

# 新型遥感立体成像技术初步研究

郭培基

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

**摘要** 主要讨论了信息获取技术和数字三维成图及其显示办法: 论述了三线阵数字摄测系统的原理及其组成, 较详细地讨论了系统各主要参数及其确定, 重点放在光学系统的参数选择, 并设计了实用的光学系统, 运用航测原理建立了完整的三线阵数字摄测系统求解立体信息的数学模型, 并对解的稳定性进行了分析讨论, 提出了用取随机的定向片距来解决解的稳定性的方法, 讨论了三维立体求解结果的显示技术。

**关键词:** 遥感; 立体成象; 数字成图

数字摄测系统(DPS)是国际上八十年代发展起来的一种新型遥感立体成像技术, 它具有下面的一些优点:

- (1) 靠载体(如飞机、卫星等)运动实现扫描, 不需其它附加运部件;
- (2) 信息量大, 可获得三维图像;
- (3) 全数字化成图;
- (4) 所得数据可实时传输, 可直接用于计算机存储和计算;
- (5) 对地面反射或辐射强度可精确测量;
- (6) 分辨率高。

它在军事、农业、林业、矿业等有广泛的应用前景, 世界各国都在竞相对此进行研究和试验, 在我国尚属空白。本文仅涉及系统中的部分技术, 具体包括如下内容:

- (1) 论述三线阵数字摄测系统的原理及组成;
- (2) 较详细地讨论了系统各主要参数及其确定;
- (3) 光学系统参数选择及实用光学系统设计;
- (4) 运用航测原理建立完整的三线阵数字摄测系统求解的数学模型并对解的稳定性进行了分析讨论;
- (5) 讨论了三维立体求解结果的显示技术。

# 1 新型遥感立体成像基本原理

Hofmann 和 MBB 公司研究人员提出的数字摄测系统 (DPS 系统) 中的三线阵数字摄测系统就是在物镜的焦平面上安置三个线阵 CCD 传感器 A、B 及 C, 这些传感器的方位垂直于飞行方向 (图 1), 另一种等价的形式是利用三个主光轴交于一点的物镜, 分别对应于三个垂直于飞行方向的传感器 (图 2)。实际上, 为定标和高分辨的需要以及便于相机的设计, 我们采用这种前视、直视、后视三相机的等价形式由此与相应的接收、处理、存储、显示系统一起, 我们称之为新型遥感立体成像系统。

立体成像系统如下

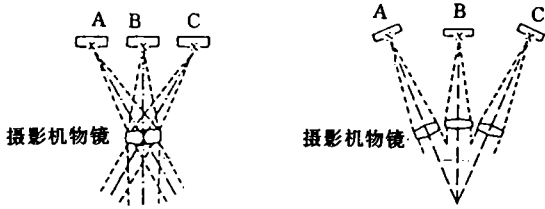


图 1 单物镜三线摄像机 图 2 交轴物镜三线摄像机

如图 3 三个相机及相应的传感器阵列 A、B、C 在飞行体飞行过程中, 依次对地面进行扫描, 故可得到同一地面不同透视中心的三个垂叠影像  $A_n$ 、 $B_n$  及  $C_n$ 。每个地面点  $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ , 在三个不同的扫描周期  $N_A$ 、 $N_B$ 、 $N_C$  成像 (分别对应于传感器阵列 A、B、C 上的位置)。像点坐标是可得到的。如果飞行体速度是不变的, 飞行姿态已知且不变或可实时测出, 则我们只需同一地面点的两个影像信息, 就可根据简单的数学关系, 利用像点坐标求得地面点的三维坐标。但事实上, 飞行体的速度是常变的, 飞行姿态也常变且不能实时准确测出, 即每个扫描周期的定向参数 ( $X_N, Y_N, Z_N, \Psi_N, \omega_N, K_N$ ) 是不同的, 根据航测的光束法平差原理, 只需对每条成像光线  $E_A, E_B, E_C$  列联立共线方程, 共线方程包含像点坐标、定向参数以及地面坐标, 我们把所列方程线性化, 利用像坐标值及定向参数, 地面坐标的近似值, 进行联合解算, 最后可得较精确的定向参数及地面点坐标。

