

视觉检测技术及应用

叶声华, 郝继贵, 王仲, 杨学友

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

[摘要] 视觉检测技术, 尤其是基于三角法的主动和被动视觉检测技术具有非接触、速度快、柔性好等特点, 是一种先进的检测手段, 适合现代制造业的需要。文章论述了视觉检测技术原理, 讨论了已经研制的多个实际视觉检测系统, 从不同角度展示了视觉检测技术在现代制造业中广阔的应用前景。

[关键词] 主动视觉; 被动视觉; 检测系统; 现代制造

引言

检测技术是现代制造业的基础技术之一, 是保证产品质量的关键。近几十年来, 制造业在新材料、新工艺、新设备等方面取得了巨大进步, 许多传统的检测技术已不能满足现代制造业的需要, 表现在: 现代制造产品种类有很大的扩充, 许多新型产品没有相应的检测方法; 现代制造强调实时、在线、非接触检测, 确保对制造过程实现全面控制, 提高生产效率和产品的合格率, 这是许多传统检测手段无法提供的; 现代产品的制造精度大大提高, 要求相应高精度的检测方法。

现代制造业的进步需要研究新型的产品检测技术, 在已经研究的多种技术中^[1], 视觉检测技术具有非接触、速度快、精度合适、现场抗干扰能力强等突出的优点^[2], 能很好地满足现代制造业的需求, 在实际中显示出广阔的应用前景。

视觉检测技术是建立在计算机视觉研究基础上的一门新兴检测技术, 和计算机视觉研究的视觉模式识别、视觉理解等内容不同, 视觉检测技术利用计算机视觉研究成果, 重点研究物体的几何尺寸及物体在空间位姿的三维测量技术。

1 视觉检测技术原理

视觉检测采用图像传感器 (CCD 器件等) 实现对被测物体的尺寸及空间位姿的三维非接触测量。理论研究中有许多视觉测试原理可用于视觉检测, 如纹理梯度法、莫尔条纹法、飞行时间法等^[1], 但实际研究中发现, 在诸多测试原理中, 基于三角法的主动和被动视觉测量原理具有抗干扰能力强、效率高、精度合适、组成简洁等优点, 非常适合制造现场的在线、非接触产品检测及监控。

图 1 给出了基于三角法的主动视觉测量原理, 即结构光传感器测量原理。传感器由光平面投射器和 CCD 摄像机组成。设摄像机坐标系为 $OXYZ$, 光平面和被测物体相交形成光条 l , 记光条上某特征点 P 在 $OXYZ$ 中的坐标为 (x, y, z) , 光平面在 $OXYZ$ 中的方程已知, 特征点 P 在摄像机像素坐标系中的坐标为 (x_m, y_m) , 由摄像机数学模型^[3,4]知

$$\begin{aligned} x_m &= f_x(x, y, z) \\ y_m &= f_y(x, y, z), \end{aligned} \quad (1)$$

又, P 点在光平面

$$f_p(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

[收稿日期] 1999-06-28

[作者简介] 叶声华 (1934-), 男, 湖北沙市人, 天津大学教授, 博士生导师

* 国家“八五”重点攻关项目 (85-725-02-02); “八六三”高科技项目 (863-512-30-01)

