近景目标立体影像用于城市三维建模的空间定位

贾盛举　陈映鹰
（同济大学遥感技术应用研究中心，上海 200092）
E-mail：shengju_jia@sina.com

摘　要　该文利用数字近景摄影测量的方法，对构成立体影像的近景目标序列影像进行数字摄影测量处理，以提取目标模型的三维空间坐标。给出了自由网模型的构建方法和大角度模型拼接的方法，解决了三维空间模型在没有控制点，仅有相对控制条件下，光束法自由网平差解算的空间基准问题。并给了三维网空间定位的实现过程和结论。

关键词　近景目标　自由网　光束法　相对控制

文章编号 1002-8331-(2004)21-0012-04　**文献标识码** A　**中图分类号** TP391.41

Spatial Location on City 3D Modeling with Close-Range Stereo Images

Jia Shengju　Chen Yingying
(Remote Sensing Research Center of Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: This paper chooses close-range target stereo image data as main topic of 3DCM, and carries through comprehensive and systemic study on photogrammetry of free network bundle adjustment from theory to practice. On the data processing of spatial model location, free network bundle adjustment are introduced to solve the base of spatial location. Photogrammetry and non-photogrammetry information are integrated to develop a union adjustment system with self-calibration parameter. Simultaneously solved problems of the big angle linked between different models of a building around taking photo, and free network adjustment with none-control point and only relation controls used. Process of realization and results are given.

Keywords: close-range target, free network, bundle adjustment, relation control

1　引言

城市三维空间可视化信息具有直观性强、信息负荷大、内容丰富等优点。由于现阶段这些空间地理信息的内容及表示基本上都是二维的，为了摆脱基于二维 GIS 和三维实物模型的表现方式，以适应现代城市发展的要求，空间三维建模方法的研究，一直是计算机视觉、数字摄影测量、GIS 等相关领域的热点问题。人们利用各种基础数据和手段进行三维建模，包括基于三维建模工具 AutoCAD，3DMAX，基于遥感影像数字摄影测量建模、基于 GIS 系统的 2.5 维表示和基于影像的现实与虚拟景观表示等等，在目标获取手段上，采用摄影、激光扫描、摄影经纬仪等等。总之，在空间三维建模方面进行了卓有成效的工作。

目前空中对地遥感观测已经发展了机载和星载的高分辨率、高光谱和雷达观测技术，利用遥感影像进行空间三维建模是一种处理范围广、便捷的方法，但仍无法解决城市高层建筑遮挡区、高层建筑物侧面、多层建筑物复杂结构、工程建筑物特殊工作面的信息获取，以及城市和工程建设所需的大比例尺、高精度（cm 级精度）三维测量问题。因此，作为空中对地观测的一种技术补充，专门研究从地面对近景目标采用新近发展的特殊观测手段，全面快速采集城市环境及各种工程目标的三维信息的方法，以实现实时化、自动化、模型化方面，具有现实的意义。

为了建立城市近景目标真实三维结构模型，必须准确量测近景目标每个变化角点的三维空间坐标。该文系统地论述了对构成立体像对的近景目标序列影像，在获取共轭影像目标基础上，在无控制点，仅利用相对控制条件情况下，对构成自由网的近景目标进行三维空间定位的理论与方法。

2　近景目标自由网构建

对于近景目标摄影测量一般用于描述目标的形状大小，过多地考虑其相对位置并不注意它的“绝对位置”，对于城市近景目标的三维建模情况也是如此。为了从已获得的二维影像、内定向数据和目标表面相对控制条件来重构和恢复三维目标信息，必须从机理上建立数学模型（方程），研究联立解算的方法和算法，实现空间多元数据在统一坐标系下的空间集成。

2.1　坐标系统的确立

坐标系是选择单独像对坐标系统，就是以摄影基线和像片主核面为基准，摄影测量坐标系的 X 横轴与摄影基线 B 重合，坐标面 XZ 与左主核面重合。原点在摄站 S1。如图 1 所示。

