

计算机视觉摄影测量的数学模型

王丰元^①

孙壮志

周一鸣

(中国农业大学车辆工程学院) (山东工程学院) (中国农业大学车辆工程学院)

摘要 计算机视觉摄影测量模型是通过计算机视觉进行事故现场测量系统设计的基础。根据摄像机成像基本关系,建立了描述空间点及其二维成像间的摄影测量数学模型,考虑了成像系统的对称性镜头畸变误差,建立了线性摄测数学模型,通过试验分析了模型的理论精度和标定精度。

关键词 计算机视觉; 摄影测量模型; 摄像机

中图分类号 TP 391.41

Photogrammetric Model of Computer Vision

Wang Fengyuan

Sun Zhuangzhi

(College of Vehicle Engineering, CAU) (Shandong Institute of Technology)

Zhou Yiming

(College of Vehicle Engineering, CAU)

Abstract The photogrammetric model of computer vision is the fundamental for traffic accident scene measurement system. According to the basic relationship between the spatial points and their image points, the photogrammetric model for camera calibration and scene measurement is built. A linear model is also developed in which the symmetrical lense distortion has been considered. The theoretical and calibration accuracy is analyzed through the experiments.

Key words computer vision; photogrammetric model; video camera

摄影测量是运用电子计算机量测摄影相片并交会使用解析计算方法来研究确定所摄物体的大小、形状、位置、性质和相互关系的一门学科。摄影测量除主要用于航测及地籍测量外,近年来在工程测量中也有应用。一般摄影测量采用照相机成像,根据照片对场景进行分析测量,组成系统复杂、测量周期长,不适合于现场快速操作;因此,笔者考虑到计算机视觉技术的发展,以摄像机为图像输入工具,建立了可完成较大场景及物体测量的摄影测量数学模型,研究出利用计算机视觉进行道路交通事故现场快速测量的系统^[1]。本系统能满足现场测量的实际要求,可提高数据采集的效率和处理的速度。

1 基本摄影测量成像关系模型

为确定空间点在摄像机的成像模型,首先确定摄像机几何坐标系(见图1)。系统由4个坐标系构成,即像平面坐标系 $O-xy$,像空间坐标系 $S-xyz$,图像空间辅助坐标系(摄像站点坐标系) $S'-XYZ$,外部空间坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 。摄像机处于空间任意位置拍摄图像时,空间任一点

收稿日期:1997-11-22

①王丰元,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)213信箱,100083

在成像平面上的成像关系见图1: M 为任一地面目标点, 其物方空间坐标为 (X, Y, Z) , M' 是点 M 在相片上的成像, 其像空间坐标和图像空间辅助坐标分别为 $(x, y, -f)$ 和 (X_M, Y_M, Z_M) 。由摄影成像几何关系可得, 成像时 S, M', M 三点位于同一直线上, 像点的图像空间辅助坐标与地面点物方空间坐标间的基本关系为

$$\frac{X_M}{X-X_0} = \frac{Y_M}{Y-Y_0} = \frac{Z_M}{Z-Z_0} = k$$

即

$$X_M = k(X-X_0), Y_M = k(Y-Y_0), Z_M = k(Z-Z_0) \quad (1)$$

根据正交变换, 像空间坐标与图像空间辅助坐标间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $a_{ij} (i, j=0, 1, 2)$ 为变换系数。式(2)代入式(1), 并考虑像主点坐标 (x_0, y_0) , 可得

$$x - x_0 = -f \frac{a_{00}(X-X_0) + a_{01}(Y-Y_0) + a_{02}(Z-Z_0)}{a_{20}(X-X_0) + a_{21}(Y-Y_0) + a_{22}(Z-Z_0)} \quad (3)$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_{10}(X-X_0) + a_{11}(Y-Y_0) + a_{12}(Z-Z_0)}{a_{20}(X-X_0) + a_{21}(Y-Y_0) + a_{22}(Z-Z_0)} \quad (4)$$

