

# 航空写真とCGを用いた3次元路線計画システム

蒔苗 耕司<sup>1</sup>・福田 正<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 教修 宮城大学助教授 事業構想学部デザイン情報学科 (〒981-3298 宮城県黒川郡大和町学苑 1-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

山地部道路の路線計画においては、道路工学的条件の他に、地形・地質などの自然環境条件に対する配慮が求められる。路線計画の段階において、これらの情報を直接的に入手する手段として、航空写真の立体視は極めて有効な方法である。そこで本論文では、道路線形に B-spline 曲線を適用し、CG の技術を利用することにより、航空写真の立体視によって再現される仮想空間内での 3 次元路線計画システムを構築した。

*Key Words : highway alignment, aerial photographs, computer graphics*

## 1. はじめに

道路の路線計画においては、さまざまな自然的、社会的条件からの配慮が求められる。とりわけ山地部道路の路線計画においては、地形や地質、あるいは動植物などの自然環境条件が極めて重要なポイントとなる。これらの自然環境に関する情報を得る手段として、航空写真の立体視による調査は極めて有効である<sup>1)</sup>。航空写真の道路設計への適用の有効性に関しては、鍛冶・中村の文献<sup>2)</sup>に詳しい。特に路線計画段階における航空写真の利用の有効性については、比較路線の設定において土地利用情報及び土質・地質・地形等の情報が写真判読によって得られること、また数量計算のための 3 次元的情報が得やすい点などが指摘されているが、その十分な活用がなされていない現状にある。

またコンピュータ技術の進歩に伴い、特に機械設計、建築設計分野を中心として、3 次元 CAD (computer aided design) が実用化の段階に入りつつある。しかしながら、道路線形設計においては平面線形と縦断線形という 2 次元線形としての設計手法が定着しており、そのためにコンピュータによる設計支援技術としての 3 次元設計システムの確立を困難にしている。本研究においては、道路の 3 次元線形に B-spline 曲線を適用し、CG の技術を利用し、航空写真の立体視によって再現される仮想空間内での 3 次元路線計画システムを提案する。

## 2. 本研究の意義

これまでも航空写真を利用した路線計画システムについてはいくつかの研究はある<sup>3),4)</sup>。しかしこれらのシステムは図化機を利用したものであり、また計画された路線に関する航空写真から得られる情報について十分な活用がなされていない。また近年ではデジタル地形情報を利用した路線計画システムが実用化されつつあるが、地形面を正確に再現しようとすると膨大な量のデジタルデータが必要であり、その処理において高速な処理速度を有するコンピュータが必要であるなどの制約を受ける。これらの手法と比較し、本研究で提案する CG を利用した航空写真による 3 次元路線計画システムの意義については、以下の通りまとめられる。

- ①航空写真には、地形図の情報よりも多くの情報が記録されている。その立体視によって再現される地形面はその過高感<sup>5)</sup>によって、微地形等の地表面の特徴も詳細に表現される。また地形情報の伝達媒体としての航空写真は、立体視によって 3 次元情報としての伝達が可能であり、地形図に比べ、情報の劣化が少ない。
- ②コンピュータ上に静止画像として表示されたステレオペアの航空写真から、3 次元情報としての認識が可能である。デジタル地形情報を利用した路線計画手法に比べ、コンピュータへの負荷が極めて小さい。特に図化機等の特殊な機器を必要とせず、路線計画に特化した機能の追加及びインターフェ