在各独立模型的分别进行解算，解求其在各自模型坐标系中的模型坐标。相机的内方位元素可通过实验室的九点坐标检校法精确标定。通过实验室检校的参数还包括相机的主距和扫描像元尺寸。上述所有参数将作为左右摄站的内外方位元素已知值参加解析计算。要确定物方任意点在局部空间坐标系中的坐标，必须首先确定该物方点所对应的左右片像片坐标。左右像片上的同名点坐标的量测，既可以在计算机屏幕上通过人工的量测方法获取，也可通过影像相关匹配的方法，实现自动

基金项目：国家 863 高技术研究发展计划项目（编号：2001AA131020）资助
作者简介：贾盛举（1965-），博士，主要从事数字近景摄影测量、科学计算可视化、虚拟现实和三维地理信息系统研究与开发工作。

万方数据

量测。

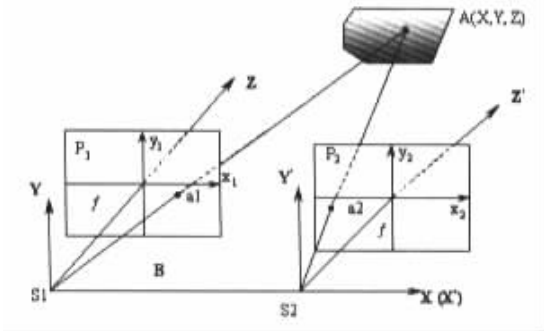


图 1

2.2 模型坐标的解算

在独立模型坐标系下,模型的坐标是利用影像相关匹配或人工量测的方法测得左右片同名点的像点坐标后,可按共面条件的方程,解求各像点在局部空间坐标系中的坐标。以建立空间模型。其数学模型,设左片在 S--XYZ 中的角元素为 τ_1 和 κ_1,右片在 S-XYZ 中的角方位元素为 ε,τ_2 和 κ_2,左右片同名光线的共面条件为:

$$\begin{vmatrix} Y & Z \\ Y' & Z' \end{vmatrix}=0 \tag{1}$$

其中,(X,Y,Z)与(X',Y',Z')分别为左右片相应象点在基线坐标系中的坐标。

若设 M_i 和 M_j 分别为左片和右片相对于基线坐标系的旋转矩阵,则有:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}=M_i\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}=M_i\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -f \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中,$(x,y,-f)^T$ 与 $(x',y',-f)^T$ 分别为左右片相应象点的象空间坐标;旋转阵 M_i 和 M_j 的诸元素分别为 τ_1,κ_1 或 $\varepsilon,\tau_2,\kappa_2$ 的函数。

经逐次迭代相对定向完成后,便得到相对方位元素 $\tau_1,\kappa_1,\varepsilon,\tau_2,\kappa_2$ 进而得到旋转阵 M_i 和 M_j,这样可计算出各模型点坐标。

2.3 自由网模型的拼接

各像对相对定向完毕后,相对方位元素所对应的坐标系分别为各个象对各自的基线坐标系,为了给区域整体平差提供初始值,必须把各组相对方位元素和模型点坐标的计算值置于统一的坐标系中,即进行模型连接,在此,是将各模型归化到第一个模型的基线坐标系中,以此作为摄影测量坐标系。

由于各模型没有连接成统一的整体,但在相邻两单模型之间都有一些公共点,一个摄站和三个以上的模型点(即连接点)。利用相邻两模型间公共点,通过其中一个模型的相似变换(平移,旋转和缩放),就可以将两相邻模型连接成一个整体,以求出一个单模型中各点相邻模型基线坐标系中的坐标。若从第一个模型开始将第二个模型归化到第一个模型的基线坐标系,求出第二个模型的各点在第一个模型的基线坐标系中的坐标,然后,以这些坐标作为依据,使第三个模型与第二个模型相连接,则可求出第三个模型的各点在第一个模型的基线坐标系中的坐标,依此进行,直至最后一个模型,即可求出各模型点在第一个模型的基线坐标系中的坐标,即构成自由网。