式(3)和(4)即为根据物体成像的共线条件得到的基本摄影测量数学模型。

2 基于三维控制场的线性摄影测量模型

进行解析摄影测量分析时, 图像坐标的测量通常是在坐标量测仪上进行的。将量测仪坐标系变换到物体空间坐标系一般要经过 2 个步骤: 首先以像主点为原点, 将量测仪坐标转换为图像坐标, 然后将图像坐标转换为物体空间坐标。采用计算机视觉进行摄像测量时, 可直接通过数字图像的像素坐标及成像平面几何参数获得目标点的图像坐标, 以完成向物体空间坐标的变换。由式(3), (4)可见, 若已知式中各系数, 可求得图像点 (x_i, y_i) 和空间点 (X_i, Y_i, Z_i) 间的变换关系。这些系数主要包括摄像机内方位元素 (x_0, y_0, f) 、摄站点坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 和与摄像机摄影姿态有关的外方位元素系数 a_{ij} 。而这 2 个关系式是关于以上各系数的非线性关系式, 要求得各系数, 需采用泰勒级数将该式线性化, 构成误差方程组后代入估计初值, 以各系数变化量为控制条件进行迭代计算, 求得各系数的优化近似解。该解法有解的可能性和所需迭代次数同初始估计值与所求真值的接近程度有关, 有时可能产生病态方程, 无法求得优化解^[2]。

为此, 笔者根据解析摄影测量中的共线方程解法, 提出了基于三维物体控制场的线性摄影测量模型, 即

$$x + \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} = 0 \quad (5)$$

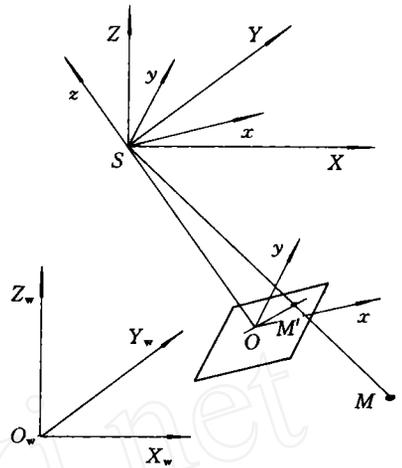


图1 摄像机摄测坐标系及成像关系

$$y + \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} = 0 \quad (6)$$

式中: x, y 为像点的图像平面坐标; X, Y, Z 为空间点的物方空间坐标; $L_i (i=1, 2, \dots, 11)$ 为包含摄像机内外方位元素的变换系数。当物方空间坐标由已知三维控制场给定时, 可由测得的图像坐标求得各未知系数以完成摄像机的标定。

3 考虑成像系统误差的摄影测量模型

图像坐标测量值存在的误差可简单分为系统误差(e_s)和随机误差(e_r), 则图像坐标量测值为 $\bar{x} = x + e_{sx} + e_{rx}$ 和 $\bar{y} = y + e_{sy} + e_{ry}$ 。式中: \bar{x}, \bar{y} 为量测值; x, y 为精确值。将式(5), (6)整理并线性化可得

$$Ae_{sx} + Ae_{rx} + x + L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4 + L_9 x X + L_{10} x Y + L_{11} x Z = 0 \quad (7)$$

$$Ae_{sy} + Ae_{ry} + y + L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8 + L_9 y X + L_{10} y Y + L_{11} y Z = 0 \quad (8)$$

式中 $A = L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1$ 。

在采用非量测相机时, 图像坐标的系统误差主要是由镜头畸变及底片变形引起的像点畸变; 而在应用 CCD 摄像机进行摄影测量的场合, 由于 CCD 各像元位置不变, 像元间存在极好的几何稳定性, 所以, 标定量测时, 只需考虑镜头畸变, 从而简化了设计计算, 提高了量测精度。

在摄影测量中为得到物点与像点的精确比例关系, 必须研究镜头畸变的规律, 从而在硬件系统确定的条件下利用软件技术消除镜头畸变, 得到精确的测量关系, 提高测量精度。镜头畸变分为对称性和非对称性 2 种。对于光学中心与几何中心重合的镜头, 其畸变关于光轴严格对称, 故称为对称性镜头畸变; 镜头组成元件中心不重合而产生的误差为非对称性镜头畸变。在此主要考虑对称性镜头畸变。根据物体成像光学原理和 Seidel 像差理论, 采用二维分量表示的对称性镜头畸变可表示为 $e_{sx} = (x - x_0)kr^2$ 和 $e_{sy} = (y - y_0)kr^2$ 。式中 k 为对称性镜头畸变常数。为达到标定目的并使计算简便, 建立包含成像系统误差在内的摄测模型: $A(x - x_0)kr^2 + x + L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4 + L_9 x X + L_{10} x Y + L_{11} x Z = 0$ 和 $A(y - y_0)kr^2 + y + L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8 + L_9 y X + L_{10} y Y + L_{11} y Z = 0$ 。

