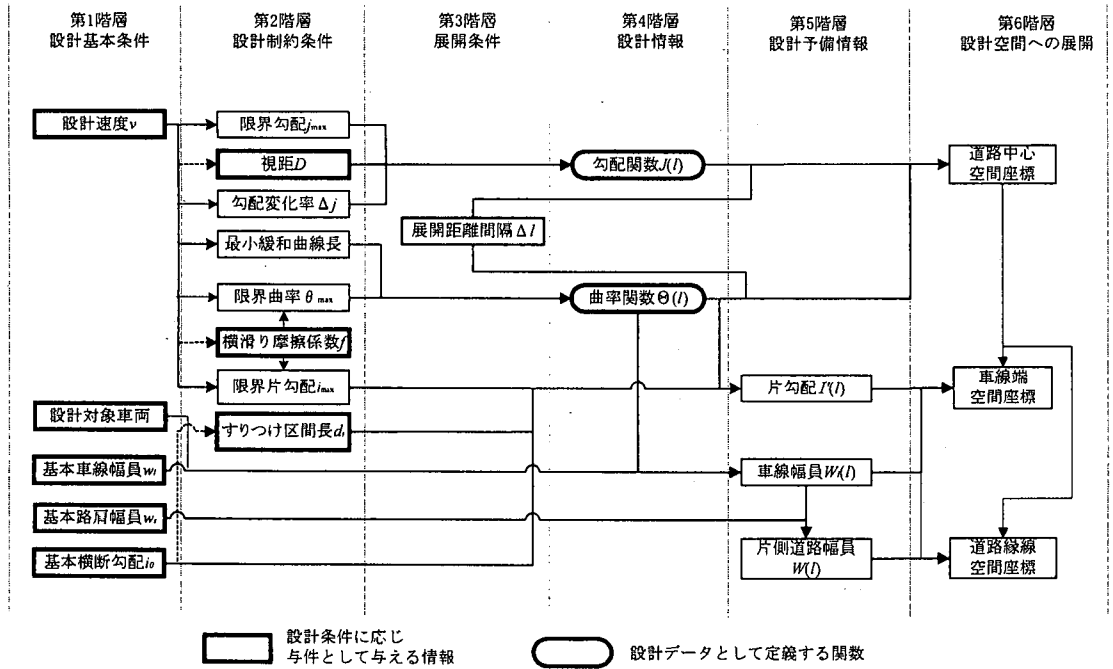


図-3 幾何構造モデル構築のスキーマ

い場合がある。そのために、片勾配に関する関数 $I(l)$ 、片側道路幅員に関する関数 $W(l)$ については、設計者による加工・修正が可能となるよう考慮すべきであろう。

5. 幾何構造設計システムの開発

(1) 設計システムプロトタイプの開発

4.の幾何構造モデルの概念を設計システムに適用するにあたって、設計空間に依存しない曲率関数、勾配関数をいかに決定するかが課題となる。そこで本研究では、設計者による曲率関数、勾配関数の仮設定とその設計空間への展開・描画処理とを高速で繰り返すことにより、設計者が常に設計空間に展開された道路の幾何構造を確認しながら、曲率関数、勾配関数を設定していく手法を用いた幾何構造設計システムのプロトタイプを構築した。この手法の実現のために、GUI(Graphical User Interface)及び高速な演算処理によるインタラクティブ性の確保が不可欠である。

プロトタイプシステムのシステムフローは図-4の通りであり、開発にあたっては、GUI構築の容易性からMicrosoft社のVisual Basic 5.0を用いた。

プロトタイプの開発では $\Delta l = 1 \text{ m}$ とし、描画・演算処理の高速化を図るため、距離 Δl 毎の配列を定義し、

設計空間への展開に必要な情報は全てこの配列に格納する。曲率関数、勾配関数の設定と同時に配列内の情報についての再計算を行い、それに基づく描画処理を行う。

開発したシステムのGUIを図-5に示す。曲率関数、勾配関数の設定は、画面下部の2つのウィンドウから行う。曲率関数、勾配関数の境界条件は、ウィンドウ内のマウスカーソルの座標に応じて仮設定される。それによりあらかじめ設定された基本設計条件に基づいた3次元幾何構造モデルが自動的に展開され、平面線形、透視図(運転者の視点及び鳥瞰)、縦断線形や片勾配、拡幅量等を示すグラフが同時に描画更新されるようになっている。なお境界条件の確定は、マウスボタンのクリックにより行う。設計作業は、マウスカーソルの移動に応じて更新されるこれらの情報を常時、参照しながら、曲率関数・勾配関数の境界条件を順次決定していく作業となる。

それぞれの関数に対する境界条件は、3.(2)の制約条件により、その範囲を逸脱する設定はできないようになっており、設計者は円曲線半径やクロソイドパラメータ等の線形要素のパラメータを意識することなく、設計を進めることができる。また必要に応じて、曲率勾配・勾配関数の規制条件として与えていない合成勾配、視距のための必要な範囲が表示される。なお、透