单模型的相似变换:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{X} \\ \widetilde{Y} \\ \widetilde{Z} \end{bmatrix}_{ij}=\lambda_j M_j\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ij}+\begin{bmatrix} \widetilde{X}_s \\ \widetilde{Y}_s \\ \widetilde{Z}_s \end{bmatrix}_j \tag{4}$$

$[X\ Y\ Z]_{ij}^T$ 为第 j 个模型中任一模型点 i 的单模型坐标向量。M_j 为第 j 个模型的旋转矩阵。λ_j 为第 j 个模型应缩放的比例因子。$[\widetilde{X}_s\ \widetilde{Y}_s\ \widetilde{Z}_s]_j^T$ 为第 j 个模型左摄站在第一个模型的基线坐标系中的坐标向量。$[\widetilde{X}\ \widetilde{Y}\ \widetilde{Z}]_{ij}^T$ 为第 j 个模型中任一模型点 i 在第一个模型基线坐标系中的坐标向量。这样,以第一个模型为准,依次连接构成近景摄影带,就可以求出测量网中任一点在第一个模型基线坐标系中的坐标。如图 2 所示。

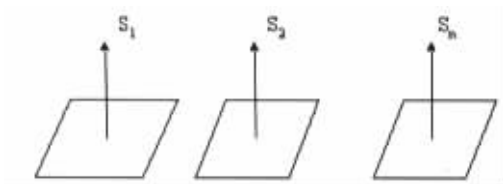


图 2 "近景摄影带"处理

2.4 大角度模型拼接的处置

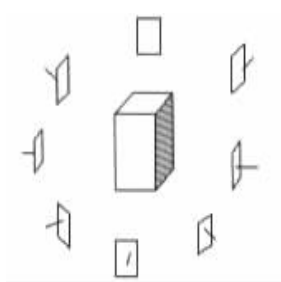


图 3 环绕目标网型处理

对于建筑物进行环形交向摄影时,存在着大角度模型拼接的问题。如图 3 所示,由于各个模型的独立坐标系并不平行,且各坐标系都是右转系统。对于方向变化处有可能存在近似垂直角大角度的情况,此时对模型的拼接,需对模型坐标系进行转换,其模型拼接方法为:将前各模型联接点改化到后模型坐标系中,也即逆时针旋转 90°后,与现独立模型坐标一起解算,解算过程如上。同时,要考虑逐个独立模型的外方位元素的各模型间传递的初始值问题,模型的角方位的连接问题就是根据相对定向解求的定向元素 $\varphi,\kappa,\varphi',\omega',\kappa'$ 和左像片的外方位元素 $\varphi_l,\omega_l,\kappa_l$,求其右像片的方位元素 $\varphi_r,\omega_r,\kappa_r$。其基本关系为:

$$R_{\tau v}=R_{\varphi_l\omega_l\kappa_l}\cdot R_{\varphi\kappa}^T$$

即 $$R_\tau R_v=R_{\varphi_l}R_{\omega_l}R_{\kappa_l}\cdot R_\kappa^T R_\varphi^T \tag{5}$$

τ,v 为摄影基线的方向角。

$$R_{\varphi_r\omega_r\kappa_r}=R_{\tau v}R_{\varphi'\omega'\kappa'} \tag{6}$$

已知 $R_{\varphi_r\omega_r\kappa_r}$ 就可求出 $\varphi_r,\omega_r,\kappa_r$。初始独立模型的左像片 $\varphi_l,\omega_l,\kappa_l$ 为 0。

