

文章编号: 1002-6061 (2002)02-0006-07

发动机孔探图像三维测量与立体重建的实现

于 辉¹, 陈 果¹, 左洪福¹, 黄传奇²

(1. 南京航空航天大学发动机故障诊断研究所, 江苏 南京 210016;

2 中国民用航空工业总局科技教育司, 北京 100710)

摘 要: 作为一种新兴的可视探测技术, 孔探成像分析在现代发动机故障诊断中一直发挥着重要的作用。研制和开发基于孔探图像的三维测量与立体重建系统对提高故障诊断水平和预测准确度, 降低工作中的人力物力投入, 节约维护成本都有着重要的现实意义。本文以整体系统的构架为线索, 阐述了系统的图像采集、摄像机标定、图像预处理、立体匹配、3D 计算以及深度重建等功能模块的研制思路和基本算法, 并给出部分研制结果。本系统的开发为基于孔探图像的发动机故障监测与诊断系统的研制奠定了重要的基础。

关键词: 孔探技术; 立体视觉; 立体匹配; 三维测量; 立体重建

中图分类号: TP391.4; V233.4; V263.6 **文献标识码:** A

Implementation of 3D Measurement and Stereo Reconstruction of Engine Borescopic Image

Yu Hui, Chen Guo, Zuo Hong-fu, Huang Chuan-qi

Abstract As a novel method of visual inspection, the analysis of bore detecting image plays an important role in the daily fault diagnostic of aeronautic engine. Development of the system of 3D Measurement and stereo reconstruction has of importance to improving the level of fault diagnostic and veracity forecasting, decreasing the devotion of manpower and material and saving the cost of maintenance. In this paper, applying the clue of whole system frame, the basic idea and arithmetic of developing the module block are presented, including collection of image, demarcating the cameras, preprocessing image, stereo matching, 3D measurement, depth reconstruction and so on. Partial achievements are presented. Development of the system establishes an important foundation to implement the expert system of fault inspection and diagnostic of aeronautic engine based on borescopic image.

Key words Borscopy; Stereo vision; Stereo mathcing; 3D measurement; Stereo reconstruction

引言

近年来, 由于发动机运行使用过程中的安全性、可靠性要求和开展视情维修方式的需要, 促使了各种发动机诊断技术的发展, 这些技术概括起来可归类为系统故障诊断技术与零部件故障监测和诊断技术。前者主要包括系统实时监控和系统功能衰变监测, 如数字式飞行数据记录器及其译码设备等, 其根本目的在于保障发动机使用过程中的安全性和可靠性, 防止突发性机械故障, 后者主要包括检视探伤技术和监

测诊断技术, 如孔探技术和滑油检测等, 目的在于最大限度地减少发动机的分解次数和范围, 保持运动精度, 合理延长使用寿命, 同时指导发动机视情维修, 降低维修费用, 提高利用率等。

孔探技术作为无损检测(NDT)技术重要分支, 是一项新兴的可视探测技术, 一直在航空发动机的维护中发挥着重要的作用。目前, 随着面向发动机维护的内窥技术产品性能的不断提高, 孔探技术日渐成为发动机检视探伤技术的主流, 在现代航空发动机维护中的应用愈来愈

广泛,极大地推动了发动机故障诊断与监测工作的顺利进行。

目前,在实际发动机维护工作中,硬杆式、光纤式和电镜式孔探仪都有着不同范围、不同方式的应用,从一定程度上满足了故障检测的需要。但是,传统的孔探设备都存在着不小的缺陷和不足:探头伸入过程操作复杂,对工作人员经验要求高;检测工作主要靠工作人员直接目视;无法对具体的损伤尺寸作定量的测量;无法对内部损伤状况进行立体显示;系统不能对缺陷或损伤做出自动评估,更不能预测故障的发生。这些缺陷在实际操作中导致诊断结果的可靠性难以保障。为此,中国民航总局将研究航空发动机的状态监测和故障诊断技术作为保障航空安全的重要手段列入了中长期科技发展规划中。2000年初,民航总局与南京航空航天大学故障诊断研究所就目前发动机故障检测与诊断中应用到的孔探技术联合立项,旨在解决传统孔探技术所存在的问题,自行研制开发出达到国际水平的基于孔探技术的发动机故障诊断系统,满足日益增长的国内民航维修市场需求。

