

基于物方直接解的圆匹配与重建*

张永军 王 乘

(华中科技大学水电与数字化工程学院 武汉 430074)

张祖勋 张剑清

(武汉大学)

摘要: 提出一种基于物方直接解的圆匹配与重建方法,建立了灰度影像与空间圆参数间的函数关系,根据已知的相片内外方位元素及空间圆参数的初值,利用直线段最小二乘模板匹配方法直接获取空间圆的参数。系统论述了基于物方直接解和直线段最小二乘模板匹配方法进行空间圆匹配与重建的数学模型。实际图像数据的试验结果表明,本算法具有较高的重建精度。

关键词: 特征提取 空间圆 最小二乘模板匹配 匹配与重建

中图分类号: TP391

0 前言

CAD在现代制造业中已相当普遍,大部分工业部件都有相应的CAD数据,因而利用这些CAD数据作为参考来评价产品的几何精度成为近年来的研究热点。对于大量的管类和板类工业部件来说,对其进行产品合格性检测几乎都会涉及到对圆的重建与检测问题。空间的一个任意圆在相片上的投影一般是一个椭圆,但它往往不是标准椭圆,存在长半轴的旋转。经典的边缘检测算子大多是利用边缘的梯度极值特性,检测局部一阶导数最大或二阶导数过零点来作为边缘点,由于直接进行微分运算,抗噪声能力比较低^[1]。一些学者提出利用概率模型^[2]和模拟退火算法^[3]进行椭圆检测。也有一些学者提出多步检测方法^[4],但参数空间中累加器的叠加及寻找局部最大值时的阈值选取都比较困难^[5]。基于Hough变换的椭圆检测方法需要在多维数组中提取峰值,运算量相当大^[1],更为重要的是,基于Hough变换的椭圆检测方法由于参数量化步长的影响,不可能获得很高的检测精度,因而重建精度也必然不高。另外,现有文献绝大部分都是关于如何对影像上的圆(椭圆)进行提取,其评价标准一般都是占用内存的大小和提取速度^[6],而对其进行物方重建及精度评定方面的研究则并不多见。

Ackermann^[7]教授提出的最小二乘影像匹配方法,充分利用影像窗口内的信息进行平差计算,使

影像匹配达到 0.10 甚至 0.01 像素的精度^[8],是目前精度最高的匹配方法之一。Gruen 等扩展了 LSM 技术用于高精度目标提取,以给定的特征模式作为参考模板与实际的影像做最小二乘影像匹配,从而高精度地提取目标,称为最小二乘模板匹配方法^[9,10]。

提出一种直接从多张灰度影像获取空间圆参数的方法,建立了灰度影像与空间圆参数间的函数关系,利用直线段最小二乘模板匹配方法直接获取空间圆的参数。实际图像数据的试验取得了很好的重建结果。

1 旋转角初值的解算

如果空间圆所在平面的法向初值通过其他途径获得,则空间圆还有 4 自由度——圆心坐标和半径。为了利用摄影测量中常用的共线方程进行物方匹配与重建,需要将空间圆所在平面的法向向量转化为旋转矩阵。

如图 1 所示,设平面的法向向量 l_{SC} 在物方坐标系下的表达为 (V_x, V_y, V_z) , 则旋转角 φ' 与 ω' 的初值可通过下式计算

$$\begin{aligned} \sin \varphi' &= V_x / \sqrt{(V_x)^2 + (V_z)^2} \\ \sin \omega' &= V_y / \sqrt{(V_x)^2 + (V_y)^2 + (V_z)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

对于空间圆来说, k' 角的大小并不影响其参数,因而此处可取为零,因此由平面法向构成的旋转矩阵为

$$\begin{bmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi' & -\sin \varphi' \sin \omega' & -\sin \varphi' \cos \omega' \\ 0 & \cos \omega' & -\sin \omega' \\ \sin \varphi' & \cos \varphi' \sin \omega' & \cos \varphi' \cos \omega' \end{bmatrix}$$

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20010486011)。20021210 收到初稿, 20030805 收到修改稿

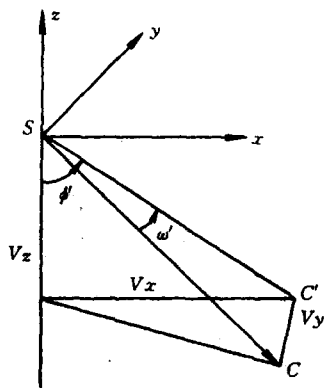


图1 旋转角元素初值确定

注意该矩阵与物方坐标系下摄像机参数的旋转矩阵不同，故上标加“撇”。假设空间圆的坐标系原点与其圆心 (x_0, y_0, z_0) 重合， z 轴与法向重合， x 轴和 y 轴在圆平面内，则圆上的任意点在空间圆坐标系下的坐标为 $(R \cos \theta, R \sin \theta, 0)$ ，而在物方坐标系下的坐标为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(a'_1 \cos \theta + a'_2 \sin \theta) + X_0 \\ R(b'_2 \sin \theta) + Y_0 \\ R(c'_1 \cos \theta + c'_2 \sin \theta) + Z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

2 物方直接解的数学模型

如图2所示，如果摄像机内外方位元素通过其他途径得到，并视为已知，利用多张重叠影像同时匹配，则可以通过透视投影的共线方程直接得到空间圆的表达式。

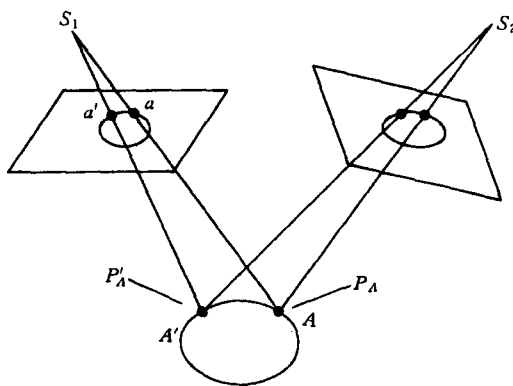


图2 基于物方解的空间圆重建

在进行匹配与重建时，空间圆初始参数视为已知，例如对于有CAD数据的工业部件来说，圆的参数可以直接从CAD数据中获取；无设计数据时可由人机交互半自动给出其初始参数，则圆上任意一点 P_i 的坐标可根据这些参数计算，并与对应的像点满足共线方程

$$\begin{aligned} x_i &= -f \frac{a_1(x_i - x_s) + b_1(y_i - y_s) + c_1(z_i - z_s)}{a_3(x_i - x_s) + b_3(y_i - y_s) + c_3(z_i - z_s)} = -f \frac{\bar{x}}{\bar{z}} \\ y_i &= -f \frac{a_2(x_i - x_s) + b_2(y_i - y_s) + c_2(z_i - z_s)}{a_3(x_i - x_s) + b_3(y_i - y_s) + c_3(z_i - z_s)} = -f \frac{\bar{y}}{\bar{z}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 (x_i, y_i, z_i) 为空间圆上某点在物方坐标系下的空间坐标，它是空间圆参数的函数，见式(2)， (x_i, y_i) 为对应的像点坐标， f 为摄像机焦距， (x_s, y_s, z_s) 为摄站坐标， (a_j, b_j, c_j) 为像片三个外方位角元素组成的九个方向余弦。

显然，空间圆上任一点的误差会引起影像点的误差，但是这些点都是空间圆参数的函数，而且空间圆所在平面法向的误差也会引起像点的误差，因而有下式存在

$$\begin{aligned} dx &= \frac{\partial x}{\partial x_0} \Delta x_0 + \frac{\partial x}{\partial y_0} \Delta y_0 + \frac{\partial x}{\partial z_0} \Delta z_0 + \\ &\quad \frac{\partial x}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial x}{\partial \varphi'} \Delta \varphi' + \frac{\partial x}{\partial \omega'} \Delta \omega' \\ dy &= \frac{\partial y}{\partial x_0} \Delta x_0 + \frac{\partial y}{\partial y_0} \Delta y_0 + \frac{\partial y}{\partial z_0} \Delta z_0 + \\ &\quad \frac{\partial y}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial y}{\partial \varphi'} \Delta \varphi' + \frac{\partial y}{\partial \omega'} \Delta \omega' \end{aligned} \quad (4)$$

空间圆的影像一般为椭圆，而且对应于圆上某点的像点无法精确提取，因而不能直接利用式(4)进行重建。采取了近似方法，由若干直线段来逼近一个圆，直线段的数目取决于圆及其影像的大小。因此空间圆的匹配可以利用成熟的直线段最小二乘模板匹配方法进行。假设以“灰度差平方和最小”作为判据(灰度差记为余差 v)，则影像匹配可以写为 $\sum vv = \min$ ，它与最小二乘法的原则是一致的。如果只考虑影像灰度的偶然误差，则有 $v = g_1(x, y) - g_2(x, y)$ ，利用该式列误差方程式并按最小二乘法求解即为最小二乘模板匹配的基本思想。

在进行模板匹配时，首先由已知边缘模式生成的边缘模板是一小块(Patch)影像，用这一小块影像与实际的待检测影像进行匹配，就能精确地确定边缘的位置。图3所示为理论模板及其相应的断面图。图4中的白色方框为具有一定宽度的直线段初值窗

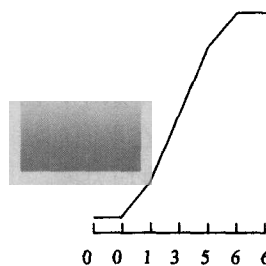


图3 理论模板示意图

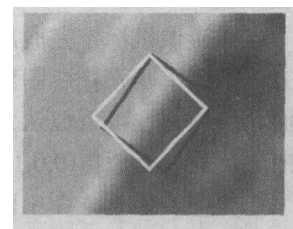


图4 最小二乘模板匹配结果

口, 黑色方框则为匹配后的影像窗口。可以看出, 匹配后影像窗口的中线(即匹配后的边缘位置)正好对应于影像的实际边缘。假设给定模板为 $g_m(x, y)$, $g(x, y)$ 为实际影像块, 建立两者的匹配意味着 $g_m(x, y) = g(x, y)$, 也即模板中每个点的灰度值等于实际影像中相应点的灰度值。

在实际图像中, 由于噪声的存在, 它们之间不可能完全相等, 因而匹配方程式为

$$g_m(x, y) = g(x + dx, y + dy) + n(x, y)$$

$$v(x, y) = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy - \Delta g \quad (5)$$

$$\Delta g = g_m(x, y) - g(x, y)$$

式中, $\partial g/\partial x, \partial g/\partial y$ 分别为影像点灰度在 x, y 方向的导数, 一般以一阶差分代替 $n(x, y)$ 为随机噪声。将式(4)代入式(5), 就可以得到基于物方解的空间圆匹配与重建的最小二乘平差模型

$$v(x, y) = \left(\frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_0} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_0} \right) \Delta x_0 + \left(\frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial y_0} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial y_0} \right) \Delta y_0 + \left(\frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial z_0} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial z_0} \right) \Delta z_0 + \left(\frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial R} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial R} \right) \Delta R + \left(\frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \varphi'} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \varphi'} \right) \Delta \varphi' + \left(\frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \omega'} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \omega'} \right) \Delta \omega' - \Delta g \quad (6)$$

限于篇幅, 各项偏导数的表达式从略。基于物方解的圆匹配与重建的误差方程式(6)为典型的间接平差模型, 各改正数的系数可由 $\partial g/\partial x, \partial g/\partial y$ 及其他偏导数计算得到, 利用多张像片上圆的影像即可通过最小二乘法获得空间圆的参数。

3 试验与分析

对于提出的空间圆匹配与重建算法, 首先利用一个花瓶的图像数据进行了试验, 试验硬件设备为一张水平格网, 一个花瓶和一台 CCD 摄像机。水平格网主要用于摄像机标定和提供每张相片的外方位元素, 在圆的匹配与重建时摄像机参数可作为已知值。

在摄像机标定完成后, 利用该摄像机在不同的方位拍摄了四张花瓶图像。由于格网基本水平, 因而花瓶顶圆也可近似认为水平, 则圆所在平面的法向向量可取近似值(0,0,1), 即旋转角初值均为零。

如图 5 所示, 图中的椭圆为半自动给定的花瓶顶圆参数的初值在像片上的投影, 距离实际边缘大约有 4~5 像素。图中的小正方形是为了半自动拖动

像片椭圆而设置的, 鼠标对图 5 中的下方、右方和上方小正方形的拖动分别表示对花瓶顶圆圆心平面坐标, 半径和高程的物方拖动。

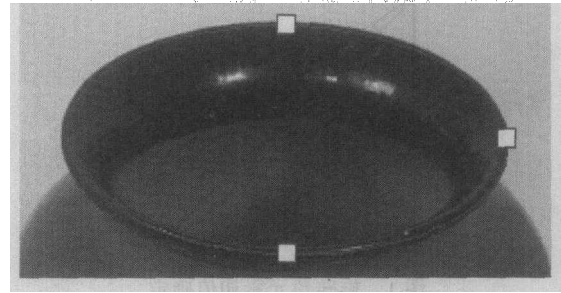


图 5 半自动获取顶圆初始参数

利用上述算法进行重建后花瓶顶圆的直径为 92.36 mm。为了定量地评价本算法的实际精度, 利用游标卡尺对花瓶的顶圆直径进行了量测, 实测直径为 92.40 mm。可以看出, 所述的方法具有很高的重建精度, 重建误差为 0.04 mm。由于缺乏合适的计量工具, 因而未对圆的其他参数进行分析, 不过从图 6 可以看出, 重建后圆的投影与实际边缘几乎重合。

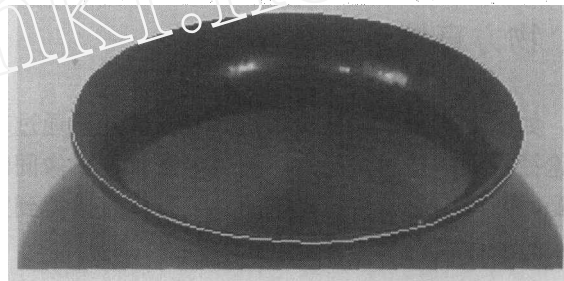


图 6 重建后顶圆的投影

还利用具有 CAD 设计数据的一个钣金件中存在的圆孔进行了试验, 本试验也将各张相片的摄像机内外方位元素作为已知值。试验中每个圆也有 6 个未知参数: 圆心空间坐标、圆的半径以及圆所在平面的法向向量构成的两个旋转角。各参数的初值均从 CAD 设计数据中获取, 图 7 为其中一个圆的设计参数在相片上的投影椭圆。采用所拍摄的 5 张相片进行重建后得到的直径为 9.948 mm, 相应的投影椭圆见图 8。该圆的设计直径为 10.000 mm, 实测直径也为 10.000 mm, 可见其重建误差为 0.05 mm 左右, 零件上的其他圆孔也具有类似的重建精度。

另外, 重建后圆孔的法向矢量为(-0.998, -0.004, 0.063), 而由钣金件上圆所在平面的空间点精确坐标所确定的法向向量为(-0.998, -0.006, 0.062), 可以看出, 二者非常接近, 进一步说明所提出的圆匹配与重建算法的正确性和可行性。

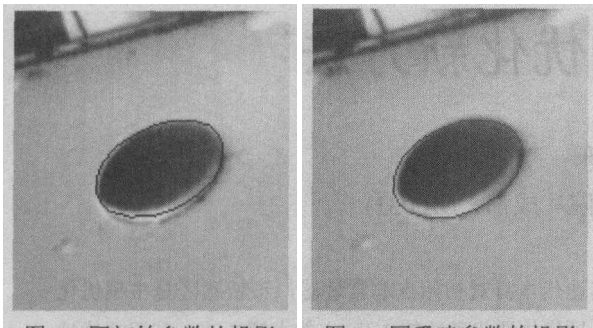


图7 圆初始参数的投影

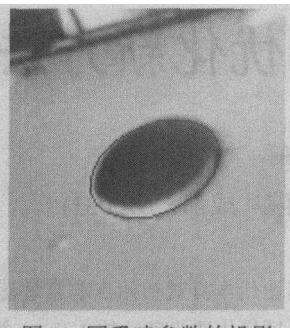


图8 圆重建参数的投影

4 结论

提出了一种直接从多张灰度影像获取空间圆参数的方法,建立了灰度影像与空间圆参数间的函数关系,利用直线段最小二乘模板匹配方法直接获取空间圆的参数。利用实际图像数据进行的重建试验取得了很好的结果,说明所提出的圆匹配与重建算法是切实可行的且具有较高的重建精度。

对于有 CAD 设计数据的管类、板类工业部件或圆状物,圆的初值可以从 CAD 数据中获取,并自动进行高精度重建与制造误差检测,因而所述的圆匹配与重建算法为工业领域中管类、板类部件及圆状物的高精度自动检测提供了一条可行途径。

参 考 文 献

- 1 郑南宁. 计算机视觉与模式识别. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 2 Leavers V F. The dynamic generalized hough transform: its relationship to the probabilistic hough transforms and an application to the concurrent detection of circles and ellipses. *CVGIP: Image Understanding*, 1992, 56(3): 381~398
- 3 Hall J, Ponzi M, Gofalini M, et al. Automatic extraction and characterization of geological features and textures from borehole images and core photographs. *Trans. SPWLA 37th Ann. Logging Symp.*, 1996
- 4 Muammar H, Nixon M. Tristage hough transform for multiple ellipse extraction. *IEE E*, 1991, 138(1): 27~35
- 5 彭扬, 胡福乔, 李介谷. 椭圆特征的快速提取. 上海交

通大学学报, 1998, 32(9): 61~63

- 6 陈燕新, 戚飞虎. 基于随机 Hough 变换的快速圆检测方法. *上海交通大学学报*, 1998, 32(10): 17~20
- 7 Ackermann F. High precision digital image correlation. *Proc. of 39th Photogrammetric Week*, University of Stuttgart, 1983
- 8 胡翔云. 航空遥感影像线状地物与房屋的自动提取: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2001
- 9 Gruen A. Adaptive least square correlation: a powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1985, 14(3): 175~187
- 10 Gruen A, Stallmann D. High accuracy dimensional measurement using non-target object features. *IAPRS XXIX Part B5*, 1992, 694~700

OBJECT SPACE-BASED MATCHING AND RECONSTRUCTION OF CIRCLES

Zhang Yongjun Wang Cheng

(Huazhong University of Science & Technology)

Zhang Zuxun Zhang Jianqing

(Wuhan University)

Abstract: A new technique to match and reconstruct circles based on immediate object space solution is proposed. Calculation of rotation angles between circle and world coordinate systems with normal vector of circles is discussed. Since the end points of line segments are results of line template matching and also functions of space circle, the parameters of space circle and gray images are directly related. Thus parameters of space circle can be obtained directly from several gray images by least squares template matching with known camera parameters and initial values of circles. The proposed approach is tested with real imagery, and the results are very satisfying.

Key words: Feature extraction Space circle
Least squares template matching
Matching and reconstruction

作者简介: 张永军, 男, 1975 年出生, 博士。主要研究方向为数字摄影测量与计算机视觉。