

路線選定システムにおける平面曲線の自動整形の試み

A STUDY ON THE AUTOMATIC DESIGN OF CENTER LINES IN THE ROUTE LOCATION SYSTEM

村井俊治*・嶋田厚二**
By Shunji Murai and Koji Shimada

1. は し が き

路線の選定はその路線がもたらす効果、建設費、地域開発などに決定的な影響をおよぼす。したがって、路線選定の際にはできるかぎり多くの関係者の討論とそれに対する技術的、公共的、経済的検討および判断がくり返えされることが望ましい。

路線選定が数多い参加者とその判断によって進められるためには比較路線が迅速に選べかつそれにひきつづく線形設計計算が自動的に行なえるようなシステムが必要である。筆者らはこのようなシステムを確立することを目的として航空写真から得られる実体光学モデルを用いた路線選定と計算機による線形計算の自動処理を試みた。筆者らが提案したシステムでは、実体光学モデル上にフリーハンドで予備的な路線が描かれると、その後は計算機が直線、円、クロソイドからなる曲線群でその路線を幾何構造上の基準を満足するようにしながら自動的に近似し、自動製図機がその平面図を自動製図してくれる。こうして得られた平面線形は再び実体モデルの中に入れられ、数多くの関係者たちの評価および判断をうけることによって適当な路線へと近づけられることが可能となるのである。以下の本論では上に述べた路線選定のシステムおよびその計算例をあげる。

2. 実体光学モデルと計算機を用いた道路路線の選定法の提案

道路路線の選定は、地域開発、産業計画、投資効果、建設工費、建設技術、用地取得、地形地質条件、その他数多い面からの検討とそれに基づく予備的な決定とがフィードバックしあいながら行なわれる。したがって、最

終的な路線が選定されるまでの決定過程のあいだに、土木技術者のみならず、政治、経済関係者および地域代表者が路線および路線周辺の現在から将来にいたる開発の可能性とその効果に対する意見交換を行なうことが望まれる。これらの意志伝達を容易にするためには、数人が同時に眺められ、しかもできるだけ現地の姿に近い計画地域のモデルをつくる必要がある。最近の写真測量機械の発達はこのようなモデルを室内のテーブルの上に余色の実体光学モデルとしてつくりだすことを可能としている。たとえば、写真-1 に示される写真測量図化機は 60×80 cm のテーブルの上に立体航空写真対から得られる余色光学モデルをつくり出し、これを数人の人間が余色立体めがねにより大局的かつ立体的にその地形を観察することを可能にしている。また必要に応じてこ

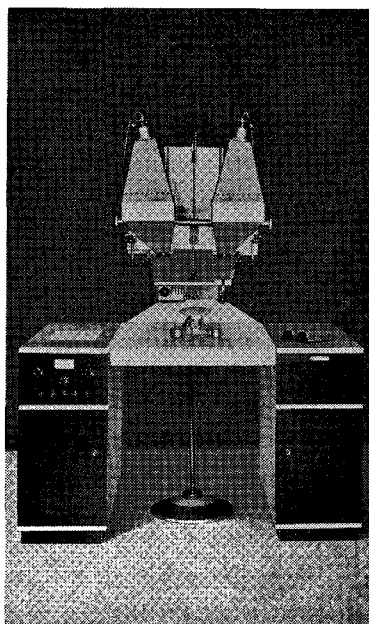


写真-1 余色立体写真測量図化機

* 正会員 東京大学生産技術研究所

** 正会員 東京大学大学院 (現大林組)

のテーブル上に地形、地物、等高線を平面図としてかくことができるとともに、これに計画路線案をフリーハンドで書き入れることもできる。このテーブル上で計画路線の縦断または横断方向の地形を描くことも可能である。このような写真測量を利用した路線選定はヨーロッパですでに試みられている。

立体航空写真対から得られる立体光学モデル上で路線選定を行なう利点を等高線地図を用いて行なう場合と比較してみるとつぎのような利点をあげることができる。

(1) 計画区域を空から見ているのと同じように大局的、立体的にかつ詳細にその地形、地質、植生、土地利用等を読みとることができる。

(2) 数人の人間が同時に一つの立体モデルを見ながら路線選定の検討を行なえるため、各方面の意志伝達が容易に行なわれる。

(3) あらかじめ等高線地図を作っておかなくても、路線選定またはそれにひきつづく設計に必要な箇所の標高、植生、土地利用、排水系等の情報をテーブル上の立体光学モデル上でただちに読みとることができる。

(4) テーブル上の立体光学モデル上に容易に計画比較路線をかき入れることができ、しかもその効果、制約等を現地に行かなくても室内でその大部分を確認することができる。また、路線の完成した姿を建設前に想像することが容易である。

予備的な路線がフリーハンドに描かれ、路線の縦断および横断方向の条件に無理がないことが確かめられると、この路線の平面線形計算が行なわれる。すなわちフリーハンドで描かれた予備的な路線は直線、円、クロノイド曲線を用いて数学的に定義されかつ幾何構造基準を満足する曲線群として整形されるのである。

この整形作業をすすめる従来の方法はまず平面図上で定規や数表を用いて円半径、クロノイドパラメーター等の線形要素を地図上にかかれた路線から図解的に求め、さらにその線形計算が手計算あるいは計算機によって行なわれていた。そのため時間と労力が多くかかり、数多い路線の比較や修正を許さない傾向にあった。このことが路線設計における平面線形設計へのフィードバック過程を少なくし最適な路線へと近づけてゆくための隘路となっていたのである。路線設計においては、路線の縦断線形の修正による建設工費の節減の影響にくらべ平面路線計画の変更がその建設工費に影響をおよぼすことの方が多いためである。

路線選定およびそれにひきつづく線形計算に関する従来の欠陥を除去する方法として筆者らは、立体光学モデル上から得られる各種の情報を計算機に与えることにより、道路幾何構造基準を満足する平面線形計算を行なわれしめ、合理的でしかも迅速な路線選定を行なうことを目