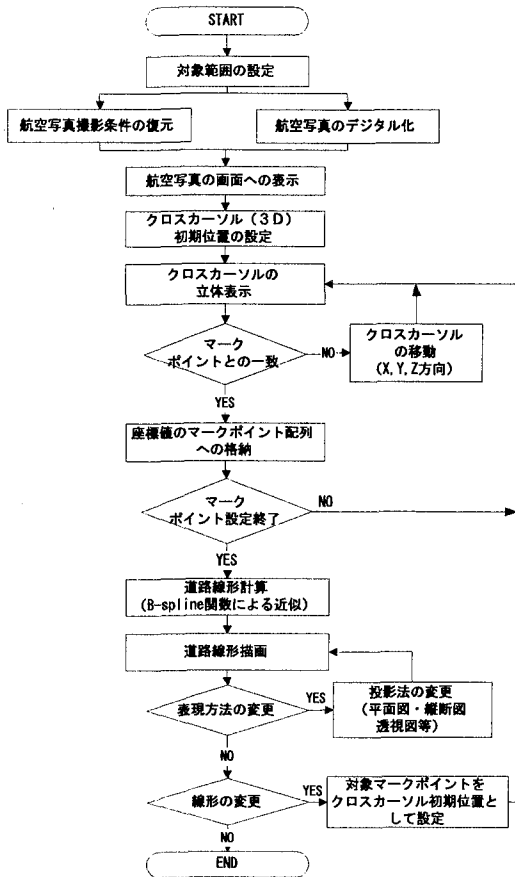


図-1 路線計画システムの基本フロー

ースの作成が容易に行える。

- ③道路線形を B-spline 曲線による 3 次元線形として定義することにより、計画情報を直接的に 3 次元のデジタル情報として得ることができ、計画の評価をリアルタイムで行うことが可能である。

### 3. 3次元路線計画システムの構築

#### (1) 基本フロー

連続して撮影された 2 枚の航空写真には、地形面の起伏によってそれぞれ微小のずれをもった透視投影像が記録される。人間は、このステレオペアの航空写真を立体視する能力を有する。このような立体視によって構築される仮想的イメージを、仮想空間と呼ぶことにする。

仮想空間内に 3 次元の道路形状を構築するには、

航空写真を撮影したカメラと同様の透視スケールを用いて描いた画像を、航空写真による仮想地形像に対してオーバレイすることによって実現される。その道路線形が既知であれば、この作業は単純な透視変換を行うだけで可能である。しかし仮想空間内で道路線形を定義しようとする場合、その中で試行錯誤的に作業を繰り返しながら、それに応じてステレオペアの画像を更新しなければならない。また仮想空間内における物体の位置・形状の正確な再現のために、透視図の描画の正確性が求められるが、これらの一連の作業を行うにあたっては、CG 技術の適用が必要不可欠である。

3次元路線計画システムは、CG 技術を利用し、航空写真によって再現される仮想空間内での路線計画を実現しようというものであり、その基本フローは図-1の通りである。

通常の路線計画では、地形図にフリーハンドで数本の路線を設定し、それに対し評価を行うという手法がとられている。この過程において、地形図から得られる情報量の制約や試行錯誤的に行われる作業上の限界が問題となる。本システムでは、航空写真を利用することによって、より多くの自然環境に関する情報を基に最適路線を設定することになる。

再現された仮想空間内においては 3 次元の自由曲線によって路線を設定する。これは空間自在定規<sup>6)</sup>を用いた線形設計手法を適用するものである。

#### (2) システム構築の手順

##### a) 仮想空間の設定

コンピュータ上で航空写真を利用するために、航空写真をイメージスキャナを用いてデジタル情報化する。なお、コンピュータ画面上に表示される航空写真の解像度は、コンピュータ画面の解像度に制約される。

コンピュータ上で仮想空間を設定する手法の原理は、図化機等で用いられているものと同様である。

まず仮想空間を設定するために、撮影したカメラの撮影時点の状況（平面位置、高度  $h$ 、焦点距離  $f$ 、フィルムの画角、傾き）を再現する必要がある。これらの情報に基づいて必要な補正を行なった後、仮想空間内の座標系を定義する。

ここでは水平成分を  $XY$ 、鉛直方向を  $Z$  とする右手座標系を用いて定義した（図-2）。写真  $L$  の投影中心点に対する高度  $0m$  地点を原点とする（図-2 の  $CL$ ）。また 2 枚の航空写真を撮影したカメラは、 $X$  方向に  $d$  の間隔をもつものとする。また写真  $L \cdot R$  の投影面の座標系を  $LX-LY$  平面、 $RX-RY$  平面とし、

