

文章编号 1004-924X(1999)05-0022-08

工件特征点三维坐标非视觉测量方法综述

祝世平 申功勋

(北京航空航天大学宇航学院 北京 100083)

孙晓明 强锡富

(哈尔滨工业大学精密仪器及测控技术系 哈尔滨 150001)

摘要 对工件上特征点的三维坐标非视觉测量方法进行了综述,其中包括平台高度尺法、电子经纬仪法、坐标测量机法、雷达测量法、莫尔条纹测距法、跟踪式激光干涉仪测距方法等。对每种方法的特点及其测量精度进行了详细的分析,并介绍了目前的发展及应用现状。

关键词 工件 特征点 坐标测量

中图分类号 TP274.5 **文献标识码** A

1 引言

工件上特征点的三维坐标测量在实际生产中是一个迫切需要解决而且有着广阔应用前景的问题,例如对于轿车白车身、导弹壳体等在其质量检验中,需要获得工件上特征点的空间三维坐标值,以此对整个工件的总体装配质量、外型质量等进行评价,并获得相关的尺寸,以便及时反馈给生产制造过程。然而在实际生产现场,该类测量问题一直没有得到很好的解决,许多单位仍在采用传统的检测方法,而这些方法普遍存在着精度差、效率低、成本高等诸多问题,因而大大制约了产品质量和生产效率的提高。近年来,这个问题引起了国内外制造行业的普遍重视,并投入大量资金进行开发研究。本文正是针对当前实际生产的迫切需要,对工件的非视觉测量方法进行了综述,对每种方法进行了详细的分析与介绍。

收稿日期: 1999-04-30

修稿日期: 1999-09-20

2 工件特征点三维坐标测量问题评述

在实际生产中, 工件上的特征点一般有两种形成方式: 一种是非直接刻划的特征点(例如以投射的光点、光条或光面形成的特征点); 另一种是直接在工作表面待测点位置刻划的标记点(例如以十字刻划线的交叉点作为特征点)。无论采用哪种形式, 只有获得这些特征点的准确空间三维坐标值, 才能进一步完成对整个工件的总体装配质量、外型质量等的评价, 以及相关尺寸的测量工作。

工件特征点三维坐标测量问题具有其特殊性和复杂性:

首先, 因为工件的尺寸比较大, 所以若要通过特征点的测量来反映工件的总体装配质量、外形质量, 则要求特征点的数量很多, 而且其在工件表面上的分布也往往很分散, 这就大大制约了测量精度和测量效率的提高:

其次, 特征点的测量精度取决于瞄准过程和测量过程两部分的精度。瞄准过程从物理本质上是一个视觉的工作过程, 而测量是以精确瞄准为前提的。因此无论采用何种测量方法, 制约测量精度和效率的决定性因素是瞄准和测量过程的精度与效率, 因此如何实现准确的瞄准与测量始终是一个关键而且困难的问题。

实际生产中对此类测量系统一般有以下性能指标要求:

(1) 测量精度: 测量精度是任何检测系统最基本的性能指标, 由于工件特征点三维坐标测量问题本身所具有的特殊性和复杂性, 给测量精度的提高带来了较大的困难;

(2) 测量效率: 由于检测系统应用于工业现场及生产线上, 所以必须具有较高的检测效率。但由于工件上特征点的分布很分散, 所以在一定程度上降低了测量效率;

(3) 自动化、智能化以及良好的人机界面: 检测系统应该尽量减轻操作人员的工作强度, 方便操作人员的使用, 减小人为因素对检测结果带来的影响, 使系统具有自动化和智能化的特点;

(4) 柔性: 检测系统本身只作较小或适当的调整, 即可对不同型号的工件和具有不同表面纹理特征和法线方向的特征点进行测量;

(5) 开放性: 在原有检测系统的基础上可以比较容易地增加新的功能, 而不需要对原有检测系统作较大的改动;

(6) 易维护性: 检测系统出现故障后应能较为迅速地被修复, 并及时恢复到正常的工作状态;

(7) 测量盲区: 检测系统应该尽量避免或减少测量盲区;

(8) 环境适应性: 检测系统在实际生产现场应该能够稳定、可靠地工作, 对于外部环境应该具有较好的抗干扰性。

现有的测量方法各有利弊, 没有能够较好地满足上述各项指标要求, 往往难以将准确性与高效性二者很好地结合起来以达到令人满意的综合效果, 使工件特征点三维坐标测量问题往

