

单站光测图像确定空间目标三维姿态方法综述

Summary of approach of determination of object's 3D pose from mono-view

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所; 2.中国科学院研究生院)杨丽梅^{1,2} 郭立红¹ 曹西征^{1,2}

Yang, Limei Guo, Lihong Cao, Xizheng

摘要: 光学设备作为重要的测量手段, 其图像记录了空间目标的轨迹及姿态信息。三维姿态是反映空间目标运动状态的重要参数, 对目标的优化设计、故障分析有重要意义。回顾了摄影测量学和计算机视觉中的单站光测图像三维姿态的各种求解方法, 并对各种方法进行了分析、比较。

关键词: 三维姿态; 光学测量; 图像处理

中图分类号: TP311 文献标识码: A

Abstract: Optical devices are main measurement method and its image has information about object's track and pose. 3D pose is an important parameter to object's movement which has vital meaning to optimized design and fault analysis. In this paper the solution to mono-view pose in photogrammetry and computer vision is viewed, categorized and compared with.

Key words: 3D pose; optical measurement; image processing

1 引言

在靶场试验中, 三维姿态参数是反映空间目标运动状态的重要参数, 获得这些参数对目标的运动分析、优化设计、故障分析等有着重要的意义。目前, 一般用遥测设备获得目标的三维姿态信息。但高精度遥测造价高, 占用有效载荷, 也有发生故障造成数据无法获取的可能。对于小型导弹、飞船逃逸塔, 往往不带遥测发射机, 而它们的三维姿态参数却极为重要, 光学设备(经纬仪、弹道相机等)作为重要的测量手段, 其图像记录了空间目标的轨迹及姿态信息, 此时可用光测图像实现目标三维姿态的测量。

目前利用两站或多站图像获得目标姿态的方法较多, 但该方法涉及到立体匹配。实际试验中, 有时只有一站经纬仪(摄像机)记录有清晰的图像, 而其它站点目标图像不可用或根本没有捕捉到目标。因此, 研究单站光测图像测量目标的三维姿态具有重要的应用价值。

2 空间目标三维姿态定义

三维姿态是反映空间目标的重要参数。近年来随着武器装备技术含量的增加, 国内外各靶场都迫切希望精确测量空间目标的三维姿态。三维姿态是指目标的俯仰角、偏航角、滚动角, 可用直角坐标系中的欧拉角描述: 绕 x 轴旋转角 θ , 角 θ 是光轴的俯仰角, 亦称垂直角; 绕 y 轴旋转角 ω , 角 ω 是光轴的偏航角, 亦称水平角; 绕 z 轴旋转角 ϕ , 角 ϕ 表示光轴滚动角或扭转

角。各角度旋转正方向定义为从坐标系原点沿各轴正方向观察时的逆时针旋转方向。对于空间目标来说, 目标多为刚体, 且目标一般为圆柱体和圆锥体的组合, 这里只研究刚体的情况。

3 姿态求解方法

空间目标三维姿态求解方法的实质就是利用光测图像中包含的已知信息, 计算出目标的俯仰角、偏航角和滚动角。下面对几种典型算法进行介绍并比较与评价各自的性能特点。

3.1 直接线性变换法

直接线性变换(DLT)法是以共线条件方程为基础, 通过解线性方程的手段求得三维姿态参数, 它既不需要在像片上的框标, 也不需要摄影机内外方位参数的起始近似值。而是建立坐标仪坐标与目标空间坐标直接关系式的算法。特别适用于非量测摄影机所拍摄片或影像的摄影测量处理, 当控制点精度高, 摄影状态良好时, 待定点也能获得较高精度, 现已成为近景摄影测量处理的重要组成部分, 在实际测量工作中获得了广泛的应用。

直接线性变换方法的模型可用下式来描述:

$$u = \frac{x_w l_{00} + y_w l_{01} + z_w l_{02} + l_{03}}{x_w l_{20} + y_w l_{21} + z_w l_{22} + l_{23}} \quad (1)$$
$$v = \frac{x_w l_{10} + y_w l_{11} + z_w l_{12} + l_{13}}{x_w l_{20} + y_w l_{21} + z_w l_{22} + l_{23}}$$

