

三维数字化综合测量及其关键技术

Integrated Solution and Key Technology for 3D Coordinate Measuring

南京航空航天大学机电学院航空宇航制造工程系 刘胜兰 张丽艳

[摘要] 针对复杂航空产品对自由形面、几何特征、关键点等多种几何要素数据的快速统一获取需求,结合自主研发的曲线/曲面/特征综合化测量系统,介绍集成了摄影测量、双目立体测量、手持接触测量等方法的三维数字化综合测量系统的基本框架,阐述其中的系统标定、立体图像对匹配、多幅视图下的靶点位置求解等关键技术,并给出航空产品综合测量的工程应用实例。

关键词: 综合测量 摄影测量 双目立体测量 手持接触测量

[ABSTRACT] During the process of measuring a complex shape product in the aerospace industry, it is required to get different types of geometric elements including free-form surfaces, geometric features, and some specific points. In this paper, an integrated system is introduced for measuring objects via several methods such as photogrammetry, binocular stereo vision, and hand-held probe measuring, and the measuring data is unified in one coordinate system. It makes more easily to reconstruct curves, surfaces and geometric features from the data. Some key technologies of the system are presented such as the basic framework, the calibration, the registration of stereo image pairs, the reference points determination using multiple views and so on. For demonstration, several complex shaped aerospace products are measured.

Keywords: Integrated metrology Photogrammetry Binocular stereo vision measuring Hand-held probe measuring.

针对复杂航空产品对自由型面、几何特征、关键点等多种几何要素数据的快速统一获取需求,本文结合自主研发的曲线/曲面/特征综合化测量系统,介绍基于视觉的三维数字化综合测量系统的基本框架,阐述其中的系统标定、立体图像对匹配、多幅视图下的靶点位置求解等关键技术,并给出航空产品综合测量的工程应用实例。

基于视觉的三维数字化测量技术是利用数字照相机抓取被测对象的图像并通过图像处理来获得三维几

何信息的方法,由于具有高精度、高效率、现场性、全场性等优点,近年来得到研究人员的大量关注,发展十分迅速。按照是否向物体发射光线信号,基于视觉的三维测量方法通常可分为主动式和被动式,其中主动式中有激光测距法、激光扫描法、结构光法等,被动式中包括双目(多目)立体测量法、近景摄影法等。由于测量原理不同,这些方法获得的数据形式也不尽相同,有的能快速采集密集点云,而有的则适合采集指定的标靶点等。在航空产品中,很多时候需要对自由型面、几何特征、关键点等多种几何要素数据进行综合获取,这时采用单一的测量技术或设备往往难以满足要求,因此,研究曲线/曲面/形位特征综合测量技术十分必要。

例如在航空制造中大量采用的标准工装、表面样件和过渡模具等产品,不但有复杂的自由曲面外形,而且还在自由曲面型面上刻有各种基准线、零件结构线、导孔线等。因此在测量这些产品时,不但要测量其曲面外形,还要测量出这些自由曲面上的三维刻线,且曲线曲面要自动统一在一个全局坐标系下。又如在飞机外形进行测量时,不但需要测量复杂的外形自由曲面,通常还希望测量其上的特征线、各对接部位的边界线等,这些特征线或边界线对产品的外形控制起着重要的作用。

1 三维综合测量解决方案

目前市场上可提供综合测量方案的主要有德国GOM和瑞士LEICA等公司的产品。GOM公司通过对相同圆形靶点的识别实现点云测量设备(ATOS)、靶点测量设备(Tritop)和测笔综合测量。LEICA公司将激光跟踪技术与激光扫描技术相结合,提出全合一(All-In-One)的测量方案,实现点云扫描设备(T-Scan)、激光跟踪仪和测笔(T-Probe)的综合。

这里介绍课题组提出的一种基于视觉的三维综合测量方案,将三种测量方法——基于瞬时光照的双目立体表面点云测量、基于单数码摄像的空间离散目标点测量以及基于立体视觉的无线测笔测量集成在一个系统中,可实现对自由型面、关键点、几何特征等的综合测量。这3个方法形成的既可独立使用又有机综合的3个子系统,分别命名为ReCreator、AutoLocator和