一个比较典型的遥感立体成像系统由下面的部分组成:

- (1) 机载的 CCD 线阵扫描相机, 由前视、直视、后视三台相机组成, 依推扫原理获取地面的数字信息;
- (2) 数据处理、图像重构与成像系统;
- (3) 立体图像的显示与存储系统。

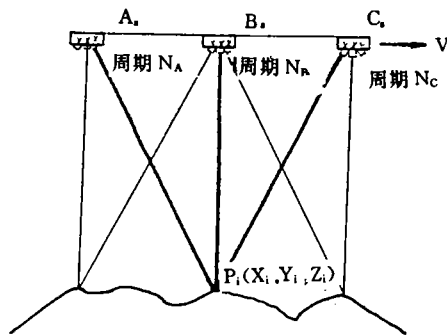


图 3 立体成像原理

系统组成方框图如下：

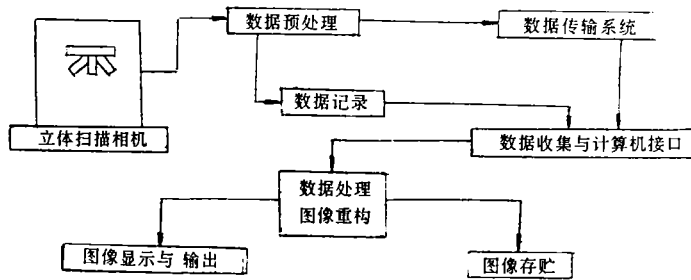


图 4 系统组成方框图

## 2 系统主要参数确定及光学系统设计

根据系统要求的主要技术指标及飞行运动主要参数，通过分析计算，确定系统主要参数值如下：

飞机飞行高度：	3.10km
飞行速度：	300km/h~750km/h
线阵 CCD 象元数：	2048
象元尺寸：	13 $\mu$ m
直视物镜焦距：	109.72mm
视场角：	13.84°
扫描行频：	69~585Hz
曝光时间：	0.4~4ms
地面分辨率：	0.118 $\times 10^{-3} \cdot H$
斜视物镜焦距：	39.436mm
视物角：	37.30°
扫描行频：	23~195Hz
曝光时间：	1.3~11ms
地面分辨率：	0.355 $\times 10^{-3} \cdot H$
相机倾角：	22°

另外根据要保证 CCD 有足够的曝光量，又不能饱和，并满足系统分辨率的原则，考虑到地表照度的不同情况，飞机飞行速度、飞行高度的不同情况并使之标准化，确定相机相对孔径为 1/5.6, 1/8, 1/11 三级可调，曝光时间为 0.1ms 到几毫秒之间可调。

### 3 航测求解地面立体信息的基本理论

对如图 5 所示的坐标系, 以 S 为投影中心的像片上的像点坐标与对应物点关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = 1/\lambda \cdot R^{-1} \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix}$$

其中 R 为三维正交矩阵:

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}$$

$a_1, a_2, \dots, c_3$  是  $\psi, \omega, \kappa$  的函数, 从而得到

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这个式子就是中心投影的构像方程式。

实际中, 像面在摄影的像空间坐标系下的 Z 轴坐标为  $f$  符号为正。从而得到实际摄影构像方程式:

$$\left. \begin{aligned} x &= f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y &= f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

光线束法空中三角测量:

光线束法空中三角测量的运算是以每条空间光线为一单元, 利用三点共线条件列出误差方程式。所谓三点共线条件, 即是指在摄影时, 地面点、相应像点和摄影站点是在同一条直线上, 因此在利用像片测量的过程中, 这三点仍满足共线条件。

由共线条件出发, 对每个像点, 可以列出式 (2) 的两个关系式, 对式 (2) 线性化得出误差方程式为:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= a_{11}\Delta X_s + a_{12}\Delta Y_s + a_{13}\Delta Z_s + a_{14}\Delta\psi + a_{15}\Delta\omega + a_{16}\Delta\kappa \\ &\quad - a_{11}\Delta X - a_{12}\Delta Y - a_{13}\Delta Z - lx \\ u_y &= a_{21}\Delta X_s + a_{22}\Delta Y_s + a_{23}\Delta Z_s + a_{24}\Delta\psi + a_{25}\Delta\omega + a_{26}\Delta\kappa \\ &\quad - a_{21}\Delta X - a_{22}\Delta Y - a_{23}\Delta Z - ly \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

