

文章编号: 0253-2239(2005)04-491-6

基于数字图像的高精度面内转角测量方法

李立春 于起峰 雷志辉 李健兵

(国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘要: 针对科研与工程中转角测量优于 $5''$ 的高精度要求, 提出了一种用直线做特征标志的基于图像的测量方法。用高分辨率相机采集被测物上长直线标志, 通过高精度检测图像上直线的倾斜角度来计算转角。分析了基于图像高精度角度测量中出现的多种原来无需考虑的影响精度的因素。给出了角秒级角度测量时直线的拟合检测算法以及直线标志的成像宽度、长度、与采样方向的角度等参量的选择应满足的条件。仿真和实验结果表明直线宽度 $5\sim 9$ pixel, 直线方向避开与采样方向成 0° 和 45° 角时角度检测精度达到最优, 当直线长度不小于 1000 pixel 时测量精度优于 $5''$ 。

关键词: 光学测量; 转角; 直线检测; 高精度; 拟合; 精度分析

中图分类号: TN209 文献标识码: A

High-Accuracy Measurement of Rotation Angle Based on Image

Li Lichun Yu Qifeng Lei Zhihui Li Jianbing

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: A measurement method based on image is present to measure rotation angle at high precision of $5''$ which uses a line as the character sign. A digital camera is used to capture the image of the line. The rotation angle is calculated by detecting the line slope angle with high accuracy in the image. The factors that affect the precision are analyzed. Then the guidelines to measure a rotation angle with high precision of seconds are proposed, which include the method to detect a line and the parameters of a line such as the length, the width and the direction. Experiments show that when the line is wide of $5\sim 9$ pixel and the angle between the line and the sampling direction is far away from 0° and 45° the rotation angle measurement gets the highest accuracy, and if the length is not less than 1000 pixel the precision is not less than $5''$.

Key words: optical measurement; rotation angle; line detecting; high accuracy; fitting; accuracy analysis

1 引 言

转角测量已被广泛用于工业、军事、航天、航海等许多领域, 并且对测量精度的要求也越来越高。现有的转角测量方式可分为机械式、电磁式以及光学测量方式。机械式和电磁式的测角技术有多齿分度台和圆磁栅等, 这些方法大多为手工测量, 温度、湿度、压力等外界环境对测量过程影响大, 测量精度受到限制^[1,2]。光学测量方法有光学分度头法、多面棱体法、激光干涉法以及平行干涉图法等, 光学测量方法具有较高的测量精度, 但是大多存在角度测量范围较小, 系统结构复杂, 调试繁琐, 对元件要求高等缺点^[3~6]。

应用基于图像的测量技术对转角高精度测量能有效克服传统测量方法的缺点, 具有体积小, 可靠性高等优点, 已经出现了一些相关的测量方法和设备^[7]。基于图像的转角测量通常是在待测物上安装辅助的特征标志, 使用 CCD 相机采集辅助目标图像, 通过图像处理获取被测物的旋转角度, 常用的特征标志有平行光栅、直线、特殊曲线等。

本文提出一种基于图像的转角精密测量方法, 选用长直线作为辅助标志, 通过高精度检测图像上标志直线的倾斜角度来计算转角。普通精度的面内转角图像测量已经可以方便地实现, 但对 $3^\circ\sim 5''$ 精度的测量要求会出现多种新的原来无需考虑的影响

作者简介: 李立春(1978~), 河北人, 国防科技大学博士研究生, 从事光测力学及图像分析研究。E-mail: lichunmail@163.com

收稿日期: 2004-06-17; 收到修改稿日期: 2004-09-14

精度的因素。文中对影响直线检测的各种因素,以及直线检测算法和测量系统的构架进行了详细分析,给出了高精度转角测量的实用方法。仿真和实验证明这种方法是有效地解决高精度角度测量的途径。

