

文章编号: 1005-2615(2002)03-0293-05

基于立体视觉的孔探分析系统及其应用

于 辉 左洪福 陈 果

(南京航空航天大学民航学院 南京, 210016)

黄传奇

(中国民用航空工业总局科技教育司 北京, 100710)

摘要 孔探分析在现代航空发动机故障诊断中一直发挥着重要的作用。开发基于立体视觉的孔探分析系统, 对提高故障诊断水平和预测准确度, 节约发动机维护成本有着重要的现实意义。系统利用立体视觉技术以及图像处理技术, 完成了对双目视觉左右图像的标定和匹配, 实现了对实体表面的三维测量和立体重建。本文介绍了基于立体视觉的孔探分析系统的基本原理与主要功能, 并结合应用实例验证了系统的有效性。

关键词: 孔探技术; 立体视觉; 摄像机定标; 立体匹配; 三维测量

中图分类号: TP391.4; TP274 **文献标识码:** A

引 言

近年来, 由于发动机运行过程中安全性、可靠性要求的提高, 开展视情维修方式的需要, 促进了各种发动机诊断技术的发展。孔探技术作为无损检测技术的重要分支, 是一项新兴的可视探测技术, 随着面向发动机维护的内窥技术产品性能的不不断提高, 它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^[1]。

传统的孔探设备都存在着不小的缺陷和不足: (1) 探头伸入过程操作复杂, 对工作人员经验要求高; (2) 检测工作主要靠工作人员直接目视; (3) 无法对具体的损伤尺寸作定量的测量; (4) 无法对内部损伤状况进行立体显示; (5) 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, 必须依赖新技术的引进来提高。近年来, 立体视觉技术工业检测中的应用越来越广泛, 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进行损伤评估。基于立体视觉的孔探分析系统正是在借鉴 OLYMPUS 技术的基础上, 作者自行研制开发的发动机故障监测系统, 并最终努力实现其专家化、智能化。

1 系统的基本原理^[2, 3]

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)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。

立体视觉技术中图像获取的关键点在于对应立体像对的产生, 这涉及到立体视觉成像技术的应

基金项目: 民航自选科技基金(编号: E0101-071)资助项目。

收稿日期: 2001-05-08; 修订日期: 2001-08-27

作者简介: 于 辉, 男, 博士研究生, 1974 年 3 月生; 左洪福, 男, 教授, 博士生导师, 1959 年 9 月生; 陈 果, 男, 博士后, 1972 年 11 月生; 黄传奇, 男, 教授, 博士生导师, 1964 年 5 月生。

用。通常采用的平行光轴双目视觉,其基本原理是在一定环境光照条件下,左右两个目镜的光轴固定平行,并有固定的间距。从工件反射的光线通过透镜被 CCD 的不同感光区吸收,各自摄取左右图像而成为立体像对。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,是立体匹配和深度获取的基础。

2 系统的组成

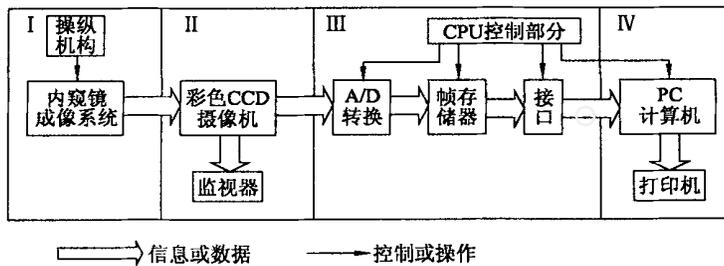


图 1 基于立体视觉的孔探分析系统硬件组成框图

孔探图像采集的一般过程为:将内窥探头伸入到欲检测的零部件内部,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。CC 的性能是保证所获取的图像质量的关键。

本系统采用 OLYM PUS MAJ-688 AT60D/60D-IV 6C6 探头,其技术指标如下:光学视角范围为 60°/60°;深度范围为 7~60 mm,埠外径为 $\varnothing 6.1$

2.1 硬件系统组成

基于立体视觉的孔探分析系统硬件部分主要由内窥镜成像系统(包括操纵机构)、CCD 摄像机和视频监视器、CPU 控制部分和微机系统组成,其组成及相互关系如图 1 所示。系统在目前研究阶段,第 I, II 部分均直接采用 OLYM PUS IV 6C6 工业内窥镜的图像采集部件,而作者集中进行第 III, IV 部分硬件及软件部分的开发。

mm,端头硬段长度为 38 mm。探头由两组镜头和 CCD 组成,焦距 f 相等且固定,CCD 光轴固定平行。

2.2 软件系统组成

基于立体视觉的孔探分析系统立足于 Windows 95/98/NT 平台,将孔探设备采集得到的立体图像对进行分析计算,得到所要测量的数据结果,并且根据用户需要对图像进行三维重建。软件系统的方案如图 2 所示。下面详细说明几个重要模块的实现。

