

三次元道路幾何構造による運転者視覚環境の定式化

大口 敬¹

¹ 正会員 博士(工学) 東京都立大学助教授 大学院工学研究科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

道路を走行する運転者から見た視覚環境を評価する指標の一つとして路面を連続的に視認できる見通し距離を取り上げ、これを既往の研究に倣い「予見視距 (preview sight distance: PVSD)」と名づける。平面線形と縦断線形に分けて道路線形を考えた場合、特別な場合を除き、一般に視距を幾何学的に正しく求めることはできない。そこでまず、平面線形要素と縦断線形要素の任意の組合せについて、三次元空間における道路幾何構造を定式化する。これにより任意の地点における予見視距を幾何学的に正しく計算できる。本稿ではガードレールなどの側壁と縦断線形クレスト部の路面が視程障害物となる場合について、予見視距の算定方法を定式化する。

Key Words: road geometry, alignment, sight distance, visual environment

1. はじめに

道路の自動車交通においては、自動車を運転する運転者の、主に視覚環境からの情報の認知と判断に決定的に依存している以上、道路交通の安全性、円滑性の確保のためには、運転者の視覚環境をできる限り理想的な状況に近づける努力が必要である。

しかし、かつて岩間らが指摘したように¹⁾、運転者から見た道路の見え方、すなわち透視図の描き方については定量的な知識が古くから蓄積されているが、透視図の評価の仕方、すなわち機能上の視覚環境の評価手法については、主観的・定性的な方法しかなく、比較することだけが唯一の物差し、という状況である。

安全に制動停止するために必要な制動停止視距は、道路上のすべての区間で設計基準を満たさなければならない²⁾とされ、視距は安全な道路を設計する上で重要な変数であるが、一方で運転者の視覚環境を定量的に評価する指標の一つと考えられる。現状では、視距が最も小さくなる場所で設計基準が満たされるかどうかを確認しているだけである。つまり視距の設計基準はいわば設計上の制約条件であり、運転者の視覚環境の設計変数として扱われていない。その主な工学上の理由は、全ての地点で連続的に視距を計算することができないためであろう。

一方、現在我が国の都市間高速道路において交通集中渋滞が多発し、その主なものが単路部(縦断勾配が凹型に変化するサグ(sag)及びトンネル入口付近)を交通容量上のボトルネック(隘路)とする渋滞である。単路部の隘路現象は、運転者の運転挙動に起因して自然発

生的に生じ³⁾、一旦渋滞が発生するとさらにその容量が低下することが知られており⁴⁾、これも渋滞の中での運転挙動に起因する現象である。こうした運転挙動特性は、運転環境を認知・判断した結果として生じるもので、例えばあるサグで渋滞が起こるかどうかは、運転者からの道路幾何構造の視認性と関連があることが既に指摘されている⁵⁾。

以上のように、道路上の運転者から見た機能上の視覚環境を評価することは、安全と円滑の両面から非常に重要と考えられる。本稿では、運転挙動の特性分析のために、道路幾何構造による運転者視覚環境を評価する指標として路面を連続的に視認できる見通し距離を取り上げ、これを任意の地点で計算できる手法を提案する。論文の構成は次の通りである。2.で既存研究を概観し、視距と視覚環境評価に関する問題点の整理を行う。3.で道路線形要素を整理し、4.では各要素を三次元空間上で定式化する。5.では座標変換を行い各要素を接続して任意の道路線形を表現する。6.では路面や付属構造物の形状の定式化を行い、三次元道路幾何構造を表現する。7.では、三次元道路幾何構造を用いて、任意の地点の運転者から路面を連続的に視認できる見通し距離を計算する手法を提案する。

2. 既存研究の概観と視覚環境評価指標

(1) 道路の視覚的問題

道路の機能上の視覚的問題とは、「道路の線形を、運転者が見た透視図の中で、如何にして歪みを少なく、視覚的な錯誤を伴わないように、広い範囲にわたって

かつ細部まで見せるか⁶⁾」として捉えられよう。

この視覚的問題の要因には、各線形要素の設計、その組合せ方、それから決まる見通しの範囲、などが複雑に効いてくる。「視距 (sight distance: SD)」は、その中の重要な要因である。運転者が道路から得る情報のほとんどは視距の範囲内からしか得られないし、逆に視距は道路の線形などによって決定される。

一般に視距 (SD) には、制動停止のために必要な「制動停止視距 (stopping sight distance: SSD)」と往復 2 車線道路で追越に必要な「追越視距 (passing sight distance: PSD)」の 2 種類が知られている。米国の道路設計指針である 1990 年版の所謂「Green Book」⁷⁾ では、SSD の概念を拡張し、道路や街路の周辺環境に応じて制動停止以外の複雑な行動が必要となることを考慮した「決定視距 (decision sight distance: DSD)」なる概念が示されている。1995 年に Gattis & Duncan⁸⁾ は、安全かつ快適に車両を制御して運転するためには路面の車線区画線 (マーキング) や縁石、または標識、照明灯、植栽やガードレールなどから前方の道路線形、形状などを適切に認識できる必要があるとし、その必要な見通し距離を「予見視距 (preview sight distance: PVSD)」と名づけている。

SSD や PSD など様々な視距の概念には、いずれも必要な最小の視距 (required sight distance: RSD) はいくらか、という問題がある。これは、運転者が対象物を認知して行動に移すまでの反応遅れ (無駄時間) とこれに対応する空走距離、路面状況による制動性能、車両の加速性能などより決まるものとされ、RSD の決定法の研究は多く行われ (例えば^{9), 10), 11)}、実際の設計基準に適用されている^{12), 13)}。

一方で RSD という制約条件を満たすように、道路線形や視程障害物を設計するにはどうしたらいいか、という問題がある。この考えを進めると、任意の道路条件下で視距が計算できれば、線形要素のパラメータなどと同様に視距を設計変数として考慮できる。このような視距は「実現視距 (ASD: available sight distance)¹⁴⁾」と呼ばれ、ASD の計算法、その設計への応用に関する研究が近年盛んに発表されている。

(2) 道路幾何構造と実現視距の関係

日本の「道路構造令の解説と運用²⁾」には、縦断線形では視界がクレスト部の路面で遮られる場合とサグ部の跨道橋で遮られる場合、平面線形では円曲線区間の円半径と視程障害物までの側方余裕を用いて、それぞれ実現視距 (ASD) の算定式が示されている。ここには法面を視程障害物とする場合の算定式もあるが、この式の導出根拠が不明で、また式の誤りが指摘されている¹⁵⁾。なおクロノイド区間の場合や直線と円など複数

の平面線形が繋がる場合、平面線形と縦断線形の組合せの場合などの ASD は定式化されておらず、「図式的に解を求める²⁾」とされている。

一方、1984 年の NCHRP レポートなどでは^{16), 17), 18)}、平面線形で、直線～円～直線と繋がる場合で、任意の立地点で障害物までの側方距離を用いた ASD 算定式を求めている。また数値計算例として、横軸に連続的に立地点をとって縦軸に ASD をとった、いわば「視距図」が作成されている。しかし平面線形で、直線～円～直線の繋がりのみが定式化され、クロノイド曲線や縦断線形との組合せは扱っていない。

