

# 双目序列影像三维运动参数确定

张剑清<sup>1</sup> 张春森<sup>1</sup> 贺少军<sup>1</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129, 430079)

**摘要:** 结合立体视觉的特点, 介绍了一套双目视觉系统与完整的、由双目序列影像确定场景中目标运动信息的方法。其主要步骤包括相机检校、运动与立体影像的匹配、运动前后三维特征点的对应以及运动参数的求解。并给出了从真实双目序列影像中获取物体匀速直线运动和匀加速直线运动参数的实验结果。

**关键词:** 双目序列影像; 相机检校; 运动参数

中图分类号: TP751

在现有的视觉监控或三维运动估计中, 几乎所有的研究都是基于单序列影像对运动物体的监测与跟踪。基于单序列影像的分析得到的运动信息是相对的, 存在一个与深度有关的尺度因子, 即估计的物体运动位移参数和形状参数与物体真实参数的比例因子。要想得到绝对移动量, 需要一个附加条件<sup>[1]</sup>。由双目序列影像可以得到运动目标特征点不同时刻的三维空间坐标, 根据这些三维位置信息即可计算出目标的运动参数(旋转矩阵  $R$  和平移矢量  $T$ )。由于三维数据的信息量远高于二维图像, 三维估计大为简化, 因此, 基于双目序列影像的运动分析方法不仅能够得到空间的绝对平移量, 而且计算简单。

## 1 双目视觉系统及摄像机检校

本文所介绍的双目视觉系统由双摄像机、云台、影像传输、系统控制等部分组成。摄像机是视频 COLOR CCD HITACHI, 镜头为 128 × ZOOM, AUTO FOCUS  $F = 3.9 \sim 63.0$  mm, 像幅为 240 像素 × 320 像素。两摄像机间的基线可以调整, 一般在 500 mm 左右。

摄像机的检校是双目立体视觉三维定位中必不可少的一个环节, 摄像机检校的精度和可靠性直接影响着立体视觉系统的空间定位精度。通常要在使用前对双目视觉系统的摄像机进行检校, 在监控过程中, 主点应是基本不变的, 且焦距应是

可控的。由于实验系统的普通 CCD 摄像机在对运动目标跟踪定位的过程中, 其焦距是自动变化的, 因此, 研究中采取实时在任检校的方法, 即基于参照物的在线检校。在背景中, 设置了两个相互垂直的已知矩形格网, 利用格网点实时计算每幅影像的参数。图 1 所示即为在任检校的场景。检校模型考虑了各项畸变改正的直接线性变换 (DLT)<sup>[2]</sup>。

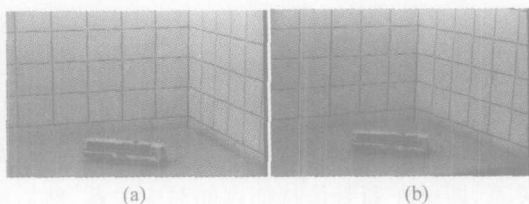


图 1 在任检校场景

Fig. 2 Scene of In-suit Calibration

## 2 影像匹配及空间点的解求

从影像中提取出特征点是匹配的第一步。特征提取采用了计算机视觉界中应用广泛的 Harris 算子<sup>[3]</sup>。

### 2.1 初始匹配

初始匹配的目标是确定一个候选匹配对集合  $T$ , 这里采用了灰度相关法<sup>[4]</sup>。对影像 1 的每个特征点  $m_1(u_1, v_1)$ , 如果影像 2 中的特征点  $m_2(u_2, v_2)$  与  $m_1$  的坐标相差不超过某一阈值, 则计

算以  $m_1, m_2$  为中心的  $(2m+1) \times (2n+1)$  窗口的灰度相关系数  $\rho$  为:

$$\rho(m_1, m_2) = \frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m [I_1(u_1 + i, v_1 + j) - E(I_1)] * [I_2(u_2 + i, v_2 + j) - E(I_2)]}{(2n+1)(2m+1) \sqrt{\sigma^2(I_1) \times \sigma^2(I_2)}} \quad (1)$$

式中,  $I_1, I_2$  分别是两窗口的灰度;  $E(I_1), E(I_2)$  分别是两窗口的灰度均值;  $\sigma_1, \sigma_2$  分别是两窗口灰度的方差。如果认为是候选匹配点, 则相关系数必须大于某一阈值(实验中阈值为 0.8)。搜索窗口的大小通常由先验知识来确定(实验中相关窗口的大小为  $11 \times 11$ )。这样就建立了影像 1 中某一特征点与影像 2 中若干特征点的候选匹配关系, 将该点对加入到候选匹配对集合  $T$  中。