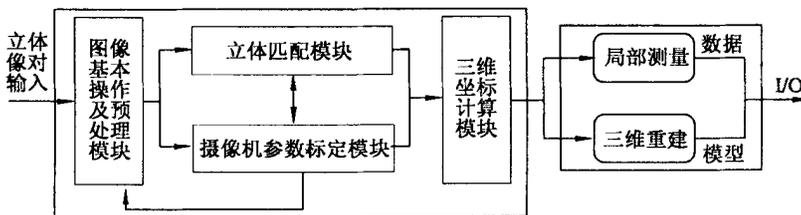


图 2 基于立体视觉的孔探分析系统软件方案框图

(1) 图像基本操作与预处理模块

从图像获取系统得到的是符合立体视觉原理的左右灰度图像对,在对其进行操作和计算之前,必须对其进行必要的预处理,完成图像变换、图像

处理以及图像调整等具体功能。图像调整直接关系到立体视觉中的匹配,直接影响到匹配的准确度和计算的精度^[4]。

由于内窥镜头属于广角镜头,在远离图像中心

处会有较大的非线性畸变,它由径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变三部分构成^[5]。在只考虑径向畸变的条件下,可用下列公式描述

$$\begin{aligned} X &= x + k_1 r^2 \\ Y &= y + k_2 r^2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: (X, Y) 为图像点坐标的理想值; (x, y) 为实际的图像点坐标; $r^2 = x^2 + y^2$, 该式表明, x 方向与 y 方向的畸变相对值与径向半径的平方成正比,即在图像边缘处的畸变较大。因此,图像调整的重要目的在于裁剪掉左右像对中畸变较大区域,减少匹配中的不确定性。同时,根据双目的基线距离 b 左右摄像机的视角等摄像机的内部参数以及相机姿态的外部参数来确定左右图像的公共区域,以确保左图像中的点在右图像中具有匹配点。

(2) CCD 参数标定模块

在本系统中, CCD 的标定不同于单目视觉中的标定,不仅需要单个 CCD 的参数进行标定,而且需要标定左右 CCD 之间的相对关系参数。在系统中,左右 CCD 固定平行,基线距离固定,因此,

CCD 参数的标定不需要所有的内外参数,而仅需要标定出每个 CCD 的焦距 f 和基线距离 b 即可^[3]。焦距的标定过程与一般单 CCD 的标定相同,也可直接从部件生产厂家获取,而 b 则必须通过标定来得到。

根据立体视觉的深度计算原理,当世界坐标系固定在相机光心(本系统定于左右光心的中点)时,有

$$\begin{aligned} X &= \frac{b(u_l + u_r)}{2D} \\ Y &= \frac{b(v_l + v_r)}{2D} \\ Z &= \frac{bf}{D} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: (X, Y, Z) 为物点的坐标; (u_l, v_l) 和 (u_r, v_r) 分别为物点在左右像面上的对应点坐标; $D = (u_l - u_r)$ 为视差。从式(2)可以看到,对空间一定距离 L 的两点 M 和 N , 可通过匹配在左右像面上找到它们的像点,当 f 确定时,就可以求出 b 。相关公式见

$$b = \frac{2L}{\sqrt{\left(\frac{u_M + u_M}{D_M} - \frac{u_N + u_N}{D_N}\right)^2 + \left(\frac{v_M + v_M}{D_M} - \frac{v_N + v_N}{D_N}\right)^2 + 4f^2 \left(\frac{1}{D_M} - \frac{1}{D_N}\right)^2}} \quad (3)$$

(3) 立体匹配模块

立体匹配是最主要的步骤之一,也是立体视觉技术中最困难的问题。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,因此,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; 建立快速和可靠的匹配算法。

在解决大多数工业应用问题中,常用的匹配算法有相关算法、松弛算法、多面体的对应算法以及三相机系统的对应算法等^[3]。由于本系统的成像来自发动机腔体内部,从孔探图像来直接判断部件不确定性很大,同时受损伤表面的光滑性差,粗糙度高,因此灰度是一个很好的匹配特征。在系统匹配算法中,作者主要尝试了灰度相关算法和特征松弛算法。从结论上看,基于特征的松弛算法复杂程度高,速度慢,准确度较高,而灰度相关算法简单易行,速度快,对于粗糙的表面准确度较高。在此基础