(3) 平面線形と縦断線形を別々に扱う場合

1991 年に Easa¹⁴⁾ は、初めて「実現視距 (ASD)」なる概念を明示し、Waissi & Cleveland による ASD の算定式¹⁸⁾ を用いて、ASD が最小となる円曲線のパラメータ (半径と区間長)、障害物までの側方距離、及び対象物の位置の条件を分析した。また、凸 (凹) 型縦断曲線が 2 つ連続して一つのクレスト (サグ) となる場合 (非対称な縦断曲線) の ASD^{19), 20)}、任意地点の跨道橋 (overpass) がサグにおける視程障害物となる場合の ASD²¹⁾、背向曲線区間 (reverse curves) で通常より短くなる ASD²²⁾、などを定式化し、所謂ジェットコースタ型縦断線形の死角となる窪み (sight-hidden dips) の範囲の導出法²³⁾ も示した。これらを踏まえて、近年景観上、視距確保上、また経済的にも望ましい縦断曲線形状について検討を進めている^{24), 25), 26)}。以上の Easa らの研究では、いずれも平面線形と縦断線形は別々に扱われ、またクロノイド区間は扱われていない。

1995 年 Hassan & Easa²⁷⁾ は、初めて連続的な側方障害物 (continuous lateral obstructions, 以降「側壁」) を考慮し、また初めて平面線形要素にクロノイド曲線を含めて ASD を導出している。しかし平面線形のみを扱い、クロノイド曲線は、区間が短く接線角が小さい場合でのみ成立する近似式で与えている。

近年、筆者らも道路幾何構造を側壁を含めてモデル化し、ASD の算定手法を開発している^{15), 28), 29)}。ここでは任意のクロノイド曲線を扱うことができ、任意の線形要素接続の任意の地点から見た ASD を計算する手法を提案している。しかし平面線形と縦断線形を別々に二次元空間で扱ったものである。

(4) 三次元立体図形として道路線形を扱う場合

(3) 節のものは、いずれも平面線形と縦断線形を別々にして二次元空間上で視距を求め、その小さい方を実際の ASD とする考え方を採っている。しかし縦断線形は立面図上ではなく展開図上で定義される¹⁾ ため、例えば平面線形が屈曲部で縦断線形がクレストの区間にお

いて、縦断線形のみで考える場合クレストの路面に接する見通しの限界線を平面線形に沿って屈曲する曲線で扱うことになるが、本来これは三次元空間の直線でなければならない。従って幾何学的に正しい ASD を得るには、本来道路線形を三次元空間で扱う必要がある。

1960年代に Geissler³⁰⁾や Park ら³¹⁾は、三次元道路線形を運転者から見た透視図をコンピュータで計算して描く方法を提案し、三次元線形としての設計上の留意点を指摘している。こうした研究を踏まえ、日本、米国、ドイツなど各国の道路設計の指針では、平面線形と縦断線形の組合せを考えることが景観上も安全上も重要であることが強調されている^{2),7),32)}。しかし道路幾何構造を一体的に三次元で扱うことは非常に困難であった。

1994年 Sanchez³³⁾は、立体交差の連結路部を対象として、コンピュータ・ソフトで三次元座標を計算して ASD を求めた。ここで接続路に平面線形は円、縦断線形は縦断勾配と縦断曲線(クレスト、サグ)となる場合の組合せを考えているが、クロノイド曲線は扱われておらず、汎用的に応用できる計算手法ではない。

1996年 Hassan & Easa ら³⁴⁾は、道路幾何構造を三次元空間上で表現するモデルを提案し、これを用いて任意の線形要素において ASD を計算する手法を提案している。ここでは近似解法として道路線形を有限要素法で定式化している。この場合各線形要素は、平面線形と縦断線形の組合せに応じた有限要素モデルに適切に置き換える必要があり、また ASD の算出には解の存在範囲を複雑に考慮する必要がある。彼らはこの三次元道路線形モデルを応用して、夜間の前照灯照射範囲の視距(headlight sight distance: HLSD)の計算^{35),36)}や、クレスト頂部で始まる平面曲線により視距の必要長が満たされない区間("red zone")の算出³⁷⁾を行い、また三次元モデルと二次元モデルの比較検討^{38),39)}より、三次元立体構造として扱うことの意義を示している。

(5) 本研究の手法と視覚環境評価指標の提案

本研究では、クロノイドも含む平面線形要素と縦断線形要素の任意の組合せにおける複雑な三次元曲線となる道路幾何構造を、有限要素法によるモデル化やスプライン曲線などの近似に依ることなく、三次元空間で理論的に定式化する。これにより視距が幾何学的に正しく計算可能となり、また本研究では線形要素として従来の平面線形と縦断線形を別々に扱ったまま、任意の地点における視距の値を算出可能な手法を示す。

(4)節での研究のほとんどは、主に実現制動停止視距(available SSD: A-SSD)を扱っているが、A-SSD が対象物体の高さに依存するために、道路幾何構造から規定される運転者の視覚環境の評価指標としては必ずしも適当ではない。本研究では、制動停止のための視距だ

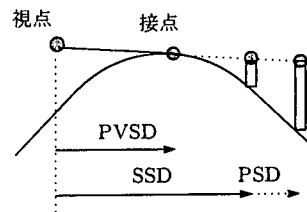


図-1 PVSD と SSD, PSD

けを扱うのではなく、道路上の見通し、道路の形状の認識できる範囲を、運転者の視覚環境を評価する指標の一つとしたい。そこで Gattis & Duncan の提案する予見視距(PVSD)⁸⁾の考え方に則り、対象物の高さを零とした道路表面までの「実現予見視距(available preview sight distance: A-PVSD)」なる指標を考える。すなわちこれを、「道路の幾何構造と付属構造物により規定される、運転者から見て連続的に運転者の居る車線上の路面状態を見通せる範囲を、道路線形を表現する測線を水平面に投影した曲線(これを「測線射影曲線」とする)上の道のりで表したもの」として定義する。なお路上の他車の影響は無視する。

図-1に、PVSD と通常の SSD や PSD の場合の違いを、平面線形が直線で、縦断線形のみを考えたクレストの例を用いて概念的に示す。路面との接点までの距離で与えられる PVSD に対し、SSD や PSD は対象物の高さによって変化してしまう。

運転者の道路横断面上の位置(測線からの横断方向の位置)と同じ横断方向の位置の路面が見通せる最大道のりが PVSD である。縦断線形が直線で平面線形のみを考える場合は、視程障害物が側壁のような鉛直に様な構造物であれば SSD と PVSD は等しくなる。一方視程障害物として法面などを考える場合は、視点を通して法面に接するような傾いた平面で考える必要があり、PVSD と SSD では対象物と視点を結ぶ視線が法面と接する場所が異なってくる。このように平面線形と縦断線形の組合せを立体的に考える必要がある場合は、SSD と PVSD は必ずしも等しくない。

3. 線形要素の定式化に必要な準備

ここでは、道路幾何構造を三次元空間で定式化するため、各線形要素の数学的な扱いを整理する。

(1) 道路線形と道のり

測点を結んだ線を測線 ψ とすると、道路線形とは測線が描く立体曲線の形状である。測線を水平面に射影したものが測線射影曲線 ψ^* である。平面線形(horizontal alignment)とは、測線射影曲線の形状である。縦断線形(vertical alignment)とは、測線と測線射影曲線を含