2 基于图像的面内转角高精度测量算法实现

2.1 利用直线标志进行面内转角测量的方法

选取直线作为合作标志固定在待测的转动平面内并随之一起转动,使摄像机光轴垂直于转动平面对合作标志进行拍摄,如图 1 所示。转动前后两次成像上直线倾斜角度的差就是待测转角的大小。在该方法中通过选取合适的直线标志和成像方式可以实现高精度转角测量,其中高精度检测图像中直线的倾斜角度是精密转角测量的关键。

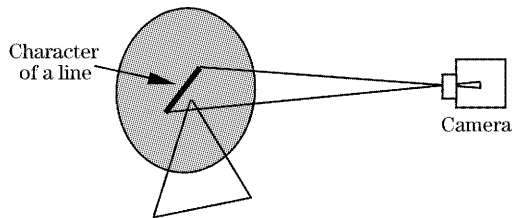


图 1 基于图像的转角测量示意图

Fig. 1 Diagram of rotation angle measurement based on image

2.2 拟合法高精度检测直线

通过提取直线上个别特征点来对直线定位和角度测量容易引入较大误差。例如,直线长度为 l pixel,端点的定位精度是 D pixel,则直线倾斜角的测量精度表示为

$$\sigma = \arctan(D/l), \quad (1)$$

对长度 500 pixel 的直线,端点定位能够达到 0.1 pixel,则用(1)式可以计算出倾斜角度测量精度仅有 $41''$ 。使用高分辨率的相机拍摄直线标志可以增加直线长度从而提高角度测量精度,但它受相机的分辨率所限制,而且这种方法只使用直线端点的信息,可靠性比较低。为了克服这一缺陷我们采用多点拟合法来检测直线。

拟合法检测直线包括直线截面的高斯拟合和截面中心的直线拟合两部分。图像上直线截面灰度分布近似为高斯型函数,如图 2 所示,直线截面可以用下面高斯函数近似表示:

$$f(x) = A \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] + B, \quad (2)$$

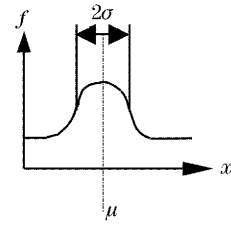


图 2 直线截面灰度分布

Fig. 2 Gray distribution of a line's section

式中 A, B 分别表示截面灰度最大值和背景灰度, μ 表示灰度最大值的位置, σ 表示截面的半宽度。选取高斯函数对截面的灰度分布进行拟合^[8],解算出控制参量 (A, μ, σ, B) , 据此确定截面中心的精确位置参量。对直线所有截面高斯拟合提取中心点,将这些中心点用最小二乘法拟合直线得到直线位置和倾斜角的精确值。分以下两个步骤:

1) 将直线截面的灰度分布用高斯函数拟合得到截面的中心点位置、宽度等参量。

通过图像边缘检测等预处理得到直线的大致宽度 w 和倾角的粗侧值 θ_0 , 根据 θ_0 和 w 的值确定参与拟合的截面及截面点, 拟合得到高斯函数的控制参量。这里把足够宽的直线截面内灰度最小值视作背景灰度 B , 将所有点的灰度值减去背景值 B 后参加拟合, 拟合用的函数将化为仅含有三个待定参量的下式:

$$g(x) = A \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

通过拟合确定参量 A, μ, σ 的最小二乘解, 这三个参量确定了直线截面的灰度极值、中心位置和宽度。根据 μ 值计算该截面上直线中心点的位置参量 $p_i(x, y)$, 截面宽度为 2σ 。

2) 拟合直线。

将全部截面中心点用最小二乘法拟合直线得到直线参量。拟合使用的直线函数为(4)式:

$$ax + by + c = 0, \quad (4)$$

根据拟合得到的参量 a, b, c 计算出直线的倾斜角度、中心位置等参量的精确值。

以上两步拟合法有多个点参与检测, 大大减少了成像时离散采样、量化的误差和图像噪声的影响, 能显著提高直线检测的精度。

3 影响转角测量精度的因素分析

基于图像的转角测量涉及图像检测和测量系统的构架两方面问题, 为实现秒级的测量精度必须对测量中每一个环节进行研究, 本文重点对图像检测

方面的因素进行了分析,限于篇幅这里直接给出有关测量系统构架方面的分析结论。

3.1 标志直线成像长度

根据(1)式可知,在点定位精度 D 一定的情况下增加直线成像长度 l 可以提高角度检测精度,但直线的长度是受相机的分辨率限制的。在实际应用中应该在相机硬件条件的允许下选取尽量长的直线标志,以获得高的测量精度。

