

结构光三维测量技术 在模具设计与制造过程中的应用

Structure Light 3D Measurement Technology and Its Application
in Mould & Die Design and Manufacturing

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室 史玉升 李中伟 钟 凯 王从军
黑龙江科技学院现代制造工程中心 程俊廷



史玉升

博士, 博士生导师, 华中科技大学特聘教授。现任华中科技大学快速制造中心主任、华中科技大学材料科学与工程学院副院长、材料成形与模具技术国家重点实验室副主任、中英先进材料及成形技术联合实验室副主任。长期从事先进成形和三维测量技术领域的教学和科研工作。

随着现代制造业的快速发展, 航空航天、汽车等大型制造业对质量控制提出了更高的要求, 且由于这些行业的产品一般大而重, 往往需要将质量问题在现场实时解决。正是基于

结构光三维测量技术作为一种快速、便携、高精度的三维测量技术, 在汽车、航空、模具、医疗及康复工程、家用电器、工业设计、工艺品制作以及儿童玩具等领域均得到了广泛的应用并得到了用户的一致认可, 已成为一种成熟的三维数据获取和质量评价与控制的手段。

这种需求, 近 20 年来各种便携式光学三维测量技术相继问世, 其中结构光三维测量技术由于具有便携性强、测量速度快、测量精度高等优点, 已成为目前使用最为广泛的一种三维测量技术^[1]。

结构光三维测量技术发展现状

1985 年, 位于德国 Munich-Karlsfeld 的 M. A. N. 光学测量技术中心率先利用相移干涉法 (Phase Shift Interferometry, PSI) 实现了变形测量和振动分析^[2]。1986 年, 该中心的研究人员 Dr. Breuckmann 将 PSI 技术引入三维形貌测量, 形成了一种新的三维形貌测量技

术: 相位测量轮廓术 (PMP)。并成立了自己的实验室, 专门从事这方面技术的研究, 近 20 年来相继推出了不同型号的测量系统, 并在工业检测、文物数字化、人体测量等多个领域得到了广泛的应用^[3-5]。除 Dr. Breuckmann 以外, Dr. Steinbichler^[6-9]、Dr. Wolf^[10] 及德国 Technical University of Braunschweig 的 Reinhold Ritter 教授^[11-12], 也是结构光三维测量技术领域的先驱。他们在上世纪 90 年代分别成立了 Steinbichler GmbH、Dr. Wolf GmbH 和 GOM GmbH, 并相继推出了多款结构光三维测量系统。

近 10 年来, 国内的清华大学、

华中科技大学、上海交通大学、西安交通大学等多所高校也在跟踪、消化、吸收国外先进技术的基础上,对结构光测量技术进行了系统研究,并推出了商品化的系统,如:北京天远三维科技有限公司的OKIO-II型三维扫描仪,华中科技大学的PowerScanner系列结构光三维测量系统、上海数造机电科技有限公司的3DSS综合型三维扫描仪等。

从上述国内外的发展情况可知,结构光三维测量技术已较为成熟,但在相位计算和系统参数标定2个关键技术方面尚有很多问题需要解决,为此本文拟对此2个关键技术进行论述,并对其在航空工业中的实际应用情况进行介绍。

结构光三维测量技术在航空模具设计与制造中的应用

结构光三维测量技术作为一种快速、便携、高精度的三维测量技术,在汽车、航空、模具、医疗及康复工程、家用电器、工业设计、工艺品制作以及儿童玩具等领域均得到了广泛的应用并得到了用户的一致认可,已成为一种成熟的三维数据获取和质量评价与控制的手段。目前,本课题组已对数十种被测实体(包括大型飞机机翼、直升机螺旋桨、航空发动机机匣等)进行了现场测量,并且圆满完成了测量任务,达到了项目预期的要求。

传统模具设计的思路与方法首先是利用CAD软件绘制模具三维数学模型,然后根据此模型进行工艺规程安排与数控加工程序编制,最后在数控设备上机械进行机械加工。然而对于表面复杂且自由曲面多的模具,最后的加工质量检测是很大的难题。过去常采用样板对模具进行检测,这样会带来一系列固有问题,如不同模具需要不同的样板,样板的加工与存放不仅使成本增加而且使模具制造周期大大延长。另外,即使采用样板