それぞれの中心点をそれぞれの座標系の原点とする。なお航空写真の投影面は焦点方向に面していると考えられる。

仮想空間内の点  $A(x_i, y_i, z_i)$  の写真L上の座標値  $(l_x, l_y)$  及び写真R上の座標値  $(r_x, r_y)$  は、次の式(1)によって求めることができる。

$$\begin{cases} l_x = x_i \cdot f / (h - z_i) \\ l_y = y_i \cdot f / (h - z_i) \\ r_x = (x_i - d) \cdot f / (h - z_i) \\ r_y = y_i \cdot f / (h - z_i) \end{cases} \quad (1)$$

仮想空間内に定義する物体について、式(1)によって写真L・R上の位置を求める。その座標位置に基づいてそれぞれの写真上にオーバーレイすることによって、航空写真と同一の仮想空間内に物体の構築が可能である。なお本システムにおける立体視の方法は、肉眼によるものであり、特殊な機器の利用は必要としていない。

### b) マークポイントの設定

仮想地形から得られる情報をもとに、地すべり等の災害の可能性や必要となる土工量等を想定しながら、計画する路線の線形制御点を3次元的に設定する。ここでは、この制御点をマークポイントと呼ぶ。設定された3次元座標値はマークポイント配列に格納される。

仮想空間内における計画路線の3次元座標値の決定は、マウス等の平面的な操作では難しい。そこで、空間内にある一点を定め、その写真L・R上の座標値を式(1)によって求め、3次元クロスカーソルとして描画する。立体視をすれば、クロスカーソルの仮想空間内の位置が認識できる。移動時には、その相対的移動量を明確にしておけば、常にそのカーソル位置の座標値は明らかであり、それに基づいた立体的描画が可能である。コンピュータ上では、移動方向をX, Y, Z方向に規定し、キーボード入力によって設定する方法を用いた。

### c) 道路線形の描画

CADシステム上における自由曲線の定義手法としてパラメトリック曲線の適用が有効であるといわれ、いくつかの曲線定義手法が提案されている<sup>7)</sup>。これらの曲線は、任意に与えた制御点に基づいて滑らかな曲線を生成するものであり、ここでは得られる線形の滑らかさ、歪みの少なさ、計算の容易さなどを考慮し、2次のB-spline関数を適用する。

B-spline 曲線は、Schoenberg<sup>8)</sup>によって提案された

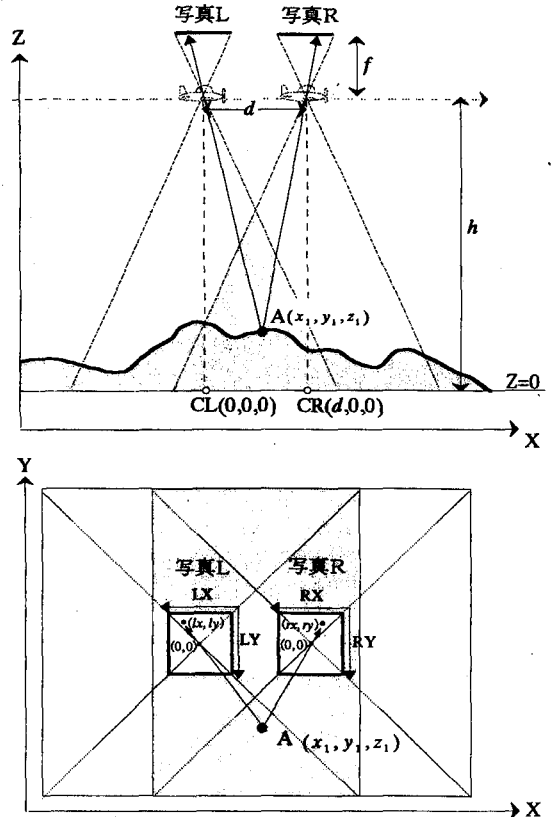


図-2 仮想空間の設定

B-spline 関数の曲線表現への応用である。 $n+1$ 個の制御点の位置ベクトル  $B_i$  ( $i=1, 2, \dots, n+1$ ) により定義される曲線上の位置ベクトル  $P(t)$  ( $t$  はパラメータ) は、式(2a)により表わされる。

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} N_{i,k}(t) B_i \quad (2a)$$

ただし  $t_{min} \leq t \leq t_{max}$ ,  $2 \leq k \leq n+1$ .