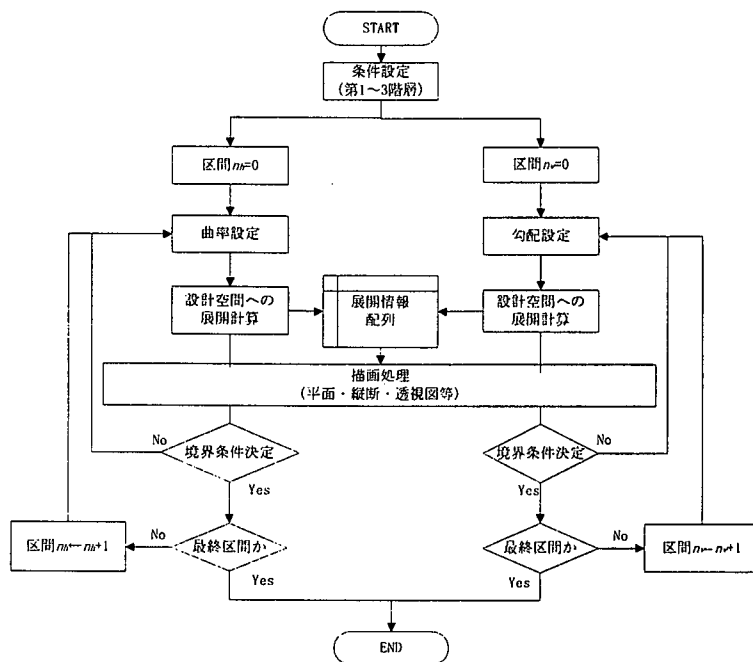


図-4 幾何構造設計システムフロー

視図の陰線処理は、筆者の開発した手法⁶⁾を用いてその高速化を図っている。

図-5 の事例では、3種3級の道路を想定し、基本設計条件、設計制約条件として表-2 に示す設定値を与え、あらかじめ設計空間内に6点のコントロールポイントを設定し、これらを通過するように曲率関数、勾配関数を定めている。

(2) 幾何構造設計システムの効用

曲率関数、勾配関数を用いた幾何構造設計システムの効用は、以下の通りである。

- ・ 曲率関数、勾配関数のみを定めることにより、幾何構造を自動的に決定できるとともに、その3次元データを直ちに得ることができる。
- ・ 曲率関数、勾配関数は単純な区分的1次関数であり、設計者がクロソイドや円曲線のパラメータを考慮せずに設計を行うことを可能とする。
- ・ 曲率関数、勾配関数は常に連続的であり、道路線形の連続性を確保できる。
- ・ 幾何構造の3次元データを基に、図面としての2次元表示、透視図としての3次元表示等を容易に実現でき、設計とその評価を同時に行うことができる。
- ・ 少ないデータ量で正確な設計情報の伝達ができるとともに、その加工も容易である。

表-2 基本設計条件・設計制約条件設定値

条件	設定値
設計速度	14 m/s (50.4 km/h)
設計対象車両	普通自動車
基本車線幅員	3.0 m
基本路肩幅員	0.75 m
基本横断勾配	0.02
視距	55 m
横滑り摩擦係数	0.14
すりつけ区間長	40 m

6. むすび

本研究では、道路の幾何構造を、距離 l を変数とした曲率関数、勾配関数により基本的に決定できることを示した。そして、これによる幾何構造モデルの構築により、コンピュータ設計の効率化を実現できることを示した。