3.2 参加拟合的截面选取方法

对直线的截面进行高斯拟合时截面的选取方式有两种,如图 3 中的截面 1 和截面 2。

1) 选取截面总垂直于直线的方向,即图 3 中截面 1。

在这种选取方式下,除了直线与图像采样方向(图像上的 x 和 y 坐标方向)成 0° 和 45° 角这两种情况,截面点都不位于整像素点位置,截面点的灰度值需要插值来确定^[9]。

2) 选取截面为采样方向或者与采样方向成 45° 角的特定方向,即图 3 中截面 2。

这种方法取得的截面上的点全部位于整像素点位置,而截面不一定完全垂直于直线,但可以使截面方向与直线垂线的夹角不大于 22.5° 。不难证明在与直线垂线成一定夹角 β 的截面上的灰度分布也是高斯分布,并且该截面的中心点就是直线垂线方向截面的中心点。所以通过截面 2 也可以用高斯函数拟合得到直线中心点,计算得到直线的有关参量。

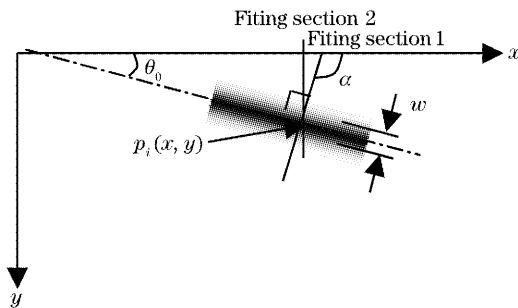


图 3 直线截面

Fig. 3 The section of a line

分析可知,第一种截面选取方式通过插值获得截面点的灰度值引入了误差,而第二种方法截面点都来自整像素点不存插值误差。当图像噪声很小时,插值误差占主导地位,所以第一种截面方式下检测精度会低于第二种方式;而在较大噪声条件下两者的检测精度相当。仿真结果也证明了这个结论。由于实际图像中都存在一定的噪声,而且选取整像素点位置的截面可显著减少运算量,所以在实际应

用中应使用第二种截面选取方法。

3.3 标志直线的成像宽度

直线的成像宽度也是影响角度测量精度的一个重要因素。在对比度一定的情况下,增加宽度导致直线截面灰度变化更加平滑,定位精度变差;而在很小宽度时,由于点采样截断误差影响的增大和数据量减少,定位精度也会下降。

本文通过仿真实验分析了直线宽度对倾斜角度检测精度的影响。做多条直线仿真图并叠加噪声进行角度检测,直线长度均取 1200 pixel。图 4 给出了实验结果,曲线表示所有角度检测误差的均方差与线宽变化的关系,不同的曲线代表不同噪声下的仿真结果。可见直线角度检测精度随着宽度增加而下降,大宽度的直线对噪声的变化更加敏感。实际应用中选用 5~9 pixel 宽的直线较为合适。