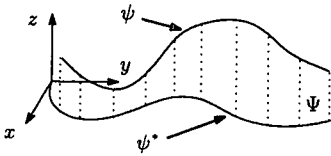


図-2 測線と測線射影曲線

む曲面 Ψ 上(展開図上)で測線が鉛直方向へ描く形状である。図-2にこれを模式的に示す。

線形要素には、平面線形要素と縦断線形要素がある。線形要素は、平面上と縦断面上で別々に定義される。

車両の進行方向を考慮するので、各線形要素には方向性が生じ、「始点」と「終点」が定義される。道路線形は、測線射影曲線 ψ^* 上の道のりに対して定義される。道路線形は、一般に三次元立体曲線となるが、その形状を定義するときの「道のり」は、「測線 ψ の道のり」ではなく、「測線射影曲線 ψ^* の道のり」である。

(2) 平面線形形状を表現する符号

クロノイド曲線は、一般に次式で定義される。

$$A^2 = r l \quad (1)$$

ここに、 r は曲率半径、 l は曲率ゼロ(曲率半径 ∞)の点 O からの道のり、 A はクロノイド・パラメータである。

$$\tau = \frac{l^2}{2A^2} = \frac{A^2}{2r^2} = \frac{l}{2r} \quad (2)$$

原点 O におけるクロノイド曲線方向を x 軸として直交 xy 座標系を取ると、曲線上の接線が x 軸に対してなす接線角(deflection angle) τ は式(2)で与えられ、クロノイド曲線上の任意の点 $P = (x, y)$ は次式で表せる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^r \frac{\cos \tau}{\sqrt{\tau}} d\tau \\ \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^r \frac{\sin \tau}{\sqrt{\tau}} d\tau \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{pmatrix} A \sqrt{2\tau} \operatorname{sinc} \tau \\ A \sqrt{2\tau} \operatorname{cosc} \tau \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(3)の右辺の積分は解析的には解けない。ここで次式(5)、(6)のように無限級数で定義される「クロノイドサイン($\operatorname{sinc} \tau$)」、「クロノイドコサイン($\operatorname{cosc} \tau$)」を用

いると、式(4)のように表現できる⁴⁰⁾。

$$\begin{aligned} \operatorname{sinc} \tau &= \tau - \frac{3\tau^3}{5 \cdot 3!} + \frac{5\tau^5}{9 \cdot 5!} - \frac{7\tau^7}{13 \cdot 7!} + \dots \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{4n+1} \frac{\tau^{2n+1}}{(2n)!} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{cosc} \tau &= \frac{2\tau^2}{3 \cdot 2!} - \frac{4\tau^4}{7 \cdot 4!} + \frac{6\tau^6}{11 \cdot 6!} - \frac{8\tau^8}{15 \cdot 8!} + \dots \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{4n+3} \frac{\tau^{2n+2}}{(2n+1)!} \end{aligned} \quad (6)$$

これを用いて、クロノイド曲線上の任意の点の xy 座標値を求めることが出来る。

式(3)、(4)では、 τ は正の値しか取り得ず、 x, y 共に正の範囲(第1象限)となる。本来クロノイド曲線は式(1)で定義されるので、 xy 座標系ではその他の3つの象限にも点・線対称で図形を描くことができる。これらの図形を定式化するためには、符号を変えて定式化しなければならない。そこで円・直線の場合も含め、以下のように符号を表すダミー変数 δ と η を導入する。

平面線形屈曲部(円区間及びクロノイド区間)には、車両の進行方向を考慮すると左カーブと右カーブがある。一つの平面線形要素のカーブの向きを符号で表すために、ダミー変数として、 δ を導入する。

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{(左カーブ)} \\ 0 & \text{(直線)} \\ -1 & \text{(右カーブ)} \end{cases}$$

クロノイド区間には、カーブの向きに加えて、車両の進行方向に対応して曲率の増加方向と減少方向がある。一つの平面線形要素(クロノイド曲線要素)の曲率の増加・減少を表すダミー変数として、 η を導入する。

$$\text{ダミー変数: } \eta \begin{cases} = 1 & \text{(曲率増加クロノイド)} \\ = 0 & \text{(円)} \\ = -1 & \text{(曲率減少クロノイド)} \end{cases}$$

4つの象限で現れる4種類のクロノイド曲線は、原点における車両進行方向を x 軸に一致させて考えると、左/右(δ)と曲率増加/曲率減少(η)の組合せに対応し、各パラメータ A, l, r, τ に符号を考慮して一般に次式で表現できる。

$$A^2 = \eta \delta r l \quad (7)$$

また、接線角 τ の関係式(2)も一般化され、次式のようになる。

$$\tau = \eta \delta \frac{l^2}{2A^2} = \eta \delta \frac{A^2}{2r^2} = \frac{l}{2r} \quad (8)$$

$$l = \eta \delta \frac{A^2}{r} = \eta \delta \sqrt{2} \sqrt{\eta \delta \tau} A = 2r\tau \quad (9)$$

$$r = \eta \delta \frac{A^2}{l} = \eta \delta \frac{A}{\sqrt{2} \sqrt{\eta \delta \tau}} = \frac{l}{2\tau} \quad (10)$$

表-1 平面線形要素における各変数の符号

$\eta \setminus \delta$	1 左 ($y > 0$)	-1 右 ($y < 0$)
1 曲増 ($x > 0$)	$\tau > 0$ $l > 0$ $r > 0$ $A > 0$ I	$\tau < 0$ $l > 0$ $r < 0$ $A < 0$ II
-1 曲減 ($x < 0$)	$\tau < 0$ $l < 0$ $r > 0$ $A > 0$ III	$\tau > 0$ $l < 0$ $r < 0$ $A < 0$ IV
0 曲率一定 (円)	$\tau > 0$ $l > 0$ $R > 0$	$\tau < 0$ $l > 0$ $R < 0$

注) I~IVは象限を指す

$$A = \sqrt{2} \sqrt{\eta \delta \tau r} = \sqrt{\eta \delta r l} = \frac{\eta \delta l}{\sqrt{2} \sqrt{\eta \delta \tau}} \quad (11)$$

ここで各パラメータ A, l, r, τ の符号を整理すると表-1 のようになる。なおこの表には、円の場合(曲率増減なし($\eta = 0$))の各パラメータの符号も示す。

(3) 平面線形要素の定義に必要なパラメータ

第 i 番目平面線形要素として、直線、円、クロノイドの定義に必要なパラメータは次の通りである。

1. 直線区間 (straight segment or tangent)

$$\text{区間長: } {}^i L \quad ({}^i L > 0)$$

2. 円区間 (circle curve)

$$\text{区間長: } {}^i L \quad ({}^i L > 0)$$

$$\text{円半径: } {}^i R \begin{cases} > 0 & ({}^i \delta = 1) \\ < 0 & ({}^i \delta = -1) \end{cases}$$