1 系统概述

20世纪70年代末,Marr创立的视觉计算理论对立体视觉的发展产生了巨大的影响,现已形成了从图像获取到最终的景物可视表面重建的完整体系,在整个计算机视觉中已占有越来越重要的地位。立体视觉的基本原理与人类视觉的体感知过程类似,是从两个(或多个)视点观察同一景物,以获取在不同视角下的感知图像,通过三角测量原理计算图像像素间的位置偏差(即视差)来获取景物的三维信息。因此,一个完整的立体视觉系统通常包括图像获取、摄像机定标、特征提取、立体匹配、深度确定及内插等6大部分^[1]。近年来,立体视觉技术在医学诊断和工业检测中的应用越来越广泛,主要体现在医用和工业内窥技术设备的发展方面,如日本Olympus公司最新研制的IV6C6和IV8C6系列工业可测量内窥镜产品,充分利用

立体视觉原理,实现了被测工件的三维测量,从而使得工作人员直接利用系统得到各项操作数据,进行损伤评估,大大促进了工业无损检测技术的发展。

本文立足于自行研制开发先进工业可测量内窥镜产品的思路,提出了基于孔探图像的3D测量和立体重建系统的研制方案,利用先进的光电技术、计算机视觉技术以及图像处理技术等软件技术,实现孔探图像的3D测量和立体重建。在研究与开发过程中,借鉴了Olympus公司的IV6C6工业内窥系统的先进技术,通过对Olympus产品的分析和研究,并针对它在发动机故障诊断的实际应用中仍存在着诸如不能测量损伤表面面积以及不能进行表面重建等的缺陷和不足,提出了功能更为完善的工业内窥系统,本系统的具体功能包括:图像获取与摄像机几何定标;图像预处理;立体图像匹配;深度计算及三维测量;深度图像重建;损伤模式识别及评价。

以上各功能在系统中由各自的功能模块来实现,下面将具体介绍各模块的功能以及其实现的具体方法。

2 图像获取与几何定标

2.1 图像获取

孔探图像获取的过程一般为,将内窥探头伸入到欲检测的零部件内部,如燃烧室,位于内窥探头头部的光源发出的光线通过反射,进入探头头部的目镜,再投射到CCD芯片上,CCD芯片将光信号转变成为电信号,通过电缆线可以直接传给监视器,同时,电信号也可以传给图像采集卡,通过A/D转换和帧存储器,将视频信息转换成数字信息,在计算机上获得左右图像对。孔探图像获取系统见图1所示,其主要由以下几部分组成:内窥探头i;CCD摄像机和视频监控器ii;图像采集卡iii;微机系统iv。