## 2.2 基于松弛法的运动与立体影像匹配

松弛法<sup>[5,6]</sup>是指让  $T$  中的候选匹配对通过迭代, 使得连续性和惟一性得到最大的满足。或可表述为: 如候选特征点是正确的匹配, 则其周围存在较多相容的候选特征点; 如候选征点不是正确的匹配, 则其周围很少有相容的特征点。对每一对候选匹配定义其初始匹配概率后, 根据相容性修正匹配概率。进行迭代处理, 一直到除最可能的匹配点对以外其余所有点对的匹配概率均小于给定的阈值为止<sup>[5,6]</sup>。

由三维对应特征点计算运动信息时, 其不同时刻三维特征点的有效对应是一难点。利用上述影像匹配方法, 通过对运动与立体匹配关系的合理组合, 可有效地解决这一难点。即首先对不同时刻左(右)影像进行运动目标特征点的提取及松弛法匹配, 获取不同时刻左(右)影像特征点的对应关系, 即单序列影像特征点的对应关系; 然后根据单序列影像匹配结果进行立体匹配, 利用运动匹配确定的左(右)影像特征点寻找同一时刻的右(左)影像上的匹配点, 以获得运动前后不同时刻影像对应的像点。

## 2.3 空间点的解求

通过特征点提取及影像匹配等获得运动目标上任意特征点的左右像点坐标后, 即可求得该物方特征点的空间坐标  $(X, Y, Z)$ 。设两影像的系数分别为  $(L_1, L_2, \dots, L_{11})$  与  $(L'_1, L'_2, \dots, L'_{11})$ , 特征点的左右像点坐标分别为  $(x, y)$  与  $(x', y')$ , 由直接线性变换公式<sup>[2]</sup> 可得以下线性方程组, 从而可解算特征点的空间坐标  $(X, Y, Z)$ :

$$\begin{bmatrix} L_1 + xL_9 & L_2 + xL_{10} & L_3 + xL_{11} \\ L_5 + yL_9 & L_6 + yL_{10} & L_7 + yL_{11} \\ L'_{11} + x'L'_9 & L'_{12} + x'L'_{10} & L'_{13} + x'L'_{11} \\ L'_{15} + y'L'_9 & L'_{16} + y'L'_{10} & L'_{17} + y'L'_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_4 + x \\ L_8 + y \\ L'_{44} + x' \\ L'_{84} + y' \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

## 3 三维运动参数的确定

在立体匹配与序列影像匹配的基础上, 可得到三维空间的点序列, 由三维空间的点序列可对物体的运动参数进行估计。

### 3.1 三维运动参数估计的基本方法

根据动力学和空间解析几何理论可知, 刚体在三维空间的运动可分解为旋转和平移。设运动刚体上任意特征点  $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$  在  $t$  时刻的三维坐标为  $(X, Y, Z)^T$ , 经时间  $\Delta t$  运动至特征点  $P'_i (X', Y', Z')^T$ , 而  $P_i$  与  $P'_i$  的对应关系为:

$$P'_i = RP_i + T \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中,  $R$  为  $3 \times 3$  的旋转正交矩阵;  $T$  为平移矢量,  $T = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$ 。这样, 从序列影像中确定运动目标的三维运动参数即确定上述方程中的旋转矩阵  $R$  与平移矢量  $T$ 。根据方程(3), 假定目标上在运动前后有三个特征对应点, 则有:

$$R \begin{bmatrix} P_1 - P_2 \\ P_2 - P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_1 - P'_2 \\ P'_2 - P'_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

方程(4)是一个关于  $R$  的线性方程, 有惟一解的条件是系数矩阵的秩不小于 2, 即  $P_1 - P_2$  与  $P_2 - P_3$  非共线。只要获得目标上 3 个以上非共线的三维特征点, 就可惟一确定出该目标的三维运动参数。为保证精度与计算速度, 实际计算采取对三维特征点的坐标重心化的方法。设三维特征点集  $\{P_i\}$  和  $\{P'_i\}$  的重心为:

$$P_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad \bar{P}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P'_i \quad (5)$$

则有:

$$\bar{P}' = RP_4 + T$$

可得:

$$(P'_i - \bar{P}')^T R = (P_i - P_4)^T \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