FreeProbe。

1.1 系统框架

ReCreator 子系统由 2 个 CCD 相机、瞬时随机光场投影装置、标定板和部分控制部分组成。测量前在物体表面黏贴辅助坐标拼合的圆形特征靶点,测量时,CCD 相机首先在普通光照下拍摄一对图像,然后开启瞬时随机光照,再拍摄一对图像,根据前一对立体图像来重建靶点的坐标,后一对图像重建物体表面的三维点云数据。

AutoLocator 子系统由单 CCD 相机、标尺、编码点组成,在被测空间布置圆形特征靶点、编码点和标尺,从多角度自由拍摄有一定重叠的系列图像后,通过对各幅图像的自动解算与分析,实现空间特征靶点的位置测量。

FreeProbe 子系统由 2 个 CCD 相机、标定板、无线测笔和控制部分组成,通过手持无线测笔使其测端接触待测目标点,由双 CCD 相机监控测笔上的特征靶点,解算出测端的三维坐标。

综合测量时,先采用 AutoLocator 获得各靶点在整体坐标系下的坐标,ReCreator 和 FreeProbe 在测量中都能够同时获得当次测量幅面内的特征靶点坐标,只要同时获得了 3 个以上的靶点,即可以根据 3 点确定 1 个坐标系的原理,将当次测量的数据变换到整体坐标系下,实现不同测量数据的自动对齐融合。系统原理图如图 1 所示。

2 关键技术

3 个子系统既能各自独立工作,又能实现综合测量,各子系统涉及的关键技术中既有共性的部分,又有各自独特的内容,包括特征靶点识别、瞬时投射装置结构设计、双目立体视觉系统参数标定、随机光照下的立体图像对匹配、多幅视图的相机姿态确定、无线测笔标定等,这里对综合系统中采用的部分关键技术进行介绍。