图像获取的关键点在于对应立体像对的产生,这就直接涉及到立体视觉成像技术的应用,通常可以采用平行光轴的双目视觉,其基本原理是在自然光或一定环境光照的条件下,由分

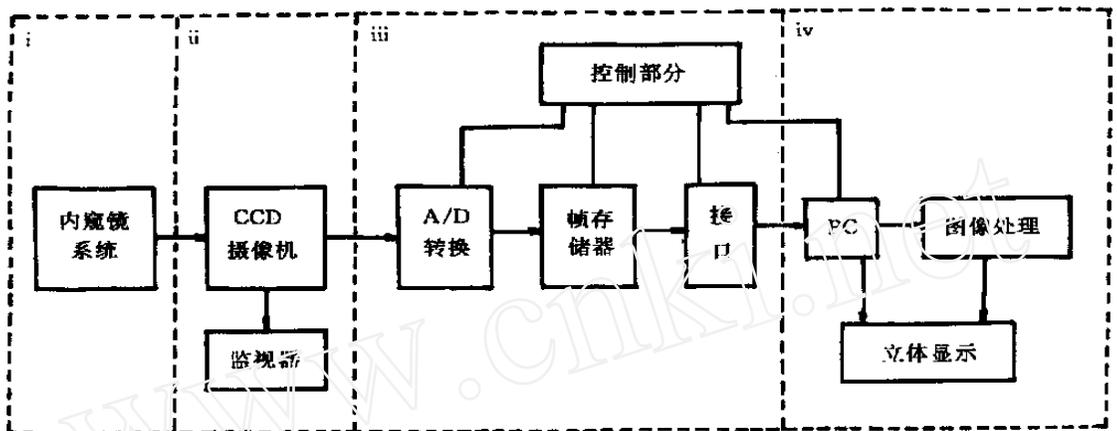


图 1 孔探图像获取系统

离一定距离的两个相机各自摄取对象的图像,找出空间物点在两个图像中的对应点,从而根据几何成像关系得到该点的距离信息,如图 2 所示为平行光轴的双镜头立体成像系统原理图。图中两个目镜的光轴平行,有固定的间距,

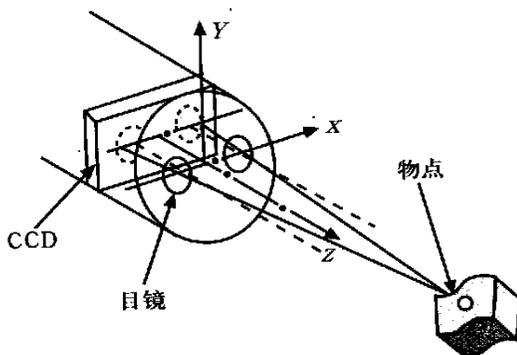


图 2 平行光轴双目成像原理图

从工件反射的光线通过透镜被 CCD 的不同感光区吸收,是获取左右对应图像对的关键。对于目标物体上的一个固定点,由于透镜间存在基线距离,所以左右像对的对应点间产生视差。CCD 的性能是保证所获取的图像质量的关键。本系统采用 Olympus AT60D/60D IV 6C6 探头,其光学视角范围为 60° ;深度范围为 $5\text{ mm} \sim$,端口外径为 $\varnothing 6.1\text{ mm}$,端头硬段长度为 26.9 mm ^[2]。

2.2 摄像机几何定标

摄像机标定是为了确定摄像机的位置、属性参数和建立成像模型,以便确定空间坐标系中物点同它在图像平面上像点之间的对应关系。对于理想的平行视点模型,其核线与图像扫描线重合,这一特点可大大降低立体匹配的复杂性。摄像机标定的方法可分为两大类,第一类直接估计摄像机位置、光轴方向、焦距等参数;第二类是通过最小二乘法拟合,确定三维空间点映射为二维图像点的变换矩阵^[3]。建立一个有效的摄像机模型,处理能够精确地恢复出空间景物的三维信息外,还有利于解决立体匹配问题。

图 3 画出了由物点开始,经相机成像后,到计算机图像坐标之间坐标变换所历经的四个步骤。每一个转换步骤,都包含有一些相机标定过程中要确定的参数。由于本系统采用平行光轴的双目视觉成像方式,在孔探的探头部位移动的同时,两个成像的相机的相对位置不变(基线长度及坐标系相对固定)。另外,对于一般的光学系统而言,透镜畸变影响可以忽略,因此标定的复杂程度大大降低,只需要确定焦距 f 和基线长度 d ,具体算法见本文第四部分。