3. 緩和区間: クロノイド曲線 (clothoid, spiral curve)

$$\text{区間長: } {}^i L \quad ({}^i L > 0)$$

$$\text{パラメータ: } {}^i A \begin{cases} > 0 & ({}^i \delta = 1) \\ < 0 & ({}^i \delta = -1) \end{cases}$$

$$\text{初期位置: } {}^i l_s$$

ここで初期位置 ${}^i l_s$ は、相対座標系の原点からこの線形要素始点位置までの道のりを符号付で表したものであり、一つ前の ($i-1$) 番目の線形要素によって決まる。

$${}^i l_s = \begin{cases} 0 & ({}^{i-1} \delta \cdot {}^i \delta < 0 \text{ or } {}^{i-1} \delta = 0) \textcircled{1} \\ {}^i \eta {}^i \delta \frac{{}^i A^2}{{}^{i-1} R} & ({}^{i-1} \delta \cdot {}^i \delta > 0 \text{ and } {}^{i-1} \eta = 0) \textcircled{2} \\ {}^i \eta {}^i \delta \frac{{}^i A^2}{{}^{i-1} r_e} & ({}^{i-1} \delta \cdot {}^i \delta > 0 \text{ and } {}^{i-1} \eta \neq 0) \textcircled{3} \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 ${}^{i-1} R$ は ($i-1$) 番目線形要素が円の場合の符号付き半径、 ${}^{i-1} r_e$ は ($i-1$) 番目線形要素がクロノイドの場合のその終点における符号付き曲率半径である。また上記3つ以外の接続パターンは有り得ない(表-2中に3パターンを示す)。なお式(12)からわかるように、クロノイド線形要素の始点は必ずしも原点になるとは限らない。

(4) 縦断線形要素の定義に必要なパラメータ

第 j 番目縦断線形要素として、縦断勾配、縦断曲線の定義に必要なパラメータは次の通りである。ここに勾配とは、測線射影曲線に対する測線の傾きを正接 (tangent) で表したもので、例えば勾配 = 0.1 (= 10%) では角度 $\tan^{-1} 0.1$ [radian] の上り坂となる。

1. 縦断勾配 (tangent) 区間: 直線 (straight line)

$$\text{区間長: } {}_j D \quad ({}_j D > 0)$$

$$\text{縦断勾配: } {}_j I \begin{cases} > 0 & \text{(上り坂)} \\ < 0 & \text{(下り坂)} \end{cases}$$

2. 縦断曲線 (vertical curve) 区間: 放物線 (parabola)

$$\text{区間長: } {}_j D \quad ({}_j D > 0)$$

$$\text{始点位置勾配: } {}_j I_s$$

$$\text{縦断曲線半径: } {}_j S \begin{cases} > 0 & \text{(サグ (sag))} \\ < 0 & \text{(クレスト (crest))} \end{cases}$$

ここで、 j 番目縦断曲線要素の始点位置の勾配 ${}_j I_s$ は、($j-1$) 番目線形要素の終点位置の勾配 ${}_{j-1} I_e$ に等しい。

4. 各線形要素形状の定式化

ここでは i 番目 / j 番目線形要素の添字は省略する。

(1) xy 相対座標系の設定と平面線形要素の定義

各変数の各平面線形要素の始点における値には s 、終点における値には e の添字を付ける。各平面線形要素上の任意の点を $P = {}^t(x, y)$ とし、始点を P_s 、終点を P_e 、 P_s から P_e までの測線射影曲線の道のりを u で表す。ここに $0 \leq u \leq L$ であり、 P_s 、 P_e はそれぞれ $u = 0$ 、 $u = L$ を代入して求められる。一般化のために接線角 τ も各線形要素に対して定義する。

a) 直線

相対座標系の原点は始点におく。 x は u に一致する。 τ は常にゼロである。

$$P = {}^t(x, y, \tau) = {}^t(u, 0, 0) \quad (13)$$

b) 円

相対座標系の原点は始点におく。 x 軸は u の初期値 u_s における測線射影曲線の接線方向にとる。 y 軸は左

カーブの円中心方向を正にとる。円における接線角 τ は、回転角と同じものである。円半径 R に表-1 に示す符号を付して考えると、左右カーブに関らず次式で定式化できる。

$$P = {}^t(x, y, \tau) = {}^t(R \sin \tau, R(1 - \cos \tau), \frac{u}{R}) \quad (14)$$

c) クロソイド

相対座標系は、曲率 = 0 となる地点に原点を置き、 x 軸は原点における u 軸の測線射影曲線の接線方向にとる。 y 軸は左カーブの中心方向を正にとる。各パラメータの符号を表-1 で与えれば、任意のクロソイド曲線は次式で定式化できる。

$$P = {}^t(x, y, \tau, l) = {}^t\left(\frac{l}{\tau} \sin \tau, \frac{l}{\tau} \cos \tau, \eta \delta \frac{l^2}{2A^2}, l_s + u\right) \quad (15)$$

(2) uz 相対座標系の設定と縦断線形要素の定義

各縦断線形要素の始点から終点までの測線射影曲線上の道のりを u とし、任意の点を $P = {}^t(u, z)$ とする。始点を P_s 、終点を P_e とすると、 $0 \leq u \leq D$ であり、 P_s, P_e はそれぞれ $u = 0, u = D$ を代入して求められる。

a) 縦断定勾配

縦断定勾配要素の始点を原点とし、鉛直上向きに z 軸方向をとる。

$$P = {}^t(u, z) = {}^t(u, I \cdot u) \quad (16)$$

但し、 I は勾配の大きさを表す。

b) 縦断曲線

縦断曲線要素の始点を原点とし、鉛直上向きに z 軸方向をとる。

$$P = {}^t(u, z) = {}^t\left(u, I_s \cdot u + \frac{u^2}{2S}\right) \quad (17)$$

但し、 $S = D/(I_e - I_s)$ は縦断曲線半径を表す。

5. 道路上の任意の点の座標と座標変換

(1) 測線上の任意の点 P の座標値

測線上の任意の点 P が、第 i 番目平面線形要素上、第 j 番目縦断線形要素上にある場合、点 P の xyz 座標は、式 (13) ~ (17) により計算される。

測線上の任意の点 P の座標値 (P_x, P_y, P_z) (これを点 P の位置ベクトル \vec{P} とする) は、第 i 番目平面線形要素と第 j 番目縦断線形要素の相対座標系において計算される。

表-2 平面線形要素の接続条件

i 番目要素	(i + 1) 番目要素						
	直線	同方向屈曲部 $\delta_i \cdot \delta_{(i+1)} > 0$			逆方向屈曲部 $\delta_i \cdot \delta_{(i+1)} < 0$		
		円	緩和曲線		円	緩和曲線	
			曲率増加	曲率減少		曲率増加	曲率減少
直線 $\delta_i = 0$	-	Δ	\bigcirc	\times	-	-	-
円 $\eta_i = 0$	Δ	Δ	\bigcirc	\bigcirc	Δ	\times	\times
緩和曲線	曲率増加	\times	\bigcirc	\times	\bigcirc	\times	\times
	曲率減少	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\times	Δ	\times

注) \bigcirc : 接続可, Δ : 条件により接続可, \times : 接続不可

①~③は式 (12) に対応

(2) 測線上の任意の点 P における測線方向ベクトル
点 P における測線射影曲線 ψ^* の方向ベクトル \vec{w}^* は、接線角 τ の定義より平面線形要素の形状に依らず常に次式で与えられる。

$$\vec{w}^* = \begin{pmatrix} w_x^* \\ w_y^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \tau \\ \sin \tau \end{pmatrix} \quad (18)$$