2.1 双目立体视觉系统参数标定

双目立体视觉测量的基本原理是利用相机的摄影变换(如图 2 所示),通过左右 2 个相机平面上的 p_1 和 p_r

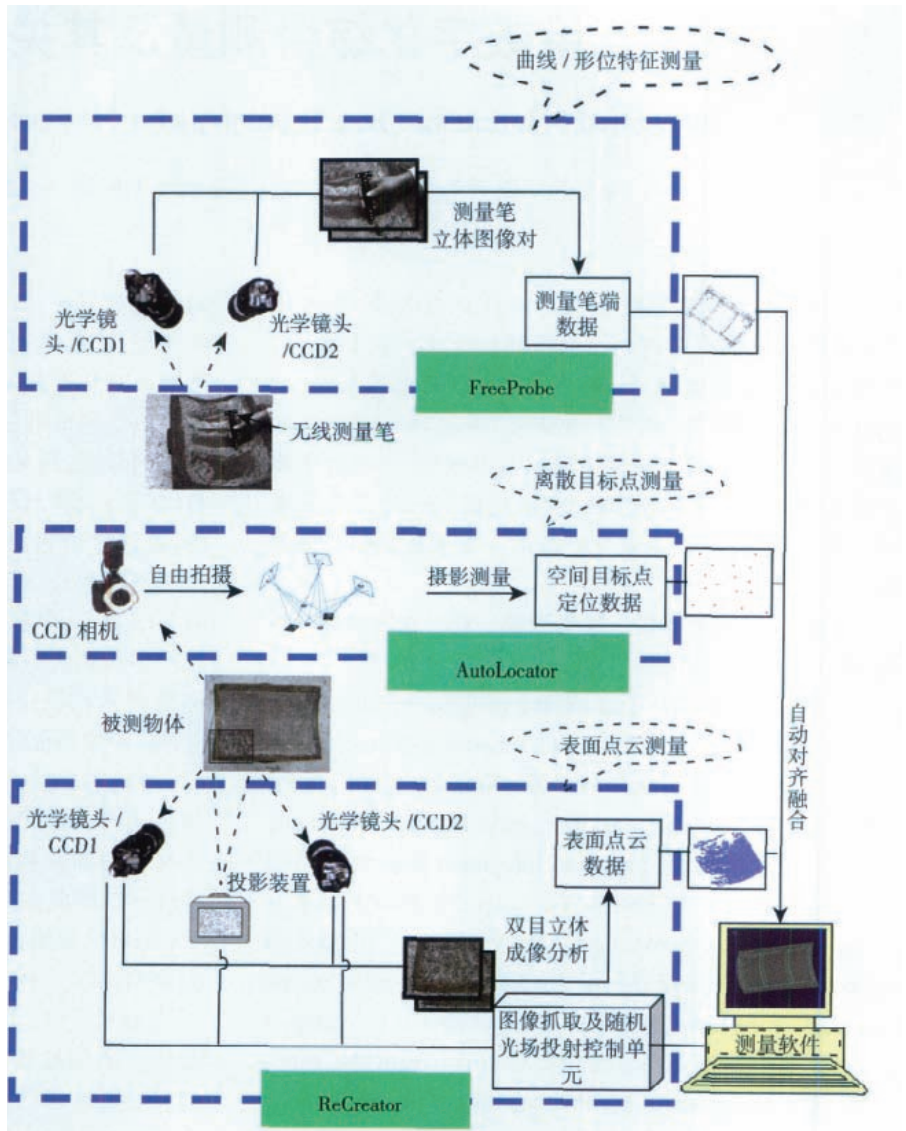


图1 综合测量系统原理图
Fig.1 diagram of integrated measuring system

点的位置来求解被测物体上的一个点 P 的位置。在测量前,必须先确定系统 2 个相机的一些内外参数,包括 2 个相机的相对位置参数以及相机的焦距、主点、畸变等内部参数。

ReCreator 使用布置有圆点阵列的平面标定板进行标定。标定时,手持平面标定板成不同角度和方位,用双摄像机对标定板进行拍摄,得到多组标定用图像。通过 3 步法来实现标定: 第 1 步,根据平面标定板和线性相机模型封闭式求解系统内外参数的初始值; 第 2 步,建立相机的非线性模型,对包括径向和切向畸变参数在内的双目立体系统的内外参数进行优化; 第 3 步,以第 2 步得到的系统内外参数作为初始值,同时将标定板上的靶标点的三维坐标也作为优化变量一起参与优化,再通过 1 个已知的标准距离进行系统的绝对尺度恢复,得到

最终的系统参数。

通常的标定算法都假定靶标的三维坐标均完全精确已知,在标定过程中作为固定不变的量处理,即只进行上述的2个步骤,因此标定靶标所存在的误差必然导致系统标定精度的降低。这里提出的3步法中的最后一步就是充分考虑了用于标定的靶标点三维坐标可能存在的误差,在优化过程中将三维坐标点也加入到优化参数当中,从而得到实际的三维靶标点,消减靶标误差对标定精度的影响。这种方法不需要标定板所有点坐标精确已知,而仅仅需要精确已知1个标准距离即可。

2.2 随机光照下的立体图像对匹配

图像间的立体匹配是双目立体视觉最重要也是最困难的一步,其实质就是给定一幅图像中的1个点(如图2中的 p_1),寻找另一幅图像中的对应点(如 p_r),这2个图像点为空间同一个点分别在两幅图像上的投影。

ReCreator 是通过在物体表面投射纯随机光场来获取图像,因而获得的图像有丰富的纹理信息,图3显示了对某风扇模型进行拍摄的立体图像对结果。匹配的主要步骤是:首先使用特征提取算法或者是手工选取等方式得到首个点的初始匹配,得到该点初始的三维坐标;然后对图像进行独立的灰度矫正;再利用几何一致性和连续性约束等条件,形成立体匹配的最小二乘条件,进行求解就得到这个点的三维坐标和图像匹配坐标;在首个点匹配和重建之后,进一步确定该点周围的其他点的匹配结果和三维坐标。