3 预处理及特征提取

3.1 图像预处理

从图像获取系统得到的是符合立体视觉原

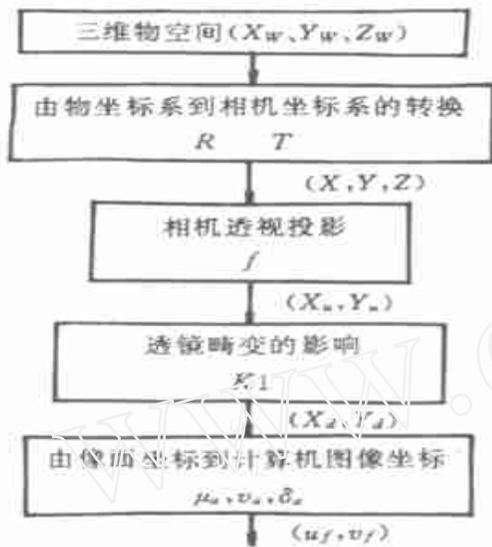


图3 成像过程坐标转换示意图

理的左右像对, 都是灰度图像, 在对其进行操作和计算之前, 必须对其进行必要的预处理。对孔探图像, 除了进行常规的降噪、滤波和图像的增强等处理外, 关键还要进行内窥图像的畸变校正。校正畸变的目的是两个方面, 一是提高立体视觉的定标精度, 正确地完成后面的匹配和重建工作; 另一目的是用来精确测量缺陷区域的面积大小。不同于传统的利用像差理论, 本系统采用数字图像处理技术来进行校正, 其实质是一个图像恢复过程, 具体分为几何变换和灰度校正两个步骤。

几何变换是对理想图像所在的坐标空间进行变换, 使得理想图像上的像素与实际图像的像素点对应起来, 用多项式来近似该对应关系, 再根据拟合多项式的参数求解方法, 从而得到理想图像与畸变图像间的几何变换关系式^[4]。近似多项式如式(1)所示, 其中 a_i 为待定的未知系数, r 为畸变图像上点的极坐标, r^i 为理想图像上像素点的坐标。

$$r = \sum_{i=0}^n a_i r^i \quad (1)$$

一般情况下, 变换后的坐标不能恰好落在实际图像的像素点上, 因此需要进行灰度校正来计算该点的灰度级, 本系统采用三次卷积法

实现。灰度级的近似表达式为

$$f(x, y) = a \cdot B \cdot c \quad (2)$$

其中, B 为坐标点的灰度矩阵,

$$a = [S(1 + \Delta y), S(\Delta y), S(2 - \Delta y)]$$

$$c = [S(1 + \Delta x), S(\Delta x), S(2 - \Delta y)]^T$$

$$(\Delta x = x - [x], \Delta y = y - [y])$$

式中的 $S(w)$ 函数为

$$S(w) = \begin{cases} 1 - 2|w|^2 + |w|^3 & |w| < 1 \\ 4 - 8|w| + 5|w|^2 - |w|^3 & 1 < |w| < 2 \\ 0 & |w| \geq 2 \end{cases}$$

在实现上述校正过程, 需要确定畸变图像的对称中心和(1)式中的多项式系数, 这可以利用系统对标准的校正样板成像, 比较校正样板和它所成的像来实现。图4为灰度几何校正前后的孔探图像。



图4 几何纠正前(左图)和几何纠正后(右图)

3.2 特征提取

对灰度图像进行特征提取是进行立体匹配的前提条件。根据孔探图像具有亮度强、视场暗、轮廓不清楚、区域特征不明显以及点光源下遮挡的孔探图像严重等特点, 选取点特征作为孔探图像的图像特征。具体处理过程为: 对左右两幅图像 $f_L(x, y)$ 和 $f_R(x, y)$ 上的每一个像点 (i, j) , 分别计算其在水平、垂直、左对角和右对角方向上与相邻像素灰度值的平方和, 并取最小值作为该像点特征的初值。然后将图像划分成大小为 $m \times n$ 的互不重叠的区域 $W_{p,q}$, 对每一个互不重叠的 $m \times n$ 区域, 求坐标 (i^*, j^*) , 使之点特征初值在区域中最大, 从而得到该图像的所有特征点。

4 立体匹配

立体匹配是视差测距过程的最主要的步骤之一,也是立体视觉中最困难的问题。当空间三维场景被投影为二维图像时,同一景物在不同视点下的图像会有很大不同,而且场景中的光照条件、噪声干扰和畸变以及摄像机特性等诸多因素都被综合成图像中的灰度这一单一值。同时,前面的预处理过程有可能导致像素点的进一步失真,因此,立体匹配是典型的视觉“病态”计算问题,很难对图像进行无歧义高准确率的立体匹配。选择的立体匹配方法必须解决以下三个问题: 正确选择图像的匹配特征; 寻找特征间的本质属性; 建立正确的匹配算法^[5,6]。