測線上の任意の点 P における測線 ψ の方向ベクトルを $\vec{w} = {}^t(w_x, w_y, w_z)$ とすると、

$$\vec{w} = {}^t(\cos \tau, \sin \tau, w_z) \quad (19)$$

ここで、 \vec{w} の z 軸方向要素 w_z には、

$$w_z = \frac{dz}{du} \cdot \sqrt{w_x^2 + w_y^2} = \frac{dz}{du} \quad (20)$$

という関係が成立するので、 w_z は、式 (16), (17) より次式で与えられる。

$$w_z = \begin{cases} I & : \text{縦断定勾配区間の場合} \\ I_s + \frac{u}{S} & : \text{縦断曲線区間の場合} \end{cases} \quad (21)$$

測線上の任意の点 P における測線方向ベクトル $\vec{w} = {}^t(w_x, w_y, w_z)$ は、式 (19) と (21) で与えられる。

(3) 相対座標の座標変換

点 P の座標値を別の相対座標で表現する場合は、座標変換が必要である。座標変換は、平面線形、縦断線形別々に、隣接する線形要素同士で順次行うことで、任意の相対座標系へ変換することができる。

a) 平面線形要素の座標変換

任意の点 P が、 i 番目の平面線形要素の座標系では $({}^i x, {}^i y)$ 、 $(i + 1)$ 番目の平面線形要素の座標系では $({}^{i+1} x, {}^{i+1} y)$ と表されるとき、両座標系間の座標変換は次式により行われる。

$$\begin{pmatrix} {}^{i+1} x \\ {}^{i+1} y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^i x - {}^i x_e \\ {}^i y - {}^i y_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} {}^{i+1} x_s \\ {}^{i+1} y_s \end{pmatrix} \quad (22)$$

ここに回転角 θ は次式で定義される。

$$\theta = {}^i\tau_c - {}^{i+1}\tau_s \quad (23)$$

一般の高速道路を考えた場合、直線、左方向屈曲部(円, 曲率増加クロノイド, 曲率減少クロノイド), 右方向屈曲部(円, 曲率増加クロノイド, 曲率減少クロノイド)の各平面線形要素について、全ての線形要素同士が互いに隣接して接続できるわけではない。平面線形要素の i 番目と $(i+1)$ 番目の接続関係をまとめたものを、表-2 に示す。

b) 縦断線形要素の座標変換

縦断線形要素の各相対座標系の z 軸は、常に鉛直上向きに固定なので、平行移動のみとなる。

$$\begin{pmatrix} j+1u \\ j+1z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j^u - j^D \\ j^z - j^z_c \end{pmatrix} \quad (24)$$

また任意の縦断線形要素は、任意の縦断線形要素に接続できる。

6. 道路形状の定式化

(1) 横断面形状

本来道路の横断面には、必要に応じて排水勾配や屈曲部の片勾配が付与されるが、ここでは簡単のため道路の横断面をどこでも水平と仮定する。この場合道路表面は、 ψ^* に直交する平面(これを平面 Π_v とする)内の水平な線分(これを横断面線分 ζ とする)を ψ^* 方向に積分してできた曲面となる。

今、線分 ζ の方向ベクトルを \vec{v} (\vec{w} から \vec{v} への回転が上から見て時計回りになるように)とする。 \vec{v} は、 \vec{w} に直交する水平方向となるので、どの平面線形要素でも次式で与えられる。

$$\vec{v} = {}^i(-\sin \tau, \cos \tau, 0) \quad (25)$$

線分 ζ を水平面に射影した線分を ζ^* とすると、 ζ^* の方向ベクトルは ζ と同じく \vec{v} である。

測線上の任意の点 P を通る線分 ζ 上の任意の点、すなわち点 P に対応する道路表面上の任意の点を E (位置ベクトル \vec{E}) とすると、点 E は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{P} + E\vec{v} \\ &= {}^i(P_x - E \sin \tau, P_y + E \cos \tau, P_z) \end{aligned} \quad (26)$$

ここに、 $E_R \leq E \leq E_L$ である。 E は線分 ζ 上の ψ からの横断方向の距離 (ζ 座標値、左側を正)であり、道路表面の横断方向左端を E_L 、右端を E_R で各々表す。

(2) 測線平行曲線及び拡幅曲線

道路の延長方向の形状は、側壁や車線区画線(マーキング)などを用いて表現される。また運転者の目の位置

(視点)を水平面に射影した点(視点射影点)は車線区画線間の任意の位置にあるものとし、車両の進行と共に視点が移動して描く図形を視点軌跡線 ψ_v 、視点射影点が描く図形を視点軌跡射影線 ψ_v^* とする。

側壁、区画線、視点軌跡線は、測線に対する平行線または拡幅曲線と考える。

測線の平面線形が直線及び円曲線区間の場合、側壁、区画線、視点軌跡線などを水平面に射影した曲線は、測線射影曲線と平行な曲線となるものとする。この平行線は直線または円曲線(同心円)となる。

道路構造令では、設計速度に応じて一定以上の曲率(一定以下の曲率半径)の屈曲部では車線の拡幅が必要とされる²⁾。拡幅が必要な区間では、クロノイド区間内で拡幅のすりつけを行う。これを「クロノイド拡幅曲線」と名付ける。拡幅が必要でない場合には、クロノイド曲線と並行な「クロノイド平行線」となる。なお、両曲線ともクロノイド曲線にはならない⁴¹⁾。

拡幅が行われる場合、拡幅量は車線当たりで定めるので、車線区画線の間でのみ拡幅を行い、路側や路肩は拡幅しない。

区画線、または視点軌跡線の拡幅前の ζ 座標値を E_0 とし、拡幅後 E_1 とするとき、通常クロノイド曲線区間における拡幅量のすりつけは、クロノイドの始点からの道のり u に対する単調増大線形関数である。すなわち、 u における拡幅すりつけ途中の ζ 座標値 E は次式で表わされる。

$$E = E_0 + \frac{E_1 - E_0}{L} \times u \quad (27)$$

拡幅に関しては、水平面に射影した平面 xy 座標値にのみ影響があるものであり、 z 方向には関係ない。

(3) 視程障害物

PVSD を決める視程障害物になるものとして、

- 防護柵(ガードレールなど)、防音壁、植栽などの連続的視程障害物(以下これを側壁とする)
- 法面
- クレスト区間の道路表面
- サグ区間における跨道橋など上方障害物

などが考えられる。ここでは簡単のために、左右路肩端部に鉛直な側壁が連続的に立っており、側壁及びクレスト部の路面のみが視程障害物となるものと仮定する。

今モデル化する道路横断面として、多車線高速道路の中央分離帯の片側を想定する。 E_L は外側車線の外側路肩の左端の側壁、 E_R は内側車線の内側路肩の右端の中央帯に設置された側壁のそれぞれ ζ 座標値とする。

左側側壁の高さを $H_L (> 0)$ 、右側側壁の高さを $H_R (> 0)$ とする。左右側壁上の任意の点の位置ベクトルをそれぞれ \vec{Q}_L 、 \vec{Q}_R とし、側壁は常に鉛直とする

接線射影線 ϕ_v^* が側壁射影曲線 ψ_q^* と接するためには、接点射影点 Q^* は円またはクロソイド区間上であり、直線区間上ではありえない。また $\delta = 1$ (左カーブ) では左側側壁、 $\delta = -1$ (右カーブ) では右側側壁のみが視程障害物となり得る。

ψ_q^* 上の点 Q^* における ψ_q^* 方向ベクトルを \vec{q}^* とする。対象とする平面線形要素の始点における ψ_q^* 上の点を Q_s^* 、終点における ψ_q^* 上の点を Q_e^* 、それぞれの ψ_q^* 方向ベクトルを \vec{q}_s^* 、 \vec{q}_e^* とする。