最后,纳入到起始独立模型的基线坐标系的统一坐标系中。

万方数据

3 自由网光束法平差

在无控制点情况下，仅利用相对控制条件纳入到独立坐标系中的自由网空间定位，会涉及到没有起算基准情况，即没有足够的起始数据，进行平差计算将会产生局部网的定位问题。解算三维空间网时形成了秩亏网，如何消除秩亏也是自由网平差的解算基础。对于自由网平差解算，是利用最小二乘原理决定了网形最佳相对位置，而最小范数条件则是在给定近似系统下做赫尔默特变换，以确定网点的绝对位置。从而建立了相对参考系，这种参考系取重心参考系。由于法方程系数矩阵是奇异的，其秩亏数为 7，为了解决秩亏问题，必须定出 7 个自由度（3 个平移量，3 个旋转角元素和一个比例尺缩放系数），在此就是确定平差计算赖以依托的基准。而秩亏自由网平差的实质是解决"基准"问题。

3.1 伪观测值法消除秩亏

为了获得高精度近景摄影测量结果，采用理论上严密的共线条件方程构成的数学模型，以构网进行光束自由网平差计算。在此，光束法自由网平差是采用加入伪观测值的方法来克服观测方程中的奇异性，该法就是在给定的近似系统下，按最小二乘原则确定改正数 V 的基础上，利用最小范数条件进行配置，以确定各点位置。并使附加观测个数等于该网必要起始数据的个数，使附加观测后的新观测方程的系数阵列满秩。

基本数学模型为：

$$G^T G=I \qquad AG=0 \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} l \\ 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} A \\ G^T \end{bmatrix}X \tag{8}$$

因 $\begin{bmatrix} A \\ G^T \end{bmatrix}$ 为列满秩，此方程有唯一解。

$$X=(A^T PA+GG^T)^{-1}A^T Pl \tag{9}$$

要使 $\begin{bmatrix} A \\ G^T \end{bmatrix}$ 为列满秩，应确定 G 阵，就是要确定法方程系数阵属于零特征值的特征向量所构成的矩阵 S，其中 G 是 S 阵的标准化向量。那么 G 的行构成了系数矩阵 X 的零空间的一组基底。三维空间自由网定位因欠缺 7 个自由度，而引起秩亏数为 7，通过 7 个条件做空间的 Helmert 变换来消除秩亏。改进后的 S 矩阵表示为：

$$S=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -Z_{01} & Y_{01} & a_{11} & b_{11} & c_{11} & \cdots & 0 & -Z_1 & Y_1 & \cdots & 0 & -Z_r & Y_r \\ Z_{01} & 0 & -X_{01} & a_{21} & b_{21} & c_{21} & \cdots & Z_1 & 0 & -X_1 & \cdots & Z_r & 0 & -X_r \\ -Y_{01} & X_{01} & 0 & a_{31} & b_{31} & c_{31} & \cdots & -Y_1 & X_1 & 0 & \cdots & -Y_r & X_r & 0 \\ X_{01} & Y_{01} & Z_{01} & 0 & 0 & 0 & \cdots & X_1 & Y_1 & Z_1 & \cdots & X_r & Y_r & Z_r \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中：

$$a_{11}=\frac{\cos\kappa_1}{\cos\phi_1};a_{21}=\frac{\sin\kappa_1}{\cos\phi_1}$$

$$a_{31}=b_{31}=0;b_{11}=\sin\kappa_1;b_{21}=\cos\kappa_1; \tag{11}$$

$$c_{11}=\tan\phi_1\cos\kappa_1;c_{21}=-\tan\phi_1\sin\kappa_1;c_{31}=1;$$

在矩阵 S 中可以不考虑外方位角元素的制约，因为这些元素对于确定基准不象物方坐标那样重要，只会影响到自身的最终精度，不需要考虑的那些未知数，在平差解算时相应列上填上 0，即外方位角元素矩阵都取 0。

3.2 相对控制条件运用

在近景摄影测量中，常有一些附加的观测值，相对控制的信息，都可以较为方便地按相应条件方程的形式，纳入并增广在使用共线条件方程式的整体平差运算之中，具体处理可分为两种类型：