往成为“瓶颈”问题,拖延了整个研制、生产的周期,同时由于测量精度偏低,给产品质量的评定以及有关试验结果的分析带来了一定的困难。因此针对工程实际中的迫切需求,如何准确、高效地完成工件特征点的三维坐标测量成为具有十分重要的意义而且迫切需要解决的问题。总之,有关工件特征点三维坐标测量的理论和方法的研究具有很大的现实意义。

目前国内外关于大尺寸空间三维坐标测量的方法很多,主要可以分为接触式与非接触式两大类,而工件特征点三维坐标测量是其中一个比较特殊的问题。主要的测量方法可以归纳为如下几大类:平台高度尺法、电子经纬法、坐标测量机法、雷达测距方法、莫尔条纹测距方法、跟踪式干涉仪测距方法、基于计算机视觉的非接触测量方法等。本文针对其中非视觉测量方法进行综述。

3 工件特征点坐标测量非视觉方法综述

3.1 平台高度尺法

平台高度尺法利用平台平面作为水平基准,通过对工件的调平过程产生工件上的水平基准平面,并使之与平台平面平行。利用平台高度尺在每一个测位测量工件上的特征点相对于平台平面的高度差,并可以将其换算到相对于工件水平基准平面的高度差,通过不断变换测位完成对整个工件上所有特征点的测量。

平台高度尺法原理清楚直观,曾在生产现场被广泛使用。其不足之处在于对工件水平基准平面的调整比较困难,测量时需要的人员多、劳动强度大、周期长。而且人为因素对测量结果的影响比较大,例如用高度尺尖对准被测特征点的过程会因人而异,而且受到操作人员经验和工作状态的影响,另外该方法只能进行高度方向上一个维度尺寸的测量,难以适应实际生产中对工件质量检验的要求。所以平台高度尺法是一种精度差、效率低的测量方法,不能满足科研、生产的需要。

3.2 电子经纬仪法

电子经纬仪法是计算机辅助光学测量方法,其基准为光学视线,故无挠度、变形等问题。且所需工艺装备少,通过计算机对测量数据进行处理,因而具有准确、通用、灵活方便以及操作简单、量程大等优点,在工件(如飞机装配型架)的特征点三维坐标测量中被广泛使用^[1]。

较为常用的是双经纬仪法,其测量误差由基准尺长度误差、标定误差、两经纬仪的测角误差、人眼的瞄准读数误差等组成。测量精度与两经纬仪之间的距离及其相对于被测对象的位置有关,测量前应根据被测对象的尺寸大小、测量精度要求以及现场条件设计出两经纬仪相对于被测对象的最佳测量布局,这就给实际使用带来了一定的困难,降低了测量效率。

另外在实际测量中,有时由于被测对象的尺寸较大,使视线受到阻碍以及测量空间的限制等原因,使得两台经纬仪一次架设后不可能同时瞄准到全部被测点,即有些测点处于“盲区”而无法被瞄准与测量。因而在测量时需多次改变两台经纬仪的架设位置,同时则需要多次标定并设计出最佳测量布局,这就大大降低了测量效率。为了克服“盲区”问题并提高测量效率,有时

需要采用多经纬仪(四台或八台)全方位测量法,但同时也带来成本提高、占用过多空间的问题。

3.3 坐标测量机法

坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, 简称为 CMM), 又称为三坐标测量机。它是精密机械为基础, 综合应用光学、电子技术、计算机技术等先进技术的测量仪器, 主要包括四个部分: (1) 坐标测量机机体; (2) 数据处理及控制系统; (3) 测头; (4) 测量及控制软件。在测量时, 将被测零件放入其容许的测量空间内, 并测得零件几何型面上各测点的三维坐标值, 通过计算即可得到被测零件的几何形状以及相关尺寸。

目前坐标测量机在国内外的应用已经相当普遍, 世界上生产坐标测量机的厂商超过 50 家, 品种规格已达 300 种以上, 全世界拥有 2 万台以上, 我国也拥有 400 台以上^[2]。

坐标测量机主要用于:

- (1) 对三维复杂零件的尺寸、形状和相互位置进行高精度测量;
- (2) 实物模型数字化, 例如对于机翼的实验模型、汽车车身实验模型的测量;
- (3) 在线质量控制。