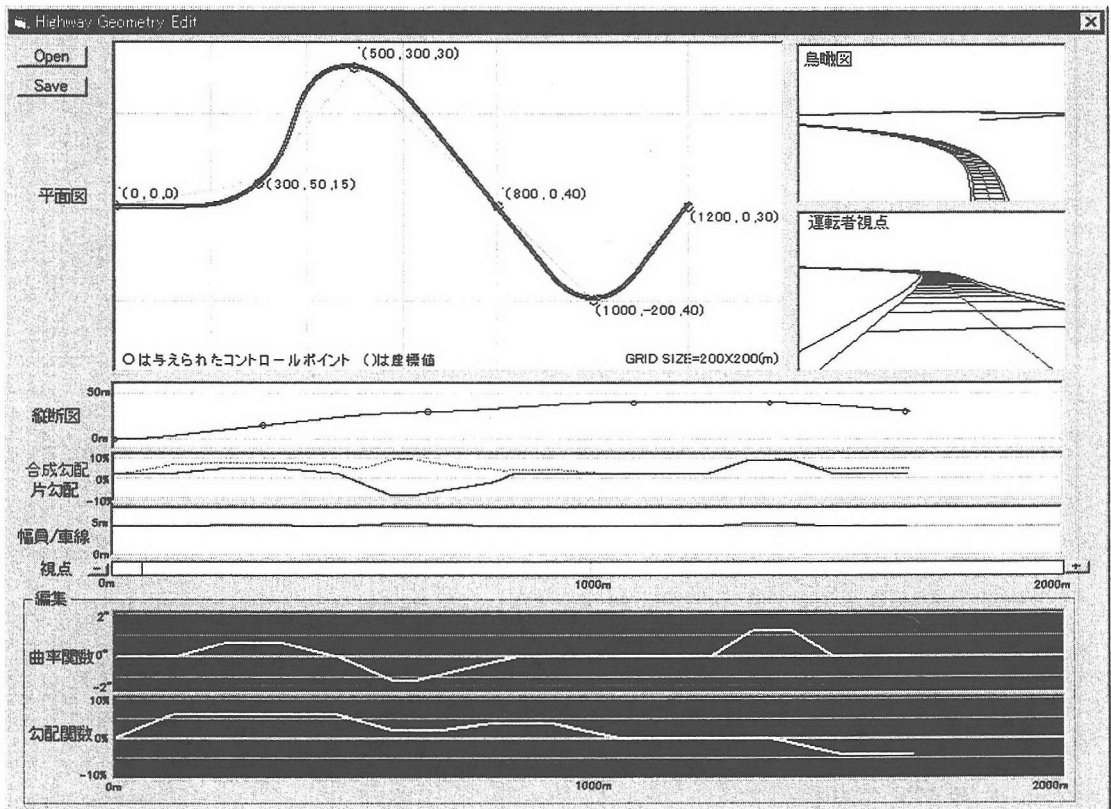


図-5 幾何構造設計システムのインターフェース

本論文で示した手法では、設計基準に関する条件は設計速度と曲率・勾配を変数とする数値関数としてコンピュータ上に実装されることになり、現行の製図をベースとした設計手法とは大きく異なる。すなわち、設計者は線形要素のパラメータを意識することなく、設計基準に適合した線形を得ることができ、製図作業の無駄を省き、設計の効率化を実現できる。さらに、3次元道路線形を把握しながらの設計が可能となることから、運転者から道路線形がどのように見えるのかといった道路線形の視覚的な評価を設計作業の中で行うことが可能となり、設計の高品質化が期待できる。

道路工学分野においても、欧州を中心にプロダクトモデルの開発が始まりつつあるが⁷⁾、道路線形の定義手法については線形要素を基にした既往の手法が用いられている。本手法により構築される幾何構造モデルは、少ないデータでより正確かつオブジェクト構造を維持したまま3次元空間展開を可能とする。したがって、本モデルを基に交差点等の複雑なモデル化を行うことにより、プロダクトモデルとしての適用も可能であろう。

本研究は道路の幾何構造のみを対象としたモデリング手法を示したものであり、地形モデルとの演算処理は行っていない。デジタル情報として与えられた地形モデル上において、本手法を基に道路設計をいかに効率的に実現するかが今後の課題である。

謝辞：本研究を進めるにあたって、宮城大学事業構想学部福田 正教授には有益な議論をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 蒔苗耕司, 福田 正: 航空写真とCGを用いた3次元道路線形計画システム, 土木学会論文集, No.590/IV-39, pp.23-30, 1998.
- 2) 蒔苗耕司: パラメトリック曲線を用いた3次元道路線形の応用, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第4部, pp.496-497, 1998.
- 3) 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.
- 4) 日本道路協会 : 道路構造令の解説と運用, 日本道路協会, 1983.
- 5) 住吉彰, 遠藤作次 : 新訂道路設計の基本, 地人書館, 1974.
- 6) 蒔苗耕司 : 3次元描画モジュールによる道路線形の検討, 土木学会土木情報システムシンポジウム論文集, Vol.6, pp.127-132, 1997.
- 7) 土木学会土木情報システム委員会土木CAD小委員会 : 平成7・8年度土木CAD小委員会研究報告書, 土木学会, 1997.
- 8) 蒔苗耕司, 藤井章博 : VRMLを利用した道路の線形設計, 土木学会第22回土木情報システムシンポジウム講演集, pp.185-188, 1996.
- 9) 蒔苗耕司 : CGによるビジュアルライゼーション, (社)建設コンサルタント協会近畿支部第28回業務研究発表会論文集, pp.91-95, 1995.
- 10) 大塚勝美, 木倉正美 : 道路の線形設計, 技術書院, 1971.
- 11) 遠藤作次 : 新版山地部道路の路線設計, 地人書館, 1987.
- 12) 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.
- 13) Pline, J.L. : *Traffic Engineering Handbook*, Institution of Transport Engineers, Prentice-Hall, 1992.
- 14) 交通工学研究会編 : 交通工学ハンドブック, 技報堂出版, 1984.
- 15) 福田 正編 : 交通工学, 朝倉書店, 1994.
- 16) 日経 CG 編著 : CADの基礎知識, 日経BP社, 1994.
- 17) Beilfuss, C.W. and Guess, R.R. : *Development of a Roadway Design/Graphics Interface System*, Transportation Research Board, 1990.

(1998.11.16 受付)

3-DIMENSIONAL HIGHWAY GEOMETRIC DESIGN METHOD USING CURVATURE FUNCTION AND GRADIENT FUNCTION

Koji MAKANAE

Under the present highway design method, highway alignment is treated as the sequence of segments prescribed by the design speed. However this method is not useful for the advanced computer aided design. This paper presents the 3-dimensional highway geometric design method using curvature function and gradient function, where both functions are defined by the length of center alignment.