类型 1：视量测数据为观测值，相对控制中含有观测值时，由条件方程建立观测值的误差方程式：

$$V_\theta=BX-D \tag{12}$$

连同共线条件方程的线性化式：

$$V=AX-L \tag{13}$$

按间接平差方法整体解算。

类型 2：相对控制中，不含观测值时，则相对控制为共线方程式(13)提供的是一种制约条件，从而构成附有条件的间接平差模型。

$$CX+W=0 \qquad V=AX-L \tag{14}$$

按附有条件的间接平差方法求解。

其中：X 为外方位元素和物点坐标的改正数向量；B，D 分别为相对控制的误差方程式之系数和常数阵；A，L 分别为象点坐标误差方程式之系数阵和常数阵；C，W 分别为相对控制的制约条件式之系数阵和常数阵。

相对控制条件能引入到平差系统中，可以部分改变系数矩阵 X 的秩亏状况，例如，量测的物点间距离，自由网系统比例尺就确定了，当尺度已确定，秩亏数为 6 则此时可去掉 S 阵的第七行。同时，相对控制条件的引入，可使平差网形更加稳固。

4 结果与结论

为了验证该理论、方法的正确性测试系统的实际应用的能力，利用笔者在 VISUAL C++下开发的近景目标三维空间模型处理和基于 OpenGL 环境的三维可视化软件，选用 CCD 摄像机进行动态数据采集，对获取的山东科技大学青岛校区的办公、教学大楼的实验数据，在无控制点仅利用相对控制情况下，对办公、教学楼进行环绕摄影，摄取构成立体相对的数字影像序列，后经数字近景摄影测量处理，进行局部三维建模的实验。摄影相机选取 NIKON D1X，像机的 CCD 面阵大小为 23.7*15.6mm，像素行列为 3008*1960，每个像素的大小为 7.88 微米，主距 f=28.9mm。图象文件格式为：TIFF，JPEG。

4.1 结果

表 1

实验方案		1# 教学楼	3# 办公楼
摄站数		55	30
摄影比例尺		1：1000	1：1000
摄影方式		近似正直摄影	交向摄影
物方坐标中误差（mm）	X	0.52	0.47
	Y	0.54	0.45
	Z	0.53	0.48
	P	0.53	0.46
相对误差		10000	12000
模型连接差(pixel)		<10	<8
平均可靠性		0.63	0.65
注：以上均引入距离相对控制和自检校参数，相对误差为分母值			