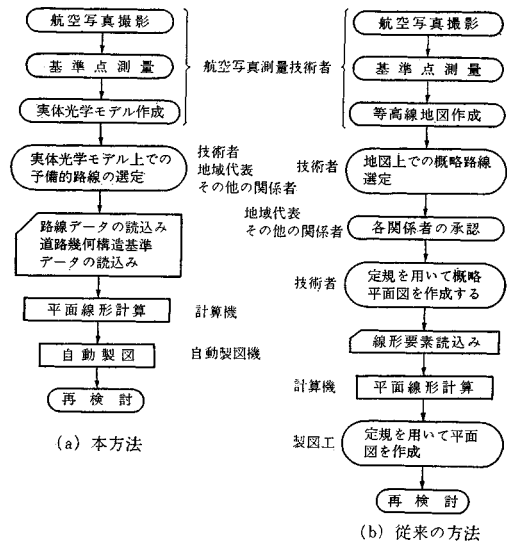


図-1 路線選定システム

的として図-1に示すような方法を考案した。この方法を従来の方法と比較するためにフローチャートと路線選定に関係する人達との関係をかかげる。

3. 平面線形整形計算の自動処理

本節では、フリーハンドで描かれた予備的な路線を計算機を用いて数学的にかつ道路幾何構造上満足のゆく曲線群に整形する方法についてのべる。

(1) 自動整形計算の概要

フリーハンドの路線の整形方法を段階ごとに示すつぎのように表わされる。

(1) フリーハンドで描かれた路線をほぼ等間隔に分割して測点をとる。

(2) 各測点の平面座標を写真-2に示すような座標読取り装置を用いて紙テープにアウトプットする。 i 番目の測点の座標を $P_i(x_i, y_i)$ とする。

(3) 連続する3測点を通る円弧群を作り、その曲率半径およびその円弧長を求める。いま図-2に示すように測点 P_{i-1}, P_i, P_{i+1} を通る円の中心の座標を (C_{xi}, C_{yi}) とし、曲率半径を r_i とすると、つぎの式が成りたつ。

$$\begin{bmatrix} x_{i+1}-x_i & y_{i+1}-y_i \\ x_i-x_{i-1} & y_i-y_{i-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{xi} \\ C_{yi} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_{i+1}^2-x_i^2+y_{i+1}^2-y_i^2 \\ x_i^2-x_{i-1}^2+y_i^2-y_{i-1}^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

$$r_i = \pm \sqrt{(C_{xi}-x_i)^2 + (C_{yi}-y_i)^2} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 r_i は時計まわり方向を正、反時計まわりのとき負とする。

(4) 円弧群で近似された路線の曲率図をつくる。測点 P_i における曲率は $1/r_i$ とし、累加距離 L_i は、

$$L_i = L_{i-1} + r_i \theta_i \dots\dots\dots (3)$$

とする。曲率図は $(L_i, 1/r_i)$ を図-3 に示すように順

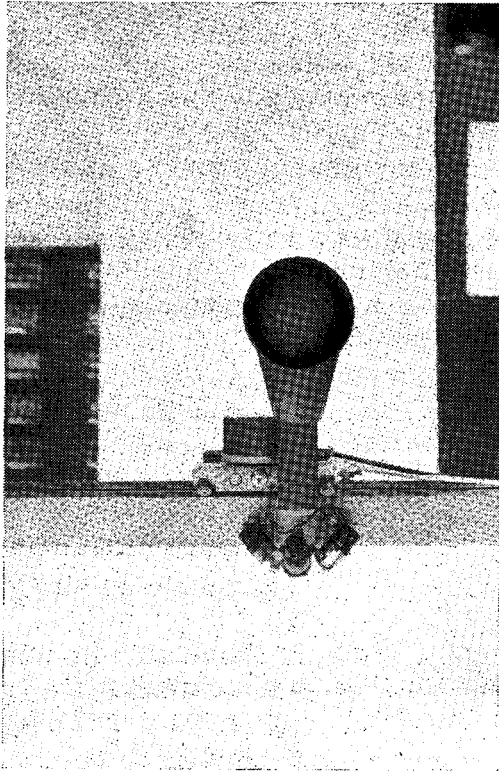


写真-2 座標読取装置

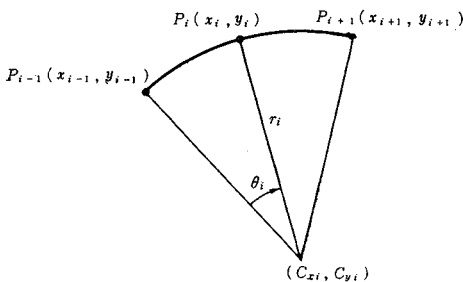


図-2 円弧近似

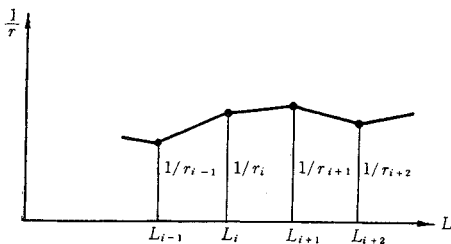


図-3 近似曲率図の作成

次直線でむすんで作る。ただし θ_i は測点 P_{i-1} から P_i までの角であってつぎの式によって計算される。

$$\theta_i = 2 \tan^{-1} \left[\frac{\left(x_i - \frac{x_i + x_{i-1}}{2}\right)^2 + \left(y_i - \frac{y_i + y_{i-1}}{2}\right)^2}{\left(C_{xi} - \frac{x_i + x_{i-1}}{2}\right)^2 + \left(C_{yi} - \frac{y_i + y_{i-1}}{2}\right)^2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

(5) 上記の近似曲率図を直線, 円, クロソイド曲線からなる曲率構成にし, 道路幾何構造基準を満足するように修正する。この方法の詳細は 3.(2) でのべる。

近似曲率図を修正して得られた修正曲率図に対する曲線は, 曲線長とその曲率の関数関係を与えているにすぎず, 曲線が測地座標系のどこの位置に設置されるかは決定されない。したがって曲率図から得られる曲線はその形状を示すだけであるから, これをわれわれは相対的平面曲線とよぶことにする。

(6) (5) で得られた相対的平面曲線の縮尺をかえ, さらに回転, 移動させ, もとのフリーハンドで描かれた予備的な路線に近づくように変換する。このように相対的平面曲線がその位置を定められたとき, われわれはこれを絶対的平面曲線と呼ぶことにする。最小自乗法を用いて絶対的平面曲線を求める方法を 3.(3) で述べる。