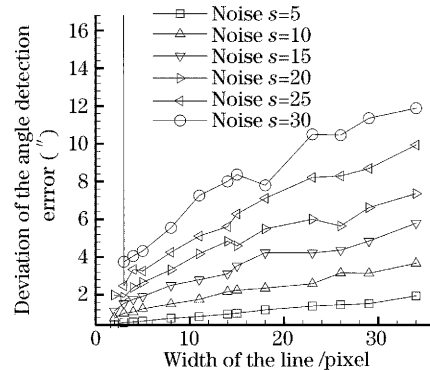


图 4 不同宽度直线角度检测结果

Fig. 4 Measurement result of roatation angle with different line's width

3.4 直线中心移位对直线角度检测精度的影响

当直线的像在相机成像平面上沿垂直于直线的方向平行移动时,采样点在直线截面的采样位置也发生相同移动。当移动距离为非整像素时就会对直

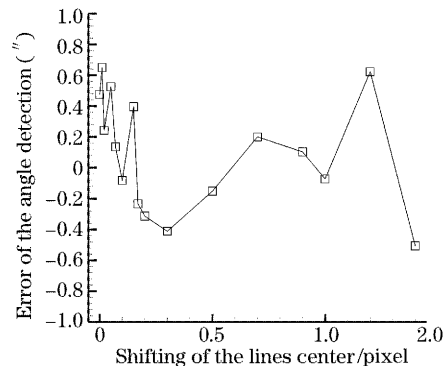


图 5 无噪声仿真直线中心移位的影响

Fig. 5 The effects of the line's shifting to the rotation angle measurement

线定位产生影响。本文通过无噪声的仿真图对非整像素平移这一因素进行了分析。仿真选取直线长、宽分别为 1200 pixel 和 5 pixel, 直线倾斜角度 30° , 沿垂直直线的方向非整像素距离移动直线, 在移动距离分别为 0.01 pixel, 0.02 pixel, ... 等情况下进行了直线检测。

图 5 为实验结果, 图中横坐标为平移的非整像素距离, 纵坐标是角度检测误差。结果表明拟合法检测直线角度对这种平移变化不敏感, 当存在噪声的情况由于平均作用这种影响将更加不敏感。

3.5 采样角度的影响

数字图像中离散的二维空间等距离采样对直线角度而言是非均匀采样, 当直线与采样方向成不同角度时, 检测直线角度将会产生不同误差, 在角度精密测量中必须考虑这个问题。在直线角度与采样方向成 0° 角或者 45° 角时, 直线角度的微小变化在数字图像上得不到反映, 导致了角度分辨率的下降。直线在这些特殊角度附近成像时, 图像采样点在直

线各个截面的分布位置相近, 这些截面中心的定位误差在计算角度时就会产生积累, 导致角度测量出现较大误差。

在较小范围内这种角度误差的变化呈一定的规律性, 当直线角度与采样方向的夹角大到一定程度时(不接近 45°)所有截面上的中心定位误差在计算直线角度时将会均衡抵消, 这时才能够得到高精度的角度测量结果。

本文仿真分析了直线角度检测受采样方向的影响。图 6(a)表示无噪声条件下三条不同长度直线的角度检测误差与采样方向的关系, 图 6(b)表示较大角度范围内角度检测误差与采样方向的关系。仿真结果证明了以上的分析, 对角秒级的角度测量要求必须考虑图像采样方向的影响。较短直线受采样方向影响更大, 但即使对长度 1200 pixel 的直线, 受采样方向影响其最大误差接近 $2''$, 可见采样方向对直线角度检测的影响是显著的, 在实际应用中直线角度应避免与采样方向成 0° 和 45° 附近的特殊角度。

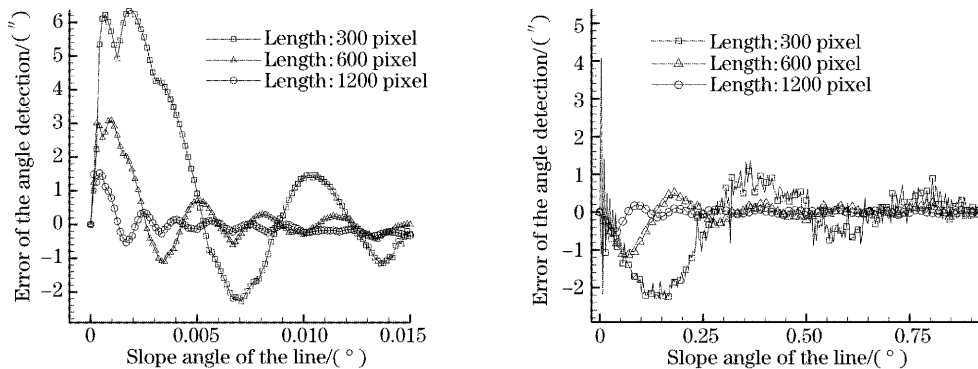


图 6 不同长度直线在采样方向附近的角检测误差。(a) 较小角度范围内角检测误差变化规律, (b) 较大角度范围内角检测误差变化规律

Fig. 6 The rotation angle error of line's with different length and directions when the directions are beside of the sampling direction. (a) the altering law of angle detecting error while line's slope angle changing in a small range, (b) the altering law of angle detecting error while line's slope angle changing in a huge range