任意の視点射影点 V^* から当該平面線形要素の側壁射影曲線に接線を引きことができる必要十分条件は、

$$(\vec{V}^* \vec{Q}_s^* \times \vec{q}_s^*) \cdot (\vec{V}^* \vec{Q}_e^* \times \vec{q}_e^*) < 0 \quad (30)$$

ここに、 \times はベクトル積 (外積)、 \cdot はスカラー積 (内積) を意味する。この式 (30) が必要十分条件であることは、中間値の定理より証明できる (付録 A 参照)。

接点探索の手順は次のようになる。

1. 視点射影点 V^* が i 番目平面線形要素にあるものとする
2. i 番目平面線形要素が条件式 (30) を満たすかどうかを判定する。ただしこの場合は線形要素の始点の代わりに視点をを用いる。
3. i 番目要素が条件を満たさない場合は、次の $(i+1)$ 番目要素が条件式 (30) を満たすかどうかを判定する。
4. 最初に条件式 (30) を満たす線形要素 (i_Q 番目) を見つけたら、その線形要素上の接点射影点 Q^* では、 $\vec{V}^* \vec{Q}^* \times \vec{q}^* = 0$ が成立することを利用して、区間縮小法⁴²⁾による解の探索アルゴリズムにより、 $Q^* = (Q_x, Q_y)$ を求める。

接線射影線 ϕ_v^* の方程式、すなわち三次元では接平面 Φ_v の方程式は次式で与えられる。

$$(Q_y - V_y)(x - V_x) - (Q_x - V_x)(y - V_y) = 0 \quad (31)$$

i_Q 番目要素における視点軌跡線 ψ_v 上の任意の点 $B = (B_x, B_y, B_z)$ は、 $P_b = (P_{bx}, P_{by}, P_{bz})$ を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} \vec{B} &= (B_x, B_y, B_z) \\ &= (P_{bx} - E_V^{i_Q} \sin \tau, P_{by} + E_V^{i_Q} \cos \tau, P_{bz}) \end{aligned} \quad (32)$$

接線 ϕ_v の方程式は次式で与えられる。

$$\frac{x - V_x}{B_x - V_x} = \frac{y - V_y}{B_y - V_y} = \frac{z - V_z}{B_z - V_z} \quad (33)$$

交点探索と PVSD 算出の手順は次のようになる。

1. ψ_v 上の点 B の式 (32) を、接平面 Φ_v の式 (31) に代入して、視点射影点 V^* 以外の実数解が存在すれば、これが交点射影点 B^* となる

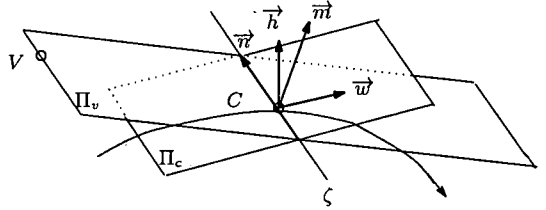


図-6 路面の接平面 Π_c と視点を通る平面 Π_v

2. 実数解がなければ、 $(i_Q + 1)$ 番目平面線形要素について、式 (32) を式 (31) に代入して、 $(i_Q + 1)$ 番目平面線形要素の範囲で実数解 B^* を探索する
3. PVSD の候補は、点 P_b^* と点 P_v^* の測線射影曲線上の道のりで計算される
4. 接線 ϕ_v が通る接点 Q' の三次元座標については、交点 B の三次元座標が求まれば、接線 ϕ_v の方程式 (33) から計算できる。ここで接点 Q' が、その位置における側壁の高さ (H_L 又は H_R) の範囲外となる場合は、これは接線とならないので、PVSD の候補とはならないことになる

(3) クレストの路面と接する場合の PVSD の算定法

クレストの路面と接する点を $C = (C_x, C_y, C_z)$ とし、 C に対応する測線 ψ 上の点を P_c とする。 P_c における測線 ψ の方向ベクトル $\vec{w} = (\cos \tau, \sin \tau, w_{cz})$ 、線分 ζ の方向ベクトル $\vec{n} = (-\sin \tau, \cos \tau, 0)$ 、視点 $V' = (V_x, V_y, V_z)$ とする。ここで w_{cz} は、式 (21) で与えられる。

C における路面の接平面 Π_c の法線ベクトル \vec{h} は、 $\vec{h} \cdot \vec{w} = \vec{h} \cdot \vec{n} = 0$ なる条件より次式で与えられる。

$$\vec{h} = (-w_z \cos \tau, -w_z \sin \tau, 1) \quad (34)$$

視点 V を含み P_c を通る線分 ζ も含むような平面 Π_v を考えると、 Π_v の法線ベクトル \vec{m} は、 $\vec{m} \cdot \vec{n} = \vec{m} \cdot \vec{V} \vec{C} = 0$ なる条件より次式で与えられる。図-6 にこの様子を示す。

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} -(C_z - V_z) \cos \tau \\ -(C_z - V_z) \sin \tau \\ (C_x - V_x) \cos \tau + (C_y - V_y) \sin \tau \end{pmatrix} \quad (35)$$

Π_c と Π_v の交線は ζ となるので、 \vec{m} と \vec{h} は \vec{n} を法線とする同一平面内にある。すなわち次式が成り立つ。

$$\vec{m} \times \vec{h} = \gamma \vec{n} \quad (36)$$

ここに γ (これを倍率係数と呼ぶことにする) は、式 (34)、(35) を解いて次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \gamma &= -w_{cz}(C_x - V_x) \cos \tau - w_{cz}(C_y - V_y) \sin \tau \\ &\quad + C_z - V_z \end{aligned} \quad (37)$$

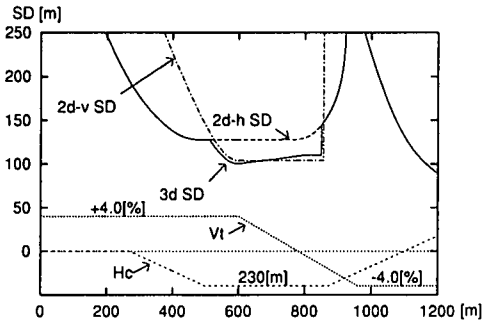


図-7 PVSDの数値計算例

今、点 C を当該クレスト縦断線形要素の始点、及び終点とした場合の倍率係数をそれぞれ γ_s, γ_e とする。この時、当該クレスト縦断線形要素の路面に接線を引くことができる必要十分条件は次式のようになり、

$$\gamma_s \cdot \gamma_e < 0 \quad (38)$$

これは条件式 (30) と類似の方法で証明できる(証明略)。接点探索と PVSD 算出の手順は次のようになる。

1. 視点 V' が j 番目縦断線形要素にあるとする。
2. j 番目縦断線形要素が条件式 (38) を満たすかどうかを判定する。ただしこの場合は始点の代わりに視点をを用いる。
3. j 番目要素が条件を満たさない場合は、次の $(j+1)$ 番目要素が条件式 (38) を満たすかどうかを判定する。
4. 最初に条件式 (38) を満たす線形要素 (j_c 番目) を見つけたら、その線形要素上で $\gamma = 0$ となる点 C が必ず存在し、これが接点となる。 $C = (C_x, C_y, C_z)$ は、区間縮小法⁴²⁾による解の探索アルゴリズムにより求められる。また接線 \overline{VC} の方程式は次式で与えられる。

$$\frac{x - V_x}{C_x - V_x} = \frac{y - V_y}{C_y - V_y} = \frac{z - V_z}{C_z - V_z} \quad (39)$$