4 模型试验及精度分析

为尽可能减少外部控制点和计算量, 达到所需标定和测量精度, 提高标定效率, 笔者对以上各模型进行了试验验证, 以确定合理的模型参数及其表达形式。试验采用普通摄录一体的 CCD 摄像机, 分别从 2 个不同站点, 采用交向方式拍摄多幅图像, 对已建立的三维控制场进行测量, 并按位置、距离、焦距等不同条件, 选择部分图像进行分析。

由式(7), (8)可知, 标定模型的理论精度可通过模型求解后的剩余误差来表示, 即 $\sigma_0^2 = v^T P v / r$ 。式中: $r = n - u$, 为冗余度 (n 为模型方程的个数, u 为未知量的个数); v 为方程求解后的剩余误差 (随机误差部分); $v^T P v$ 是方程求解所得累积误差平方和, P 一般取单位阵, 即认为模型方程求解的各变量等权; σ_0^2 为剩余误差的偏差平方和, σ_0 也称单位权中误差, 该参数是系统标定精度的基本衡量指标, σ_0 越小, 表明对现场标定物的测量基准拟合越准确, 标定及测量的精度越高。标定结果列于表 1, 可以看出 σ_0 均小于 1%, 表明标定模型已对外部标定物的结构参数进行了较高精度的标定。

表1 标定误差分析表

图像	绝对误差/mm						理论误差/ μm	
	不考虑系统误差的模型			考虑系统误差的模型			$v^T P v$	σ_0
	X	Y	Z	X	Y	Z		
A	1.518	1.369	6.053	1.409	1.207	5.066	1.36	6.02
B	1.044	0.864	3.550	1.043	0.896	3.688	1.11	5.52
C	1.284	0.864	3.763	1.286	0.864	3.768	2.00	7.50
D	1.232	1.317	5.490	1.029	1.004	4.066	3.05	8.21
E	1.162	1.220	5.094	1.089	1.215	5.000	1.18	5.89
F	1.369	1.411	6.041	0.902	1.177	5.135	2.31	8.24
G	1.162	1.220	5.094	1.089	1.215	5.007	1.18	5.89
平均值	1.253	1.181	4.998	1.121	1.083	4.533	1.74	6.75

将标定点参数代入标定模型后,得到各个不同坐标方向上模型计算值与实际坐标值的相差程度的绝对量值,如表1所示。表中各参数按如下方法得到,即对第 j 幅图像用模型 m 进行分析时,得到的平均绝对误差为

$$\mu_x(j, m) = \frac{\sum_{i=1}^N |X_i^c(j, m) - X_i(j, m)|}{N} \quad (\mu_y(j, m), \mu_z(j, m) \text{的计算同此})$$

式中: $X_i^c(j, m), Y_i^c(j, m), Z_i^c(j, m) (i=1, 2, \dots, N)$ 是相应方向上各模型计算坐标值; $X_i(j, m), Y_i(j, m), Z_i(j, m)$ 是该方向上点的实际坐标; N 为标定测量点的数量。表中平均值及均方差项为同一模型中对不同图像的标定结果的综合描述,可从总体角度反映不同模型间标定误差的大小,评价模型的标定精度。由表1可见, x 和 y 方向上的绝对差值约为1mm,而 z 方向上约为5mm。造成 z 方向标定误差较大的原因主要是标定时 z 方向外部控制稍差,这一结果是可以加强对该方向的控制来改善的。

5 结 论

根据摄像机成像基本关系,建立了描述空间点及其二维成像间的基本摄影测量数学模型,通过对基于三维控制场的线性数学模型的分析,建立起考虑成像系统对称性镜头畸变误差的实用摄测数学模型。经模型理论精度和标定精度的试验验证,确立了一种通过计算机视觉和摄影测量进行较大场景范围非接触测量的有效方法。

参 考 文 献

- 1 王丰元. 计算机视觉在道路交通事故现场勘察中的应用研究:[学位论文]. 北京:中国农业大学,1997
- 2 Naftel A J, Boot J C. An iterative linear transformation algorithm for solution of colinearity equations. PE & RS, 1991, 57(10):576~582