坐标测量机的优点在于测量精度高、效率高、通用性好, 是现代科学研究、工业生产必不可少的精密测量仪器^[3]。按照坐标测量机的测量精度可以分为计量型和生产型两种。计量型坐标测量机一般放在有恒温条件的计量室内用于精密测量, 其测量分辨率最高可达 $0.1\mu\text{m}$, 空间任意方向的测量不确定度为 $5\mu\text{m}/\text{m}$ 以下; 生产型坐标测量机一般放在生产车间用于生产过程中的检测, 其测量分辨率最高可达 $1\mu\text{m}$, 空间任意方向的测量不确定度为 $5\mu\text{m}/\text{m}$ 以上^[4]。

3.4 雷达测距法

(1) 激光雷达测距系统

激光雷达测距系统利用光速在空气中传播速度为常数的原理, 由测距器主动向被测物体发射激光脉冲或经过调制的激光束信号(调制方法包括幅度调制和频率调制两种), 光束遇到被测物体反射回来并被探测器所接收。距离信息的获取是通过测量激光脉冲在测距器与物体表面之间的飞行时间, 经过调制的返回信号的相位移动, 反射光强度或反射率(回波能量与光源能量之比, 是描述物体固有性质的重要参数)等参数来获得^[5-7]。

这种方法具有以下优点^[8]:

- a. 对物体的表面性质不加限制;
- b. 可测得绝对距离;
- c. 不需要拍摄图像并作图像处理, 因此被测距离的获得与灰度图像无关。

该方法的不足之处是成本较高, 使用激光会造成环境公害。

(2) 超声波雷达测距系统

超声波雷达测距系统的基本原理与激光雷达测距系统是相同的, 利用了声速在空气中传播速度为常数的原理, 在生物界蝙蝠就是利用超声波测距的原理在飞行时躲避障碍物的^[9]。

(3) 微波雷达测距系统

微波雷达测距系统的基本原理与以上两种雷达测距系统也是基本相同的, 但是微波雷达

避免了激光雷达和超声波雷达系统容易受烟雾、灰尘、空气密度变化等外界环境条件干扰的问题,适合于在更广泛的环境条件下使用。G. S. Woods 提出了一种复合型微波雷达测距系统,该方法首先利用频率调制连续波方法(FM CW)进行绝对距离的测量,然后利用高精度的连续波方法(CW)进行相对距离测量,结合以上两种方法即可进行绝对距离的高精度测量,实验结果表明在 50cm 范围内测量误差小于 $0.1\text{cm}^{[10]}$ 。

3.5 莫尔条纹测距法

莫尔条纹技术利用刻划有高频等间距条纹的标尺光栅与指示光栅相重叠,并且二者之间有一个很小夹角时相对运动形成低频莫尔条纹的原理。利用莫尔条纹技术进行测距是基于被测深度包含于被测物体表面所调制的条纹相位信息中,从中可以解调出被测表面轮廓、形状的原理。该方法适合于物体的轮廓、形状测量,其主要包括以下几种方法^[11]。

(1) 双光栅莫尔条纹测距系统

该系统需要一副精密的匹配光栅,投射光栅放置在光投射器前,摄像机光栅放置在摄像机前,光投射器和摄像机相对深度方向都有一个夹角。光投射器发出的投射光的幅度被投射光栅所调制,然后投射被测物体上。被测物体的表面轮廓调制了投射光的相位,摄像机通过摄像机光栅将会拍摄到相应的莫尔条纹。而摄像机光栅相当于对投射光栅的幅度调制进行了解调,摄像机所拍摄到的莫尔条纹包含了表面轮廓高度信息,利用三角法即可求得被测深度。该方法的关键在于对光投射器和摄像机的准确标定以及对莫尔条纹图像的自动分析^[12]。

(2) 单光栅莫尔条纹测距系统

单光栅莫尔条纹测距系统去掉了摄像机光栅,而只保留投射光栅。根据投射光栅放置位置的不同,又可以分为以下两种形式。

a. 对于相对比较平坦的物体表面:

在这种情况下,可以把投射光栅贴近物面放置,物体表面通过光栅进行照明,并利用摄像机拍摄阴影莫尔条纹图像。这种方法除了不需要一副精密的匹配光栅之外与双光栅莫尔条纹测距系统的基本原理是相同的。G. Mauvoisin 结合干涉方法和阴影莫尔条纹技术,采用基于相位移动的方法和 FFT 方法,在 20mm 范围内的测量误差小于 $0.01\text{mm}^{[13]}$ 。

b. 对于一般的物体表面:

此时投射光栅与物面距离较远,由投射器将周期性的光栅像投影到物体表面上,则投影光栅像的位相受到物体表面轮廓的调制而成为变形光栅像,用摄像机直接拍摄被测物面的投影光栅像,同时对平面物体拍摄投影光栅像作为参考图像。最后由计算机解调出变形光栅像的位相就可以提取出被测物体的高度轮廓。