(7) 以上の作業が計算機によって処理されると, つぎに曲率図, 絶対的平面曲線を自動製図機によって自動描画させる。

以上の諸過程の流れをフローチャートにあらわすと図-4 のように表わすことができる。

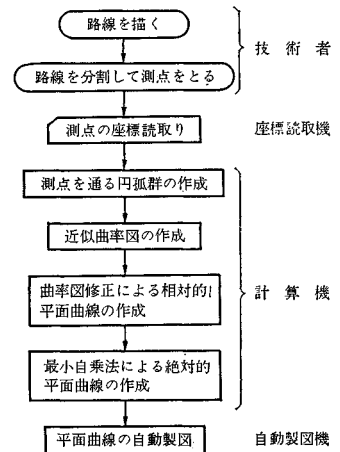


図-4 平面線形の自動整形計算の流れ

(2) 曲率図の修正による相対的平面曲線の作成方法

フリーハンドで描かれた路線を円弧群で近似したものをそのまま道路平面線形にするわけにはいかない。さらに道路幾何構造基準を満足するように直線, 円, クロソイド曲線をくみあわせて滑らかな曲線に整形しなければならない。この作業は円弧群から得られた短い折線状の曲率図を図-5 に示されるように, 直線, 円, クロソイド曲線で整形することをさす。

計算機を用いてこの整形計算を行なうアルゴリズムを順を追って述べよう。

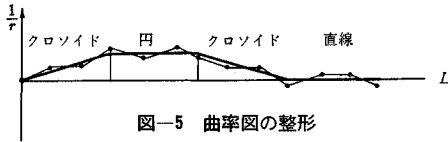


図-5 曲率図の整形

プログラム 1. 曲率図の予備的整形プログラム

(i) 測点区間 $[i, i+1]$ における曲率の勾配の絶対値がゼロとみなせられないものはクロソイド曲線区間とする。

(ii) 直線区間か円弧区間かは $[i, i+1]$ 区間の曲率の絶対値 $|1/r_i + 1/r_{i+1}|/2$ がゼロとみなせるか否かによって分類する。

(iii) すべての測点について直線、円弧、クロソイド曲線区間の分類が完了したら隣りあう区間の同種の曲線を集めて同種曲線ブロック群を作成する。

(iv) 円弧ブロック群についてはそのブロック内を同一の曲率にするか否かを判定する。これは隣り合う区間の曲率の差の絶対値がある許容値より小さいか否かによ

り、同一曲率にするか否かを判定する。

(v) クロソイドブロック群についてはおのおののブロックを同一のパラメータにするか否かを隣り合う区間の曲率の傾きの差の絶対値がある許容値より小さいか否かにより判定する。

(vi) 円弧ブロックおよびクロソイドブロック群の中でそれぞれ同一曲率または同一パラメータとみなし得る区間はその区間内を最小自乗法により同一の円弧またはクロソイド曲線をあてはめる。

(vii) 以上の操作によって得られた曲率図を自動製図させる。

以上の計算の流れをフローダイアグラムにあらわすと図-6 のようになる。

プログラム 2. 道路幾何構造基準に基づく曲率図修正計算

プログラム 1 によって作られる曲率図は機械的に曲線を直線、円弧、クロソイド曲線区間に分類したにすぎず、これらの関係が道路幾何構造上満足のものか否かは保証されていない。そこでプログラム 2 ではプログラム 1 で得られた曲率図を道路幾何構造基準を満足するようにさらに修正される。