其中 (x_w, y_w, z_w) 是三维空间目标的控制点坐标, (u, v) 是图像上对应于三维控制点的图像点的坐标, l_{ij} 是直接线性变换方法的待定参数。此时未考虑摄像机成像时的镜头畸变等因素。不失一般性, 令 $l_{23}=1$ 。若已知 N

杨丽梅: 博士 讲师

基金项目: 国家 863 计划(863-703 主题基金)

($N>5$) 个空间目标的控制点坐标及其相对应的图像上的坐标,用最小二乘法计算出 11 个参数。即可计算出目标的俯仰角、偏航角和滚动角。

3.2 弱透视投影法

弱透视投影是一个带有比例因子的正交投影。在弱透视投影中,假设物体平面与图像平面平行,物体平面上的点 P_i 首先沿平行于光轴的方向垂直投影到参考点 P_0 所在平面上,且此平面平行于图像平面,连接投影中心与此点的连线,交图像平面于点 P_i^w ,如图 1 所示。

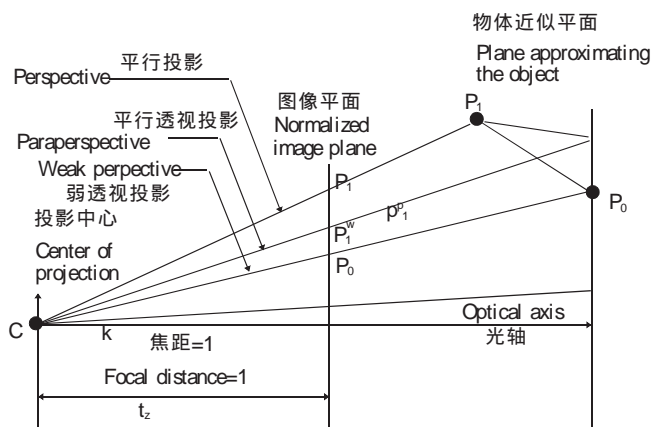


图 1 弱透视投影和平行透视投影

Fig.1 weak perspective and paraperspective projection

文献 1 中给出了弱透视投影下,刚体的旋转矩阵和平移矩阵分别为 R 和 T 时的姿态参数的求解方程:

$$x_i = \frac{I' \cdot P_i + x_0}{1 + \varepsilon_i} \quad y_i = \frac{J' \cdot P_i + y_0}{1 + \varepsilon_i} \quad (2)$$

$$R = [I \quad J \quad K]^T \quad T = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T$$

其中: (x_0, y_0) 是 p_0 点坐标, I' 和 J' 是 I 和 J 与 t_z 的比值, ε_i 是 $K \cdot P_i$ 与 t_z 的比值。

弱透视投影下,在上面的公式(2)中,假设

$$\frac{1}{1 + \varepsilon_i} \approx 1 \forall i, i \in \{1, 2, \dots, n\}, \text{ 则 } \begin{cases} x_i^w = x_i (1 + \varepsilon_i) \\ y_i^w = y_i + (1 + \varepsilon_i) \end{cases} \quad (3)$$

利用公式(3)可计算出空间目标的俯仰角、偏航角和滚动角。弱透视投影法是一种从 2D 图像到 3D 目标点和线对应基础上的姿态计算的一种快速方法,它的收敛特性依赖于物体偏离光轴的平移。该算法通用性较强,适合用于复杂的场景中。

3.3 平行透视投影法

平行透视投影法是透视法和平行透视法的一个综合。在平行透视投影中,假设物体平面与图像平面平行,物体平面上的点 P_i 首先沿平行于 P_0P_0 的方向投影到参考点 P_0 所在平面上,且此平面平行于图像平面,连接投影中心与此点的连线,交图像平面于点 P_i^p ,如图 1 所示。平行透视投影下,在上面的公式(2)中,假设

$$\frac{1}{1 + \varepsilon_i} \approx 1 + \varepsilon_i \forall i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