$N_{i,k}(t)$  は正規化された  $k$  位 ( $k-1$  次) の B-スプライン基底関数であり、Cox-deBoor の帰納式により、式(2b)(2c)のように表現される<sup>7)</sup>。

$$N_{i,1} = \begin{cases} 1 & x_i \leq t \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (2b)$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{t - x_i}{x_{i+k-1} - x_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{x_{i+k} - t}{x_{i+k} - x_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \quad (2c)$$

ただし、 $x_i$ の値は、 $x_i \leq x_{i+1}$ の関係を満たす数列のベクトル要素である。

連続する3つのマークポイント  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $P_3(x_3, y_3, z_3)$  に対する2次のB-spline曲線の補間点  $(X, Y, Z)$  は式(3a)(3b)によって求められる。なおパラメーター  $t$  は  $0 \leq t \leq 1$  である。

$$\begin{cases} X = N_1(t) \cdot x_1 + N_2(t) \cdot x_2 + N_3(t) \cdot x_3 \\ Y = N_1(t) \cdot y_1 + N_2(t) \cdot y_2 + N_3(t) \cdot y_3 \\ Z = N_1(t) \cdot z_1 + N_2(t) \cdot z_2 + N_3(t) \cdot z_3 \end{cases} \quad (3a)$$

ただし、

$$\begin{cases} N_1(t) = (1-t)^2/2 \\ N_2(t) = t(1-t) + 0.5 \\ N_3(t) = t^2/2 \end{cases} \quad (3b)$$

$t$ の値を0から1へと変化させることによって、 $P_1$ ,  $P_3$ を始終点とし、かつ線分  $P_1-P_2$ ,  $P_2-P_3$ に接する曲線が描かれる。すなわち、線形の制御点となるマークポイントは通常の曲線設置におけるIP(intersection point)点と同様の機能を有する。したがってマークポイントの設定にあたっては、このことを考慮する必要がある。

#### d) 2次元平面への投影

道路線形に関する既往の設計基準との適合を検討するにあたって、2次元平面としての平面図及び縦断面図としての表現が必要である。図-3に示すように平面図は、X-Y平面に対する3次元道路線形の平行投影像であり、そのX, Y座標をプロットすることによって作成される。また縦断面図は、道路線形の延長に対する高度プロファイルをグラフとして表現したものである。同時にその縦断面勾配を計算すれば縦断面勾配図が作成される。

マークポイントの設定と同時にこれらの計算、描画を行うようにすることによって、設定したマークポイントに基づいた道路線形が所定の設計基準と適合しているか否かの判断についても同時に行うことができる。地形図上での路線検討では、平面的に描いた道路線形が所定の縦断面勾配の基準を満たしているかどうかの判断は縦断面図を作成するまで明確に把握できないが、このシステムを利用すれば所定の縦断面勾配に見合った道路線形を当初より描くことが可能である。

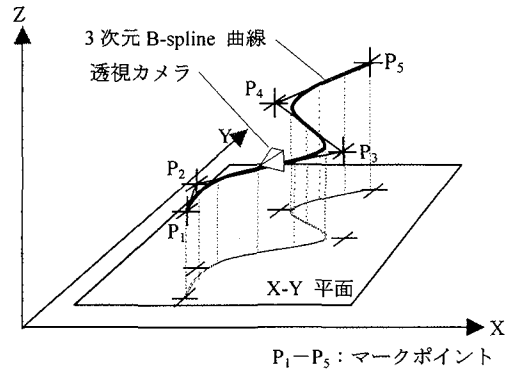


図-3 3次元道路線形の概念

#### e) 道路の透視図

3次的に道路線形を定義したことにより、任意の視点(例えば図-3の透視カメラ)を設定し、その視点に対する透視投影計算を行うことによって容易に透視図を描画することができる<sup>9)</sup>。この段階では片勾配については定義していないから概略的なものとならざるを得ないが、実際に描いた道路線形が運転者の視点からどのように見えるかといった線形の視覚的問題<sup>9)</sup>という観点からの評価も可能である。