上,作者将极线几何约束条件与灰度相关算法相结合,准确度有了很大的提高,而匹配速度达到毫秒级,实现了实时匹配。

(4) 计算、测量和重建模块匹配问题解决之后,计算、测量和重建模块的工作相对简单。计算中存在的重要问题是物理坐标系和图像坐标系的转换,转换过程如下:

$$\begin{aligned} u &= \frac{x}{dx} + u_0 \\ v &= \frac{y}{dy} + v_0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中: u, v 为图像坐标系中的坐标,以像素为单位; x, y 为以毫米为单位的物理坐标; u_0, v_0 为摄像机光轴与图像平面的交点处的像素坐标,系统中将该点取为调整后图像的中心; dx, dy 为 x, y 轴的比例因子,可以通过测量得到。

3 系统功能

在发动机故障诊断与监测的实际工作中,如何

能够定性而又定量的了解发动机燃烧室、涡轮叶片等部件的状态和性能,是孔探分析的核心问题。

基于立体视觉的孔探分析系统立足于自行研制开发先进工业可测量内窥镜产品的目标,借鉴OLYMPUS公司的IV6C6工业内窥系统的先进技术,利用先进的光电技术、立体视觉技术以及图像处理技术等软件技术,实现了孔探图像的3D测量和立体重建。系统的具体功能包括:孔探图像对获取;图像预处理;立体图像匹配;摄像机定标;深度计算及三维测量;图像三维重建等。这些基本功能定性和定量的解决了发动机内部的监测问题,同时也为后期的硬件系统自行研制以及孔探分析智能专家系统的开发奠定了技术基础。

4 系统应用实例

基于立体视觉的孔探分析系统较好的解决了目前民航发动机孔探检查中所急需解决的问题,有着较大的实用价值。作者在系统研制过程中,在民航有关部门的协助下,多次对发动机实体进行成像分析实验,取得了良好的实验结果。在此,本文将某腔体内表面的凹坑图像的大致分析结果来展示说明。

采集到的原始图像整体大小为 640×480 ,系统调整后的左右图像大小均为 200×400 。在立体视觉分析模块中,对调整后的图像进行立体匹配,并根据需要选择计算模式。如图3所示,选择点面模式,图像中周围三点为平面确定点,中间点为测

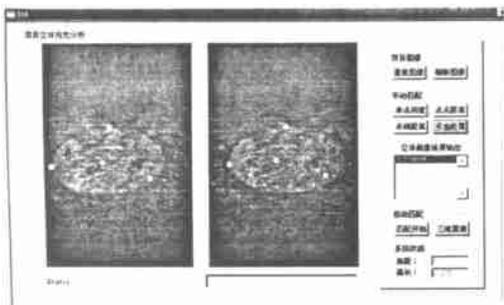


图3 孔探图像立体视觉分析及其结果

量点(均以白色标识出),测量结果为 0.034566 mm,测量点低于平面。图4为选择的关键区域进行自动匹配后重建的网格模型结果,可以清楚看出表面凹坑的效果图。实验证明,该结果与实际状况基本符合。

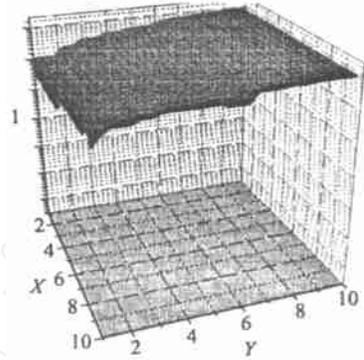


图4 孔探图像表面重建效果图

5 结 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故障监测与诊断专家系统的前期工程部分,为后续的基于BP神经网络的模式识别和故障预测等功能模块提供资料基础和技术支持。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,如提供观测物三维资料、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。

参 考 文 献

- 1 左洪福 发动机磨损状态监测与故障诊断技术[M] 北京:航空工业出版社,1995
- 2 Marr D. Vision W. H. Freeman and company[M] 1982
- 3 刘巽亮 光学视觉传感[M] 北京:中国科学技术出版社,1998
- 4 徐建华 图像分析与处理[M] 北京:科学出版社,1992
- 5 马颂德,张正友 计算机视觉——计算理论与算法基础[M] 北京:科学出版社,1998

Analytical System of Borescopy Based on Stereo Vision and Its Application

Yu Hui Zuo Hongfu Chen Guo

(Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016, P. R. China)

Huang Chuanqi

(Department of Science, Technology & Education Civil Aviation Administration of China Beijing 100710, P. R. China)

Abstract Borescopy plays an important role in modern fault diagnosing of aeronautic engine. Development of the analytical system of borescopic based on stereo vision has a important meaning for improving the level of fault diagnosing and veracity of forecasting, decreasing the cost of engine maintenance. Based on the technology of stereo vision and image processing, the system completes the camera calibration, stereo matching, 3D measurement and reconstruction of objects surface. The basic theory and main functions are introduced and an example is verified.

Key words: borescopy; stereo vision; camera calibration; stereo matching; 3D measurement