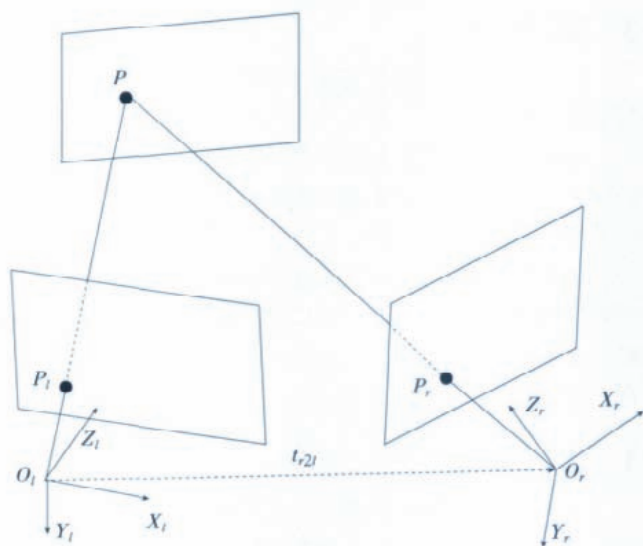
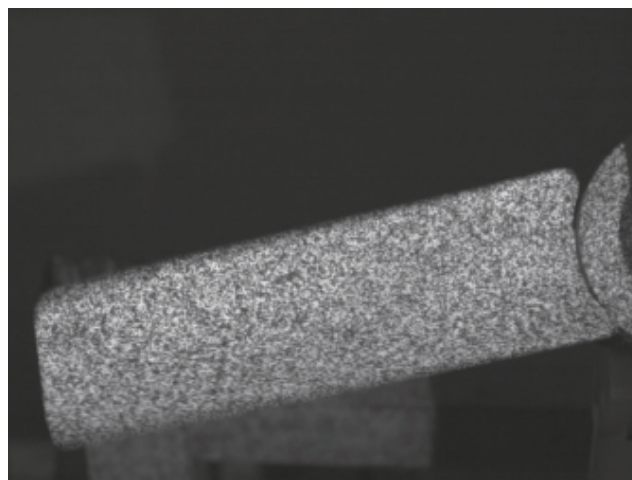


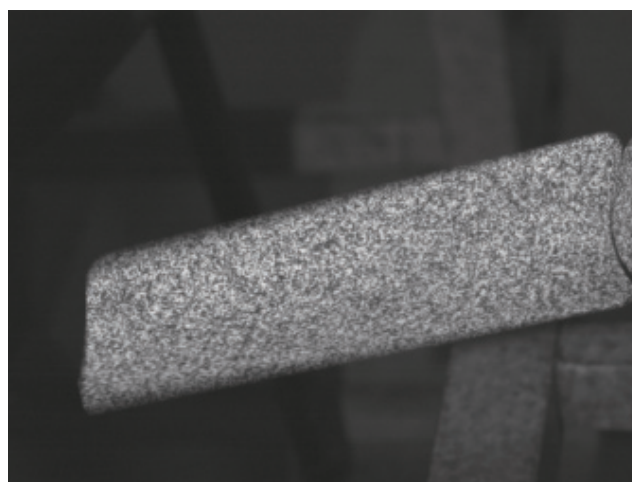
图2 摄影变换

Fig.2 Photogrammetric conversion

ReCreator 采用瞬时随机光场照射下的立体图像,与大多数在一个时间序列上多次投射不同的结构化光的



(a) 左图像



(b) 右图像

图3 随机光照下的立体图像对

Fig.3 Stereo image pairs under random illumination

方法相比,有着明显的优点:不会由于单次测量过程中被测物体的不稳定影响测量,非常适合现场测量和对非静态物体的测量。

2.3 多幅视图下的靶点位置求解

AutoLocator 是一近景摄影测量设备,通过手持一个数码 CCD 相机自由拍摄1组图像来实现空间离散靶点的测量。

求解时,首先从各图像中提取目标点,并建立目标点在不同图像之间的对应匹配关系;然后将问题数学建模为一个大型的非线性优化问题(光束平差),同时优化求解相机内参数、对应每幅图像的相机空间位置和姿态(平移向量和旋转矩阵)以及每个空间目标靶点的三维坐标。为提高重建精度,在进行非线性优化时,建立镜头畸变模型,将对镜头畸变参数的求解转化成一系列的隐式参数。