透視図の作成にあたって、まず道路線形データに対して初期条件として与えた道路幅員に基づいて、側線上の座標値を求めて道路の3次元形状のデータを作成する。この3次元形状データに対し、カメラの位置を仮想空間内の任意の位置に定め、任意の方向に対する透視投影像を求めている。これらの値の設定は、画面に表示された平面図上において視点の平面的位置をマウス操作により設定し、さらにマウスボタン操作によりその視線方向及び高度を設定するようにした。その変更に応じて同時に透視図も更新される。

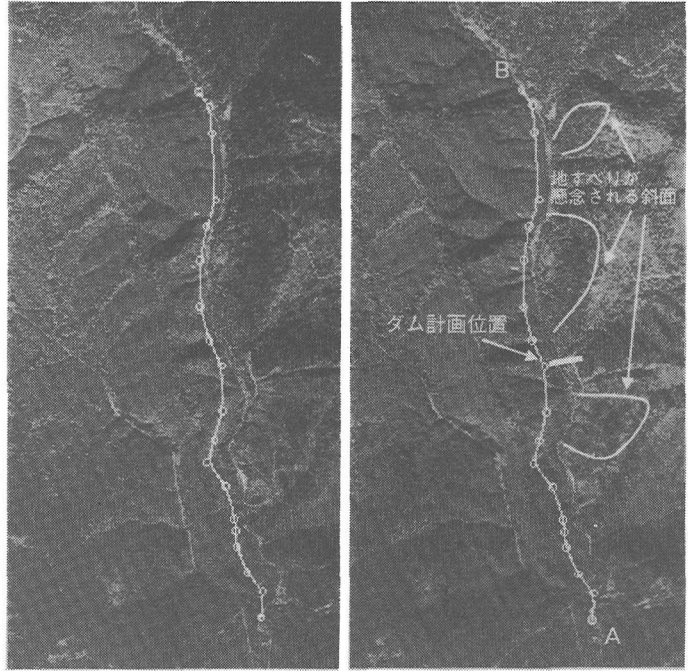
#### f) 道路線形の修正

設定した道路線形は、マークポイントの移動、追加、削除によって修正できる。マークポイントは空間内の絶対座標であり、図面としての表現に依存したものではない。したがって、マークポイントの座標値の変更によって、立体図、平面図、縦断面図、透視図等のすべての表現に対して同時に修正がなされ、また逆にあらゆる表現からの修正をリアルタイムに実現することが可能である。例えば、透視図を見ながらのマークポイントを移動し修正を行なったとす

表-1 マークポイント座標

No.	X	Y	Z
1	1168	-1285	434
2	1176	-1165	434
3	1102	-1075	441
4	1050	-950	450
5	1043	-876	455
6	1037	-820	460
7	992	-670	475
8	926	-580	480
9	931	-478	488
10	977	-325	500
11	975	-120	503
12	902	-5	503
13	862	145	503
14	862	355	503
15	887	505	503
16	933	625	503
17	912	925	503
18	902	1045	503
19	852	1115	503

注：1) 単位：m  
 2) 写真Lの中心をX=0, Y=0とする。  
 3) 図-4及び図-5の平面図に○印でマークポイントの位置を示す。



写真L

写真R

図-4 適用事例の航空写真

る。これは3次元道路線形に対する直接的操作であり、平面図、縦断図、3次元路線図に対しても同時に更新される。このことによって設計と評価とのフィードバックが実現される。

#### 4. 適用事例

##### (1) 設定条件

ここでは、ダム建設に伴う付替え道路をケーススタディとして設定する。使用した航空写真(図-4)は縮尺約1:15,000のカラー航空写真<sup>10)</sup>である。

図-4に示すようにダム堤体位置を仮定し、付替えの対象路線を谷沿いに走る現道とする。なおダム(堤高約40m)の堤頂高度は高度500mと仮定する。したがってダム堤体より上流側では付替えとなる道路は高度500m以上である必要がある。また付替え道路の最大許容縦断勾配は8%以内とする。