内。其中： f_x, f_y 是摄像机的模型函数，在摄像机标定中可以精确地求得； f_p 为光平面在 $OXYZ$ 坐标系中的方程，在标定传感器时可精确地求得。

联立 (1) (2) 可解出被测物体上特征点 P 在坐标系 $OXYZ$ 中的三维坐标。

双目立体视觉传感器是基于三角法的被动视觉测量原理的典型应用，其测量原理如图 2 所示。传

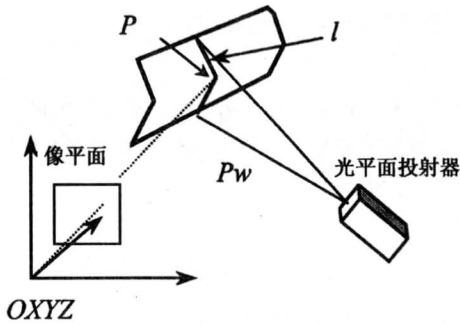


图 1 结构光传感器测量原理

Fig.1 The measuring principle of structure light sensor

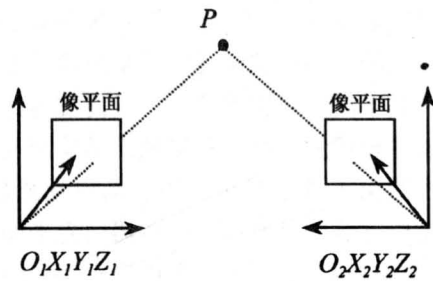


图 2 双目立体视觉测量原理

Fig.2 The measuring principle of binocular stereoscopic vision

感器由两台摄像机组成（分别称为左、右摄像机），记左摄像机坐标系为 $O_1X_1Y_1Z_1$ ，右摄像机坐标系为 $O_2X_2Y_2Z_2$ ，空间被测点 P 在左、右摄像机坐标系中的坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) ， P 点在左、右摄像机像素坐标系中的像素坐标分别为 (x_{1m}, y_{1m}) 和 (x_{2m}, y_{2m}) ，由摄像机模型知：

$$\begin{aligned} x_{1m} &= f_{1x}(x_1, y_1, z_1) \\ y_{1m} &= f_{1y}(x_1, y_1, z_1) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_{2m} &= f_{2x}(x_2, y_2, z_2) \\ y_{2m} &= f_{2y}(x_2, y_2, z_2), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 f_{1x}, f_{1y} 和 f_{2x}, f_{2y} 分别为左、右摄像机的模型函数，通过标定摄像机可以准确地求得。

设左、右摄像机坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 和 $O_2X_2Y_2Z_2$ 之间的关系可表示为

$$X_2 = RX_1 + T, \quad (5)$$

式中： $X_1 = (x_1, y_1, z_1)'$ 和 $X_2 = (x_2, y_2, z_2)'$ ； R 为 3×3 阶坐标系间旋转变换矩阵； T 为 3×1 阶坐标系间平移变换矩阵。

R, T 在立体视觉传感器中是已知的，通过传感器标定可严格地求出*。

由 (3)、(4)、(5) 解出被测空间点 P 在左摄像机坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中的三维坐标。

视觉检测技术的应用非常灵活，能适用于不同类型的检测任务^[5,6]。通常单个视觉传感器实现较小测量空间内的测量，而由多个传感器组成的视觉测量系统可实现较大空间内的测量任务^[5,6]。视觉检测系统原理如图 3 所示。

多个传感器安装在刚性支架上形成统一的视觉检测系统，每个传感器实现对大型被测物体一个局部区域的测量，所有传感器组合实现对物体多个不同区域的测量，从而实现对被测物体的整体测量。

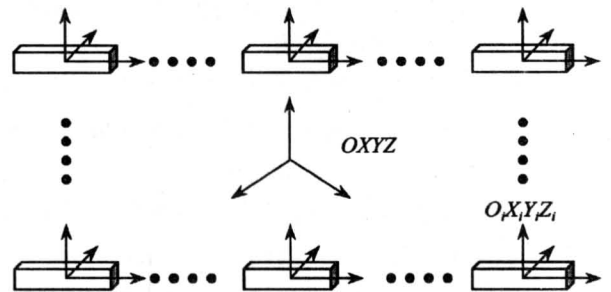


图 3 多视觉传感器组成的视觉检测系统

Fig.3 The visual inspection system with multiple vision sensors

在多传感器组成的视觉检测系统中，每个传感

* 天津大学精仪学院. IVECO 车身视觉检测系统技术报告. 1999

器都有自身测量坐标系 $O_iX_iY_iZ_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 应当研究适合全局的标定技术, 将各个传感器坐标系统一到视觉系统的测量坐标系 $OXYZ$ 中, 在统一的系统测量坐标系中给出传感器的测量结果。全局标定是多传感器视觉检测系统的关键技术和难点, 已经取得的研究成果成功地解决了这一难题, 实现了视觉检测系统的现场全局标定^{[7]*}, 使视觉检测技术走向成熟和实用。