3.6 相机光轴与待测面的垂直问题以及光路扰动问题

基于图像的面内转角测量需要待测平面与相机摄影主轴垂直, 实际应用中通过在视场设置特定形状的标志, 根据标志的成像调节相机姿态来实现垂直关系。由于主轴与待测面不垂直而产生的角度误差属于系统误差, 所以在系统交付使用前对这一误差进行标定可以免除其对最终角度测量精度的影响。当测量中光路较长时, 需要考虑长距离传播的光线受空气温度变化、气体流动、外界雾气等因素的扰动而对直线测量精度产生的影响^[10,11], 必要时应

采取稳定光路的措施来保证测量精度。

4 仿真实验结果及结论

4.1 仿真结果

仿真实验中做不同角度的长 1200 pixel 的直线并叠加不同方差水平的高斯噪声, 线宽为 5 pixel, 用本文算法检测直线, 考察直线倾斜角度误差以及直线中心位置误差。多次实验结果如表 1 所示, 可以看出该方法在图像有较大噪声($s=30$)的情况下角度测量精度仍优于 $5''$, 直线中心定位精度优于

0.02 pixel, 达到了高精度直线测量的目的。

4.2 实验结果

为考察该方法的工程实用性, 我们设计了转角检测的实测实验。实验中带直线标志的圆盘固定在 T3 经纬仪(角度测量精度 $0.5''$) 上, 圆盘绕其中心旋转的角度 $\Delta\theta$ 可以由经纬仪得到。用光轴垂直于圆盘平面的相机采集转动前后圆盘的图像, 用本文的方法检测圆盘上直线的倾角, 得到转角的测量值 $\Delta\theta_1$, 转角测量的误差为 $\Delta\theta - \Delta\theta_1$ 。实验取三条不同宽度的直线, 使用像素数为 $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 的相机对直线成像, 直线宽度约为 5 pixel, 7 pixel 和 9 pixel。图 7 为实拍的直线图像之一。实验中直线角度要避免采样方向, 这里选取以 10° 为起始点, 经纬仪每旋转 $240''$ 采集图像, 进行角度检测, 连续旋转 10 以上, 统计测量误差。直线成像长度为 1000 pixel, 取成像质量较好的宽度 5 pixel 的直线 1 和宽度 9 pixel 的直线 2 进行检测。三组独立实验

结果由表 2 给出。从实验结果可以看出, 三组转角测量的角度误差的最大均方差为 $3.3''$, 精度优于 $5''$, 在主频为 2.4 GHz 的微机上, 检测处理一条直线需要的时间为 32 ms, 满足一般 20 f/s 的实时性要求, 该方法是一种有效的转角高精度测量算法, 能满足工程应用的要求。

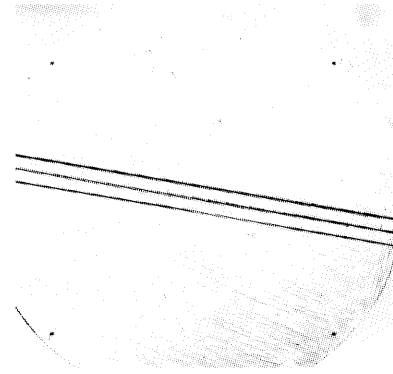


图 7 实验拍得直线图

Fig. 7 The line's figure in a real experiment

表 1 直线检测误差统计表

Table 1 The statistic of some line's rotation angle measurement

Deviation of Gauss noise	Angle error / ($''$)		Position error of the line's center / pixel	
	Mean	Deviation	Mean	Deviation
0	-0.01612	0.294931	0.000061	0.001094
5	-0.00435	0.558234	0.000242	0.002492
10	0.092138	1.255073	0.000307	0.004913
15	0.108081	1.894417	-0.00044	0.007258
20	-0.32294	2.559287	-0.00062	0.010401
25	-0.08701	3.678924	0.000023	0.014941
30	0.302863	4.658829	-0.00127	0.018346