从本系统的应用目的和要求出发,在前面的预处理过程中,根据孔探图像的特点选取点作为图像特征,因此在立体匹配中也选取点特征作为匹配特征。另外,系统硬件设备的成像方式采用平行光轴双目视觉方式,左右像对的对应像点间有着极强的几何极线约束关系(见图5),同时由于采用人工照明,对应点间的灰度值也有很强的相关性。因此,立体匹配过程融合了极线相关原理与灰度相关原理^[5]。

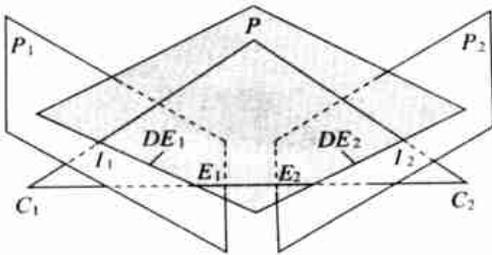


图5 极线相关原理图

根据极线相关原理,物点 P 在左视平面 P_1 上的像点为 I_1 ,其在左视平面上的对应点一定在内极线 DE_2 上,即 I_2 。同理,右视平面上的像点 I_2 在左视平面上的对应点也在内极线 DE_1 上,因此,内极线 DE_2 相当于物点 P 沿着 I_1C_1 直线滑动时在 P_2 上所形成的投影轨迹。据此,当立体视觉系统的内部参数已知时,对任意给定的视平面 P_1 上一点 I_1 ,可根据其在 P_1 上的 N 矢量,利用坐标变换求得其在视平面 P_2 上对

应点 I_2 所在的内极线 DE_2 ,从而将立体匹配中的搜索范围大大缩小。对于平行光轴双目立体视觉,问题更简化为沿着纵坐标相等的直线的搜索,极大提高了匹配速度。

内极线约束构成了图像匹配的局部约束条件,对于左图像中的一个点,在右图像的内极线上仍可能有多个可能的对应匹配点,因此,很有必要再运用灰度相关原理来进行计算。在灰度匹配计算中,我们采用了基于特征的匹配和基于面积匹配的融合算法,即在特征提取的基础上,对特征点进行基于面积的灰度匹配。在匹配过程中,以互相关函数作为两个搜索区域的相似性测度。

对左图像 $f_L(x, y)$ 中一点 (x_L, y_L) , 取以其为中心大小为 $m \times n$ 的模板 T , 在右图像 $f_R(x, y)$ 中平移 T 。假设在水平方向移动 Δx , 在垂直方向移动 Δy , 它所覆盖下的 $f_R(x, y)$ 的第 k 个子图为 S_k 。如果 T 与 S_k 相同, 则它们的差为零。定义 T 与 S_k 之间差别的测度为:

$$\begin{aligned}
 D(T, S_k) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j) - T(i, j)]^2 \\
 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j)]^2 - 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_k(i, j) \\
 &\quad \cdot T(i, j) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(i, j)]^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

当 $D(T, S_k)$ 最小时, T 与 S_k 达到最佳匹配。公式(3)右边的头尾两项都可以近视为常量,因此,中项达到最小既可使 $D(T, S_k)$ 最大,因此归一化互相关函数定义为

$$\begin{aligned}
 C(\Delta x, \Delta y) &= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j) \cdot T(i, j)]}{\left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j)]^2 \right\}^{1/2} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(i, j)]^2 \right\}^{1/2}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

当 $C(\Delta x, \Delta y)$ 达到最大时,得到左图像中的点 (x_L, y_L) 与右图像中的点 $(x_L + \Delta x, y_L + \Delta y)$ 相匹配。图6所示为对孔探图像中某一特征点进行匹配后的对应左右图像,图中黑色标记点为对应点。