##### (2) 本システムによる路線設定

本システムにおける計画路線の設定手順は以下の

通りである。

まず航空写真の立体視によって、付替え道路を左岸・右岸のどちらに取り付けるかの検討を行う。ここでは図中に示すように左岸斜面には、ダム湛水あるいは道路建設に伴う地すべりが懸念される斜面が存在しており、右岸斜面の方が道路建設に適している。そこで、ここでは右岸に対する路線設定を行うものとする。

ダムサイト部で高度500m以上と規定されることから、最大許容縦断勾配を越えることなく、縦断線形を決められるよう始点の設定を行う。ここでは始点を図中A点とする。この作業にあたっては、クロスソールを3次的に、立体地形上の地点Aと合致するまで移動させ、始点のマークポイントを決定する。

次にダムサイトまでの路線設定を行う。立体地形から得られる地形の起伏等を読みながら、立体図上に描かれる道路線形が立体地形と調和するとともに、同時に表示される縦断勾配図を参考に所定の設計基準を満たすようにマークポイントを決定していく。ダムサイトより上流右岸斜面への取り付けについて

は、貯水池に沿ったルートとし、一定の高度を保ち現道との取り付け位置 B まで路線を設定する。なお、谷を横断する部分については橋梁を計画する。

始点 A から終点 B までのマークポイントの設定が終了した段階で、設定された道路線形について、立体図を見ながら、地表面との整合性、縦断線形・勾配による評価、透視図による視覚的評価を行い、マークポイントの微調整を行う。このようにして決定された 19 のマークポイント (表-1) を基に、B-spline 関数によって表現された道路線形 (延長約 2.5 km) が図-4 上に描かれる。図-5 に路線設定終了時におけるシステムのインターフェース画面を示す。これは設定された道路線形に対する平面図、縦断図、縦断勾配図、透視図により構成される。透視図の視点の位置及び視線方向は、平面図上に cam1~3 として示している。なお視線方向は路線の平面線形において接線方向とした。

### (3) システム適用の効用

従来の路線計画手法によれば、まず地形図上における平面線形の設定が行われる。次に平面線形に対する縦断線形の設定が行われるが、そのためには地形面の縦断プロファイルを作成する作業が必要となる。しかし、縦断勾配が設計基準を満たすことができない場合には、再び平面線形の設定に戻って検討が必要となる。平面線形の微修正により対処できるケースであっても、このような作業の繰り返しを避け、縦断線形の修正のみで対応することもあり、地形改変量が多くなる要因ともなる。

適用事例に示すように、本システムの適用は、3次元曲線として B-spline 曲線を用いて道路線形を定義することにより、平面線形と縦断線形の設計を同時に可能としている。そのため、これまでの線形設計における平面線形と縦断線形との試行錯誤的工程を省くことが可能となる。事例の通り、システムによる路線設定は極めて容易な手順によるから、道路線形と地形との調和という設計本質についての試行錯誤を容易とする。

これまで透視図の描画は 3 次元道路線形としての視覚的評価手法としては有効であるといわれており、その CG 技術の適用も図られている。しかし、道路線形の設計システムとは分離したシステムとして取り扱われており、評価から設計へのフィードバックシステムが確立されていない。

本システムにおいては、この事例に示すように、透視図の描画はリアルタイムで実現可能であり、その視覚的問題が明らかとなった場合には、直ちに路

線設定の修正を行えばよい。さらに 3 次元デジタル情報の応用は、道路線形に関する走行力学、人間工学的評価等への応用も可能とする。

本システム上においては、設計速度に応じて走行する自動車に対する遠心加速度についての評価を可能としている。本事例において、設計速度を 40 km/h とした場合に、全区間において 0.15 g (g: 重力加速度 9.8 m/s<sup>2</sup>) 以下であり、またその変化率は 1 m/s<sup>3</sup> 以下であることが分かっている。これらの評価がリアルタイムで得られることにより、それを基にした線形の修正を直ちに行うことが可能であり、すなわち、評価から設計へのフィードバックシステムを実現している。

また、路線計画は、一般に地形・地質、植生等の自然環境に関する十分な調査を行う以前の段階で行われることが多い。そのため、後の段階において、これらの調査結果をもとに線形修正や対策工が必要とされる場合もあり、道路線形の連続性を阻害したり、建設費の増大を招くおそれがある。したがって、線形設定の自由度の高い路線計画段階におけるこれらの配慮が必要とされる。

