

工件特征点三维坐标视觉测量方法综述

祝世平¹, 强锡富²

(1. 北京航空航天大学第五研究室 北京 100083;

2. 哈尔滨工业大学计算机科学与电气工程学院自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对工件上特征点的三维坐标视觉测量方法进行了综述, 其中包括结构光方法、激光自动聚焦法、双目视觉方法、三目视觉方法、单目视觉方法等。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: 特征点; 三维坐标测量; 计算机视觉
中图分类号: TB92 **文献标识码:** A

1 引言

基于计算机视觉方法的检测系统, 是指利用 CCD 摄像机作为图像传感器, 综合运用图像处理、精密测量等技术进行非接触二维或者三维坐标测量的检测系统。计算机视觉检测方法具有精度高、效率高、自动化程度高、造价较低等优点。

用于三维场景信息获取的计算机视觉方法, 按照其测量过程中所采用照明方式的不同主要可以分为以下两大类:

1. 主动式方法: 是指向被测物体发射可控制的光束, 然后拍摄光束在物体表面上所形成的图像, 通过几何关系计算出被测物体距离的方法。主要可以分为结构光方法和激光自动聚焦法两类。根据投影光束形态的不同, 结构光方法又可以分为光点式结构光方法、光条式结构光方法、光面式结构光方法等;

2. 被动式方法: 是指不向被测物体发射可控制的光束, 而根据直接拍摄的物体的图像进行距离测量的方法。主要可以分为双目视觉、三目视觉、单目视觉等方法。

另外, 在计算机视觉中用来求取距离的参数还很多, 例如纹理、遮挡、光流、阴影等。利用纹理

的方法只能获得物体表面上的点与摄像机光学中心之间的相对距离, 而且要求物体表面有一定的纹理; 利用遮挡的方法所获得的物体表面上的点与摄像机光学中心之间的距离信息只是“在...前面”、“在...后面”、“与...等距”等一些定性的描述; 目前利用光流和阴影的研究还很不成熟, 用于测量则误差较大。所以在实际的视觉检测中较少采用基于纹理、遮挡、光流以及阴影的四种方法, 因而下面的讨论就着重于在视觉检测系统中应用较多的主动式与被动式两种方法。

2 结构光方法

对于没有制作特征点的工件表面, 可以用结构光方法形成特征点。特别是对于平坦的、无明显灰度、纹理和形状变化的表面区域, 用结构光可形成明显的光条纹, 便于作图像分析和处理, 这一点对于较平坦表面工件的测量是相适应的。结构光方法还具有计算简单、测量精度较高的优点, 因而在实际视觉测量系统中被广泛使用。

结构光方法中由激光投射器和 CCD 摄像机共同作为结构光图像传感器, 其测量过程主要包括两个步骤:

第一步: 由激光投射器根据测量需要投射可控制的光点、光条或光面结构光到物体表面形成特征点, 并由 CCD 摄像机拍摄图像;

第二步: 按物体表面投射光图案的几何形态特征解释投影模式, 利用三角法测量原理可求得特征点与 CCD 摄像机镜头主点之间的距离, 即特征点的深度信息。在标定出激光投射器和 CCD 摄像机在世界坐标系中的空间方向、位置参数后, 即可求得特征点在世界坐标系中的三维坐标, 下面分别对几种方法进行具体的分析。

2.1 光点式结构光方法

在光点式结构光方法(激光三角法)中, 激光器发出的光束投射到被测物体表面上产生一个光点, 光点的部分反射光通过摄像机镜头成像在位置敏感器件(PSD)或电荷耦合器件(CCD)的像面上。如果被测物体沿着激光束方向发生位移, 则 PSD 或 CCD 像面上的像点位置也会随之移动, 根据像点的移动距离和经过标定后的激光器与 PSD 器件或 CCD 器件之间的相互方向、位置参数, 即可求出被测物面的移动距离。作为一种独具特色的非接触式测量方法, 它满足在线检测中快速、实时的要求。实用中采用较多的是激光单光点式单三角法测头^[1], 例如在机器人手眼激光测距传感器中的应用^[2]。

