

東大生研 正 丸 安 隆 和

東大生研 正 ○村 井 俊 治

川田工業 正 船 木 健 治

1. 土木設計と視覚による判断決定

計算機の急速な発達には工学設計の分野に才2次産業革命とも言い得る程の質的変革をもたらした。すなわち、多大の労力と時間を必要とする設計計算や製図作業など、数値的あるいは物理的にとりあつかいが可能である機械的仕事を計算機に肩代りさせることができるようになったからである。そのため設計者はより複雑な構造物の建設計画やその処理方法など、創造的な作業に時間を費やすことが可能になったのである。

設計計算や製図作業などの機械的仕事から解放された設計者は、より多くの設計要素を考慮する機会に恵まれることになり、いままで設計の分野で積極的に考えられることが少なかった景観、美観、視覚認知、人間工学上の問題など視覚による判断を必要とする問題までも考えに入れた設計を行うことさえ可能となったのである。幾何学的あるいは工学的に満足のゆく設計がさらに視覚判断によつて、構造物の美学性、安全性、運動性が確認できるわけである。

土木設計に視覚判断が必要な問題には、たとえば次のようなものがある。

- 1.) 景観または美観：道路、橋梁、ダムなど殆どすべての構造物は景観工学上あるいは幾何学的な意味での美学的センスにあふれたものでなければならない。
- 2.) 運動安全性：たとえば高速道路の線形が運転者にどのように認知されるかその走行安全性を検討したり、飛行場の滑走路がどのように見えるかなどを検討するような問題である。
- 3.) 地形障害の検討：高速道路における視距の検討など地形によつて構造物の機能が阻害されるかどうかを検討するような問題。
- 4.) 他の構造物による障害：他の構造物が新しく設計されるとき、それによつてどのような視覚的な障害が生れるかを検討するような問題。たとえば、高速道路の近くに大きな建物が建設されるような場合におきる問題である。

土木構造物の設計に際してこのような視覚判断が積極的にとり入れられるためには、次に示すような条件が必要であらう。

- 1.) 構造物を任意の角度から3次元的に眺めることのできる透視図が必要に応じて容易に描けること。これは、構造物の諸元がデジタルな形で与えられれば、計算機によつて、透視図にするための座標変換を行なわせ、さらにこれらの座標値を用いて、自動製図機により透視図を自動的に描かせることができる。
- 2.) 地形に関する情報が入手できること。構造物の設計に景観工学的な検討を行なうためには、実際の建設位置の写真があれば最もよい。
- 3.) 上にのべた透視図を実際の風景が写された写真の中にくみ入れられること。これはあとでべる

ような写真測量技術があれば可能である。

4.) さらに時間の要素を考えに入れて4次元的に稱造物を設計するような場合は、時間毎の透視図をアニメーション（動画）することによつて、動的な視覚判断が可能となる。

次に透視図の作成方法をのべてみることにする。

2. 透視図の作成方法

透視図は、空間にある3次元像を一定の画面上に中心投影した図である。いま空間座標系 $X Y Z$ におかれた対象物の仕様の点を $P(X, Y, Z)$ とし、投影中心である視点の座標を $O(X_0, Y_0, Z_0)$ とする。また、視軸を与える視準点の座標を $V(X_v, Y_v, Z_v)$ とし、画面はこの視軸と垂直になるようにする。

このとき、図1に示すように、 $X Y Z$ 座標系を、視点 O を原点とし、視軸方向を Y' 軸とするような座標系 $X' Y' Z'$ に変換する。座標系 $X Y Z$ から座標系 $X' Y' Z'$ への変換は平行移動量 (X_0, Y_0, Z_0) と X 軸まわりの回転 ω と順次 Y 軸のまわりに φ 、 Z 軸まわりに K を考えればよい。すなわち $X' Y' Z'$ は次のようにして求められる。

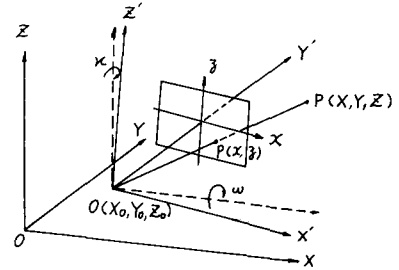


図 - 1

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos K & -\sin K & 0 \\ \sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、空間座標系 $X Y Z$ で水平であつたものは、新しい座標系 $X' Y' Z'$ においても水平であるようにすれば、 Y 軸まわりの回転 φ は考えなくてよい。