AutoLocator 具有硬件要求简单、测量方式灵活、目

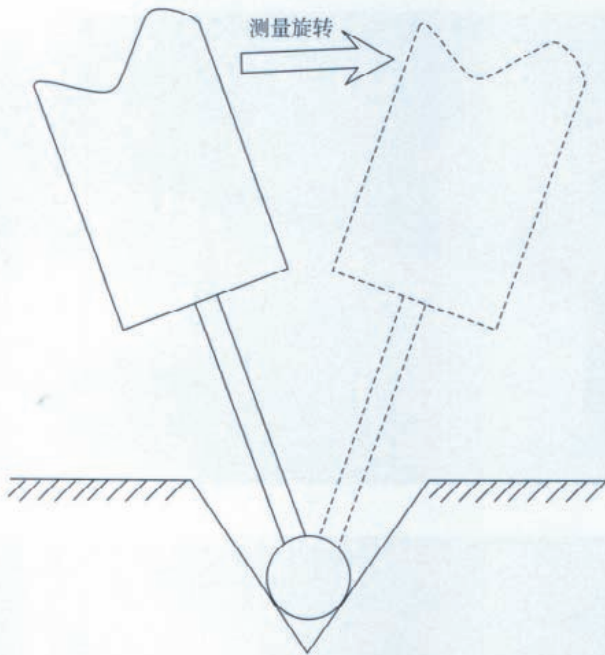


图4 测笔转动示意图
Fig.4 Rotation of the probe

标点一次性全局定位、适合较大范围(10m以内)多目标点的测量等突出优点。

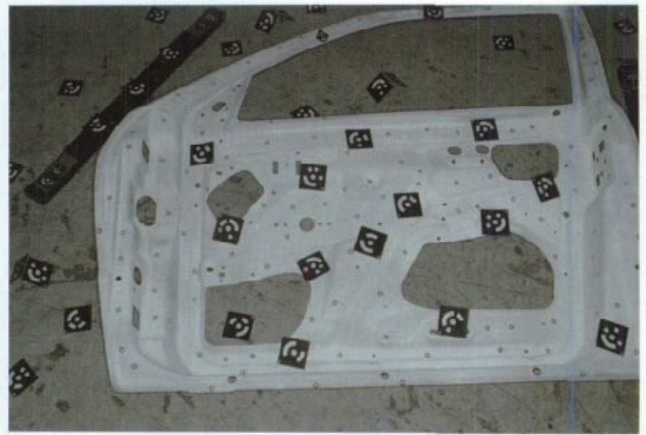
2.4 无线测笔系统标定

FreeProbe 是在双目立体测量结构的基础增加一个手持式轻型无线测量笔,笔上带有8个圆形特征靶点和一个测量头(测针)。

实现测笔测量的关键是系统标定,包括对双目立体结构和测量笔的标定,前者在2.1节中已经进行了介绍,这里介绍后者,即确定笔端与其上8个特征靶点的相对位置关系。可以利用1个圆锥孔来进行测笔标定,将测笔放入圆锥孔内,使得测球完全嵌入到圆锥孔底部中,则测球与圆锥孔自然相切。如图4所示,测笔在圆锥孔内转动,在多个不同的位置上对测笔拍摄,由于每次测球都与圆锥孔相切,因而测球球心坐标理论上没有变化。在每个位置上拍摄都可获得1组标记点坐标,将标记点坐标变换到各自位置上的测笔坐标系下,即可获得多份标记点在测笔坐标系中的坐标数据,可取这些数据的均值作为标记点的最终标定结果。

测量时,手持无线测笔使其测头接触物体上的待测点,并通过遥控计算机和双目立体结构对测量笔拍摄1对立体图像,系统首先自动求出测笔上的标记点坐标并根据测笔标定的结果进一步解算出测头的三维坐标。

FreeProbe 简单便携,可以伸进深孔、窄缝或内腔进行测量,更可方便地获得零件表面的曲线及形位特征数据。



(a) AutoLocator 测量时布置的现场,测量完成后可获得各特征靶点的坐标



(b) ReCreator 进行表面点云测量测现场

图5 钣金件测量实例

Fig.5 Example for measuring a sheet metal part

3 应用实例

应用研发的三维综合测量系统,对多个复杂产品进行了实例测量验证。

图5为对某钣金件综合测量的结果,对该实例既测量了其上面黏贴的特征靶点,也测量了其表面点云,且2种数据拼合在统一坐标系下。

对航空模胎曲面及其上面刻线的的综合测量是困扰航空企业的难题,单独采用多种测量设备都无法满足要求,课题组综合运用 ReCreator 和 FreeProbe 很好地实现了任务。

4 结束语

在航空复杂零件及部件装配等场合,往往需要对自由形面、几何特征、关键点进行综合测量。本课题结合自主研发的曲线/曲面/特征综合化测量系统,介绍了基于视觉的三维数字化综合测量系统的基本框架,并对其中的系统标定、立体图像对匹配、多幅视图下的靶点位置求解等关键技术进行了阐述。(责编 良辰)