为了增大测量范围又不依赖于坐标测量机, 可以采用测量头固定而用光线扫描的双三角法装置进行三维曲面轮廓测量。两个 CCD 摄像机分别与激光束构成一个单三角测量装置, 整体则构成对称的双三角测量装置。同时激光束通过扩束聚焦系统成为发散角较小的光束入射到多面体转镜上, 利用转镜的旋转实现激光束在被测物面垂直与水平两个方向上的扫描, 这样即可完成对整个三维轮廓表面的测量。其测量范围与摄像机镜头的焦距、被测物面对激光的漫反射程度等有关。根据该测量原理所研制的复杂曲面轮廓激光测量系统, 在 1700mm × 1200mm × 200mm 测量范围内测量精度优于 1mm, 提高 CCD 摄像机的定位精度或缩小激光束的直径可以进一步提高测量精度^[3]。

Kazuhiro Yoshida 研制的功率为 1mW、可以在室外对自然景物进行测量的激光测距系统, 在 5m 范围内相对测量误差为 2%。该系统由多个(偶数)摄像机和单激光束投射器所组成, 以减小匹配错误的可能性。并通过延迟和微分的双信号提取方法, 以及脉冲相位微分法从很强的自然光

照明背景下提取反射回来的微弱激光信号^[4]。

G. C. Bakos 等应用轮廓扫描法来克服测量中的“盲区”问题, 并建立了一个长距离、非接触、高精度结构光扫描测量系统, 在距被测物体约 500mm 处测量精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ ^[5]。

Shinichi Tamura 等采用两个电流计和迭代搜索法对三维激光扫描系统进行标定, 并建立了相应的误差模型。另外该系统采用沿 X 和 Y 两方向转动的平面反射镜反射激光光束使之投射到被测物体上, 以此获得足够强的激光信号, 使得即使在日光直射下也可以进行测量, 在 1m 范围内其相对测量误差小于 2%^[6]。

2.2 光条式结构光方法

该方法也是基于三角测量原理, 但是采用线光源代替点光源, 这样可以减少对物体表面的扫描时间, 而且通过简单的运算就能够进行图像匹配。文献[7]中利用双目视觉测量原理, 采用双光源光切法使整个被测物体均处于结构光场中, 从而减少测量“盲区”。另外采用步进电机带动旋转平台, 实现对第三维的扫描, 可以获取被测物体的全轮廓信息, 对实际物体的测量结果表明其相对误差平均值为 $\pm 0.2\%$ ^[7]。

美国 Perceptron 公司的 D. Greer 和 R. Dewar 指出了利用“金标定靶”与“银标定靶”进行标定的困难, 并给出了结构光截面传感器的一种新的标定方法。采用四根半透明的弹性纤维细丝紧固在金属框架上形成四条空间分布呈 L 型的平行线, 其与光截面相交时形成四个目标光点。测量出目标光点在摄像机坐标系中的三维坐标, 然后用电子经纬仪测量目标光点在经纬仪坐标系(相当于世界坐标系)中的三维坐标, 这样即可求出由摄像机坐标系到世界坐标系的转换矩阵, 该方法简单实用, 提高了标定精度^[8-9]。

Tsugito Maruyama 等将多光条方法和单光条方法结合起来, 减小了多光条方法的匹配难度。该方法用于电子元件生产线上机器人的手眼在线插拔系统, 在 100mm × 100mm 范围内, 测量精度优于 0.2mm, 在 500mm 深度范围内, 测量精度优于 1mm, 测量 20 个位置所用时间为 1.2 秒^[10]。

K. Araki 等采用位置敏感器件 PSD 作为图像传感器, 用转镜实现光条在被测物体上的扫描, 在 60cm 距离处相对测量误差为 $\pm 0.3\%$, 每幅图像获取与处理的时间为 1/32 秒^[11]。

光条式结构光方法的一种变化形式是采用衍射光栅进行测距^[12]。

2.3 光面式结构光方法

由于光点式结构光方法或光条式结构光方法都需要进行连续扫描才能完成对整个表面的测量,所以降低了测量效率。而如果将编码结构光(光栅式、网格式等)投射到被测物体表面上则无须进行连续扫描测量。根据标定出的摄像机和光投射器的内部几何参数以及外部方向、位置参数和结构光的编码方式,利用三角法即可测量出被测物体表面各点的三维坐标^[13-14]。

S. R. Yee 采用具有容错机能的平面结构光编码方式对头像模型进行测量,平均测量误差为 0.488mm,标准差为 0.423mm^[15]。P. K. Commean 和 A. Godhwanl 采用圆环编码光和多视觉传感器方法对头像模型进行 360 圆周测量,避免了由于机械扫描过程而降低测量效率和引入测量误差的问题,提高了数据采集与处理的速度(数据采集时间少于 1s,数据处理时间少于 2min),同时给出了多视觉传感器测量系统的详细结构设计方案以及摄像机和光投射器的标定方法。该系统在 330mm 范围内测量误差小于 0.25mm^[16-17]。