5. 接線 \overline{VC} が、視点から接点までの区間の側壁や j_c 番目線形要素以外の路面と交わりを持つ場合は点 C は接点とならない。
6. PVSD の候補は、点 P_c^* と点 P_v^* の測線射影曲線上の道のりで計算される。

(4) 数値計算例

片側 2 車線高速道路の標準的な横断面を想定し、視点軌跡射影線は右側車線の車線中心線として平面線形の屈曲部の拡幅と横断勾配は無視する。設計速度 80[km/h] での設計基準値を考慮して、勾配 4.0[%] の上り坂と下り坂を縦断曲線半径 4500[m] のクレストで結び、曲線半

径 (特例値) 230[m] の円区間と組合せた場合の PVSD を、運転者の視点位置が 1[m] 進む毎に計算する。

図-7 は、この計算例における平面曲率図 (図中の H_t)、縦断勾配図 (図中の V_t)、三次元立体道路幾何構造を用いて計算された PVSD の値 (図中の 3d SD) を示す。また平面線形のみ (図中の 2d-h SD)、及び縦断線形のみ (図中の 2d-v SD) をそれぞれ二次的に考えた場合の PVSD も一緒に示す。

道路線形の三次元立体構造を考慮すると二次元で考えたものと比較して、PVSD の値が異なる部分のあることは図から明らかである。道路線形を平面線形と縦断線形に別々に分けて考えたのでは正しい PVSD を計算することができず、視覚環境の評価には三次元空間で考えることが必要になることがわかる。

8. おわりに

本稿の成果をまとめると以下の通りである。

- 視距 (SD) についての概念の整理と、特に実現視距 (ASD) に関する既存の研究成果を概観し、提案されている様々な概念を整理した。
- 運転者の視覚環境を評価する指標として、予見視距 (PVSD) なる指標を明確に定義した。
- 道路線形、横断面形状を、3次元空間上で幾何学的に論理的に整合するように定義し、定式化を行った。
- 任意の道路上の運転者からみた PVSD を、3次元空間上で連続的に計算する新たな手法を提案した。

当面の課題としては、この算定手法を用いた PVSD が現実の運転者の視覚環境をモデル上正しく再現できていることを検証すること、そのためには必要に応じて法面や横断勾配についてもモデル化を進めること、さらに現実の視程障害物はモデルで考えるほど単純な形状ではなく、実際は側壁や法面をセットバックされていたり、樹木の生長により逆に視界が遮られてしまったりしているが、そうした現実の状態における視覚環境を導出する手法を確立すること、などが挙げられる。

今後の研究の展開としては、PVSD の値の空間的変動・分布が実際の運転挙動に与える影響を明らかにすること、PVSD という距離指標以外にも鉛直接平面： Φ_v と路面接平面： Π_c とで囲まれた空間的な領域を表現するようなその他の指標による視覚環境の定量的評価の可能性の検討、及び道路空間の安全性や円滑性を評価するためにこうした視覚環境評価指標を設計変数として取り込むこと、などが考えられる。

謝辞：本研究の一部は、1998 年度文部省科学研究費奨励研究 (A) (課題番号：10750405) による補助を受けた。また数値計算には、大崎啓史氏 (東京都) の協力を得た。ここに謝意を表する。

付録 A 接線を引くことのできる条件の証明

視点射影点: V^* を原点: O においても一般性は失われない。また側壁射影曲線は円またはクロソイド(拡幅)曲線であるが、これを一般の関数

$$y = f(x) \quad (A.1)$$

$$f''(x) > 0 \quad (A.2)$$

においても、 xy 軸を適当に取れば一般性を失わない(ここで $f'(x), f''(x)$ はそれぞれ1階微分, 2階微分を表す)。また点 $Q_s^* = {}^t(x_s, y_s)$, ベクトル $\vec{q}_s^* = {}^t(x_s, f(x_s))$, 点 $Q_e^* = {}^t(x_e, y_e)$, ベクトル $\vec{q}_e^* = {}^t(x_e, f(x_e))$ とする(ここに $0 \leq x_s \leq x_e$)。また曲線上の任意の点 $Q^* = {}^t(x, y)$, ベクトル $\vec{q}^* = {}^t(x, f(x))$ とする ($x_s \leq x \leq x_e$)。

このとき本文中の式 (30) は次式ようになる。

$$(\overrightarrow{OQ_s^*} \times \vec{q}_s^*) \cdot (\overrightarrow{OQ_e^*} \times \vec{q}_e^*) < 0 \quad (A.3)$$

このとき

$$\overrightarrow{OQ^*} \times \vec{q}^* = 0 \quad (A.4)$$

を満たす点 Q^* が存在することを証明すればよい。

式 (A.3) は次のように置き換えられる。

$$\frac{f(x_s)}{x_s} > f'(x_s) \text{ かつ } \frac{f(x_e)}{x_e} < f'(x_e) \quad (A.5)$$

または,

$$\frac{f(x_s)}{x_s} < f'(x_s) \text{ かつ } \frac{f(x_e)}{x_e} > f'(x_e) \quad (A.6)$$

式(A.5)となる場合: $x_s > 0$ より,

$$f(x_s) > x_s f'(x_s) \text{ かつ } f(x_e) < x_e f'(x_e) \quad (A.7)$$

ここで $g(x) \equiv x f'(x) - f(x)$ とおけば, 式 (A.7) は,

$$g(x_s) < 0 \text{ かつ } g(x_e) > 0 \quad (A.8)$$

となる。ここで,

$$g'(x) = f'(x) + x f''(x) - f'(x) = x f''(x) > 0 \quad (A.9)$$

であるから, $x_s < \exists x < x_e$ なる x について, $g(x) = 0$ となる x が存在することは中間値の定理より明白である。