(i) 直線区間の場合：直線区間長 l_s が許容最小長 C_{S1} と許容最大長 C_{S2} の間にあれば幾何構造上問題ないとする。

[1] $l_s < C_{S1}$ の場合

(a) 直線区間の前後の曲率の積が負のときは、図-7(a) に示すように直線区間をなくし一本の S 形クロソイド曲線にする。

(b) 前後の曲率の積が正のときは図-7 (b) に示すように直線区間を C_{S1} まで延長する。

[2] $l_s > C_{S2}$ の場合

直線区間の長さを C_{S2} に短縮し、残りの長さ $l_s - C_{S2}$ を図-7 (c) に示すようにつぎのクロソイド区間に加える。

(ii) 円弧区間の場合：円弧長 l_R が円弧許容最小長さ C_{R1} と許容最大長さ C_{R2} の間にあれば幾何構造上問題ないものとする。

[1] $l_R < C_{R1}$ の場合

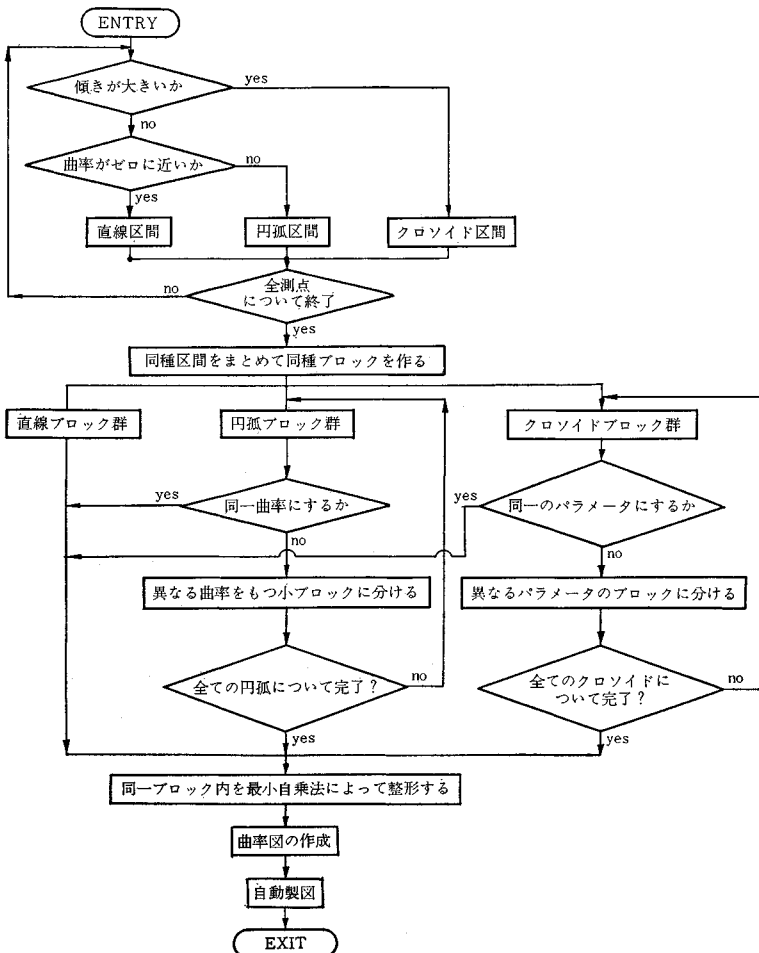


図-6 曲率図の予備的な整形の流れ

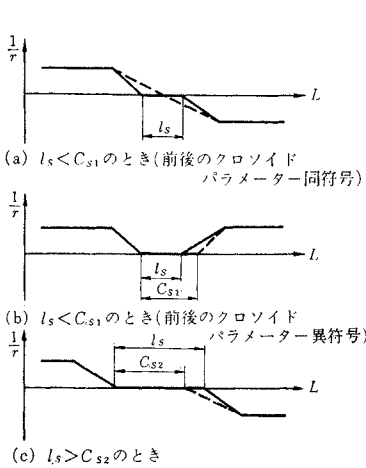


図-7 直線区間の修正

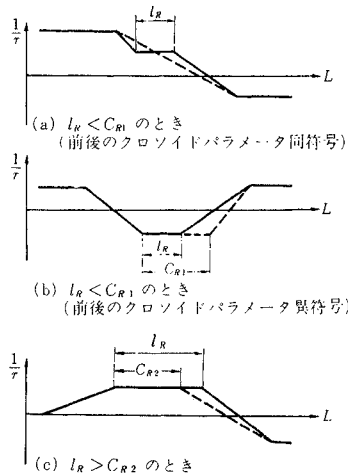


図-8 円弧区間の修正

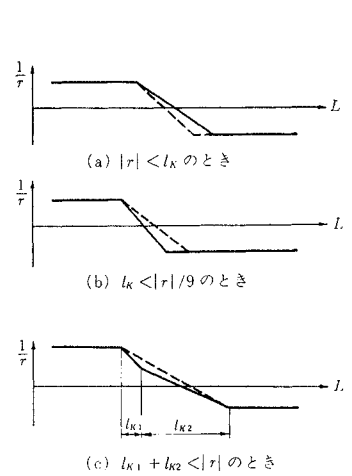


図-9 クロソイド曲線区間の修正

- (a) 前後のクロソイド曲線のパラメーターが同符号のときは円弧をなくし図-8 (a) に示すように1本のクロソイド曲線にする。
- (b) 前後のクロソイド曲線のパラメーターが異符号のときは図-8 (b) に示すように円弧長を C_{R1} に延長する。

[2] $l_r > C_{R2}$ の場合

円弧長を C_{R2} とし図-8 (c) に示すように残りの長さ $l_r - C_{R2}$ をつぎのクロソイド区間へ加える。

(iii) クロソイド曲線区間の場合：道路幾何構造上クロソイドパラメーター A は $|r/3| \leq |A| \leq |r|$ を満足する

のがよいとされている。この関係はクロソイド曲線長を l_k とするとき、

$$|r/9| \leq l_k \leq |r|$$

を満足すれば幾何構造上問題ないということに等しい。

[1] つぎの曲線が円弧または直線のときは図-9 (a), (b) に示すように l_k の長さが上記の範囲内に入るようにクロソイド長を修正する。

[2] つぎの曲線がクロソイド曲線の場合は図-9 (c) に示すように l_{k1} または l_{k2} が $|r|/9$ より小さいかまたは $l_{k1} + l_{k2} < |r|$ のときは $l_{k1} + l_{k2}$ の区間を1本のクロソイド曲線にする。

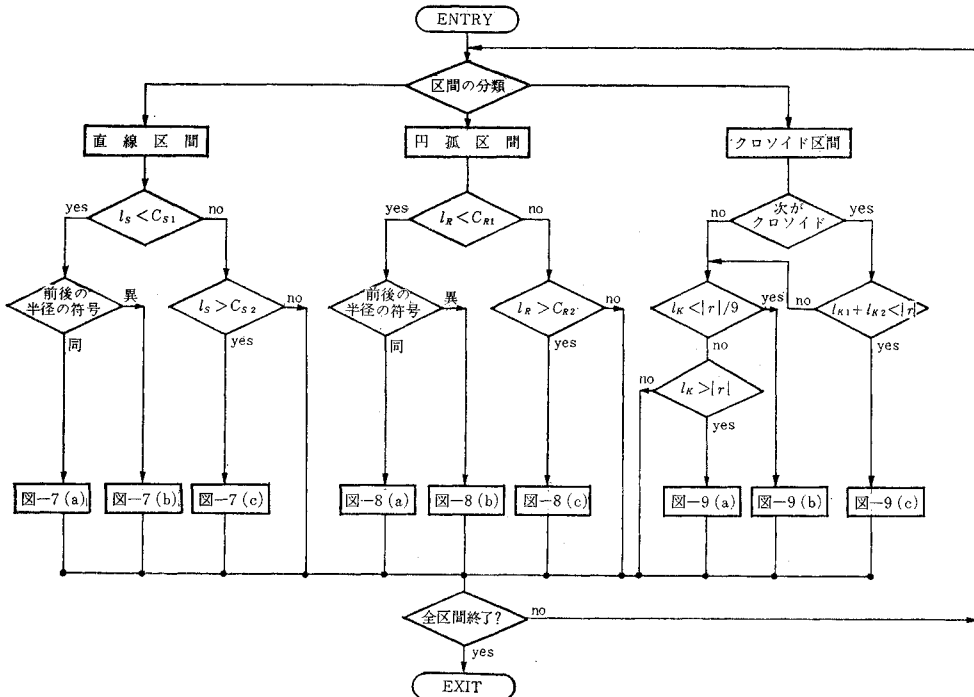


図-10 道路幾何構造基準に基づく曲率図の修正フロー

以上に示した判定および修正は 図-10 に示すフローダイアグラムにしたがって行なわれる。

プログラム 3. 曲率図の再修正プログラム

プログラム 2 によってできた曲率図から得られる曲線が最初にフリーハンドで描いた路線の形状にさらによく近似するように曲率図を再修正する。このためには最初に作られた曲率図とプログラム 2 によって修正された曲率図とが囲む面積の和をゼロに近くなるように修正すればよい。ただしもとの曲率が新しい曲率より大きい部分は正の面積をとりその逆は負の面積をとるものとする。

再修正の手続きは面積の差の累積が一定値をこえたつぎの区間までを最小自乗法を用いて新たな曲率をあてはめることよって行なわれる。曲率図再修正の流れ図を 図-11 に示す。

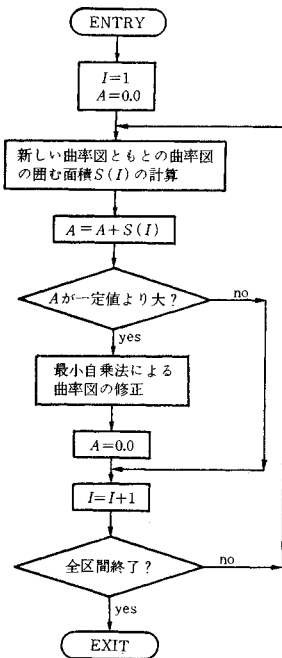


図-11 曲率図の再修正プログラム

(3) 絶対的平面曲線の標定

フリーハンドで描かれたもとの路線に相似な形状をもつ曲線として近似された相対的平面曲線に縮尺、回転および平行移動の変換を行ない、測地座標系に描かれたもとの路線位置に近づけることを絶対的平面曲線の標定とよぶことにする。この標定はつぎに示される段階にしたがって行なわれる。