Z. Chen 等应用相互垂直网格的编码结构光测量半径 35mm、高度 125mm 的圆柱体,半径平均相对测量误差为 4.16%,高度平均相对测量误差为 3.5%^[18]。

Minoru Ito 等提出了投射空间 TCP (A Three-Level Checkerboard Pattern) 模式编码光面的测量方法,同时给出了摄像机和光投射器的快速、准确的标定方法。在距离摄像机 0.8m 处,相对测量误差为 0.2%,整个测量与标定工作所用时间为 40 秒^[19]。

文献[20]中用于 Audi-100 轿车白车身检测的在线视觉检测系统,采用光条结构光法和网格结构光法分别构成轮廓传感器和表面传感器完成对车身侧围的测量,取得了令人满意的结果。

2.4 采色结构光法

K. L. Boyer 等提出了基于彩色编码的光条结构光方法,由于采用彩色结构光编码,简化了编码光的识别与匹配过程,提高了测量效率和精度^[21]。

3 激光自动聚焦法

T. Akuta 等研制了新的采用自动调焦控制原理的三维形状测量系统,该系统由激光光点投

射器、快速响应的 Z 轴伺服控制工作台以及安装在其上的高灵敏度位置敏感器件(PSD)聚焦探测装置所组成。测量时用 PSD 聚焦探测装置拍摄光点图像并使之相对于光点始终处于聚焦位置,即保持 PSD 聚焦探测装置到光点的距离为常量,并通过 Z 轴伺服控制工作台的位移量反映到被测物体表面的高度变化。在与量块的比对测量中,该系统在 50mm 高度范围内测量精度为 $\pm 4\mu\text{m}$,标准偏差(σ)为 $2\mu\text{m}$,测量 20,000 个点所需时间为 20min^[22]

文献[23]中基于激光自动聚焦测量原理,提出了用激光自动聚焦测头代替坐标测量机的接触式测头,以实现快速、精密、非接触三维形状连续扫描的测量系统以及变扫描速度控制算法。测量系统中激光测头安装在 Z 轴上,采用模拟位置敏感(相敏检测)线路作为 Z 轴伺服机构的误差传感器。CNC 控制系统每 20 毫秒检测一次激光测头的焦距变化,并根据这一变化量控制 Z 轴运动(自动聚焦)使相敏检测器输出为零,即始终保持测头与被测物体表面光斑的距离(焦距)不变。应用该系统扫描测量一个 $\varnothing 60\text{mm}$ 的标准球面,测量精度为 $\pm 6\mu\text{m}$,标准偏差(σ)为 $2\mu\text{m}$,最大测量速度为 3000 点/min,适应被测面角度变化为 $0^\circ \sim 65^\circ$ 。此外,该系统对四种汽车样车及其主模型进行了实测,以较高的效率获得了满意的型面、轮廓线和特征线尺寸的测量结果,满足了汽车制造业实际生产的需要。

4 双目视觉方法

双目视觉方法是人类获取距离信息的主要方式,属于被动式的视觉方法。该方法根据立体视差进行测距,所谓立体视差就是被测点在左、右摄像机 CCD 像面上成像点位置的差异。设 x_{PL} 和 x_{PR} 分别是被测点在左、右摄像机 CCD 像面坐标系中的 X 轴坐标(坐标原点取为 CCD 像面中心), $x_{PL} + x_{PR}$ 相当于 P 点在左、右摄像机 CCD 像面坐标系中 X 方向的视差(设 x_{PL} 和 x_{PR} 均为标量), b 表示左、右摄像机镜头中心之间的距离, v 表示像距,则物距 u 可由下式得到^[24]

$$u = \frac{b \cdot v}{x_{PL} + x_{PR}} \quad (1)$$

双目视觉方法的测量过程可以分为如下几步:

- 1) 从左(或右)图像中选出某些特征点;
- 2) 找出它在右(或左)图像中的匹配点,这个

过程一般称为立体匹配;

3) 根据以上点对匹配关系, 就可以计算出匹配点在摄像机坐标系中的空间三维坐标;