则

$$\begin{cases} x_i^p = x_i (1 + \varepsilon_i) - x_0 \varepsilon_i \\ y_i^p = y_i + (1 + \varepsilon_i) - y_0 \varepsilon_i \end{cases}$$

(4)

利用公式(4)可计算出空间目标的俯仰角、偏航角和滚动角。平行透视成像模型算法的速度非常快,收敛速度是弱透视投影的 2~3 倍,且物体与摄像机的距离越近,收敛速度越快;平行透视投影是透视投影的最佳近似,它的近似程度要比弱透视投影法好,并且保留着特征点坐标与图像点坐标之间的线性关系。平行透视成像模型法精确度较高,是一种从 2D 图像到 3D 目标点和线对应基础上的姿态计算的快速方法,适合用于复杂的场景中。

3.4 目标圆环椭圆度法

就圆柱体来说,在空间投影时,除退化情况外,一般得到椭圆,椭圆长轴与短轴之比称为椭圆度,根据椭圆度可以计算出空间圆的姿态,此时椭圆的长轴等于空间圆的直径,如图 2 所示。通过提取图像中椭圆的边界点,然后用椭圆曲线拟合的方法得到椭圆长短轴和方向信息,椭圆短轴所在直线 AA' 与 OX 轴的夹角等于空间圆柱偏航角。图中 a 和 b 分别是椭圆的长轴和短轴,则

$$\varphi = \arcsin^{-1}(b/a) \quad (5)$$

这种方法适用于小视场远距离拍摄的情况,此时目标成像可以近似看作平行投影。但当圆柱体俯仰角增大时,圆柱体起始母线与螺旋线的投影都将变短,它们交点的定位精度降低,测量误差将增大。俯仰角接近 90 时,起始母线与螺旋线分别退化为一个点和一个圆,这时无法获得偏航角。

3.5 目标长宽比方法

空间圆柱体投影时,除退化情况外一般得到矩形外加两个半椭圆。根据矩形的长宽比可计算出空间圆柱体的姿态。从图 3 中可以看出,椭圆短轴所在直线 AA' 与矩形长边平行,此时直线 AA' 与 OX 轴的夹角等于空间圆柱偏航角。设空间目标的实际高度为 L ,空间目标的表面直径为 D ,投影后目标的高度为 L' ,椭圆的长轴为 D' 。投影图像目标长宽比与实际目标长宽比的比值的反余弦:

$$\varphi = \arccos \frac{L'/D'}{L/D} \quad (6)$$

从(6)式可以看出,由于函数的特点,当俯仰角接近于 0 时函数值变化不敏感,此时测量误差将较大。

3.6 测量目标滚转角的螺旋线法

空间目标的滚动角在二维图像中是难以在光测图像中获取的。因此,通过光测图像求解滚动角必须采用特殊的方法。可在目标体表面人为的做上特殊标志线,测量标志线的运动变化来确定目标滚动角,其

中的一种方法是螺旋线标志法。做螺旋线标志时,要求目标滚动,螺旋线也随之转动,则螺旋线在光学仪器上所成的图像也是变化的。

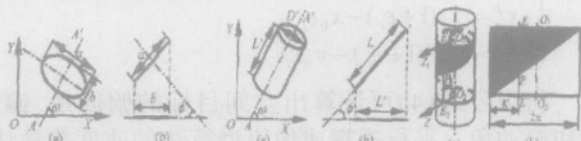


Fig.2 Method of elliptical degree Fig.3 Method of ratio to length and width Fig.4 Method of spiral marking