(1) フリーハンドで描かれた路線上の測点 (X_i, Y_i) に対応する相対的平面曲線上の点 (x_i, y_i) を求める。

(2) つぎに相対的平面曲線の座標系 xy に縮尺、回転および平行移動の変換をほどこし絶対座標系に対応する点の残差の二乗和が最小になるように変換パラメータを決定する。すなわち、絶対座標系 XY と相対座標系 xy の変換式を

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}$$

とすとき残差の二乗和

$$[vv] = \sum v_{xi}^2 + \sum v_{yi}^2$$

$$v_{xi} = X_i - (ax_i + by_i + X_0)$$

$$v_{yi} = Y_i - (-bx_i + ay_i + Y_0)$$

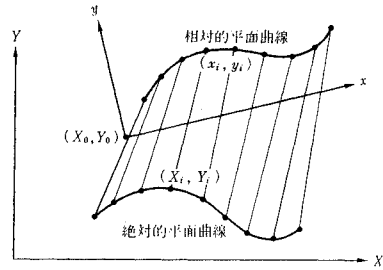


図-12 絶対座標系への変換

を最小にするような a, b, X_0, Y_0 を求める (図-12 参照)。

(3) たとえば橋梁地点やトンネル付近などの測点はフリーハンドで描かれた路線になるべく近い範囲内をその路線が通ることを要求される。このように測点のなかには、近似度の要求条件が異なるものがある。そのため上記の最小自乗法には測点に重みを考慮する。重みを考慮した最小自乗法では (2) で示した残差の二乗和 $[vv]$ を最小とする代りに、

$$[pvv] = \sum P_{xi} v_{xi}^2 + \sum P_{yi} v_{yi}^2$$

を最小にするような最確値 a, b, X_0, Y_0 を求めればよい。ただし P_{xi}, P_{yi} は測点 i におけるそれぞれ X 座標、 Y 座標に対する近似要求の重みである。最確値 a, b, X_0, Y_0 は、

$$\frac{\partial [pvv]}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial [pvv]}{\partial b} = 0 \quad \frac{\partial [pvv]}{\partial X_0} = 0 \quad \frac{\partial [pvv]}{\partial Y_0} = 0$$

から得られる四元連立一次方程式を解いて求められる。

(4) 以上のようにして得られた絶対的平面線形の主要点および中間測点の座標を求め、自動製図機により路線平面図を自動製図する。

(4) 計算機による自動平面線形の整形計算例

比較的曲率の大きい曲線 (データ I) とゆるやかな曲線 (データ II) の 2 本の路線をフリーハンドで描きその整形を上記のべたプログラムにしたがって行なってみた。上記の 2 本の路線からそれぞれ 24 点、32 点の測点の平面座標が読取られ、それぞれについて表-1 に示すように 2 種類の幾何構造基準に対して計算を行なった。

a) 入力データ

表-1 幾何構造基準に関する入力データ

Case	路線	幾 何 構 造 基 準							
		C1	C2	C3	C4	CRN	CRX	CSN	CSX
I-1	I	0.001	0.001	0.001	0.005	10.0	500.0	10.0	500.0
I-2	I	0.001	0.001	0.001	0.0025	10.0	500.0	10.0	500.0
II-1	II	0.001	0.001	0.001	0.005	10.0	500.0	10.0	500.0
II-2	II	0.001	0.001	0.001	0.0025	10.0	500.0	10.0	500.0

幾何構造基準データ

C_1 : 曲率の勾配をゼロと見なせる限度

表-2 計算例およびその計算結果を示す図

Case	相対的平面曲線	絶対的平面曲線	
	曲率図	修正後の結果	平面曲線
I-1	図-13	表-3	図-15
I-2	図-14	表-4	
II-1	図-16	表-5	図-18
II-2	図-17	表-6	

C_2 : 曲率をゼロと見なせる限度

C_3 : クロソイドパラメーターを同一と見なせる限度

C_4 : 円弧の曲率を同一と見なせる限度

CSX : 最大直線区間長

CSN : 最小直線区間長

CRX : 最大円弧区間長

表-3 絶対的平面曲線 (Case I-1)

測点 I	データ	重み	データ	重み	計算結果		残差		距離 DELTAL (I)
	X(I)	PXX(I)	Y(I)	PYY(I)	XX(I)	YY(I)	VX(I)	VY(I)	
1	-125.00	100.00	-90.00	100.00	-115.82	-99.28	-9.18	9.26	13.05
2	-113.20	1.00	-73.80	1.00	-107.24	-81.74	-5.96	7.94	9.93
3	-101.50	1.00	-57.50	1.00	-97.43	-64.83	-4.07	7.33	8.38
4	-86.60	1.00	-43.00	1.00	-82.74	-50.64	-3.86	7.64	3.56
5	-67.00	1.00	-39.00	1.00	-65.21	-42.09	-1.79	3.09	3.58
6	-49.00	1.00	-30.80	1.00	-49.22	-31.21	0.22	0.41	0.47
7	-36.00	1.00	-15.50	1.00	-36.42	-16.37	0.42	0.87	0.97
8	-19.50	1.00	-4.00	1.00	-21.19	-3.97	1.69	-0.03	1.69
9	0.00	1.00	0.00	1.00	-3.10	2.88	3.10	-2.88	4.23
10	20.00	1.00	0.00	1.00	16.14	5.95	3.86	-5.95	7.10
11	40.00	1.00	0.00	1.00	35.54	7.73	4.46	-7.73	8.93
12	60.00	1.00	0.50	1.00	54.89	10.24	5.11	-9.74	11.00
13	80.00	1.00	4.80	1.00	74.26	14.97	5.74	-10.17	11.68
14	98.80	1.00	12.80	1.00	92.92	21.95	5.88	-9.15	10.88
15	115.30	1.00	23.70	1.00	110.06	30.76	5.25	-7.06	8.79
16	130.50	1.00	37.00	1.00	126.40	41.72	4.10	-4.72	6.25
17	143.70	1.00	52.20	1.00	141.31	54.47	2.39	-2.27	3.30
18	155.10	1.00	68.50	1.00	154.47	68.68	0.63	-0.18	0.65
19	165.00	1.00	86.00	1.00	166.03	84.49	-1.03	1.51	1.82
20	173.00	1.00	104.20	1.00	175.57	101.33	-2.57	2.87	3.85
21	181.00	1.00	123.00	1.00	184.02	119.36	-3.02	3.64	4.73
22	189.00	1.00	141.50	1.00	192.22	137.20	-3.22	4.30	5.38
23	196.50	1.00	160.00	1.00	200.35	154.86	-3.85	5.14	6.42
24	204.00	100.00	178.00	100.00	208.29	172.12	-4.29	5.88	7.28