事例に示すように、航空写真の立体地形によれば、地すべり地形などの地形的特徴を読み取り、それを基にした路線計画を行うことが可能である。また路線計画システムのコンピュータ支援により、航空写真判読技術に熟練した地形・地質調査技術者自らによる路線計画を可能とする。特に地形・地質条件の厳しい山地部における路線計画において、災害等に対する安全性の高い路線を導き出すためには有効な手法となる。

さらに航空写真の直接的利用は、地形図の図化工程を待つことなく、路線設計作業を可能とするものであり、地形図の図化と路線計画と並行作業を実現する。すなわち、設計期間の短縮効果を創出するものである。

## 5. むすび

本研究においては、CG と航空写真立体視を利用した 3 次元路線計画システムを構築した。特に山地部の道路においては、道路工学と地形・地質学によるコンカレントエンジニアリングによる路線計画が必要であり、本システムはその実現を可能としている。また、道路線形を 3 次元の B-spline 曲線を用いて定義することにより、3 次元路線図 (立体図) と平面図、縦断図、任意の視点からの透視図の連動が可能であることを示した。この方法により、線形評価から路

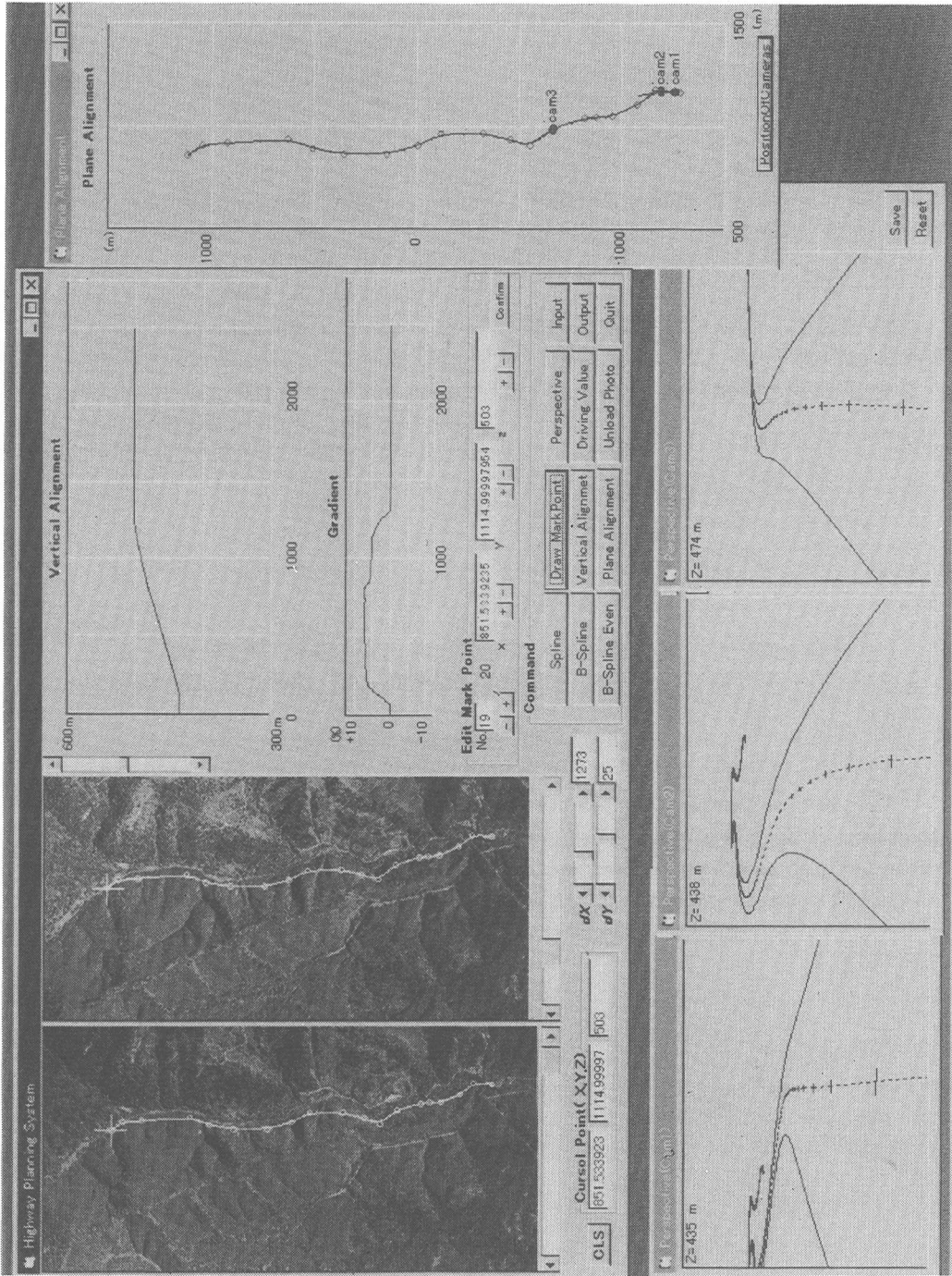


図-5 3次元路線計画システムのインターフェース画面

線設定へのフィードバックを実現した。

道路設計ツールとして本システムを適用する場合、すなわち道路線形の設計段階に適用する場合には、B-spline関数によって定義された3次元道路線形と既往の道路線形に関する設計基準との適合性の検討が最終的に必要であろう。すなわち、本システムによって、コンピュータ画面に平面図あるいは縦断図として表現された画像に対して、既往の線形基準への変換作業が必要になる。より効率的な運用を図るためには、このような変換作業を経ることなく、既往の設計基準を満たすような3次元道路線形を自動的に設定できるシステムに拡張することも必要であろう。

謝辞：本論文を作成するにあたって、宮城大学事業構想構想学部藤井章博助教授には有益な議論をいただいた。ここであらためて謝意を表する。

#### 参考文献

1) Beaven, P.J. and Lawrance, C.J.: Terrain Evaluation for Highway Planning and Design, *Transportation Research Record*, No.892, pp.36-46, 1982.

- 2) 鍛冶晃三, 中村秀夫: 道路工学と写真測量, 技術書院, 1972.
- 3) 澤 鉦二, 川島一洋, 中舎 哉, 片桐正一: 航空写真による林道路線選定, 名古屋鉄道株式会社研究報告, No.29, pp.12.1-12.10, 1984.
