

文章编号: 1001-3806(2003)03-0185-05

飞行目标 3 维姿态测量的新方法

李永斌 张昌兵

(西昌卫星发射中心, 西昌, 615000)

摘要: 针对传统光测方法通常用于测量目标的点运动轨迹, 而难以获得目标的 3 维姿态参数的情况, 提出用数字图像处理手段, 对目标图像建立特征点, 结合特定的算法, 得出目标的俯仰角、偏航角、滚动角、漂移量等 3 维参数, 从而获取更多的目标姿态参数的新方法。

关键词: 光测设备; 数字图像; 3 维姿态; 测量方法

中图分类号: V556 **文献标识码:** A

A new method to get tridimensional gesture of flying target

Li Yongbin, Zhang Changbin

(Xichang Satellite Launch Center, Xichang, 615000)

Abstract: Aiming at the situation that traditional optical measurement method is usually used in particle position measurement of a target, but it is difficult to measure the tridimensional gesture of a target, a method of digital image processing is put forward to get more gesture parameters of the target. Characteristic spots are set up in image, combined with specific arithmetic, some tridimensional parameters, such as elevation, yaw, roll, shift, can be educed.

Key words: optical equipment; digital image; tridimensional gesture; measurement

引言

光学设备(经纬仪、弹道相机等)作为重要测量手段,其图像记录了飞行目标的轨迹及姿态信息。过去由于各种条件的限制,通常是将目标作为质点处理,这样只能得到目标的运动轨迹,而难以获得反映飞行目标运动特征的 3 维姿态参数:俯仰角、偏航角、滚动角、漂移量。

目前,一般用遥测设备获得目标的俯仰、偏航、滚动等姿态信息。但高精度遥测造价高,占用有效载荷,也有发生故障造成姿态数据无法获取的可能。对于目标起飞段及再入段,背景信号复杂,遥测信号处理有一定难度。对小型导弹、飞船逃逸塔,它们往往不带遥测发射机,而它们的 3 维姿态参数却极为重要,这时目标的姿态就可以通过光测图像来获得。

目标的漂移量是指目标起飞时,其上、中、下部偏离铅垂线的程度。微小的漂移可造成目标远程飞行的巨大偏差,参数意义重大。由于漂移一般很小,遥测也难以记录,目前,采用几台高速摄影的胶片来

记录漂移量。但胶片记录处理的自动化程度很低,漂移量的获取很不方便。

随着计算机应用技术的发展和图像处理技术的进步,应用需求的提高,充分挖掘光学图像信息,用光测图像测量目标 3 维姿态已经成为可能。这种方法可在不增加任何外测设备的条件下,用一台或多台现有光测仪器,通过数字图像处理,改变判读和处理方法,就可得到 3 维姿态参数。在现有的条件下,运用光测图像进行数字化处理,采用特殊方法获取目标 3 维参数就有了可能,并且成为光测技术的一个发展方向。

1 传统光测图像处理的不足

目前,传统光测仪器通常将目标作为质点测量,质点是不能认为有俯仰、偏航、滚动的。因此,也就得不到目标的 3 维姿态参数,仅能反映目标运动轨迹及速度。

实际上,现行光测设备记录的光学图像(胶片、电视)上已记录了目标的姿态信息(俯仰角、偏航角、滚动角、漂移量),但是由于受记录介质、计算机处理速度和数字图像处理技术的局限,对光测图像的处理主要是基于半自动判别,人为干预较多,能够识别提取的信息有限。光学图像上虽然记录了姿态信

作者简介:李永斌,男,1971 年 10 月出生。工程师。现从事航天测控方面的研究工作。

收稿日期:2002-07-03;收到修改稿日期:2002-10-25

息,但是要把3维姿态表达出来,需要提取的图像信息量不仅十分巨大,而且还比较困难。例如,在火箭起飞漂移量的测量中,对每一幅图像都需要人工识别姿态,确认火箭上相应标志的位置。这种处理方式的自动化程度必然很低,工作量巨大,算法复杂,还带来人为判读的随机误差,精度不高。所以,目前一般不使用光学图像来获取3维姿态信息,光测图像中包含的姿态信息也只能是一种感官意义上的信息。