各系数值  $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{26}$  及常数值  $lx, ly$  由地面点、摄影外方位元素的近似值及像点坐标计算得到。

对控制点而言, 其相应的  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  为零, 若要考虑控制点已知坐标的误差影响, 则可以把控制点的坐标值也作为观测值看待, 保留其待定的改正数  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ , 但额外加一组下列

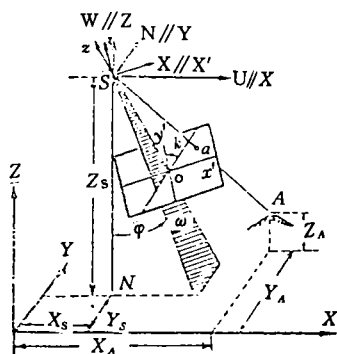


图 5 像点坐标与物点关系

的误差方程式, 用最小二乘法求解时, 给以适当的权

$$\left. \begin{aligned} v'_x &= \Delta X \\ v'_y &= \Delta Y \\ v'_z &= \Delta Z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对于相邻至少有 50% 重叠的  $m$  张像片而言, 由于至少在两张象片上成像的地面点最少可列 4 个误差方程式, 总能使  $6m + 3n < 4n$  ( $n$  为被摄到的均分布的地面点, 对每个地面点而言至少在两张像片成像)。

把由这些点列出的误差方程式用最小二乘法求解, 可求得地面坐标点及摄影的外方位元素的改正数, 由于方程式中各系数  $a_{ik}$  取自泰勒公式的第一次导数项, 而未知数的近似值往往是粗率的, 因此计算必须通过逐渐趋近方法, 在每次趋近时要重新计算其常数项, 并且当未知数的改正数有大的变化时, 必须要重新计算各系数值, 未知数的最后值为其起始值与每次趋近所求得相应改正值的和。如此反复迭代进行, 直至各改正数小于规定的限差时为止。

#### 4 三线阵数字摄测系统的求解

利用摄测的光束法平差原理我们对图 5 中的每条光线  $E_A, E_B, E_C$  列联立共线方程, 共线方程包含像点坐标、定向参数及地面坐标, 事实上计算每个扫描周期的定向参数没必要。在飞行轨道上选取一些等间距的离散扫描周期, 把这些周期上获得的三行影像称为定向片 (图 6), 这样就只计算这些离散的定向片的定向参数, 所有在定向片之间的扫描周期的定向参数, 均可由定向片的定向参数用线性或非线性内插方法得到, 实用中的三交相机的三线阵数字摄测系统的求解, 可用类似的方法。

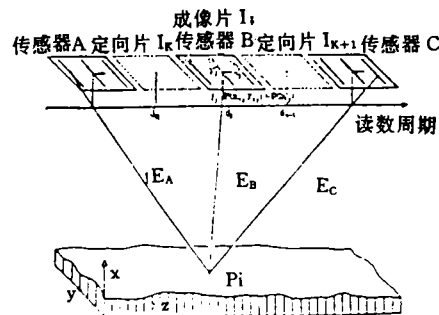


图 6 成像片、定向片和读数周期

(1) 对中间的直视相机, 一维构像:  $X = 0$ , 构像方程式为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y_{\omega j} \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} R^{-1} \begin{bmatrix} X_i - X_j \\ Y_i - Y_j \\ Z_i - Z_j \end{bmatrix} \quad (7)$$