按照解调方法的不同,又可分为以下各种测量方法:例如莫尔等高线法^[14]、傅立叶变换轮廓法^[15]、步进移相法^[16]、空间相位探测法^[17]等。江毅等利用傅立叶变换轮廓法(FTP)实现对物体表面轮廓的测量,最大测量高度为 1m,测量精度优于 0.3%,重复性精度优于 0.1%。相对于其它投影光栅条纹强度进行分析并得到被还原的相位,该方法不需要较均匀的光栅图像,相位还原直接由条纹分析实现,其测量准确度主要依赖于条纹中心位置的定位精度。由于采用发

散照明,故可测量较大物体,但对光栅条纹的分析较为复杂^[19-20]。陈文艺等采用交叉光轴投影光栅系统,对 70mm(长)×70mm(宽)×60mm(高)标准平面的高度进行测量,测量平均值为 59.95mm,均方误差为 0.032mm^[21]。

3.6 跟踪式激光干涉仪测距法

美国国家标准局的 K. Lau 等研制了自动跟踪式激光干涉仪测距系统,用于对机器人手腕上被测点的空间位置进行测量,该系统有三种构成形式^[22]:

(1) 自动跟踪式单光束五维激光干涉测距系统(5-D LTIS)

该系统可以测量被测目标的五个空间自由度参数(XYZ 三维空间坐标加上两个角度参数)。系统由计算机、便携式跟踪单元和目标单元所组成。便携式跟踪单元由一路激光干涉仪系统、两轴伺服控制的跟踪转镜及其角度编码器和一个三角支架所组成。目标单元安装在机器人的手腕上,由两轴伺服控制的部分反射镜及其角度编码器和两个光电二极管(安装在反射镜的背面,用来感知入射光的方向和位置,并通过 4 个 A/D 转换器将信号输入计算机以便对反射镜进行伺服控制)所组成。跟踪伺服控制系统要准确控制跟踪转镜的方向,使跟踪单元所发出的激光束准确发射到目标反射镜的中心位置,同时目标伺服控制系统要准确控制目标反射镜使之垂直于入射光束并将其反射回初始发射处。

测量系统所测得的是目标反射镜与跟踪转镜之间径向距离的变化量。为了获得二者之间的绝对距离,需要进行二者之间初始绝对距离的标定。在验证实验中,采用 HP5501A 准单光束平面反射镜干涉系统,并将目标反射镜固定在手动坐标测量机上。该系统在 $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ m}^3$ 空间范围内测量重复性优于 $\pm 10 \mu\text{m}$,在 $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ 空间范围内预计长度测量精度为 $\pm 40 \mu\text{m}$,预计角度测量精度优于 $1''$ 。

(2) 自动跟踪式单光束三维激光干涉测距系统(3-D LTIS)

该系统仅测量被测目标点的 XYZ 三维空间坐标值,采用猫眼反射镜代替伺服控制的反射镜,这样使测量系统更加经济、实用。在验证实验中采用双频单光束干涉系统,其测量精度与 5-D LTIS 基本相同。

(3) 自动跟踪式双光束三维激光干涉测距系统(Two Station 3-D LTIS)

该系统在形式上类似于两个 3-D LTIS 的组合,即采用两套独立的光路伺服跟踪控制系统去跟踪共同的目标点,并基于三角法而非干涉技术的测量原理。该系统的优点在于可以进行绝对距离的测量,同时避免了采用成本较高的激光干涉测量系统。缺点是需要对两个跟踪转镜之间的绝对距离进行精确标定,同时由于体积较大,易受外界环境因素的干扰和影响。L. B. Brown 在此基础上进行扩展,采用自动跟踪式六光束激光干涉测距系统,测量机器人手腕上被测点六个自由度的坐标^[23]。

Osamu Nakamura 等研制的用于标定三维工作台的四光束激光干涉仪系统将角锥反射镜固定在工作台上,通过四个激光干涉仪所测得的距离信息计算出角锥棱镜角点的三维坐标,在 $100 \times 100 \times 100 \mu\text{m}^3$ 的范围内测量精度为 $0.56 \mu\text{m}$ ^[24]。