2 目标3维姿态测量的实现

3维姿态反映的是特定形状目标各部分在立体空间的位置变化。要得到目标(如运载火箭)的3维姿态,必须获得目标的整体运动信息,而不能是局部信息。在图像的处理上,要对图像进行数字化处理,建立目标特征点,根据特征点位置的变化来确定目标的3维参数变化。下面介绍的是一种用光测图像测量飞行目标3维姿态的新方法,它包括3个过程:(1)图像的数字化预处理;(2)目标与背景的分离;(3)数字图像进行3维姿态的计算。

2.1 图像的数字化预处理

计算机技术及图像处理技术的发展使得图像的采集、数字处理变得极为方便,应用中不仅可以事后处理,而且可以满足较高的实时性需求。这里先简略的介绍图像数字化预处理^[1]的基本过程:(1)模拟信号经过A/D转换,得到数字图像,这种原始图像是2维的,包含噪声、畸变;(2)用直方图技术进行图像增强;(3)图像的去噪平滑,用于去除光电转换及数字化过程中的噪声;(4)图像锐化,目的是加强图像中的边缘轮廓及细节。微分尖锐是边缘增强中最常用的一种。在边界处,图像灰度变化最大,梯度最明显,背景及其它地方,灰度不变化或微变。由此可建立明显的图像轮廓。

2.2 目标与背景的分离

图像锐化后,再将图像分为两个区域。图1为某光测设备跟踪目标经过数字化采集处理后的图像,目标区为TR,围绕目标的外框区称为背景区BR。第1幅图像的划分由手工完成,划分的原则是BR区尽可能靠近目标,但不允许目标进入其中。这样BR区只含有背景区的灰度特征,不含有目标的灰度特征。而目标区既含有目标,又含有背景的灰度特征。只要实时的获取BR,TR区的灰度特征,再加以比较,就可以将目标区TR中属于目标的像素点分离出来^[2]。

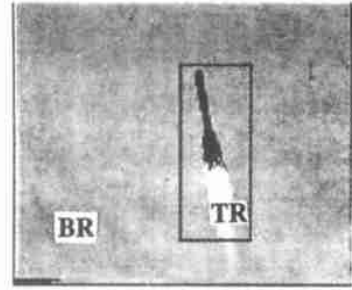


Fig. 1 Picture of tracing window

目标区和背景区的灰度分布可以用直方图来表示,如图2所示,统计出目标区的直方图为 $hT(x)$,背景区的直方图是 $hB(x)$ 。由于目标区与背景区的像素分布必然有所差异,它们的直方图分布也不相同,因此,将各自形成一个峰。但是目标区还是含有少量背景,目标区直方图也就和背景区有少量重合。

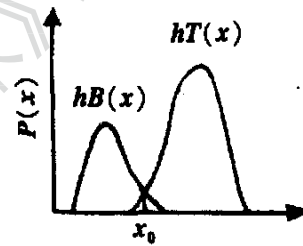


Fig. 2 Image Histograms

只要能实时统计出TR,BR区的灰度直方图,即可以建立实时分类原则。这种分类方法是只依据像素的灰度级(亮度)就可以判断像素点的属性:属于目标的像素赋值为1(或0),属于背景的像素点赋值为0(或1)。这样实测图像变成了一幅二值图像。对于光测图像而言,人们最关心的是一个点是否属于目标点,而对于目标点的灰度值大小并不是特别关心。因此,经过一系列处理,将原始图像变为二值图像是可以接受的。

由于BR区只含有背景区像素的灰度,因此,只要将TR区中灰度级等于BR区灰度级的像素去除,即可将目标与背景完全分离。在算法中,可以通过建立分类统计表的方法实现:创建一个8位256级的分类表,如表1。该表的上一行是地址,即像素灰度级;表的内容是0(背景)或1(目标),该表相当于一个像素分类的标尺。统计出背景区BR的所有像素分布,如果BR区中某像素灰度为 x ,则地址为 x 的表的内容为0(背景)。如果BR区所有像素的灰度都不是 y ,则灰度 y 对应的表中的内容为1(目标)。

Table 1 Table of pixel classification

classification		classification	
grey level	of	grey level	of
	picture element		picture element
00000000	0	00010000	1
00000001	0	00010001	1
00000010	0	1
00000011	0	11111100	1
.....	0	11111101	1
00001110	0	11111110	1
00001111	1	11111111	1