从而对每个像点 (或每根成像光线) 可列两个共线方程:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= f_0 \frac{a_{1j}(X_i - X_j) + b_{1j}(Y_i - Y_j) + c_{1j}(Z_i - Z_j)}{a_{3j}(X_i - X_j) + b_{3j}(Y_i - Y_j) + c_{3j}(Z_i - Z_j)} \\ y_{\omega j} &= f_0 \frac{a_{2j}(X_i - X_j) + b_{2j}(Y_i - Y_j) + c_{2j}(Z_i - Z_j)}{a_{3j}(X_i - X_j) + b_{3j}(Y_i - Y_j) + c_{3j}(Z_i - Z_j)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对前倾  $\Phi_0$  相机所得像可作如下处理: 先把所得像的像空间坐标系统绕自身的  $y$  轴顺时针旋转  $\Phi_0$  角。得到一个各轴分别与中心相机所得像的像空间坐标的对应轴平行的新空间坐标系; 再把像上点的像空间坐标转换成新坐标下的坐标; 然后可按直视的情况处理, 这就是说

在构像方程式 (7) 的左方乘以相应的旋转矩阵, 就可得到前倾  $\Phi_0$  相机的构成方程式, 从而得到相应的共线方程式为:

$$\left. \begin{aligned} f_1 \operatorname{tg} \Phi_0 &= f_1 \frac{a_{1j}(X_{1i} - X_{j1}) + b_{1j}(Y_{1i} - Y_{j1}) + C_{1j}(Z_{1i} - Z_{j1})}{a_{3j}(X_{1i} - X_{j1}) + b_{3j}(Y_{1i} - Y_{j1}) + C_{3j}(Z_{1i} - Z_{j1})} \\ y_{1ij} / \cos \Phi_0 &= f_1 \frac{a_{2j}(X_{1i} - X_{j1}) + b_{2j}(Y_{1i} - Y_{j1}) + C_{2j}(Z_{1i} - Z_{j1})}{a_{3j}(X_{1i} - X_{j1}) + b_{3j}(Y_{1i} - Y_{j1}) + C_{3j}(Z_{1i} - Z_{j1})} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

同样的道理, 对后倾  $\Phi_0$  的相机所得像的每个像点可列如下的两个共线方程式:

$$\left. \begin{aligned} f_2 \operatorname{tg}(-\Phi_0) &= f_2 \frac{a_{1j}(X_{2i} - X_{j2}) + b_{1j}(Y_{2i} - Y_{j2}) + C_{1j}(Z_{2i} - Z_{j2})}{a_{3j}(X_{2i} - X_{j2}) + b_{3j}(Y_{2i} - Y_{j2}) + C_{3j}(Z_{2i} - Z_{j2})} \\ y_{2ij} / \cos(-\Phi_0) &= f_2 \frac{a_{2j}(X_{2i} - X_{j2}) + b_{2j}(Y_{2i} - Y_{j2}) + C_{2j}(Z_{2i} - Z_{j2})}{a_{3j}(X_{2i} - X_{j2}) + b_{3j}(Y_{2i} - Y_{j2}) + C_{3j}(Z_{2i} - Z_{j2})} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由于共线方程式都是非线性方程式, 因此要对它们线性化再求解, 这里对 (8) 式线性化, 就得到点  $P_i$  在像片  $I_{oi}$  上成像点的两个改正数方程:

$$\left. \begin{aligned} u_{x_{oij}} &= a_{11}\Delta X_j + a_{12}\Delta Y_j + a_{13}\Delta Z_j + a_{14}\Delta\phi_j + a_{15}\Delta\omega_j + a_{16}\Delta\kappa_j \\ &\quad - a_{11}\Delta X_i - a_{12}\Delta Y_i - a_{13}\Delta Z_i - (-X^{\circ}_{oij}) \\ u_{y_{oij}} &= a_{21}\Delta X_j + a_{22}\Delta Y_j + a_{23}\Delta Z_j + a_{24}\Delta\phi_j + a_{25}\Delta\omega_j + a_{26}\Delta\kappa_j \\ &\quad - a_{21}\Delta X_i - a_{22}\Delta Y_i - a_{23}\Delta Z_i - (y_{oij} - y^{\circ}_{oij}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