解出旋转矩阵  $R$  后, 平移分量即可按下式计算:

$$T = \bar{P}' - RP_4 \quad (7)$$

### 3.2 旋转矩阵 $R$ 的解求

直接计算  $R$  的 9 个分量存在算法复杂, 所得

解不正交、可靠性差等缺点。由于旋转矩阵中只有 3 个独立变量, 选取这 3 个独立变量进行计算, 对于减少计算量、提高算法的可靠性是极为有利的。本文采用基于反对称矩阵分解的方法计算三维运动旋转参数, 既能减少计算量, 又实现了线性运算。

由 Cayley 定理知<sup>[8]</sup>, 一个三维正交矩阵  $R$ , 如果满足  $I + R$  是满秩的, 则可将其惟一地由三维反对称矩阵  $S$  和单位阵  $I$  分解为如下形式:

$$R = (I + S)(I - S)^{-1} \quad (8)$$

式中,

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = \frac{1}{1 + a^2 + b^2 + c^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 + a^2 - b^2 - c^2 & 2ab - 2c & 2ac + 2b \\ 2ab + 2c & 1 - a^2 + b^2 - c^2 & 2bc - 2a \\ 2ac - 2b & 2bc + 2a & 1 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(8)代入式(6)有:

$$(P'_i - \bar{P}')^T (I + S) = (P_i - \bar{P})^T (I - S) \quad (10)$$

解方程(10)即得独立变量  $a, b, c$ , 从而得到旋转矩阵  $R$ 。

## 4 实验结果

### 4.1 匀速直线运动

利用双目视觉系统, 对一在  $XY$  平面上作匀速直线运动的玩具小车等时间间隔地依次获取 8 个不同位置的立体序列影像对(每一时间间隔内,  $\Delta X = 17.6 \text{ mm}$ ,  $\Delta Y = -17.6 \text{ mm}$ ), 对此运动目标双目序列影像的三维运动参数进行了解算。表 1 给出了 7 个时间间隔内旋转角度与平移向量的计算结果; 表 2 给出了 7 个时间间隔内目标在  $X, Y$  方向运动的计算结果与真实值比较的误差, 在  $X$  与  $Y$  方向的平均偏移误差分别为  $2.7 \text{ mm}$  与  $2.5 \text{ mm}$ ; 表 3 为根据上述方法求出矩阵  $R$  与矢量  $T$  后, 通过方程(3)计算运动目标上  $t$  时刻任意特征点  $P_i(X_i, Y_i, Z_i)^T$  经时间  $\Delta t$  运动后对应特征点的三维坐标  $P'_i(X'_i, Y'_i, Z'_i)^T$ , 与由重建所得  $t + \Delta t$  时刻对应特征点的三维坐标  $P''_i(X''_i, Y''_i, Z''_i)^T$  间的中误差, 其中  $i = 1, 2, \dots, 16$ 。

### 4.2 匀加速直线运动

设物体以加速度  $2 \text{ cm/s}^2$  作匀加速直线运动, 初始速度为 0。左右摄像机分别在  $t_1, t_2, \dots,$

表 1 角度与平移向量的计算结果

Tab. 1 Results of Rotational Angle and Translation Vector

	$\varphi/(\circ)$	$\omega/(\circ)$	$\kappa/(\circ)$	$\Delta X/\text{cm}$	$\Delta Y/\text{cm}$	$\Delta Z/\text{cm}$
1	1.439 006	1.104 751	0.737 537	1.74	-1.70	-0.49
2	-4.010 399	-3.376 598	-0.891 974	1.78	-1.36	1.27
3	0.816 508	1.320 509	-2.736 706	1.35	-1.40	-0.13
4	-2.084 656	-1.176 902	-1.107 007	1.95	-1.23	0.92
5	0.428 672	1.241 595	-1.233 721	1.23	-1.71	-0.55
6	2.688 088	2.701 891	-0.868 271	1.18	-1.63	-1.16
7	-1.932 762	-1.438 182	-0.946 721	1.93	-1.55	0.81

表 2  $X, Y$  方向的平移误差/cm

Tab. 2 Errors of the Moving Point in  $X, Y$  Directions

	1	2	3	4	5	6	7
$d_{\Delta X}$	-0.00	-0.00	-0.04	0.18	-0.54	-0.59	0.16
$d_{\Delta Y}$	-0.01	-0.04	-0.04	0.54	-0.06	-0.14	-0.22

表 3 对应特征点的计算值与真实值的中误差/cm

Tab. 3 Root Mean Squares Errors of Moving Points

	1	2	3	4	5	6	7
$m_x$	0.27	0.15	0.22	0.37	0.08	0.16	0.34
$m_y$	0.29	0.13	0.23	0.33	0.10	0.18	0.29
$m_z$	0.25	0.17	0.12	0.26	0.06	0.16	0.22