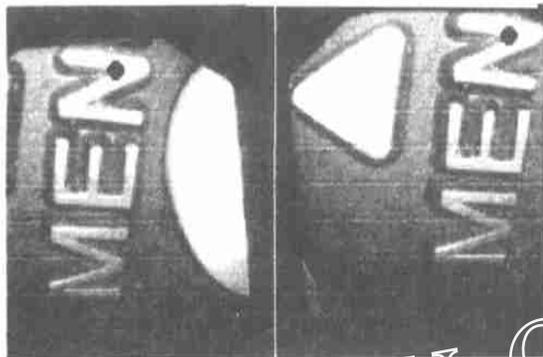


图 6 Olympus 系统生成的左右彩色图像对

5 3D 测量

3D 测量是根据视觉的三角成像原理, 根据左右图像的匹配关系以及坐标关系, 来计算各特征点的三维坐标。在立体匹配后, 我们得到左右图像的对应点, 再根据成像方式所限定的几何关系, 以及定标系统所得到的相机内外部参数, 就可以求出特征点的三维坐标, 特别是得到该点的深度(相对于某一固定点)。由于本系统采用的是平行光轴的双目立体成像方式, 下面简单介绍它的算法^[3]。

如图 7 所示为平行光轴的双目立体成像几

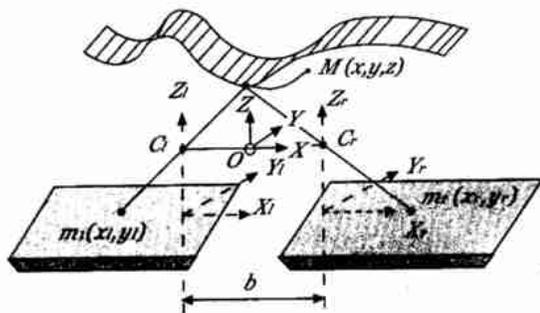


图 7 平行光轴双目立体成像几何原理图

何原理图, C_l, C_r 分别为两相机所在位置, X_l, Y_l 所确定的平面是 C_l 相机的视平面, Z_l 为 C_l 的光轴方向。 X_r, Y_r, Z_r 同理。 $M(x, y, z)$ 为物点, $m_l(x_l, y_l)$ 为 M 点在 C_l 像面上所成的像点, $m_r(x_r, y_r)$ 为 C_r 像面上所投影生成的像点。 C_l, C_r 为基线, b 为两相机间的距离, 即为基线的长度, O 为两相机连线中点, 坐标系 (X, Y, Z) 为物坐标系。

相机到像平面的距离为焦距 f (两相机焦距相同)。按照透视投影定理, M 点对左右相机的成像分别为

$$\begin{aligned} \frac{Z_l - f}{f} &= \frac{X_l}{x_l} & \frac{Z_r - f}{f} &= \frac{X_r}{x_r} \\ \frac{Z_l - f}{f} &= \frac{Y_l}{y_l} & \frac{Z_r - f}{f} &= \frac{Y_r}{y_r} \end{aligned} \quad (5)$$

另外, 物空间坐标与两个相机坐标之间的关系分别为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -b/2 \\ 0 \\ -f \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b/2 \\ 0 \\ -f \end{bmatrix}$$

结合以上两式, 得到 M 点在物坐标系中的坐标:

$$\begin{aligned} x &= \frac{b(x_l + x_r)}{2(x_l - x_r)}, & y &= \frac{b(y_l + y_r)}{2(y_l - y_r)}, \\ z &= \frac{bf}{x_l - x_r} \end{aligned} \quad (7)$$

6 立体重建

立体重建的目的是实现孔探图像的 3D 模型重建, 在此系统采用基于图像的造型和绘制 (Image Based Modeling and Rendering, 简称 BMR) 技术。在上一部分中我们实现了对空间物点三维坐标的测量, 实质上也就进行了对图像特征点三维空间重构, 要实现立体重建, 还必须进行更多的内部插值处理。匹配和内插重建两个模块之间存在一定的信息反馈, 匹配结果约束内插重建, 而重建结果又引导正确匹配。根据 Hoff 等提出的匹配、重建一体化的方法, 在得到匹配的同时重建出完整的视差表面, 并以此为信息不断修正匹配结果, 循环往复最终得到精确的匹配视差。因此, 内插采用一次/二次曲面拟合技术, 同时具有检测视差表面不连续的能力, 整个算法是一种由粗到细引导的多分辨率结构, 从而生成完整的视差场, 而且可以为匹配提供更多的信息, 如不连续性、遮挡等, 提高匹配的可信程度。