对地面控制点而言,  $\Delta X_i = \Delta Y_i = \Delta Z_i = 0$

在我们所摄测的条块中前后各有一段只被扫描两次, 中间的都被扫描三次, 这样对每个地面点可列 4 个或 6 个改正数方程, 如有  $m$  个定向片, 总可使  $6m + 3n < 4n_1 + 6n_2$  ( $n$  为均匀分布于整个条块的点,  $n_1$  个点被扫描 2 次,  $n_2$  个点被扫描三次 ( $n_1 + n_2 = n$ ) 即方程数大于未知数。把这些方程根据最小二乘法组成方程组, 解之可得各改正数, 将各改正数加入相应近似值中后, 再将新的近似值代入重新计算各改正数, 如此反复迭代, 直至改正数小于规定的限差时为止, 这样, 我们就求得参与运算的点的坐标和定向片的外方位元素, 利用有关公式可求出参与运算的点坐标。

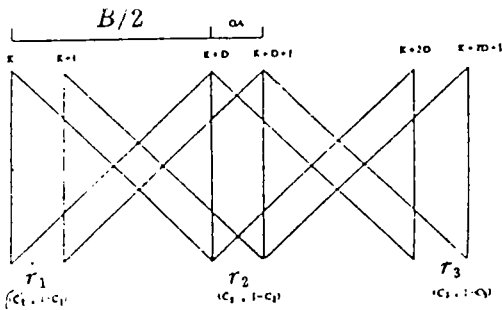


图 7  $B/2oA = \text{整数 } D$  时, 空中光束交会关系。

(1)  $B/2oA$  为整数

为便于分析, 我们假设在一个平坦的地表上用 CCD 三行阵列传感器作一次直线的推扫式扫描 (实际上由于飞行高度远大于地表起伏, 上述假设较合理), 所获取的航线中的光束交会

(2) 解的稳定性的讨论

联邦德国的 O. Hofmann, H. Ebner 和 F. muller 等教授对三线阵数字摄测系统中三行传感的不同排列方案作了大量的实验。实验表明, 平行排列的数字摄测系统获得的数字信息在某些情况下, 其数值解是不稳定的, 并发现基线半长与定向片距之比  $(B/2) / oA$  的值影响解的稳定性, 通过适当选取  $(B/2) / oA$  可使解稳定。

下面我们就取几种情况加以分析

关系如图 7 和图 8 所示。

这种交会关系时，分析知列出的方程中，系数列向量存在线性相关，即某些未知数的列向量之和可由其它某些未知数的列向量之和生成，由有关知识，方程有不定解。

(2)  $B/2\circ A=D+0.5$  (D 为整数)

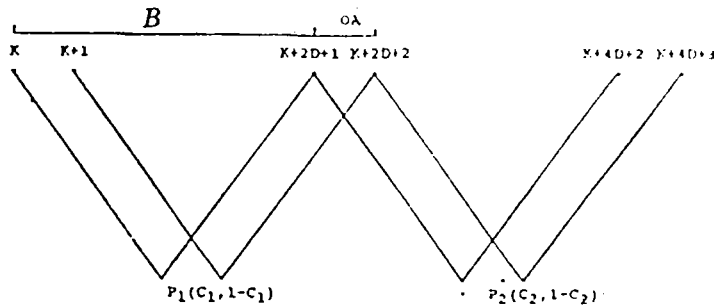


图 8 (B/2OA=D+0.5) 时空中光束交会关系

$B/2 \cdot OA=D+0.5$ 、所获取的空气中的光束交会关系如图 8 所示。

这种交会关系时，分析知列出的误差方程中列向量之间存在局部相关性，解稳定但精度不好。

(3)  $B/2OA=D+0.25$  (D 为整数)

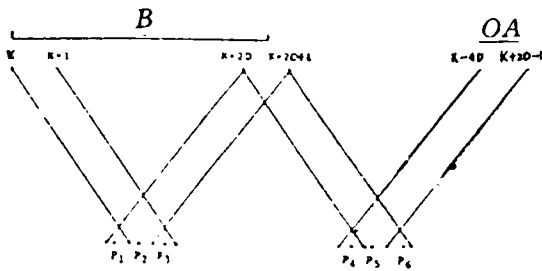


图 9  $B2OA/D+0.25$  时，空中光束交会关系

$B/2OA=D+0.25$  时，航线中的光束的交会关系如图 9，由图可知所有经定向片辐射的扫描光线都在地表面呈现相互交叉状态，使系数列向量之间不再线性相关，因此解是稳定的，平差结果精度好。