次に視点 O から画面に至る距離を C とすると、点 $P(X, Y, Z)$ と、この点に対応する透視画面上の点 $P'(x, y, z)$ の間には、次の関係式がなりたつ。

$$y = C, \quad x = \frac{X'}{Y'} y = \frac{X'}{Y'} C, \quad z = \frac{Z'}{Y'} y = \frac{Z'}{Y'} C \quad (2)$$

(1)式において $\varphi = 0$ とし、(2)式に代入すると透視図を与える座標 (x, z) は

$$\left. \begin{aligned} x &= C \frac{A_1(X - X_0) + A_2(Y - Y_0) + A_3(Z - Z_0)}{B_1(X - X_0) + B_2(Y - Y_0) + B_3(Z - Z_0)} \\ z &= C \frac{C_1(X - X_0) + C_2(Y - Y_0) + C_3(Z - Z_0)}{B_1(X - X_0) + B_2(Y - Y_0) + B_3(Z - Z_0)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と求められる。

ただし

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \cos K, & A_2 &= -\sin K \cos w, & A_3 &= \sin K \sin w \\ B_1 &= \sin K, & B_2 &= \cos K \cos w, & B_3 &= \cos K \sin w \\ C_1 &= 0, & C_2 &= \sin w, & C_3 &= \cos w \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

回転角 K および w は視軸が透視図座標の原点を与えるということから求められる。すなわち $(X, Y, Z) = (X_v, Y_v, Z_v)$ のとき、 $(x, y) = (0, 0)$ であることより次の式がなりたつ。

$$\left. \begin{aligned} (X_v - X_0) \cos K - (Y_v - Y_0) \sin K \cos w + (Z_v - Z_0) \sin K \sin w &= 0 \\ (Y_v - Y_0) \sin w + (Z_v - Z_0) \cos w &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

上式を解くと次の式が得られる。

$Y_v \neq Y_0$ のとき

$$\left. \begin{aligned} \tan w &= -\frac{Z_v - Z_0}{Y_v - Y_0}, & \tan K &= \frac{X_v - X_0}{\sqrt{(Y_v - Y_0)^2 - (Z_v - Z_0)^2}} \frac{Y_v - Y_0}{Y_v - Y_0} \\ Y_v = Y_0 \text{ のとき } w &= \frac{\pi}{2}, & Z_v \neq Z_0 \text{ のとき } \tan K &= \frac{X_v - X_0}{Z_v - Z_0} \\ Z_v \neq Z_0 \text{ のとき } K &= \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

このようにして、透視図座標 (x, y) を得るプログラムを作れば、多数のデジタルな点の集合として与えられる構造物の透視図座標は、計算機によつてただちに紙テープにパンチアウトすることができる。次に紙テープにパンチされた透視図座標値により、図 2 に示すような自動製図機を数値制御しながら透視図を自動的に描くことができる。図 3 は東京大学生産技術研究所にある自動製図機 DRAFTER NUMER ICON によつて自動製図された本州四国連絡橋の設計案の透視図である。

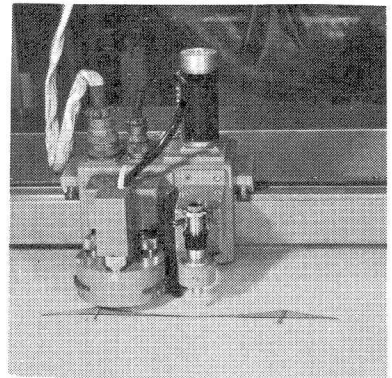


図 - 2

3. ステレオグラフによる実体視

透視図は空間座標から平面座標への中心投影変換であるが、逆に一枚の透視図からその空間座標を求めることはできない。透視図に描かれたものの空間構成を知るためには、相異なる 2 つの視点からみた 2 枚の透視図を作成し、これを立体視すればよい。これは人間が 2 つの目で物を見ることによつて、その立体感がわ