表-4 絶対的平面曲線 (Case I-2)

測点 I	データ	重み	データ	重み	計算結果		残差		距離 DELTAL(I)
	X(I)	PXX(I)	Y(I)	PYY(I)	XX(I)	YY(I)	VX(I)	VY(I)	
1	-125.00	100.00	-90.00	100.00	-122.19	-93.97	-2.81	3.97	4.86
2	-113.20	1.00	-73.80	1.00	-112.29	-76.79	-0.91	2.99	3.13
3	-101.50	1.00	-57.50	1.00	-101.18	-60.33	-0.32	2.83	2.85
4	-86.60	1.00	-43.00	1.00	-85.31	-46.98	-1.29	3.98	4.18
5	-67.00	1.00	-39.00	1.00	-66.95	-39.53	-0.05	0.05	0.53
6	-49.00	1.00	-30.80	1.00	-50.01	-29.60	1.01	-1.20	1.56
7	-36.00	1.00	-15.50	1.00	-36.01	-15.45	0.01	-0.05	0.06
8	-19.50	1.00	-4.00	1.00	-19.72	-3.93	0.22	-0.07	0.23
9	0.00	1.00	0.00	1.00	-0.90	1.75	0.90	-1.75	1.97
10	20.00	1.00	0.00	1.00	18.79	3.54	1.21	-3.54	3.74
11	40.00	1.00	0.00	1.00	38.58	3.95	1.42	-3.95	4.20
12	60.00	1.00	0.50	1.00	58.37	4.91	1.63	-4.41	4.70
13	80.00	1.00	4.80	1.00	78.32	8.40	1.68	-3.60	3.97
14	98.80	1.00	12.80	1.00	97.27	15.44	1.53	-2.64	3.06
15	115.30	1.00	23.70	1.00	114.12	25.37	1.18	-1.67	2.05
16	130.50	1.00	37.00	1.00	129.60	38.01	0.90	-1.01	1.35
17	143.70	1.00	52.20	1.00	143.22	52.54	0.48	-0.34	0.59
18	155.10	1.00	68.50	1.00	154.94	68.35	0.16	0.15	0.22
19	165.00	1.00	86.00	1.00	165.23	85.38	-0.23	0.62	0.66
20	173.00	1.00	104.20	1.00	174.16	102.91	-1.16	1.29	1.72
21	181.00	1.00	123.00	1.00	182.44	121.35	-1.44	1.65	2.19
22	189.00	1.00	141.50	1.00	190.24	139.70	-1.24	1.80	1.18
23	196.50	1.00	160.00	1.00	197.93	157.90	-1.43	2.10	2.54
24	204.00	100.00	178.00	100.00	205.44	175.67	-1.44	2.33	2.74

CRN：最小円弧区間長

測点座標 $X(I), Y(I)$

測点の重み $PXX(I), PYY(I)$

b) 出力データ

出力されたデータ，曲率図および平面線形は表-2に示される図表にあらわす。

c) 所要計算時間

使用した計算機は FACOM 270/30 であり，プログラムは FORTRAN によった。自動製図はいったん紙テープに出力された指令テープを用いて東京大学生産技術研究所にある自動製図機 DRAFTER NUMERICON によって行なった。

ケース I-1 の場合についての所要計算時間をあげるつぎのようである。

プログラム コンパイルおよびデータ読み込み	6 分
演算	3 分
自動製図のための紙テープ出力	1 分
合計	10 分

4. 考 察

本節では上に示した計算例をもとに，主に曲線近似の誤差に関する考察がのべられる。

3. で示した4つのケースに対する曲線近似の誤差はそれぞれ表-3, 4, 5, 6 に DELTAL (I) として対応する測点間の距離のずれの量で表わされている。各ケースにおける DELTAL の最大値，平均値および近似された直線，円，クロソイドの曲線数総和をまとめると表-7 のようになる。

表-7 および 図-15, 18 からわかるように，ケース I-2, ケース II-2 の方がそれぞれケース I-1, ケース II-1 より近似度がよい。これは表-1 に示されるように幾何構造の基準のうち円弧の曲率半径を同一と見なす限度 C_i の値の相違によるもので， C_i が小さければ，数多くの円弧で曲線が近似されることになり近似度がよくなる。近似度をよくしようとすると，路線を構成する曲線の種類の数が多くなるので，適切な幾何構造基準値を与えるようにしなければならない。適切な基準値の設

表-5 絶対的平面曲線 (Case II-1)