$t_8$ 时刻(等时间间隔)获取影像序列, 采用二次外推的方法给出运动物体  $t_4, t_6, t_8$ 时刻位置的预测值。通过计算控制所建双目视觉系统云台上摄像机的水平左右摆动或上下仰俯运动的旋转量, 能够保证运动目标再次处于视场中央, 即满足摄像机跟踪的要求。对于匀加速直线运动物体的跟踪结果如表 4 所示, 其中  $X, Y, Z$  为  $t_4, t_6, t_8$ 时刻运动物体相对于  $t_1$ 时刻位置的估计值,  $S_{估}$  为由  $X, Y, Z$  计算得出的相对于  $t_1$ 时刻位置的估计位移量,  $S_{真}$  为  $t_4, t_6, t_8$ 时刻运动物体相对于  $t_1$ 时刻位置的实际距离,  $\Delta S = S_{估} - S_{真}$ 。

表 4 匀加速直线运动跟踪结果/cm

Tab. 4 Tracing Results of the Linear Motion with Uniform Acceleration

	$X$	$Y$	$Z$	$S_{估}$	$S_{真}$	$\Delta S$
$t_4$	-0.75	0.57	0.02	0.94	0.90	0.04
$t_6$	-2.03	1.61	0.01	2.59	2.50	0.09
$t_8$	-4.05	3.07	-0.00	5.09	4.90	0.19

## 5 结 语

本文将摄影测量与计算机视觉有效地结合, 得出了一套完整的由双目序列影像确定目标运动参数的方法, 有效地解决了运动目标三维特征点的对应问题, 实现了对作匀速直线运动与匀加速直线运动物体的跟踪定位。进一步的工作是在现有工作的基础上, 对物体任意运动的跟踪定位。

## 参 考 文 献

- [1] 马颂得, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [2] 冯文灏. 近景摄影测量——目标外形与运动状态的摄影法测定[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002
- [3] Harris C, Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector[C]. The 4th Alvey Vision Conference, Manchester, 1988
- [4] 张剑清, 王树根, 潘励. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003
- [5] Zhang Zuxun, Zhang Jianqing, Wu Xiaoliang, et al. Global Image Matching with Relaxation Method[C]. The International Colloquium on Photogrammetry, Remote Sensing and Geographic Information Systems, Wuhan, China, 1992
- [6] Zhang Zuxun, Derche R, Faugeras O, et al. A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry[J]. Artificial Intelligence, 1995, 78(1/2): 87-119
- [7] Aggarwal J K, Nandhakummar N. On the Computation of Motion from Sequences of Images: a Review[J]. IEEE, 1988, 76(8): 917-935
- [8] 徐文立, 刘文煌. 由特征点的空间位置估计运动参数[J]. 自动化学报, 1992, 18(4): 440-447

第一作者简介: 张剑清, 教授, 博士生导师。现主要从事数字摄影测量、计算机视觉的研究。

E-mail: jqzhang@supresoft.com.cn

## 3D Motion Parameters Determination Based on Binocular Sequence Images

ZHANG Jianqing<sup>1</sup> ZHANG Chunsen<sup>1</sup> HE Shaojun<sup>1</sup>

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In this paper, a binocular vision system and a method for determining 3-D motion parameters of an object from binocular sequence images are introduced. The main steps include camera calibration, the matching of motion and stereo images, 3-D feature point correspondences and resolving the motion parameters. Finally, the experimental results, acquiring the motion parameters of the objects with uniform velocity and acceleration in the straight line based on the real binocular sequence images by the mentioned method, are presented.

**Key words:** binocular sequence image; camera calibration; motion parameter

**About the first author:** ZHANG Jianqing, Ph.D supervisor, professor, majors in photogrammetry, computer vision

E-mail: jqzhang@supresoft.com.cn

(上接第 22 页)

could be achieved. Epoch-by-epoch 3D RMS calculated from postfit residuals of observations in both kinematic and static case is smaller than 3 cm. The external RMS calculated from epoch-by-epoch differences between the PPP solution and double-differenced solution with kinematic data shows that horizontal RMS is smaller than 5 cm, vertical RMS is better than 10 cm. Making differences epoch by epoch between PPP simulated kinematic solution and known coordinate of static base station derives RMS shows that horizontal RMS is smaller than 3 cm, vertical RMS is better than 5 cm.

**Key words:** kinematic precise point positioning; no ground base station; airborne survey

**About the first author:** ZHANG Xiaohong, associate professor, Ph.D, majors in the theory and applications of satellite positioning technology and airborne laser scanning technology.

E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn