

基于数码相机的三维物体空间几何位置的摄影测量

管业鹏,童林凤,尹涵春
(东南大学电子工程系,江苏南京 210096)

摘 要: 利用数码相机作为图像传感器识别待测工件各特征点位置,避免了接触式测量方法难以精确瞄准的困难.通过一台数码相机从不同方向拍摄的两幅或两幅以上二维图像,实现实际空间坐标和数码相机像平面坐标的透视变换,并实时完成对三维物体非接触测量的数据采集.同时,提出了一种高效、准确、简单的特征点坐标提取方法,实验证明该方法是有效、可行的.

关键词: 数码相机;测量;图像;坐标;精度

中图分类号: TM93

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2002) 06-0849-04

The Photography Measurement of 3-Dimensional Object Based on Digital Camera

GUAN Ye-peng, TONG Lin-su, YIN Han-chun

(Department of Electronics Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The position of specified points on the measured object can be identified by digital camera as a kind of image sensor, which avoids the difficulties that make touching measurement fail to aim at the specific position precisely. The perspective transform between actual spatial coordinate and digital camera image plane coordinate can be achieved through two or more pieces of 2-dimensional images captured by one digital camera from different directions, which accomplishes the data acquisition of 3-dimensional object non-touch measurement in real time. Besides, a kind of method, which can pick up the coordinates of the specific points more efficiently, accurately and simply, is put forward. It is proved to be efficient and feasible by experiment.

Key words: digital camera; measurement; image; coordinate; precision

1 引言

现代工业生产中,经常需要对工件的三维坐标进行精密测量.由于被测工件的复杂性,给测量工作带来了一定的困难.目前,国内外相关的测量方法主要有:电子经纬仪法和三坐标测量机法.电子经纬仪因其存在测量盲区和需要优化测量布局而限制了其广泛应用;三坐标测量机法具有精度高、效率高、通用性好等特点,但因其探头无法实现对工件特征点的精确瞄准,因而会带来测量误差.利用数码相机作为图像传感器来识别工件各特征点的位置,避免了接触式方法难以精确瞄准的困难.本文提出了一种数字近场摄影技术.该技术结构简单,成本低廉,数据采集快速,且便于移动,操作方便,并对实验结果作了对比分析,证实了该技术是有效、可行的,完全可满足三维物体空间坐标的精密测量要求.

2 测量原理

数码相机以其高分辨率、方便、快捷和优良的性能价格比得到了广泛应用.利用数码相机可以很好地实现三维数字图

像的采集工作.通过多个或单个数码相机从不同方向拍摄的两幅或两幅以上的二维图像,可综合给出物体的三维轮廓.其中数码相机定标是实现三维立体视觉的基本而又关键的一步.

设空间物体坐标系为 $X-Y-Z$, 数码相机像面的像平面坐标系为 $x-y$, 以双数码相机为例,说明测量系统的透视变换关系,如图1所示.

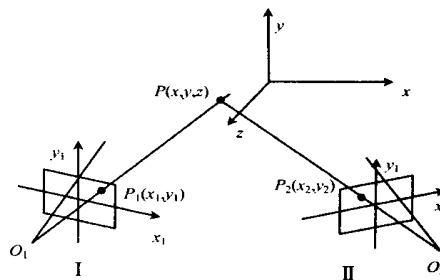


图1 空间物体坐标系与数码相机像平面坐标系

P 为空间任一点,其三维物体坐标 (x, y, z) ,在数码相机 和数码相机 上的像点坐标分别为 $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2)$. 数码相机像点坐标与空间物体三维坐标有如下变换关系^[1]:

$$\begin{bmatrix} w_i x_i \\ w_i y_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i11} & a_{i12} & a_{i13} & a_{i14} \\ a_{i21} & a_{i22} & a_{i23} & a_{i24} \\ a_{i31} & a_{i32} & a_{i33} & a_{i34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $i=1, 2$, x_i 和 y_i 是实际图像平面上像素点的二维坐标, w_i 为非零参数, $a_{i11}, a_{i12}, \dots, a_{i34}$ 为系统变换矩阵中的元素,与数码相机的位置及成像系统参数有关,可通过系统定标来确定.在数码相机标定的过程中,由一组物体和图像的对应点,根据式(1)可以导出 a_{ijk} 参数.在实际应用中,通常是令元素 $a_{i34}=1.0$,来解决式(1)中的参数非唯一性.

将式(1)展开,有:

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{a_{i11} X + a_{i12} Y + a_{i13} Z + a_{i14}}{a_{i31} + a_{i32} Y + a_{i33} Z + 1} \\ y_i &= \frac{a_{i21} X + a_{i22} Y + a_{i23} Z + a_{i24}}{a_{i31} + a_{i32} Y + a_{i33} Z + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

经适当的代数处理,可由每一对物体与图像的对应点得到一个含有 a_{ijk} 参数的线性方程组

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_i X & -x_i Y & -x_i Z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -y_i X & -y_i Y & -y_i Z \end{bmatrix} \cdot A_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中

$$A_i = [a_{i11} \ a_{i12} \ a_{i13} \ a_{i14} \ a_{i21} \ a_{i22} \ a_{i23} \ a_{i24} \ a_{i31} \ a_{i32} \ a_{i33}]^T$$

由于式(3)的两个方程为线性无关,且共有 22 个未知数(A_1, A_2),而一对物体与图像的对应点只能有 4 个方程组,因此,需至少选择 6 个几何位置或分布为非共面的已知靶标点,求解 A_i . 由此,得:

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{i1} X_1 & -x_{i1} Y_1 & -x_{i1} Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_{i1} X_1 & -y_{i1} Y_1 & -y_{i1} Z_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_6 & Y_6 & Z_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{i6} X_6 & -x_{i6} Y_6 & -x_{i6} Z_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_6 & Y_6 & Z_6 & 1 & -y_{i6} X_6 & -y_{i6} Y_6 & -y_{i6} Z_6 \end{bmatrix} \cdot A_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ y_{i1} \\ \dots \\ x_{i6} \\ y_{i6} \end{bmatrix} \quad (4)$$

这一步称为系统定标.

完成系统定标后,根据式(4)和被测点 P 在数码相机像面上的像点坐标 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,求出未知点 P 的三维空间坐标 (X, Y, Z)

$$\begin{bmatrix} (a_{111} - a_{311} x_1) & (a_{112} - a_{312} x_1) & (a_{113} - a_{313} x_1) \\ (a_{121} - a_{311} y_1) & (a_{122} - a_{312} y_1) & (a_{123} - a_{313} y_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - a_{114} \\ y_1 - a_{124} \end{bmatrix} \quad (5)$$

这样就可根据式(5),利用两个数码相机拍摄的两幅二维图像,求出被测物体的三维坐标 (X, Y, Z) .

利用三个或更多的数码相机则可使测量精度更高,也便于测量到超出两个数码相机采集范围以外的被测点.在测量

过程中,若始终保持靶标和被测物体的相对位置不变,则可只用一个数码相机,在两个或两个以上不同位置分别拍摄两幅或两幅以上二维图像,并保证至少有 6 个几何位置或分布呈非共面的已知靶标点及被测物体特征点均成像在每幅二维图像上.

3 二维图像特征点坐标的求取

测量中,特征点的二维图像坐标能否准确提取将直接影响到测量精度.邓文怡等人在文献[2]中,采用高反射率的小亮斑作为靶标特征点,且在待测工件上,采用粘附高反射标记或用激光投射办法产生特征点.一方面在对靶标特征点空间位置坐标事先测定时,其坐标位置很难准确定位在小亮斑的能量中心;另一方面,用激光方法产生待测特征点,成本较高,如采用粘附高反射标记办法产生待测特征点,工作量较大.基于此,本实验中,将以十字刻划线作为测量特征点,从而不需使用结构光方法来形成被测特征点.但因十字交叉线往往与加工纹理噪声相混杂,且图像灰度随外界光照条件的不同而变化,给十字线交点坐标的提取带来了困难,尤其是作为特征点的垂直线与加工纹理噪声平行,更难提取.为能提取出十字刻划线交点坐标,祝世平等人在文献[3]中提出了其处理办法.但在处理十字交点坐标时,首先要求输入的原始图像为 BMP 文件,且需对输入的原始图像作直方图统计、灰度拉伸、低通滤波、二值化及高通滤波等一系列变换,分别提取出水平线和垂直线,再对提取出的由大量离散点组成的水平线和垂直线分别作最小二乘拟合,求出直线方程,由此求出十字刻划线交点坐标.可见其运算量大,且繁琐.

基于此,本文提出了一种高效、准确、简单的以十字刻划线作为特征点的二维图像特征点坐标求取方法.实验证明了该方法的有效性和准确性.

采用能精确到一个像素点的局部边缘提取算法(canny),对特征点二维图像(该图像可以为任意图像文件)作边缘提取,对提取的边缘图像作 radon 投影变换,确定 radon 变换矩阵中的峰值点,这些峰值点则对应于原图像中的某条直线.

3.1 radon 变换

设 $p(x, y)$ 为 $f(x, y)$ 经某一角度的投影,则定义^[4]

$$p(\theta, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta) dx dy \quad (6)$$

$$\text{其中 } \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos & \sin \\ -\sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (7)$$

为原图像 $f(x, y)$ 的 radon 变换,radon 变换算子又称作投影算子. $f(x, y)$ 的 radon 变换就是 $f(x, y)$ 在 θ 角射线的一维投影信号.旋转直角坐标系

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos & \sin \\ -\sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos & -\sin \\ \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

便可得到式(6).

radon 变换也可看成把 (x, y) 空间映射到 (θ, s) 空间的变

换. 在 (x, y) 空间中每一个点相应于 (x', y') 空间的一个点. 如图 2 所示.

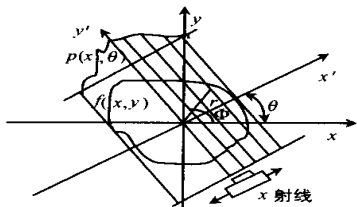


图 2 平行射线的投影

从图 2 可看出:

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta, y = r \sin \theta \\ x &= r \cos(\theta - \phi) = x' \cos \phi + y' \sin \phi \end{aligned} \quad (10)$$

radon 变换的几何意义如图 3 所示

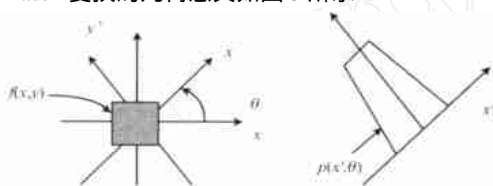


图 3 radon 变换的几何意义

3.2 特征点坐标求取算法

读取一幅二维图像, 对其作局部边缘提取, 对提取的边缘图像作 radon 变换, 确定 radon 变换矩阵中的峰值位置. 这些峰值点即对应原图像上的直线. 这样, 由求原图像中的直线问题转化为求峰值点位置问题, 运算量大为减小, 且受原图像直线中断点等的干扰影响也少. 在求取峰值点坐标时, 本文采用寻求峰值点几何中心的办法求取对应的峰值坐标.

下面代码说明如何通过 radon 变换, 提取出原始图像中特征点(十字交叉点)坐标.

读入由数码相机摄取的二维数字图像 ORG(如图 4).

$A = \text{read}(ORG, \text{fmt});$

其中参数 fmt 为图像存储格式, 可为 $\text{bmp}, \text{hdf}, \text{jpg}, \text{tif}, \text{xwd}$ 等.

对输入的原始图像作边缘提取, 并转换成二进制边缘图像(如图 5).

$B = \text{edge}(A);$

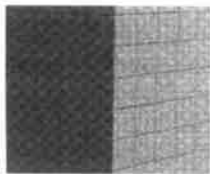
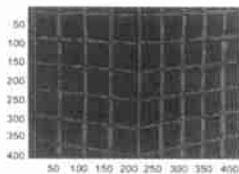


图 4 原始图像

图 5 提取的局部边缘图像



对边缘图像作 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的 radon 变换(如图 6).

$[R, p] = \text{radon}(B, 0:180);$

其中矩阵 R 中每一列对应 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的 radon 变换, 矩阵 p 中包含沿 x 轴的相应坐标.

选取一合理阈值 T , 确定矩阵 R 中的峰值位置.

如图 6, 矩阵 R 在 $70^\circ \sim 110^\circ$ 之间, 对应 x 轴有 12 个峰

值点 $(x_i, i = 1, 2, 3, \dots, 12)$, 这些点对应原始图像在倾角 $= 70^\circ \sim 110^\circ$ 的 x 坐标轴上有 12 条垂直于 x 的直线, 它们分别对应于原图像中的 12 条横线. 见图 7.

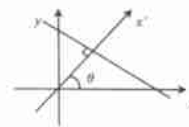
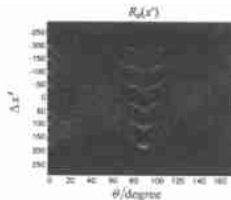


图 6 边缘图像的 radon 变换 图 7 利用 radon 变换提取出的直线

设这些峰值点的中心坐标为 (x_i, x_i) , 则其对应横线的直线方程可表示为:

$$y = -\cot(\theta_i) x + x_i \csc(\theta_i) \quad (11)$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, 12$.

$\theta = 0^\circ$ 时, 有 9 个峰值点, 它们即对应于原图像中的九条垂直线. 设其峰值中心 x 坐标为 $(x_i, i = 1, 2, 3, \dots, 9)$, 则对应的直线方程可写为:

$$x = x_i \quad (12)$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, 9$.

联立式 (11)、(12) 即可求出十字交叉点坐标. 由于其坐标原点 $(0, 0)$ 对应于原始二维图像的中心点坐标 (x_c, y_c) , 并注意到像素坐标与图像平面坐标的变换关系, 于是, 原始二维图像中特征点坐标为:

$$x = x_c + x_i, y = y_c + y_i \quad (13)$$

4 实验结果与分析

本实验测量系统由 Nikon (Coolpix950) 数码相机 (1024 × 768)、已知坐标位置的靶标 (50 × 50 × 50mm)、计算机及相应图像处理软件组成. 靶标由空间非共面的若干十字线构成, 其空间位置坐标经事先精确测定而可知. 在测量过程中, 使用一台数码相机在不同位置进行两次拍摄, 经数码相机接口将拍摄到的二维图像输入到计算机, 由计算机内的图像处理软件进行处理.

将靶标上特征点的坐标及其在两个数码相机像面上的对应像点坐标代入式 (4), 便可确定两个成像系统的变换矩阵系数 A_i , 即完成系统定标. 尔后, 被测工件的表面轮廓可逐点测量. 将每个待测点在两个数码相机像面上的像点坐标代入式 (5), 即可确定该待测点在实际空间坐标系中的坐标值 (X, Y, Z) . 在本实验中, 已知坐标的靶标既是定标模块, 又是被测模块, 即除利用该靶标上一些特征点对系统定标外, 还利用靶标上其余特征点对上述算法的可靠性进行检验. 为验证特征点坐标的求取精度、标定精度和整个算法的可靠性, 先将靶标固定在一个水平平面上, 通过移动数码相机, 在两个不同方位分别拍摄两幅含有若干相同非共面特征点的二维图像. 靶标离数码相机的距离约为 460mm, 数码相机两次拍摄时光轴约成 20° . 从靶标模块中选择 48 个非共面点进行数码相机标定, 利用标定结果, 对其余 6 点, 依据其二维图像坐标, 根据式 (5) 恢复其三维坐标, 并与已测得的实际三维坐标进行对比, 其平均

误差小于 0.3mm.

在实验中,有很多因素影响测量精度,如靶标坐标的测量精度;系统定标时,特征点数目及位置的选取;以及提取坐标中心的准确性和数码相机移动时的聚焦位置及靶标与数码相机的相对位置等.因此,为提高测量精度,一方面除需对数码相机标定及特征点坐标提取算法进行优化与改进外,另一方面,还需建立完善的误差修正与补偿模型.

5 结论

(1)利用已知尺寸的靶标对视觉系统定标,不需精确调整光学系统,也不需事先精确测定系统参数.该技术十分适合于曲面或轮廓复杂的三维工件进行非接触测量.系统定标后,需测工件特征点三维坐标可实时测定.

(2)证明本文所提出的测量方法简单、方便、快速、准确,实用性强.

参考文献:

- [1] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别 [M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
- [2] 邓文怡,吕乃光,巫建坤. 测量工件三维曲面的工业视觉测量系统 [J]. 华中理工大学学报. 1999,27(1):81-83.
- [3] 祝世平,强锡富,等. 基于计算机视觉的大型工件特征点三维坐标测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报. 1997,18(8):607-612.

- [4] 容观澳. 计算机图像处理 [M]. 北京:清华大学出版社,2000.

作者简介:



管业鹏 男,1967年6月生于湖北孝感,1990年、1996年、2000年分别获中南工业大学学士、硕士、博士学位,2000年入东南大学电子工程系作博士后研究,主要感兴趣方向为:数字图像处理与分析、电磁兼容、电路与系统等.



童林凤 男,1933年12月生于辽宁沈阳,1955年北京大学物理系毕业.现任东南大学电子工程系教授,博士生导师,中国电子学会士,IEEE资深会员,复旦大学物理系兼职教授,上海交通大学兼职教授,主要研究方向为显示科学与技术.

尹涵春 男,1946年出生于上海市,1969年毕业于复旦大学物理系电子物理专业,1981年于南京工学院获硕士学位,1985年在英国阿斯顿大学作访问学者,回国后至今在东南大学电子系任教授,博士生导师,IEEE会员,主要从事电磁场计算,电子显示器件CAD及电子图像处理等研究.