万方数据

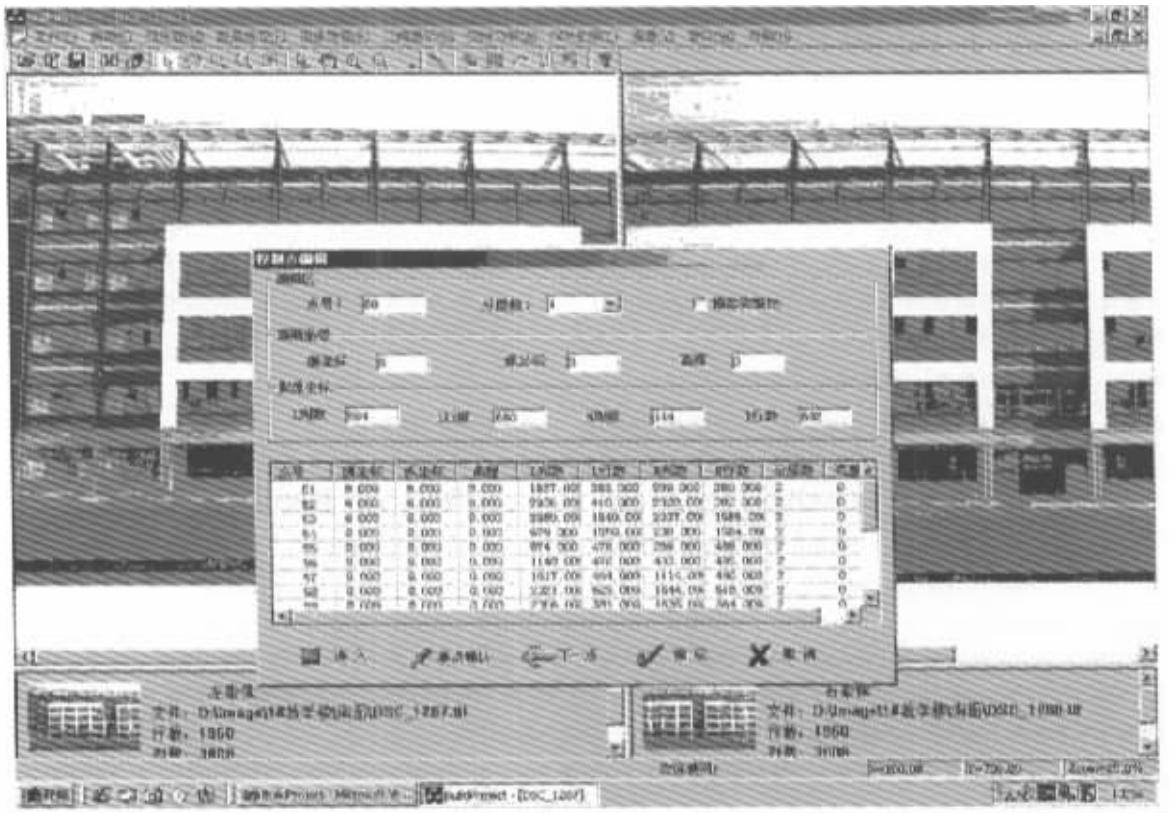


图 4　系统运行界面

数字近景摄影测量自由网光束法平差，包括对构成立体影像序列的逐个立体模型框架内相应坐标点的选取，进行像片内定向、模型的相对定向、模型连接和光束法平差过程。系统界面如图 4。计算结果如表 1，三维可视化结果如图 5。



图 5　利用 OpenGL 构建近景目标计算结果与纹理映射的空间立体模型

4.2　结论

（1）由于构建自由网是以第一个模型的独立坐标系为基准坐标系，所以第一个模型的姿态对后续的处理，影响较大。最好选取正直摄影方式摄影。

（2）自由网的拼接是按逐个模型拼接的结果，误差的传播不可避免，要加入系统误差的改正和相对控制条件的引入，以加强构网的强度。

（3）自由网是以重心坐标系为参考坐标系，当已知模型的方位和在坐标系的坐标时，可方便地纳入到相应的坐标系中。

（4）对于模型空间坐标的解算，是按照逐次收敛迭代的过程，完成空间三维坐标的解算。

（5）与有控制点的经典网光束法平差相比，自由网平差的一个优点是：坐标估值和它的精度不受起始点精度的影响，误差更均匀，总体误差更小。（收稿日期：2004 年 4 月）

参考文献

1.冯文灏.近景摄影测量[M].武汉大学出版社，2002

2.张祖勋，张剑清.数字摄影测量学[M].武汉测绘科技大学出版社，1996

3.马颂德，张正友.计算机视觉[M].北京：科学出版社，1998

4.Robert T Collins.The Ascender System：Automated Site Modeling from Multiple Aerial Image[J].Computer Vision and Image Understanding，1998；72

5.Tanimoto S，Pavilidis T.Hierarchical Data Structure for Picture Processing[J].Computer Graphics and Image Process，4：104~119

6.邵锡惠.军事工程摄影测量[M].北京：解放军出版社，1991

7.陶本藻.自由网平差与变形分析[M].北京：测绘出版社，1984

8.黄维彬.近代平差理论及其应用[M].北京：解放军出版社，1992

9.李德仁.摄影测量平差系统的误差处理和可靠性理论[M].北京：武汉测绘科技大学出版社

10.万刚，陈刚，游雄.虚拟城市中地物几何建模技术的研究[J].北京：测绘学报，2002；31(1)

11.陈爱军，徐光佑，史元春.基于城市航空立体像对的全自动 3 维建筑物建模[J].测绘学报，2002；31(1)

12.贾盛举.近景目标三维建模技术研究[D].博士论文.同济大学，2003-04

万方数据