4) 由于在第三步中只能计算出匹配点的三维坐标, 对于其它点则需要用插值的方法来获得。

立体匹配问题始终是双目视觉测量的一个主要难点所在, 国内外众多学者对此进行深入而持久的研究, 提出了大量的匹配算法并进行了实验验证。例如利用外极线约束、相容性约束、唯一性约束、连续性约束、形状连续性约束、偏差梯度约束等约束条件减小匹配搜索范围和确定正确对应关系的原则, 以及很有影响和代表性的 MPG 匹配方法和多通道结构匹配方法^[25]。

M. Herman 提出了多视点匹配算法, 首先利用局部性质进行初步匹配, 然后利用 Waltz 滤波过程获得拓扑约束, 最后根据拓扑和几何约束进行树型搜索而获得全局的最后匹配点^[26]。

J. Y. Weng 采用窗口傅立叶变换相位曲线(WFP)作为匹配特征, 采用适合于并行处理的神经网络方法进行匹配, 减少了匹配错误和迭代次数, 提高了匹配速度和准确度^[27-28]。Y. N. Zhang 将分割和匹配两个相对独立的过程结合起来, 用分割技术减小匹配过程中的不确定性, 并以中间匹配结果帮助分割, 这样多次反复进行, 由粗取精, 最后再考虑各种约束条件进行全局匹配。该方法为将不同的视觉方法相结合而解决复杂、困难的匹配问题提供了一个有指导意义的研究方向。^[29]

S. B. Marapane 等提出的 MPH 匹配算法, 基于多层次、多匹配特征元素并利用分级控制策略, 从而优于单层次、单匹配特征元素的匹配算法, 该算法的匹配正确率为 85% ~ 100%, 深度测量误差小于 2%, 其标准差为 1.68%^[30]; 类似地, S. D. Cochran 等综合“区域”和“特征”作为匹配特征元素, 取得了 96.27% 的匹配正确率^[31]。

T. Kanade 等提出了基于自适应地选择模板窗口形状、大小的迭代匹配算法, 该算法为每一个像素选择一个窗口, 在视差估计不确定性最小的意义下, 通过对窗口内灰度以及视差变化的评价, 利用统计模型对窗口进行优化。该算法是完全局部化算法, 不包含全局优化, 相对于固定模板尺寸的算法具有灵活和自适应的优点^[32]。

此外, 还有基于金字塔图像结构的匹配算法、多方向通道的立体匹配算法、基于小波变换相位基元的立体匹配算法、应用图像分形特征的匹

算法等。

目前也有不少实际应用的双目视觉测量系统, 例如 Y. C. Kim 的双目视觉方法以零交叉点作为匹配特征, 采用松弛方法进行匹配, 经过 4 次迭代 90% 的点被匹配, 经过 7 次迭代 98% 的点被匹配, 在 300cm 距离处测量误差为 2.6cm, 在 700cm 距离处测量误差为 31.9cm^[33]。

S. F. El-Hakim 等给出了基于双目视觉原理的 VCM 多视觉传感器三维坐标自动测量系统, 在 30cm × 30cm × 20cm 的测量空间内其测量精度为 8 μ m, 均方根误差(RMS)为 13 μ m^[34]。

鉴于立体匹配的复杂性, 可以利用双目影像各自独立形成的光流求解空间物体的运动参数, 避免了在基于立体匹配的运动分析方法中进行精确匹配带来的困难[35]。另外利用并行立体摄像机产生的图像流作为输入, 通过求解系数由图像速度矩和两图像内坐标构成的线性系统方程式, 不需要知道左、右两幅图像流场间特征点与特征点的对应关系就可以求解物体的 3-D 运动参数^[36]。

5 三目视觉方法

引入三目视觉方法的主要目的是为了增加几何约束条件, 减小双目视觉中立体匹配的困难, 但结构上的复杂性也引入了测量误差, 降低了测量效率, 所以在实际测量中应用较少^[37-38]。

6 单目视觉方法

单目视觉方法只采用一个摄像机, 所以结构简单, 相应的对摄像机的标定也较为简单, 同时避免了双目视觉中立体匹配的困难。单目视觉方法又可以分为聚焦法和离焦法:

1) 聚焦法: 就是使摄像机相对于被测点处于聚焦位置, 然后根据透镜成像公式可求得被测点相对于摄像机的距离。摄像机偏离聚焦位置会带来测量误差, 寻求精确的聚焦位置是关键所在^[39]。