式(A.6)となる場合: $x_s > 0$ より,

$$f(x_s) < x_s f'(x_s) \text{ かつ } f(x_e) > x_e f'(x_e) \quad (A.10)$$

ここで, $g(x) \equiv x f'(x) - f(x)$ とおけば, 式 (A.10) は,

$$g(x_s) > 0 \text{ かつ } g(x_e) < 0 \quad (A.11)$$

となる。

一方, 式 (A.9) より, $g'(x) > 0$ であるから, これは式 (A.11) と矛盾する。

従って式 (A.6) となることはない。

証明了

参考文献

- 1) 岩間滋, 七宮大: 交通工学 17・増補・道路設計における透視図法, 技術書院, 1965.
- 2) 道路構造令の解説と運用, 日本道路協会, pp.254, 1983.
- 3) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 4) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和: 高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, No.458/IV-18, pp.65-71, 1993.
- 5) 大口敬: 高速道路サグにおける渋滞の発生と道路線形との関係, 土木学会論文集, No.524/IV-29, pp.69-78, 1995.
- 6) ハンス・ローレンツ [中村英夫・中村良夫訳]: 道路の線形と環境設計, 鹿島出版会, pp.91, 1976.
- 7) American Association of State Highway and Transportation Officials: *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, pp.136-137, 1990.
- 8) Gattis, J. L. and Duncan, J.: *Geometric Design for Adequate Operational Preview of Road Ahead*, *Transp. Res. Rec.*, No.1500, pp.139-145, 1995.
- 9) American Association of State Highway and Transportation Officials: *A Policy on Design Standards for Stopping Sight Distance*, 1971.
- 10) Cleveland, D. E., Kostyniuk, L. P., Waissi, G. R., Olson P. L. and Fancher, P. S.: *Stopping Sight Distance Parameters*, *Transp. Res. Rec.*, No.1026, pp.13-23, 1985.
- 11) Neuman, T. R.: *New Approach to Design for Stopping Sight Distance*, *Transp. Res. Rec.*, No.1208, pp.14-22, 1989.
- 12) 前掲 2), pp.254-261, 1983.
- 13) 前掲 7), pp.117-140, 1990.
- 14) Easa, S. M.: *Lateral Clearance to Vision Obstacles on Horizontal Curves*, *Transp. Res. Rec.*, No.1303, pp.22-32, 1991.
- 15) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 道路線形と見通し視距の関係に関する考察, 土木計画学研究・講演集, No.19(2), pp.585-588, 1996.
- 16) Olson, P. L., Cleveland, D. E., Fancher, P. S., Kostyniuk, L. P. and Schneider, L. W.: *Parameters Affecting Stopping Sight Distance*, *NCHRP Report*, No.270, *Transp. Res. Board*, 1984.
- 17) Cleveland, D. E., Kostyniuk, L. P., Waissi, G. R., Olson, P. L. and Fancher, P. S.: *Stopping Sight Distance Parameters*, *Transp. Res. Recrd.*, No.1026, pp.13-23, 1985.
- 18) Waissi, G. R. and Cleveland, D. E.: *Sight Distance Relationships Involving Horizontal Curves*, *Transp. Res. Rec.*, No.1122, pp.96-107, 1987.
- 19) Easa, S. M.: *Sight Distance Model for Unsymmetrical Crest Curves*, *Transp. Res. Rec.*, No.1303, pp.39-50, 1991.
- 20) Easa, S. M.: *Sight Distance Models for Unsymmetrical Sag Curves*, *Transp. Res. Rec.*, No.1303, pp.51-62, 1991.
- 21) Easa, S. M.: *Sight Distance Relationships for Symmetrical Sag Curves with Noncentered Overpasses*, *Transp. Res.*, Vol.26B, No.3, pp.241-251, 1992.

- 22) Easa, S. M.: Design Considerations for Highway Reverse Curves, *Transpn. Res. Rec.*, No.1445, pp.1-11, 1994.
- 23) Easa, S. M.: Design Considerations for Highway Sight-Hidden Dips, *Transpn. Res.*, Vol.28A, No.1, pp.17-29, 1994.
- 24) Easa, S. M.: New and Improved Unsymmetrical Vertical Curve for Highways, *Transp. Res. Rec.*, No.1445, pp.94-100, 1994.
- 25) Easa, S. M.: Three-Arc Vertical Curve for Constrained Highway Alignments, *Journal of Transp. Eng.*, ASCE, Vol.124, No.2, pp.163-171, 1998.
- 26) Easa, S. M. and Hassan, Y.: Design Requirements of Equal-Arc Unsymmetrical Vertical Curves, *Journal of Transp. Eng.*, ASCE, Vol.124, No.5, pp.404-410, 1998.
- 27) Hassan, Y., Easa, S. M. and Abd El Halim, A. O.: Sight Distance on Horizontal Alignments with Continuous Lateral Obstructions, *Transpn. Res. Rec.*, No.1500, pp.31-42, 1995.
- 28) 富士田昌栄, 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 道路線形を用いた視距図作成アルゴリズムの開発, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.52-4, pp.214-215, 1997.
- 29) 大口敬, 富士田昌栄, 片倉正彦, 鹿田成則: 道路の平面線形と視距の関係に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.20(2), pp.907-910, 1997.
- 30) Geissler, E. H.: A Three-Dimensional Approach to Highway Alignment Design, *Highway Res. Rec.*, No.232, pp.16-28, 1968.
- 31) Park, R. A., Rowan, N. J. and Walton, N. E.: A Computer Technique for Perspective Plotting of Roadways, *Highway Res. Rec.*, No.232, p.29-45, 1968.
- 32) Smith, B. L. and Lamm, R.: Coordination of Horizontal and Vertical Alignment with Regard to Highway Esthetics, *Transp. Res. Rec.*, No.1445, pp.73-85, 1994.
- 33) Sanchez, E.: Three-Dimensional Analysis of Sight Distance on Interchange Connectors, *Transp. Res. Rec.*, No.1445, pp.101-108, 1994.
- 34) Hassan, Y., Easa, S. M. and Abd El Halim, A. O.: Analytical Model for Sight Distance Analysis on Three-Dimensional Highway Alignments, *Transp. Res. Rec.*, No.1523, pp.1-10, 1996.
- 35) Hassan, Y., Easa, S. M. and Abd El Halim, A. O.: Modeling Headlight Sight Distance on Three-Dimensional Highway Alignments, *Transp. Res. Rec.*, No.1579, pp.79-88, 1997.
- 36) Hassan, Y. and Easa, S. M.: Design of Sag Vertical Curves in Three-Dimensional Alignments, *Journal of Transp. Eng.*, ASCE, Vol.124, No.1, pp.52-58, 1998.
- 37) Hassan, Y. and Easa, S. M.: Design Considerations of Sight Distance Red Zones on Crest Curves, *Journal of Transp. Eng.*, ASCE, Vol.124, No.4, pp.343-352, 1998.
- 38) Hassan, Y., Easa, S. M. and Abd El Halim, A. O.: Design Considerations for Combined Highway Alignments, *Journal of Transp. Eng.*, ASCE, Vol.123, No.1, pp.60-68, 1997.
- 39) Hassan, Y., Easa, S. M. and Abd El Halim, A. O.: Highway Alignment, Three-Dimensional Problem and Three-Dimensional Solution, *Transp. Res. Rec.*, No.1612, pp.17-25, 1998.
- 40) 中村英夫, 村井俊治: 測量学, 技報堂出版, pp.333-336, 1981.
- 41) 佐藤信武: 実用クロソイド曲線の設計と計算例, 現代理工学出版, pp.112-118, 1984.
- 42) 堀洋一: 直線探索付き最大傾斜法による最適問題の数値計算プログラム, 電気雑誌 OHM, Vol.73, No.6, pp.77-80, 1986.

(1999.2.8 受付)

FORMULATION OF DRIVER'S FUNCTIONAL VISUAL ENVIRONMENT DEPENDING ON THREE DIMENSIONAL ROAD GEOMETRY

Takashi OGUCHI

Driver's functional visual environment are decided mainly by roadway alignments and cross sections. In this paper, studies about sight distance are reviewed, and relatively new concept, "preview sight distance (PVSD)", which definition is re-examined by author, is proposed as a evaluator of driver's functional visual environment. Though horizontal and vertical alignments are usually defined separately on two-dimensional plane, the three-dimensional exact definition of road geometry including road alignments and cross sections is introduced. At last, utilizing this three-dimensional road geometry definition, the algorithm for calculating PVSD, at any point of driver's view simultaneously, is proposed.