かるのと同じ原理である。これはまた、写真測量学における基礎的な原理であつて、2枚の写真に撮影された対応する像の写真座標値



図 - 3

$p_1(x_1, y_1)$ 、 $p_2(x_2$

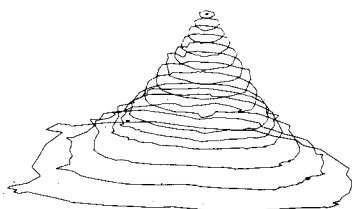
, $y_2)$ とカメラの基線距離 b 、レンズの焦点距離 f がわかれば、その像の空間座標 (x, y, z) を求めることはできる。

透視図は写真と同じ中心投影であるから、立体視のできる2枚の透視図があれば、透視図座標からその空間座標が求められる。このような立体視のできる一組の透視図をステレオグラフという。

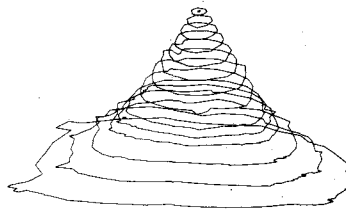
ステレオグラフを作るには、オ1の視点 O_1 と同じ高さでオ1透視図の視軸に直角な方向に基線長 b だけ離れた点をオ2の視点 O_2 からオ1透視図の視軸に平行な視軸をもつような透視図を作ればよい。

このステレオグラフによる実体視は次に示すような利点をもつ。

- 1) 構造物を立体的にとらえることができる。
- 2) 構造物の見える部分と見えない部分が判別できる。透視図の中で目に見える部分だけを描かせるソフトウェアを開発することは大変難しいであろう。ステレオグラフでは構造物を立体的にとらえることができるため、見える部分と見えない部分を明確に区別できる。たとえば図4は富士山の等高線のステレオグラフ(田子の浦から見た富士山の姿を示す)であるが、図4(a)あるいは(b)だけではどの部分が前側かを知ることはできないが両者を実体視すれば目に見える側がはつきりする。



(a)



(b)

図 - 4

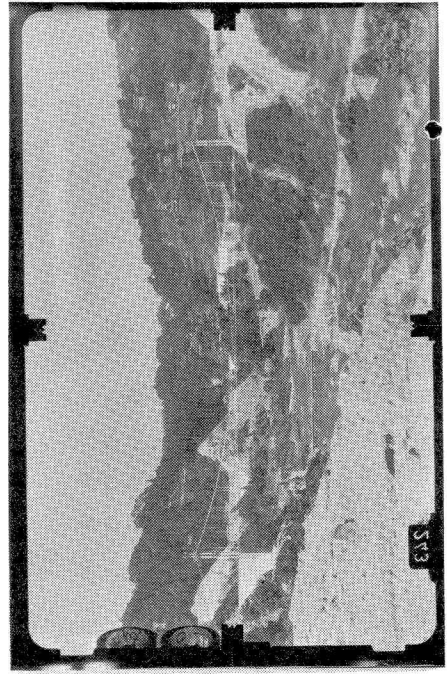
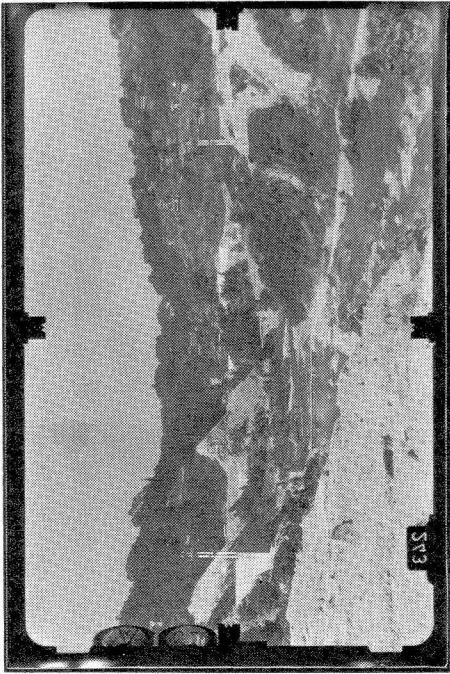
- 3) 設計された構造物が不自然であると判断されたときに、ステレオグラフからその空間座標を求め、もとの設計図に対応する部分を修正することができる。