分类表制作完成后,逐个的将目标区 TR 像素的灰度值作为地址来查表,如果表的内容为 0,则该点为背景,否则是目标点(1)。这样将 TR 区像素分类为目标或背景,从而把灰度图像变为一幅二值图像。

整个分类的过程相当于认为目标区是目标点与背景点的集合,背景区只是背景点的集合。用目标区的像素集合减去背景区像素集合,剩下的就是目标像素。

例如,TR 区某点的灰度为 254(11111110),在表中内容为 1,则该点是目标点。

值得注意的是,该分类查询表是不断变化的,根据目标和背景分布的不同,表中“0”和“1”的分界点也会发生变化。目标与背景分离的关键就是要完成这张表的制作,这也是图像处理的关键。因此,为了清晰地描述目标与背景分离的过程,把上述图像分类处理过程概括如下。

(1)对第 1 幅图像,人为指定跟踪区(也叫跟踪窗,波门)及背景区。

(2)依据图像统计分类原则,建立分类表,对直方图进行分类,判断哪些点属于目标(用 1 表示),哪些点属于背景(用 0 表示)。这些表征目标与背景的二进制代码存放在分类表中。此时,完成了第 1 幅图像目标与背景的分离,并建立了一个作为判别准则的分类存储器,该存储器将作为下一幅图像的判别准则。

(3)下一幅图像进来后,用图像的灰度值为地址去查询访问有判别准则的分类表,进行目标实时分类,得到一幅二值图像,供后面的姿态、轨迹参数计算处理。由该二值图像还可得到目标重心位置、长度和宽度。将重心位置作为下一场跟踪窗的位置,由长度和宽度外推一定数量,形成下一场的跟踪窗。

同时,用该图像去刷新分类表,形成并存入新的判别准则,作为下一场图像分类的依据。

这种逐场更新的方法,可以适应图像和背景的不断变化,取得正确的处理结果。图 3a 是一幅分类前的目标图像,图 3b 是分类后的二值图像,目标已经与背景分离。结果显示,图像分类效果还是比较好的。

通过上述处理过程,只需要在第 1 幅图像上指定跟踪窗(即使在实时任务中也很容易做到的),就可以得到逐场更新的分类存储表和跟踪窗,从而将目标与背景分离出来,得到一幅二值图像,为其后的姿态处理做好了全面的准备。

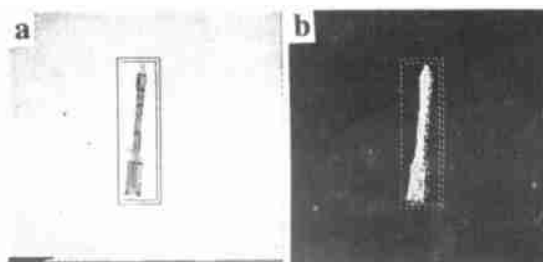


Fig. 3 Separation of target and background
a—initial image b—binary image

2.3 目标 3 维姿态参数的提取

要获得目标的 3 维姿态,必须将目标作为几何图形处理,建立目标特征。测量不同的参数,所需建立的目标特征也不相同。

2.3.1 俯仰角、偏航角的求解 提取目标中轴线可用于测量火箭类轴对称目标的俯仰角和偏航角。图 4a 是一幅光测图像,图 4b 是其简化的二值数字图像。0 代表目标背景像素。

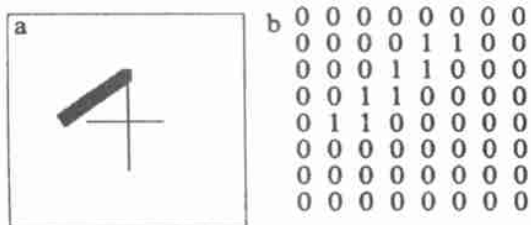


Fig. 4 Thresholding of image
a—initial image b—binary image

将目标数字图像分为上下两部分,上部质心为:

$$x_1 = a_{ij}i / a_{ij}, \quad y_1 = a_{ij}j / a_{ij} \quad (1)$$

同理可确认下部质心 (x_2, y_2) 。

质心 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 是表明目标在光测图像中相对于十字丝中心位置的两个关键的点。由于图像中心的位置已经由光测设备的视轴所确定,因此,在确认目标上下两部分质心后,根据光测系统焦距及当前仪器光轴指向(俯仰角 A 、高低角 E),可