从上面的分析可知，解不稳定是由于方程组中由空中三角链所确定的

列向量存在线性相关，其根本原因是定向片辐射的扫描光束与其它定向片辐射的扫描光束相交于地表面，如果破坏这种交会状态，使所有经定向片辐射的扫描光线都在地表面呈相互交会状态，相应于交会关系误差方程系统中非零的分布，在各定向未知数下的系数列向量中也呈现错动状态，每个地面点也以不同的贡献系数给出与其相应的定向片未知参数的误差方程系数，使系数列向量之间不再线性相关，这样我们就想到用取不定的定向片距离来避免定向片扫描光线都相交于地面，使这些光线在地面呈相互交叉状态，从而达到使解稳定的目的。

### 5 求解结果的三维立体显示

表现一个模型的立体图有许多种方法，这里主要讨论了一咱网状立体图和一咱三维灰度图的实现技术，并给出了事例。

图 10 和图 11 是本人在微机上用 C 语言编制的一个例子，函数为  $Z = 40 \sin(0.05 \sqrt{x^2 + y^2})$ ，透视投影时视点为  $(1800, -650, 1200)$  平行投影时投影轴的方向余弦为  $(0.7, -0.1, 0.708)$

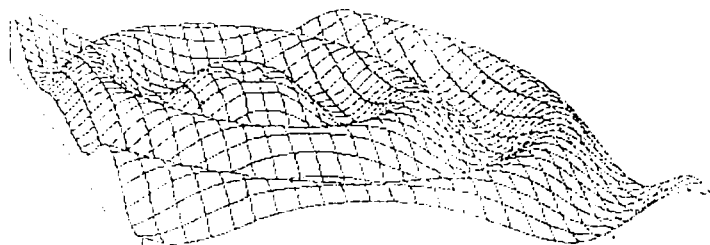


图 10 透视投影

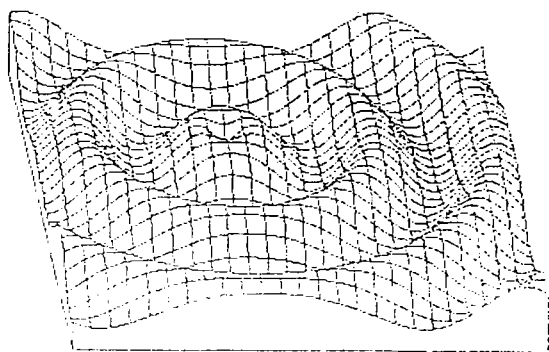


图 11 平行投影

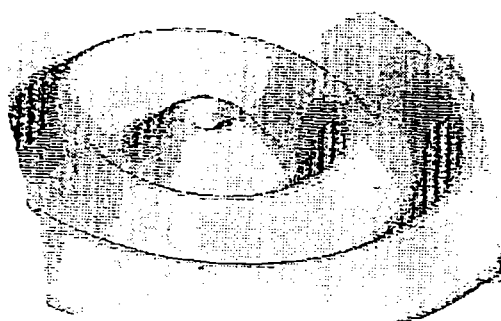


图 12 三维灰度图

图 12 为简化阴影计算，以点的疏密表灰度的例子。函数同上例，投影轴的方向余弦为  $(0.7, -0.1, 0.708)$  光线的方向余弦为  $(0.5, 0.5, 0.708)$

## Preliminary Study on a New Remote Sensing Stereo Imaging Technology

Guo Peiji

*(Changchun institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)*

### Abstract

After a brief description of the principle about three line opto-electronic scanning digital photogrammetric system and its structure, the principal parameter of the system, including the optical system's parameter have been studied in detail; The used optical system satisfying the technique requirements is designed; An efficient mathematical model suitable for combined point determination has been discussed, and stable solution method has been obtained; Finally, stereo image display technology has been investigated.

**Key words:** Remote sensing, Digital photo-grammetry, Stereo imaging