測点 I	データ X(I)	重み PXX(I)	データ Y(I)	重み PYY(I)	計算結果		残差		距離 DELTAL(I)
					XX(I)	YY(I)	VX(I)	VY(I)	
1	3.10	100.00	333.20	100.00	-12.21	316.07	15.31	17.13	22.97
2	22.20	1.00	329.10	1.00	6.53	312.18	15.67	16.92	23.06
3	40.20	1.00	325.30	1.00	24.11	308.16	16.09	17.14	23.51
4	60.70	1.00	318.00	1.00	44.55	301.84	16.15	16.16	22.84
5	74.10	1.00	308.80	1.00	59.32	295.89	14.78	12.91	19.62
6	89.50	1.00	297.40	1.00	76.14	287.54	13.36	9.86	16.10
7	102.90	1.00	284.80	1.00	91.58	278.22	11.32	6.58	13.10
8	117.00	1.00	267.50	1.00	109.21	265.30	7.79	2.20	8.10
9	127.70	1.00	253.80	1.00	122.02	254.08	5.68	-0.28	5.69
10	142.70	1.00	232.20	1.00	139.68	235.34	3.02	-3.14	4.35
11	151.80	1.00	218.50	1.00	149.80	222.80	2.00	-4.30	4.74
12	165.70	1.00	197.40	1.00	165.07	203.31	0.63	-5.91	5.94
13	174.30	1.00	184.20	1.00	174.59	191.16	-0.29	-6.96	6.96
14	189.00	1.00	164.20	1.00	189.59	172.01	-0.59	-7.81	7.83
15	201.70	1.00	147.10	1.00	202.46	155.58	-0.76	-8.48	8.52
16	214.20	1.00	131.00	1.00	215.21	140.21	-1.01	-9.21	9.27
17	224.80	1.00	118.20	1.00	226.57	128.55	-1.77	-10.35	10.50
18	243.70	1.00	98.50	1.00	247.16	111.47	-3.46	-12.97	13.42
19	261.50	1.00	84.00	1.00	266.09	99.32	-4.59	-15.32	15.99
20	282.20	1.00	70.30	1.00	287.95	88.63	-5.75	-18.33	19.21
21	304.50	1.00	60.00	1.00	310.72	80.71	-6.22	-20.71	21.62
22	335.20	1.00	55.20	1.00	340.65	74.65	-5.45	-19.45	20.19
23	363.50	1.00	59.00	1.00	368.61	73.11	-5.11	-14.11	15.00
24	396.00	1.00	71.60	1.00	402.58	76.47	-6.58	-4.87	8.18
25	424.80	1.00	86.50	1.00	433.24	84.68	-8.44	1.82	8.64
26	445.00	1.00	98.30	1.00	454.67	92.82	-9.68	5.48	11.12
27	467.00	1.00	109.00	1.00	477.27	100.82	-10.27	8.18	13.13
28	492.60	1.00	119.20	1.00	503.59	107.06	-10.99	12.14	16.37
29	520.30	1.00	123.00	1.00	530.89	110.03	-10.59	12.97	16.74
30	552.00	1.00	118.30	1.00	562.26	109.21	-10.26	9.09	13.71
31	576.20	1.00	112.30	1.00	586.39	105.47	-10.19	6.83	12.27
32	596.00	100.00	107.70	100.00	605.78	100.91	-9.78	6.79	11.91

表-6 絶対的平面曲線 (Case II-2)

測点 I	データ X(I)	重み PXX(I)	データ Y(I)	重み PYY(I)	計算結果		残差		距離 DELTA(I)
					XX(I)	YY(I)	VX(I)	VY(I)	
1	3.10	100.00	333.20	100.00	-1.47	331.90	4.57	1.30	4.75
2	22.20	1.00	329.10	1.00	17.28	326.77	4.92	2.33	5.44
3	40.20	1.00	325.30	1.00	34.85	321.59	5.35	3.71	6.51
4	60.70	1.00	318.00	1.00	55.18	313.90	5.52	4.10	6.88
5	74.10	1.00	308.80	1.00	69.77	306.94	4.33	1.86	4.71
6	89.50	1.00	297.40	1.00	86.30	297.41	3.20	-0.01	3.20
7	102.90	1.00	284.80	1.00	101.36	286.99	1.54	-2.19	2.68
8	117.00	1.00	267.50	1.00	118.42	272.78	-1.42	-5.29	5.47
9	127.70	1.00	253.80	1.00	130.70	260.60	-3.00	-6.80	7.43
10	142.70	1.00	232.20	1.00	147.43	240.49	-4.73	-8.29	9.54
11	151.80	1.00	218.50	1.00	156.90	227.14	-5.10	-8.64	10.03
12	165.70	1.00	197.40	1.00	171.15	206.43	-5.45	-9.03	10.54
13	174.30	1.00	184.20	1.00	180.03	193.50	-5.73	-9.30	10.93
14	189.00	1.00	164.20	1.00	194.03	173.15	-5.03	-8.95	10.27
15	201.70	1.00	147.10	1.00	206.03	155.69	-4.35	-8.59	9.62
16	214.20	1.00	131.00	1.00	217.66	139.06	-3.46	-8.06	8.77
17	224.80	1.00	118.20	1.00	227.48	125.74	-2.68	-7.54	8.00
13	243.70	1.00	98.50	1.00	244.81	104.80	-1.11	-6.30	6.40
19	261.50	1.00	84.00	1.00	260.91	88.59	0.59	-4.59	4.63
20	282.20	1.00	70.30	1.00	280.32	73.31	1.88	-3.01	3.55
21	304.50	1.00	60.00	1.00	301.90	61.79	2.60	-1.79	3.15
22	335.20	1.00	55.20	1.00	331.94	54.43	3.26	0.77	3.35
23	363.50	1.00	59.00	1.00	360.32	55.44	3.18	3.56	4.78
24	396.00	1.00	71.60	1.00	393.86	64.17	2.14	7.43	7.74
25	424.80	1.00	86.50	1.00	423.56	76.77	1.24	9.73	9.81
26	445.00	1.00	98.30	1.00	444.52	86.91	0.48	11.39	11.40
27	476.00	1.00	109.00	1.00	466.83	96.65	0.17	12.35	12.35
28	492.60	1.00	119.20	1.00	493.06	104.83	-0.46	14.37	14.37
29	520.30	1.00	123.00	1.00	520.51	109.77	-0.21	13.23	13.23
30	552.00	1.00	118.30	1.00	552.36	111.15	-0.36	7.15	7.16
31	576.20	1.00	112.30	1.00	577.07	109.07	-0.87	3.23	3.35
32	596.00	100.00	107.70	100.00	597.04	105.81	-1.04	1.89	2.15

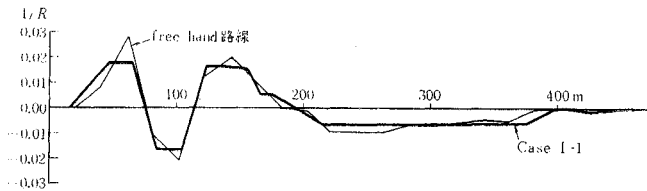


図-13 曲率図 (Case I-1)

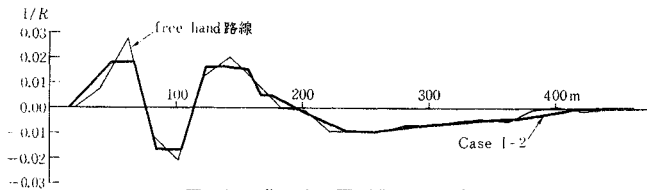


図-14 曲率図 (Case I-2)

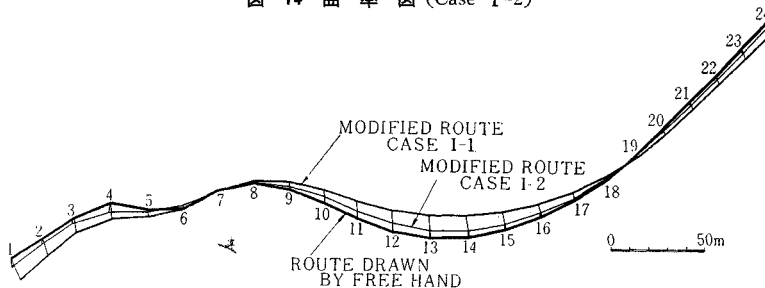


図-15 平面曲線 (路線 I)