参 考 文 献

- 1 陆敬舜. 型架双经纬仪三维测量法. 南京航空航天大学学报, 1994, 26(5): 628 ~ 634
- 2 戚加良. 三坐标测量机的选择. 计量技术, 1994, (9): 7 ~ 10
- 3 Spyridi A J, et al. Accessibility Analysis for the Automatic Inspection of Mechanical Parts by Coordinate Measuring Machines. Proc of the 1990 IEEE International Conf on Robotics and Automation, Cincinnati, 1990. 1284 ~ 1289
- 4 曹麟祥等. 三坐标测量机的现状、发展与未来. 宇航计测技术, 1996, 16(2): 15 ~ 19
- 5 Bieman L H. Survey of Design Considerations for 3-D Imaging System. Proc SPIE, 1988, 1005: 138 ~ 144
- 6 Blais F, et al. Practical Consideration for a Design of a High Precision 3-D Laser Scanner System. Proc SPIE, 1988, 958: 225 ~ 246
- 7 Chen Y D, et al. Dynamic Calibration and Compensation of a 3-D Laser Radar Scanning System. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1993, 9(3): 318 ~ 323
- 8 徐建华. 图像处理与分析, 北京: 科学出版社, 1992
- 9 Jarvis R A. A perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(2): 122 ~ 139
- 10 Woods G S, et al. A High Accuracy Microwave Ranging System for Industrial Applications. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(4): 812 ~ 816
- 11 Besl P J. Active, Optical Range Imaging Sensors. Machine Vision and Applications, 1988, 1(2): 127 ~ 152
- 12 Gasvik K J. Moire Technique by Means of Digital Image Processing. Applied Optics, 1983, 22(23): 3543 ~ 3548
- 13 Mauvoisin G, et al. Three-Dimensional Shape Reconstruction by Phase-Shifting Shadow Moire. Applied Optics, 1994, 33(11): 2163 ~ 2169
- 14 Takasaki H. Moire Topography. Applied Optics, 1970, 9(7): 1467 ~ 1475
- 15 Takeda M, et al. Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-D Object Shapes. Applied Optics, 1983, 22(22): 3977 ~ 3982
- 16 Srinivasan V, et al. Automated Phase Measuring Profilometry of 3-D Diffuse Object. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105 ~ 3108
- 17 Toyooka S, et al. Automated Profilometry of 3-D Diffuse Object by Spatial Phase Detection. Applied Optics, 1986, 25(10): 1630 ~ 1633
- 18 江毅等. 物体测量中的傅立叶变换轮廓法. 重庆大学学报, 1994, 17(3): 1 ~ 6
- 19 Zhou J Q, et al. 3-D Object Profilometry Based on Direct Fringe Displacement Analysis. Optics and Lasers in Engineering, 1994, 21: 187 ~ 198
- 20 胡正峰等. 基于光栅条纹强度分析的自动三维面形测量. 计量学报, 1996, 17(4): 251 ~ 255
- 21 陈文艺等. 一种用于复杂形面测量的三维检测系统研究. 计量学报, 1996, 17(4): 256 ~ 260
- 22 Lau K, et al. Robot Performance Measurements Using Automatic Laser Tracking Techniques. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 1985, 2(3/4): 227 ~ 236
- 23 Brown L B, et al. Coordinate Measurement with a Tracking Laser Interferometer. Lasers & Applica-

tions, 1986: 69 ~ 71

- 24 Nakamura O, et al. Four-Beam Laser Interferometry for Three-Dimensional Microscopic Coordinate Measurement. *Applied Optics*, 1994, 33(1): 31 ~ 36

Analysis of Non-Vision 3-D Coordinates Measuring Methods with Feature Points on Large-scale Workpiece

ZHU Shi-Ping, SHEN Gong-Xun

*(The 5th Research Unit, School of Space Technology,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)*

SUN Xiao-Ming, QIANG Xi-Fu

(Dept. of Precision Instrumentation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

This paper gives a detailed analysis of non-vision 3D coordinates measuring methods with feature points on workpiece, such as platform height-gauge method, electronic theodolite method, Coordinate Measuring Machine method, radar ranging method, moire fringe ranging method, tracking interferometer ranging method, etc. The characteristics and measuring precision of each method are analyzed detailedly, meanwhile the current development and application status are also introduced.

Key Word: Workpiece, Feature points, 3-D Coordinate measurement

祝世平 男, 1970年7月20日生。分别于1991年和1994年在西安理工大学测试计量技术及仪器学科获得工学学士和硕士学位。1997年在哈尔滨工业大学精密仪器及机械学科获得工学博士学位。目前在北京航空航天大学“航空与宇航技术”博士后流动站从事博士后研究工作。主要研究领域为精密测试计量技术, 计算机视觉在精密测量中的应用等。已发表论文十余篇。