将 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 中的坐标值,折算成偏离中心位置的角度值^[2],即通常讲的脱靶量,两质心的坐标即为目标上部和下部的脱靶量,采用脱靶量修正的方法,可分别求得两质心相对于测量设备的高低角和俯仰角 (A_1, E_1) 和 (A_2, E_2) ,由此得到从测量站坐标原点指向目标的两条方向线。空间几何中,由两条直线,或由3点求平面是很简单的。两条方向线确定一个指向目标的方向面,目标就在该方向面上,但具体位置仍是不确定的。但是同理可以从另一光测站得到第2个方向面,这两个方向面相交于一条直线,该直线就是目标中轴线,中轴线方向矢量实际上就是中轴线方程,由该方程可以很简单的按空间几何理论得到目标俯仰角、偏航角。具体在求解的过程中,需要将质心坐标转换到发射坐标系下,求出的中轴线方程也是在发射系下表示的。

通过目标中轴线法测俯仰角及偏航角时,它测量的是目标图像上两个点各自的方向线,方向线由设备光轴指向来确定,这样方向线求解可以做到十分精确,从而使得由交汇方法求出的直线方程十分准确。如果由单台设备定位求目标上两点的3维坐标进而求直线方程,两个点的实测距离存在测量误差,并且在算法中误差随距离增大呈放大趋势,使得求出的轴线与实际轴线有较大偏差,所以,一般优先使用交汇法来求俯仰角及偏航角。

上例中仅将图像分为两部分,实际上可分为多个部分,求出各自质心,用最小二乘法求出一条直线去拟合这些质心,将此直线作为图像中轴线,在成像面内任意取中轴线上的两个点,点的位置可以图像中轴线方程算出,再按前述方法转换为脱靶量。最小二乘法可以大大减少图像处理中的误差。图5是一幅由最小二乘法求出的目标中轴线,中轴线效果很好。

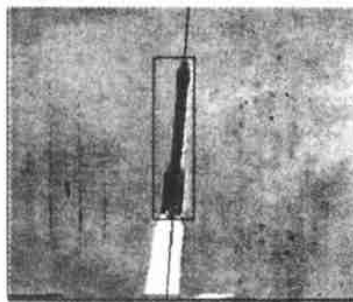


Fig. 5 Axial of image

为验证方法的正确性,这里选取了某火箭飞行程序转弯时5个时刻的图像进行交汇处理的原理性实验,姿态计算结果如表2。

为评定算法的计算精度,可人为地在仪器光轴指向加一定的扰动。实验中,按经纬仪测角精度加上15扰动。加扰动后得到3维姿态的变化量见表3。

Table 2 Gesture result at different time

angle/ (°)	time/ s				
	8	12	16	20	24
elevation	6.4625	6.8547	6.4684	7.7096	7.2774
yaw	19.7661	20.9416	21.4523	27.4172	28.7631

Table 3 Gesture result at different time with disturbance

angle/ (°)	time/ s				
	8	12	16	20	24
variety of elevation	- 0.0125	- 0.0318	- 0.3904	0.0462	0.822
variety of yaw	- 0.0137	- 0.0337	0.7432	0.221	0.8048

应该指出,严格的精度评估应该进行全弹道的数据参数计算,再按上述参数扰动方法模拟出弹道上各跟踪点的误差,对所有模拟出的误差统计出平均值及标准差^[3]。限于篇幅和计算的复杂性,这里未对全弹道的情况进行处理,只是有代表性的选取了几个点进行原理实验。实验结果仍然反映了实际飞行情况,与实测值是相符合的。从表3可见,误差传递较小。

2.3.2 滚动角的求解 目标的滚动在2维图像中是难以反映的。为此,可以在目标表面人为的做上特殊标志,其中一种方法是螺旋线标志法,就是在目标外表画上螺旋线作为图像处理的标志。立体螺旋线转动时,其平面投影图像也是变化的,如图6所示。