在空间目标的表面作上螺旋线标志,滚动角定义为中轴线与投影方向线所成平面和中轴线与螺旋线起始母线所成的平面之间的夹角,如图4中的 $\angle O_1$ 或 $\angle O_2$ 。测量时,首先提取空间目标的中轴线,然后确定目标中轴线上螺旋线边缘的位置。由此可以得到圆柱体目标螺旋线标志的起始位置相对于过摄影系统光心和目标中轴线的平面的滚动角为:

$$\theta = 2\pi EP/O_1O_2 \quad (7)$$

当图像为序列图像时,图像二值化后,可获得目标转动前后的图像,得到目标转动前后的螺旋线的位置,可明显看到转动后二值图像相对于转动前二值图像中的像素的上下移动。图5a为目标转动前的图像,图5c为目标转动前的二值图像;图5b为转动后的图像,图5d为转动后的二值图像。设图5c的对应矩阵为b。图5d的对应矩阵为D,则二者间有差矩阵: $E=D-B$

矩阵E必然与滚动角及螺旋线方程有特定函数关系。反映在二值图像上,像素点上下移量与转动角成正比。因此,根据有差矩阵可得滚动角。螺旋线移动距离与滚动角的关系可以事先标定。

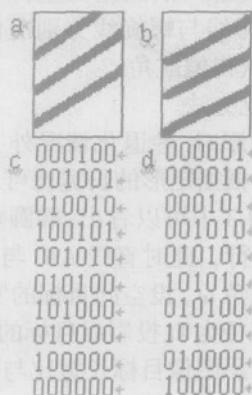


图5 螺旋线法

Fig.5 Method of spiral marking

4 结论

前面对几种典型的姿态求解方法做了描述。可以看出,前三种方法是建立在已知空间目标特征点三维坐标的基础上的,此时目标特征点与图像点的对应是一个关键问题,它直接影响到姿态求解的精度。后三种方法是针对光测图像目标多为圆柱体形状,而且目

标距摄像机距离较大。此时,采用平行投影模型,充分利用目标几何形状上的约束条件来求解目标的三维姿态。在图像质量中等的情况下,后三种方法的精度要优于前三种方法。

参考文献:

- [1]Fadi Dornaika and Christophe Garcia. Pose estimation using point and line correspondences [A].Real-Time Imaging ,1999(5): 215- 230.
- [2]YU Qi- Feng ,SUN Xiang- Yi ,QIU Zhi- Qiang. Approach of determination of object' s 3D pose from mono-view[J].Optical technique ,2002 28(1) :77- 79.
- [3] LI Yong- Bin ZHANG Chang- Bing.A new method to get tridimensional gesture of flying target[J].Laser technology ,2003 27(3) : 185- 189.
- [4]Alfred M.Bruckstein ,Robert J.Holt. Trifocal tensors for weak perspective and paraperspective projections. Pattern Recognition , 2001(34) 395- 404.
- [5]宋峰,王俊璞,金志华. PDA 在电子罗盘姿态显示中的应用[J]微计算机信息 2005,3:111- 112

作者简介:杨丽梅,(1974.12—),女(汉族),吉林松原人,讲师,博士研究生,主要研究方向为计算机视觉与图像处理 E-mail: yanglm2007@eyou.com。郭立红(1964.8—),女(汉族),吉林舒兰市人,研究员,博士生导师,主要研究方向为 Windows2000/NT 底层开发技术、计算机控制、星体自动化标校等。

(130033 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 杨丽梅 郭立红 曹西征

(100039 中国科学院研究生院)杨丽梅 曹西征

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun130033, China) Yang,Limei Guo,Lihong Cao,Xizheng

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing100039 China) Yang,Limei Cao, Xizheng

通讯地址:(130033 长春市东南湖大路 16 号中科院长春光机所光电对抗部)杨丽梅

(投稿日期:2005.9.16) (修稿日期:2005.10.26)

书 讯

《变频器与软启动器应用 200 例》
110 元 / 本(免邮资)汇至

《现场总线技术应用 200 例》
110 元 / 本(免邮资)汇至

地址:北京海淀区皂君庙 14 号院鑫雅苑 6 号楼 601 室
微计算机信息杂志收 邮编:100081
电话:010-62132436 010-62192616(T/F)