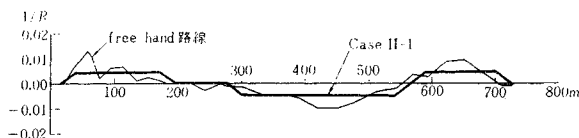


図-16 曲率図 (Case II-1)

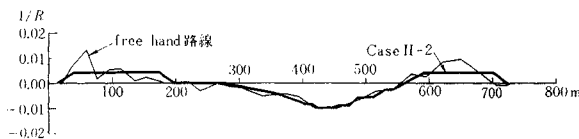


図-17 曲率図 (Case II-2)

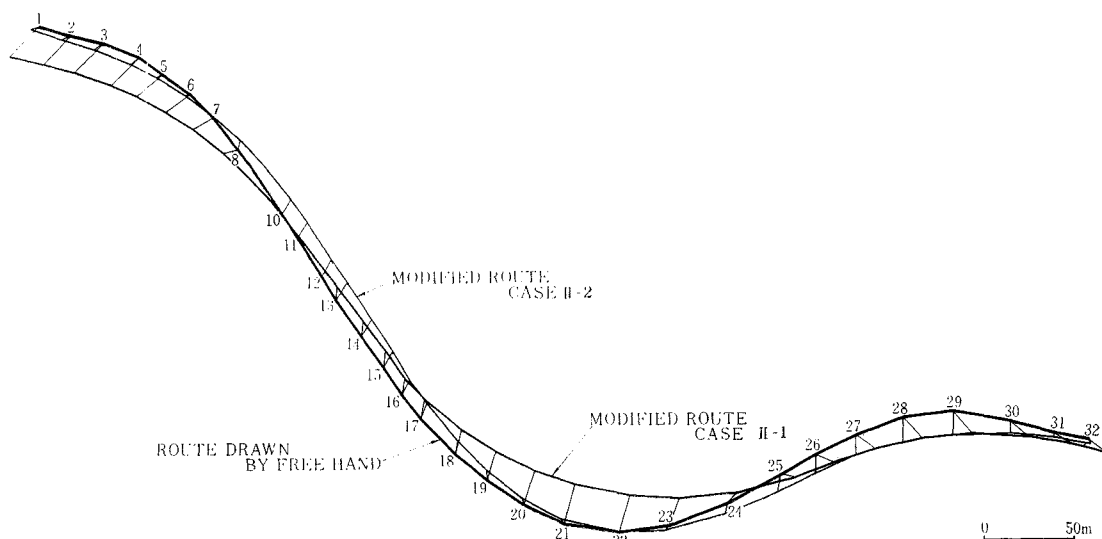


図-18 平面曲線 (路線 II)

表-7 整形路線の近似度

	最大値 (m)	平均値 (m)	曲線の種類の総和
ケース I-1	13.05	6.21	17
ケース I-2	4.86	2.35	23
ケース II-1	23.51	13.47	13
ケース II-2	14.37	7.25	23

定は今後さらに研究する必要がある。

上記の計算例では路線の始点および終点に大きい重みをつけてできるだけ終始点の近似度をよくするようにした。その他の点で近似度をよくしたい場合にはそれに応じた重みを大きくすればよい。

本方法によって得られた路線平面線形が満足のかどうかは、路線近似による誤差の影響を考えて技術者が判断を下すべきである。もし満足のかない箇所があれば局所的な修正をすることは容易である。このような判断を適確なものとするためには、最初用いた実体光学モデル上に修正された路線を入れこむことがとくに有効である。

5. む す び

フリーハンドで描かれた曲線を計算機によって放物線や三次曲線等でスムージングする方法は、機械工学の分野などで開発されているが、本論文で開発したように直線、円弧、クロノイドで近似する方法はまだなされていなかった。スムージングされた曲線がさらに道路幾何構造基準を満足するためにはきわめて数多くの判定と修正がくりかえされる必要があった。本論文に示したスムージングの方法は、路線がきわめて短い区間でしかも曲線種の少ない部分での実験に適用されたため比較的良好な結果が得られた。さらに長区間で複雑な曲線が組み合わせられるような路線に対しても本方法が適用可能であるためにはつぎに示すような問題点を解決する必要がある。

(1) フリーハンド上の測点の平面座標測定があまり精度がよくない場合は、単なる三点を通る円弧近似でなくさらになめらかな曲線を内挿することが望ましい。円

弧近似による欠点は測定点測定の精度が悪い場合は曲率の変化が急激になりやすいことである。

(2) 相対的平面曲線から絶対的平面曲線への標定が、一次のヘルマート変換を用いているため、長い路線になった場合、偏位量が部分的にかなり大きくなる危険がある。これを防ぐには、長い路線を適当に短く分割するか、さらに高度の変換方法を考えるかしなければならない。

(3) 路線が選定される場合、始終点の平面位置が決定され動かせられないことが多い。また始終点で接続される曲線の接線方向がすでに決められているときもある。このような場合に対してはこのような条件を守ってしかもフリーハンド路線によくあうような変換方法を考え出す必要がある。始終点における相対的な方向変化角を一致させることは曲率図における面積の総和を一定になるようにすればよい。

計算機を用いて路線選定にひきつづ線形計算が自動化されることによって路線選定段階における平面線形に関する比較路線の検討が容易になり、路線設計の大きな質の向上が期待される。

本研究はこのような平面線形の自動整形を目的として行なった一つの試みである。実用化するためにはさらに数多くの修正が必要であるが、本研究に示した考え方はそれらの基本となるにちがいない。

本研究の基本となった曲率図から平面線形を整形する構想は中村、村井から出たが、その後の発展は異なるところとなった。

本研究はこの構想をもとに中間的にまとめたものである。中村は現在さらにこれを発展させ、精度のよい整形方法を開発研究中であり、その成果が近いうちに発表される予定である。

本論文作成にあたっては丸安教授および中村助教授に多くの助言をいただいた。付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 丸安・中村：道路設計と写真測量，土木学会誌，Vol.52，No. 3 1967.
- 2) 高速道路調査会：高速道路線形計算便覧.
- 3) 丸安ほか：土木構造物の自動設計自動製図，オーム社.
- 4) 丸安・中村・村井・若林：土木設計における最適化，東大生産技術研究所報告，Vol 19，No. 4，1969.

(1969.7.17・受付)