进行模具检测,人为因素对检测结果影响也很大,造成检测一致性差。结构光三维测量技术的出现有效地解决了上述问题。如图1所示的某型直升飞机螺旋桨模具,首先通过现场测量获取被测模具(见图1(a))的三维点云数据(见图1(b)),然后将得到的数据与原始三维CAD模型进行比较,即所谓的质量评价。具体过程是将点云数据进行旋转与平移,使其与CAD模型重合,然后根据点云数据与CAD模型间的距离来分析加工误差,不同的误差区间用不同的颜色来表示如图1(c)所示,可以非常直观地反映出模具加工精度整体分布情况,如果需要还可以得到任意一点的误差情况,为下一步的修整或其他决策提供原始依据。

在很多情况下,不仅需要得到被测实体的点云数据,而且还需要得到被测实体的三维实体数学模型,以便对其进行数控加工、快速原型制造或模具铸造等。这就需要点对云数据进行进一步处理,即三维数学模型重建。这个过程可以通过CAD软件或逆向软件来完成,目前对于飞机机翼模具及机身等大尺寸的三维测量,也主要使用这一测量方法。图2为波音飞机机翼模具三维测量现场。

结构光三维测量技术中的关键技术

1 相位计算

相位计算是基于相位测量的结构光三维测量中的关键技术之一,包括相位主值计算和相位展开2部分内容。近20年来,由于基于相位测量的结构光三维测量技术和相移干涉法在测量原理上非常相似,二者在发展过程中相互交融借鉴均得到了很快的发展,并且出现了多种相位主值计算方法和相位展开算法。

在众多的相位主值计算方法中,相移法的发展最为迅速,其基本思想是通过采集多帧有一定相移的条纹图像来计算包含被测物体表面三维信息的相位主值^[13]。目前相移算法主要有:标准 N 步相移法或等间距满周期法、 N 帧平均算法、 $N+1$ 步相移算法和任意步长相移算法等。根据相关报道,标准 N 帧相移算法对系统的随机噪声具有最佳的抑制作用,且对 $N-1$ 次以下谐波误差不敏感,已成为结构光测量技术中使用最为广泛的一种相移算法^[14],前述国内外商品化的结构光三维测量系统均使用此方法进行相位主值计算。

相位展开是相位测量领域的一个热点问题,经过多年的发展目前已

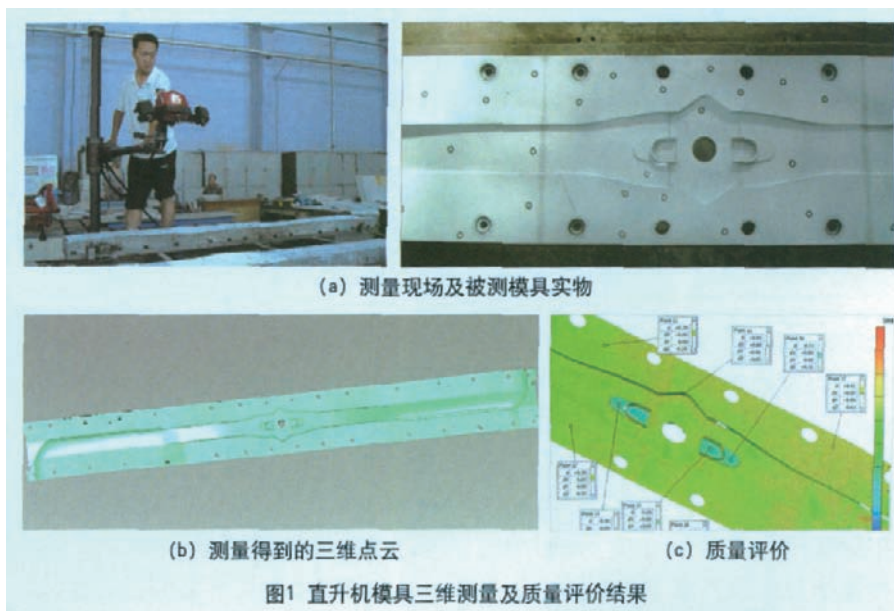


图1 直升机模具三维测量及质量评价结果

有非常多的相位展开算法。这些算法大体上可分为2大类：空间相位展开和时间相位展开。空间相位展开采用一幅相对相位图，通过分析空间相邻元素之间的相位值，然后根据相位连续性适当调整相对相位值恢复出连续的绝对相位分布。Ghiglia和Pritt^[15]的对比分析结果显示每种相位展开算法都取得了一定的成果，但是都只能解决部分问题而没有一种空间相位展开算法能够对所有情况的相位进行展开。与以上的空间相位展开算法相对应，Huntley等提出了时间相位展开方法(Temporal Phase Unwrapping Algorithm)^[16]。