2 视觉检测技术在制造业中的应用

基于三角法的视觉检测技术, 因为具有非接触、速度快、可在线、组建灵活等突出优点, 非常适合于现代制造业的产品检测。研究表明: 视觉检测技术在零件形位尺寸测量、模具测量、逆向工程、机器人视觉引导、微电子器件检测、大型工件三维尺寸检测等领域都有重要的应用价值。已经研究的汽车车身视觉检测系统、无缝钢管直线度、截面尺寸视觉检测系统、微电子器件封装 (BGA) 引脚平面度视觉检测系统等实际应用系统从多个方面显示了视觉检测技术良好的应用前景。

2.1 汽车车身视觉检测系统

在汽车制造过程中, 车身总成上许多关键点的三维尺寸需要检测, 坐标测量机 (CMM) 的传统检测方法只能实现离线定期抽样检测, 效率低, 不能全面反映车身生产的总体质量, 更不能满足现代汽车制造在线检测需求。视觉检测技术很好地解决了这个问题, 典型的汽车车身视觉检测系统如图 4 所示。

汽车车身视觉检测系统的主体是多个视觉传感器, 系统还包括机械运送机构、机械定位机构、电气控制设备、计算机等相关部分。每个传感器对应车身总成一个被测点 (或被测区域), 传感器的具体类型根据实际被测点 (或被测区域) 的实际状态进行选择 (结构光传感器或双目立体视觉传感器)。系统中, 全部视觉传感器通过现场网络总线连接到计算机上, 计算机对每一个传感器的测量过程进行控制。

具体测量过程是: 被测车身总成在电气控制设备的控制下, 由机械运送机构和机械定位机构运送并定位在测量状态。计算机控制视觉传感器按设定顺序依次进行测量, 将传感器测量结果转换到视觉

系统统一的测量坐标系中。

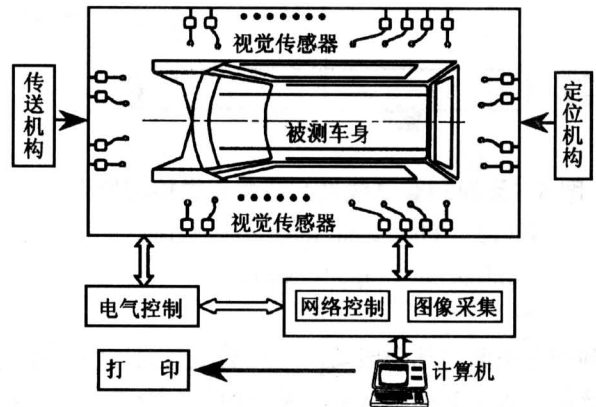


图 4 汽车车身视觉检测系统组成原理

Fig.4 The principle of visual inspection system for Car-Body

汽车车身视觉检测系统测量效率高, 精度适中, 测量工作在计算机控制下全部自动完成。在通常情况下, 这个包含几十个测点的系统能在几分钟内测量完毕, 很好地满足了现代汽车制造对检测速度和精度的需求。此外, 车身视觉检测系统的组成非常灵活, 柔性好, 系统中传感器的类型和传感器的空间分布, 可根据不同的车型进行不同的配置, 以适应具体的应用要求。这很大程度上减少了车身视觉检测系统的使用维护费用, 同时也适合现代汽车产品换代更新速度快的特点。

2.2 无缝钢管直线度和截面在线视觉检测系统

无缝钢管是一类重要的工业产品, 在反应无缝钢管质量的参数中, 钢管直线度及截面尺寸是主要的几何参数。钢管直线度及截面尺寸的在线检测意义重大, 是控制无缝钢管制造质量的关键。现代工业技术已能实现无缝钢管的大批量规模生产, 但无缝钢管直线度、截面尺寸的高效率检测一直没有得到很好解决, 原因可归结为: 无缝钢管的制造环境恶劣, 不允许采用接触式的测量方法; 无缝钢管的空间尺寸大, 大型无缝钢管长度达十几米, 要求检测系统具备很大的测量空间。视觉检测技术, 非常适合于无缝钢管直线度及截面尺寸的测量, 视觉检测原理如图 5 所示。