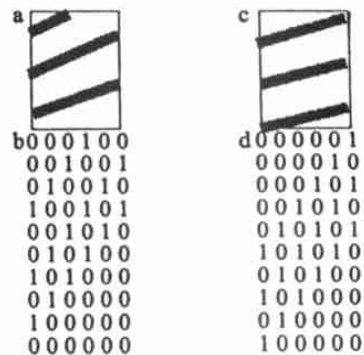


Fig. 6 Method of spirial marking

图6a为目标转动前的图像,图6b为目标转动前的二值图像;图6c为转动后图像,图6d为转动后的二值图像。可明显看到转动后相对于转动前二值

图像中像素值向下移动。设图 6b 的对应矩阵为 B ，图 6d 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。在柱坐标系中，螺旋线上一点的移动量 Z 与转动角成正比，即 $Z = k \cdot \theta$ 。

反映在二值图像上，像素点下移量与转动角成正比。因此，根据差矩阵 E 可以确定滚动角。条纹移动距离与滚动角的线性关系可以事先标定。

2.3.3 目标起飞漂移量的测量 目标起飞时的漂移量难以测量，通常是在目标表面涂有 4~5 个蓝色的标志环。通过处理高摄画面中各标志环的位置，再将不同高摄得到的标志环位置进行交汇处理求出漂移量^[4]。如图 7 所示。

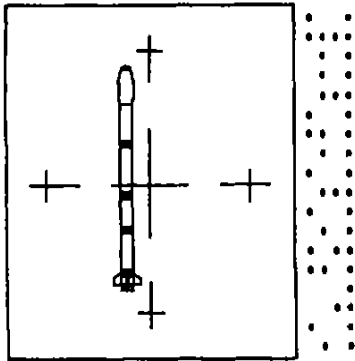


Fig. 7 Image of slow motion

漂移量测量关键是确认图像中各标志环的位置。传统漂移量处理方法是：将高速摄影胶片图像投影到屏幕上，用鼠标点击每个标志环的左上角、右下角，判读仪由此得到每个标志环上下角的脱靶量数据。经脱靶量修正和系统误差修正后，得到每个标志环左上角的角度数据；通过标志环的已知参数，可计算出各标志环中心位置的角度数据，并用该数据进行交汇处理，即可得到火箭头部、尾部位置，即确定了漂移量。显然，该方法工作量太大、处理速度很慢、受人为因素影响大。

数字图像处理中，标志环与背景的分隔是十分容易的。这是因为高速摄影成像距离目标很近，标志环成像明显偏暗，而背景明显偏亮（箭体为白色），

目标与背景反差很大，十分利于用数字图像处理的梯度法或统计分类法将像素分类。标志环提取后，再利用现行交汇算法求解漂移量。

数字图像处理的方法求漂移量最大的优点是计算机处理速度快、自动化程度高、减少了人为因素的影响。目前，用高帧频电视代替高速摄影已经成为必然趋势，电视视频更有利于进行数字图像处理。如果直接采用高清晰数字电视，则数字图像处理的优越性是不言而喻的。

3 应用前景

利用光测图像进行数字化处理，获得 3 维姿态使得光测设备使用效能大为提高。按照作者所述的方法，除了可以获得目标的 3 维姿态信息，还可以获得高精度的目标空间位置信息，随着计算机速度和应用技术的不断提高，实时测量 3 维姿态也将成为可能。该方法利用现有光测设备，改进图像处理方法，实现了图像的全数字化处理，提高了设备使用效能及数据精度，在目标起飞初始段又提供了一种姿态测量的手段，因此，在光学设备的发展及数据处理中的应用前景十分广阔。

4 结束语

数字化测量已经成为必然趋势，也是光学测量的一个发展方向。作者只是对光学图像的数字化处理提出一个研究方向，指出通过处理光测设备记录的图像，从中获取测量飞行 3 维姿态参数的可行性。这一方法若得到实际应用，不仅可以提高光测设备使用效能，提高测量数据的精度，而且为运动目标的姿态测量提供了一种新的便捷可靠的途径。

参 考 文 献

- [1] Castlenan K R 著. 朱志刚, 石定机译. 数字图像处理. 北京: 电子工业出版社, 2002: 375 ~ 405.
- [2] 曾 恋, 阎冬梅. 电视测量技术. 北京: 装备指挥技术学院出版社, 1998: 231 ~ 280.
- [3] 王正明, 易冬云, 周海银 *et al.* 弹道跟踪数据的校准与评估. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 443 ~ 450.
- [4] 张昌兵, 吴天丹. 航天器发射场, 2001(12): 59 ~ 64.