图2 波音飞机机翼模具三维测量现场

这种方法通过投射一系列不同频率的条纹图到被测物体表面，并同步拍摄得到一组受被测物体表面调制的变形光栅条纹图，然后将每点的相位在这个序列上独立进行计算，从原理上避免了误差的传播。此方法在解相过程中不受被测物体形貌的影响，可自动准确地测量表面不连续的物体。与空间相位展开方法相比，时间相位展开虽然需要的图像更多但是其算法的稳定性更强，因此当能够记录多幅图像且速度能满足要求时，时间相位展开方法要更为优越。

在结构光三维测量技术中，当使用空间相位展开时，大多要求被测表面轮廓连续，很难测量表面不连续或有阶梯的物体，然而在工业测量中这种表面不连续的物体非常普遍，因此目前在工业测量领域大多使用时间相位展开算法，其中Gray编码加相移算法与多频外差原理是使用最为

广泛的2种时间相位展开算法。

2 系统参数标定

系统参数标定是结构光三维测量中的另一项关键技术。传统的基于单相机-单投影仪的结构光三维测量系统，测量过程中由投影装置把光栅图像投影到被测物体表面，同时使用相机拍摄下经被测物体表面调制而发生变形的光栅图像，然后通过处理对变形的光栅图像进行计算算出代表物体高度的相位信息，最后根据相位信息和已标定出的系统结构参数对被测物体表面进行三维点云重建^[17]。该方法存在约束过强、标定精度不高、可操作性差等问题，影响

了该技术的实用化^[18]。

近年来一种将投影仪当作一个逆向相机的新型参数标定算法得到了广泛关注。该算法通过建立投影仪图像和相机图像的对应关系将投影仪标定转化为成熟的相机标定，从而将单相机结构光三维测量系统转换为经典的双目立体视觉系统^[19-20]。实现此方法的关键是使投影仪具备“拍摄”标定板图像的能力，再根据计算得到高精度的绝对相位值以后即可根据预先标定出的系统参数重建出被测物体表面的三维数据。

三维测量技术的发展趋势

上述应用案例充分证明了结构光三维测量技术是目前航空工业模具设计与制造中最为先进的一种测量方法并且已得到了广泛应用。但是该方法仍然存在以下缺点：

(1) 需要粘贴大量的标志点，非

常耗时耗力。

(2) 当被测范围增大时，使用照相测量技术测量标志点的精度会明显下降，从而影响数据整体拼合精度。目前的研究趋势是采用大范围跟踪定位技术，对测量终端进行实时跟踪，以完成数据自动拼合的功能。

本课题组研究对比了现有的大范围跟踪定位技术，结果表明：室内GPS拥有相当多的优势，其最大优点是测量误差达到一定值后不会随着测量范围的增大而增大，这一优点使得室内GPS测量技术能够用于大型零部件的高精度测量^[21]。在大型零部件测量现场，室内GPS系统的成本低廉而且耐用，在保持70-100 μm的精度下，室内GPS系统可以在更大的空间里使用，在大于10m的测量空间里室内GPS是精度最高的测量系统^[22-23]。室内GPS系统的另一个优点是可以围绕着被测物体进行360°空间测量，不需要转换坐标系从而降低或消除坐标转换造成的误差。此外还可允许多名操作人员进行独立而并行地测量，这将大大提高大型零部件的测量效率。

为此，本课题组将室内GPS技术和结构光三维测量技术有机地结合在一起形成了一种组合式大尺寸空间精密测量新方法，使用结构光测量技术测量大型零部件表面局部复杂曲面的密集点云数据，同时由室内GPS技术实时跟踪定位结构光测量系统在世界坐标系下的位置和姿态，从而自动完成测量数据从局部坐标系到全局坐标系的转换，得到大型零部件表面的完整三维点云数据。上述方法与现有的测量方法相比，在测量航空工业的大型零部件及其模具过程中，它的测量效率和测量精度均有较大的优势，发展潜力巨大。

注：本文有参考文献23篇，由于篇幅所限未能一一列出，读者如有需要，请向本刊编辑部索取。(责编 阳光)