由多个结构光传感器组成检测系统, 传感器的结构光投射器所投射的光平面和被测钢管相交, 得

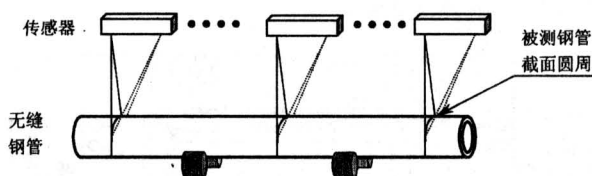


图5 无缝钢管直线度和截面视觉检测原理

Fig.5 The visual inspection principle for seamless steel pipe linearity and section size

到钢管截面的部分圆周，传感器测量到该圆周在传感器三维空间中的位置。系统中每一个传感器实现对无缝钢管的一个截面上部分圆周的测量，通过适当的数学方法，由截面上部分圆周拟合得到截面的尺寸和截面圆心的空间位置。

检测系统在计算机控制下，传感器顺序测量无缝钢管的多个截面，综合所得到的多个截面尺寸和截面圆心，给出无缝钢管的直线度和截面尺寸。

2.3 BGA 芯片封装引脚平面度视觉检测系统

随着半导体集成电路设计技术及制造工艺的飞速发展，集成电路的引脚封装越来越复杂。BGA 芯片对应着一种大规模集成电路引脚封装技术，芯片的引脚为球型，在芯片表面上呈阵列分布。BGA 芯片中所有引脚被设计在一个平面内，这样确保芯片焊接在电路板上时，所有引脚和电路板良好接触。引脚的共面性是反映 BGA 芯片封装质量的重要参数，在芯片制造过程中必须进行检测。

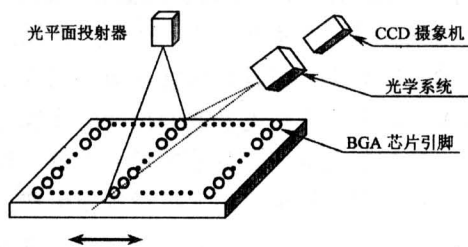


图6 BGA 芯片引脚平面度视觉检测原理

Fig.6 The visual inspection principle for the planeness of BGA chip leg

视觉检测手段是实现 BGA 芯片引脚共面性检测的理想方法，测量原理如图 6 所示。测量装置包括光平面投射器、光学系统、CCD 摄像机。调整光平面投射器使光平面和芯片引脚平面正交，并且

使光平面和引脚阵列的一个方向平行，如图 6 所示。光平面和 BGA 芯片引脚相交的图像通过光学系统由 CCD 摄像机接受，分析图像，可以测量芯片引脚的空间三维坐标。测量时，BGA 芯片在二维工作台上沿芯片引脚阵列的另一方向移动，扫描全部引脚，并完成对全部引脚的测量。

图 6 所示的测量原理可以在一个坐标系中测得 BGA 芯片所有引脚的三维坐标，并根据共面性评定准则，给出 BGA 芯片引脚的共面性参数。

图 6 中光学系统是将光平面和芯片引脚相交的线阵图像分解成几段，形成面阵图像，充分利用面阵 CCD 摄像机的空间分辨率，提高测量精度。

在图 6 所示的测量原理中，相应地研究了工作台移动误差的补偿模型，这样就可以将该测量原理真正用于芯片生产过程中的在线测量。

3 结束语

视觉检测技术已经成功地用于多种生产制造场合，具有非接触、抗干扰能力强、组建灵活等特点，很好地满足了现代制造业的需求，是一种很有前途的产品检测手段。

参考文献

- [1] Jarvis R A. IEEE Trans. Trans. on PAMI, 1983, 5 (2): 122~139
- [2] Pierre Trepagnier. Recent development in visual gaging. Vision'85. 1985, 3: 12~23
- [3] Tsai R A. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 323~344
- [4] Heikkila J, Silven O. Calibration procedure for short focal length off-the-self CCD cameras [A]. Proc. of the 13th Int. Con. on Pat. & Rec [C], Vienna, Austria. 1996
- [5] Ye Shenghua, Zhu Dinghai, Wang Chunhe, et al. Vision-based system calibration for dimensional inspection [A]. IECON'92 [C]. San Diego. 1992. 731~734
- [6] 邹定海, 叶声华. 仪器仪表学报. 1995, 16 (4): 337~340
- [7] 罗明. 多传感器机器视觉测量系统的研究及应用 [D]. 天津: 天津大学, 1996

(下转第 62 页)