4. モンタージュ写真の作成

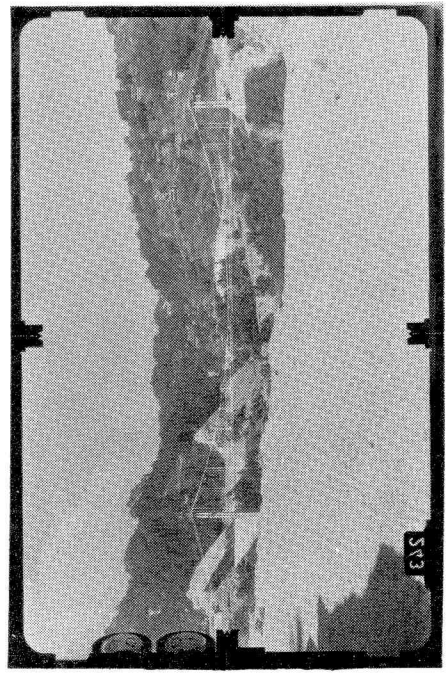
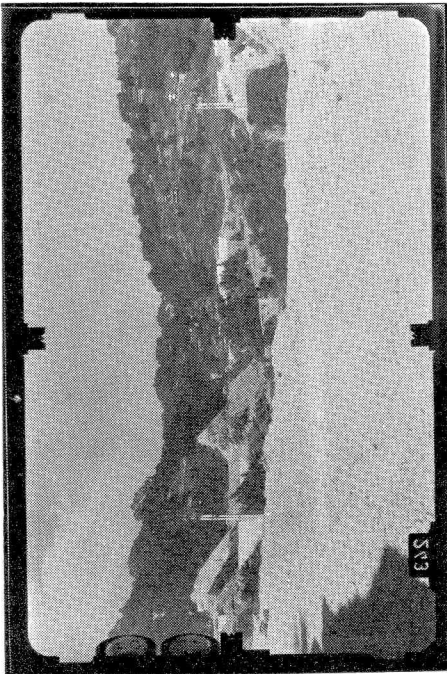
透視図あるいはステレオグラフは、構造工学上の検討のほか、景觀工学的な検討をする際の有効な資料になる。構造物の建設予定地の風景を構造物と共に描写するためには、現地での写真に構造物の透視図をモンタージュすればよい。

モンタージュ写真を作成するには次のことに注意しなければならない。

- 1) 透視図座標原点および視軸を写真の主点(中心点)とレンズ中心線に一致させる。



9 - ☒



9 - ☒

2) 写真縮尺と画面縮尺を合わせる。このためには、写真を C/f 倍で引きのばして透視図に合わすかまたは透視図の画面距離を $C = f$ として写真原版に透視図をかきこむかすればよい。

モニタージュ写真を作成する場合には、カメラの空間位置を知らなければならない。カメラ位置は直接現地測量して求めてももちろんよいわけであるが、写真内に6点以上の地上座標 (X, Y, Z) が既知であれば、解析写真測量学の理論によつて、そのカメラ位置 (X_0, Y_0, Z_0) とその傾き K, φ, ω を求めることができる。

図5は、奈良県伊賀に架設される予定の八幡橋の境塚のステレオ写真である。図5の原写真はカメラP30 (ウィルド製焦点距離: 165 mm) によるものである。図6は八幡橋のステレオグラフを写真の中に重ね焼きしたステレオモニタージュ写真である。

5. むすび

これまで述べてきた土木設計における写真測量技術の導入の方法の特徴をまとめるとつぎのように言うことができよう。

1) 視覚による構造設計の良否の判断の資料として透視図、ステレオグラフあるいはモニタージュ写真などをきわめて能率的に得ることができる。まえにあげた透視図作成の際に用いた計算機はFA00 M 270/30であるが、たとえば図3のつり橋の透視図用の紙テープのパンチアウトを含めて約2分であった。

2) ステレオグラフおよびそのモニタージュ写真を作成することによつて、構造物を実際に近い姿で立体的にとらえることができる。

3) 写真測量学の技術によつて、ステレオグラフ上で修正した量は、もとの空間座標系での修正量として知ることができる。

4) 将来、計算機とonlineされたグラフィックディスプレイ装置を用いることができれば、いままでのべた方法はさらに高速度化され、動画の作成もきわめて容易になるであろう。

以上、土木構造物の設計と写真測量技術の導入に関してのべてきたが、これらの方法を、その構造物設計の電子計算システムの中にくみ入れることによつてさらに次元の高い構造設計が生れることは確実である。おわりにこの論文の資料および自働装図のプログラムを手伝つた川田工業KKの方々および丸安研究室の方々に感謝の意をあらわすものである。