表 2 转角测量实验结果

Table 2 The result of line's rotation angle measurement in experiment

	Deviation of the angle detection error / ($''$)					
	Experiment 1		Experiment 2		Experiment 3	
	Line 1	Line 2	Line 1	Line 2	Line 1	Line 2
Deviation σ	2.960488	3.214171	2.886239	2.92383	3.30347	2.412447

5 结 论

使用直线标志的基于图像的转角测量能达到 $5''$ 的测量精度, 该方法在实际应用中是可行的。构架测量系统时选取线标志的成像长度应不小于 1000 pixel, 宽度 5~9 pixel, 直线方向要避免与采样方向成 0° 或 45° 角的方向, 另外在较大的转角范围内精密测量角度时镜头的畸变误差是进一步要考虑的问题。

参 考 文 献

- Sun Fang-jin. Angle measuring[J]. *J. Astronautic Metrology and Measurement*, 1999, 19(2): 22~24 (in Chinese)
孙方金. 角度计量[J]. 宇航计测技术, 1999, 19(2): 22~24
- Hu Ming. Research on InBb precise angular displacement sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1998, (2): 1~3 (in Chinese)
胡明. InSb 精密角位移传感器的研究[J]. 仪表技术及传感器, 1998, (2): 1~3
- Ma Junshan, Wang Xiangchao. Optical precision measurement technique of rolling error[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1403~1406 (in Chinese)

- 马军山,王向朝. 滚转角误差的光学精密测量技术研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(10): 1403~1406
- 4 Xiao Li Dai, Osamil Sasaki, John Egreivenkamp *et al.*. High accuracy, wide range, rotation angle measurement by the use of two parallel interference patterns[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6190~6195
- 5 Fu Zhao-bang, Tao Wei, Zhang Zhuo. Angle measurement with optical methods[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 168~171 (in Chinese)
浦昭邦,陶 卫,张 琢. 角度测量的光学方法[J]. 光学技术, 2002, **28**(2): 168~171
- 6 Zhang Cai-ni, Wang Xiang-qian. Optical methods for measuring small angles[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(4): 416~419 (in Chinese)
张彩妮,王向朝. 微角度的光学测量[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(4): 416~419
- 7 Tan Jiubin. Some hot problems in super precisely measurement technique and instrument engineering research. <http://www.chinatool.net/jsyd/discourse/20010305.htm> (in Chinese)
谭久彬. 超精密测量技术与仪器工程研究中的几个热点问题. 中国工具信息网, [http://www.chinatool.net/jsyd/discourse/](http://www.chinatool.net/jsyd/discourse/20010305.htm)
- 20010305.htm
- 8 Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. *Precisely Measurement and Motion Metric Based on Image*[M]. Beijing: Science Press, 2002. 140~143 (in Chinese)
于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 140~143
- 9 Chen Ting-zheng, Lu Hai-bao. CCD Subdivision method and application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1396~1399 (in Chinese)
谌廷政,吕海宝. CCD细分技术方法研究及应用[J]. 光学学报, 2002, **22**(11): 1396~1399
- 10 Yi Shi-he, Hou Zhong-xi, Li Li-chun. The preliminary analysis of optical performance of aerodynamic Window[J]. *Laser and Infrared*, 2002, **32**(3): 168~170 (in Chinese)
易仕和,侯中喜,李立春. 自由旋涡气动窗口的光学特性研究[J]. 激光与红外, 2002, **32**(3): 168~170
- 11 Wang Zhi-yong, Chen Kai, Chen Tao. Atmospheric thermal lens in flying optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(5): 665~671 (in Chinese)
王智勇,陈 凯,陈 涛. 飞行光学导光系统中的空气热透镜效应[J]. 光学学报, 1999, **19**(5): 665~671