BMR 技术综合了计算机视觉技术、计算机图形学以及摄影测量学的相关内容, 实现从二维图像生成几何模型。其具体实现过程主要包括相机复原、模型复原、立体匹配和纹理合成等四个步骤, 有的问题在系统的前期模块中已经得到解决。因此, 在立体重建中, 系统的主要技术路线是基于 CAD 的视觉建模。在具体实现过程中, 我们根据前面所得到测量和内插数据结果, 采用 OpenGL 技术, 在 Windows 平台下以 VC++ 6.0 作为开发工具进行。

7 结束语

孔探图像的三维测量与立体重建系统是基于孔探图像的发动机气路故障监测与诊断系统的前期工程部分, 为后继的基于 BP 神经网络的模式识别和故障预测等功能模块提供数据基础和技术支持。同时系统中也实现了一些相对独立的功能模块, 可直接进入发动机孔探维护的实际应用, 如提供观测物三维数据、立体模型等, 使操作人员通过人机交互, 了解到发动机内部的缺陷状态和模式, 因此具有很大的实用价值, 对促进发动机维护工作的计算机智能化有着一定的现实意义。

由于篇幅所限, 不能在此对系统作更详尽的阐述。同时, 由于整体研制工作是以关键问题为起点的, 如预处理和立体匹配等, 所以系统的某些相对独立的模块的开发工作正在进行, 还不能得到数据或图像结果, 因此, 本文只是着重讨论了系统的整体模块流程和实现方法。随着系统开发工作的进一步进行, 系统的完整面貌和功能将呈现出来。

参考文献

- 1 Marr D. Vision W H Freeman and Compay, 1982
- 2 OLYMPUS INDUSTRIAL Endoscopy System Guide, Version 2, 1999
- 3 刘巽亮 光学视觉传感 北京: 中国科学技术出版社, 1998
- 4 Warren E Smith, et al Correction of distortion in endoscope images IEEE Trans Med Imag. 1992, MT- 11(1): 117~ 122
- 5 高文, 陈熙霖 计算机视觉——算法与系统原理 北京: 清华大学出版社, 1998
- 6 徐建华 图像分析与处理 北京: 科学出版社, 1992

收稿日期: 2001-10-08

作者简介: 作者简介: 于辉(1974-), 男, 博士。

· 本期封面产品简介 ·

圆光栅测角仪

圆光栅测角仪是一台集光机电一体、高精度、自动化的动态角度检测仪器, 是既能检测线角度器件(圆光栅盘、码盘等)又能检测面角度器件(角度件、正多面棱体等)的角度基准检测仪器。它由精密双面止推空气轴系、基准光栅角度发生器、衍射光栅莫尔条纹系统、动态瞄准系统、净化空气稳压控制系统、驱动稳速系统、光电读数系统、电信号细分系统、A/D 转换及计数系统、数据处理及图形显示软件、计算机及自动控制软件系统等组成。

仪器主要技术指标: 1) 动态检测线角度的测量不确定度: $U_{99} = 0.08$; 2) 动态检测面角度的测量不确定度: $U_{99} = 0.12$, 其中高精度面角度的测量不确定度: $U_{99} = 0.09$ 。

圆光测角仪的研制成功, 填补了我国动态

测角领域的空白, 两院院士王大珩教授主持了该项目的鉴定会, 给予了高度评价。该项课题的研制完成, 解决了航空、航天、航海等国防领域中武器装备的制导、导航、定位等测角器件(或传感器)的动态校准等问题, 作为国防计量检定系统中的线角度标准和面角度的标准, 在保证国防角度标准的量值传递和完善国防计量系统图等方面具有重要意义。

圆光栅测角仪的研制成功, 使我国在角度计量方面的能力迈进了国际先进行列, 特别是角度测量的动态瞄准技术的突破, 将大幅度提高角度测量的精度和效率, 并为测角仪器和测角方法的改进提出了全新的思想, 将此技术推广应用具有广泛的社会经济效益。