- 4) 鈴木保志, 三宅 徹, 神崎康一: ステレオ写真プロッターの林道路線選定支援システムへの利用, 京都大学農学部演習林報告, pp.221-228, 1990.
- 5) 財団法人日本地図センター: 空中写真の知識, 財団法人日本地図センター, 1993.
- 6) ローレンス, H.: 道路の線形と環境設計, 中村英夫, 中村良夫共訳, 鹿島出版会, pp.145~171, 1970.
- 7) Rogers, D.F. and Adams, J.A.: コンピュータグラフィックス第2版, 川合 慧監訳, 凸版出版社, 1993.
- 8) Schoenberg, I.J.: Contribution to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions, *Q.Appl.Math*, Vol.4, pp.45-99, pp.112-141, 1946.
- 9) 福田 正 編著: 交通工学, 朝倉書店, pp.90-93, 1995.
- 10) 建設省国土地理院: カラー航空写真 C HO-77-39 C5A-16 ~17, 1977.

(1997. 5. 29 受付)

## HIGHWAY ALIGNMENT PLANNING SYSTEM UTILIZING STEREO-VIEWING OF AERIAL PHOTOGRAPHS AND COMPUTER GRAPHICS

Koji MAKANAE and Tadashi FUKUDA

When planning the alignment of a highway in a mountainous area, it is important to consider about geomorphologic and geological conditions in addition to highway engineering's one. Surveys based on the stereo-viewing of aerial photographs are extremely useful because it presents much information about these conditions at the stage of route planning. This paper proposes a 3-dimensional highway alignment planning system in virtual space applying B-spline curve and utilizing stereo-viewing of the aerial photographs.