2) 离焦法: 这种方法不要求摄像机相对于被测点处于聚焦位置, 而是根据标定出的离焦模型计算被测点相对于摄像机距离。这就避免了由于寻求精确的聚焦位置而降低测量效率的问题, 但离焦模型的准确标定是该方法的主要难点^[40]。

参考文献:

- [1] 张吉华等. 激光三角法轮廓测量[J]. 天津大学学报, 1995, 28(2): 265- 269.
- [2] 王晓东. 空间机器人激光测距传感器系统的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文: 1995.
- [3] 唐朝伟等. 三维曲面激光精密测量技术[J]. 计量学报, 1994, 15(2): 99-103.
- [4] Yoshida K, *et al.* Laser Triangulation Range Finder Available Under Direct Sunlight[C]. Proc. of the 1988 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, 1988: 1702-1708.
- [5] Bakos G C, *et al.* Long distance non-contact high precision measurements [J]. International Journal of Electronics, 1993, 75(6): 1269-1279.
- [6] Tamura S, *et al.* Error correction in laser scanner three-dimensional measurement by two-axis model and coarse-fine parameter search[J]. Pattern Recognition, 1994, 27(3): 331-338.
- [7] 陈伟民等. 双光源光切法三维轮廓测量的误差分析[J]. 仪器仪表学报. 1996, 17(2): 149-153.
- [8] Greer D. On-Line machine vision sensor measurements in a coordinate system[C]. Proc. of SME Robots 12 and Vision '88, Detroit, Michigan, June 5-9, 1988, 1(5): 43-50.
- [9] Dewar R. Self-generated targets for spatial calibration of structured-light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system[C]. Proc. of SME Robots 12 and Vision '88, Detroit, Michigan, June 5-9, 1988, 1(5): 13-21.
- [10] Maruyama T, *et al.* Hand-eye system with three-dimensional vision and microgripper for handling flexible wire [J]. Machine Vision and Applications, 1990, 3(4): 189-199.
- [11] Araki K, *et al.* A high-speed and continuous 3D measurement system[J]. Machine Vision and Applications. 1995, 8(2): 79-84.
- [12] Dewitt T D, *et al.* Range-finding method using diffraction gratings[J]. Applied Optics, 1995, 34(14): 2501-2521.
- [13] Bhatnagar D, *et al.* Static scene analysis using structured light[J]. Image and Vision Computing, 1991, 9(2): 82-87.
- [14] Maruyama M, *et al.* Range sensing by projecting multiple slits with random cuts[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(6): 647-651.
- [15] Yee S R, *et al.* Three-dimensional imaging system[J]. Optical Engineering, 1994, 33(6): 2070-2075.
- [16] Commean P K, *et al.* Geometric design of a multisensor structured light range digitizer[J]. Optical Engineering, 1994, 33(4): 1349-1358.
- [17] Godhwani A, *et al.* Calibration of a multisensor structured light range scanner[J]. Optical Engineering, 1994, 33(4): 1359-1367.
- [18] Chen Z, *et al.* Measuring 3-D location and shape parameters of cylinders by a spatial encoding technique[J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1994, 10(5): 632-647.
- [19] Ito M, *et al.* A three-level checkerboard pattern(TCP) projection method for curved surface measurement[J]. Pattern Recognition, 1995, 28(1): 27-40.
- [20] Zou D H, *et al.* Structured-lighting surface sensor and its calibration[J]. Optical Engineering, 1995, 34(10): 3040-3043.
- [21] Boyer K L, *et al.* Color-encoded structured light for rapid active ranging[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(1): 14-28.
- [22] Akuta T, *et al.* Development of an automatic 3-D shape measuring system using a new auto-focusing method[J]. Measurement, 1991, 9(3): 98-103.
- [23] 吴晓峰. 激光自动聚焦三维形状测量系统的研究[J]. 仪器仪表学报. 1996, 17(2): 129-131.
- [24] Shan Y C, *et al.* A new technique to extract range information from stereo images[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 768-773.
- [25] 吴立德. 计算机视觉[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993.
- [26] Herman M. Matching three-dimensional symbolic descriptions obtained from multiple views of a scene[C]. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 1985. 585-590.
- [27] Weng J Y. A theory of image matching[C]. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern

Recognition. 1990. 200-209.

- [28] Weng J Y, *et al.* Matching two perspective views[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(8): 806-825.
- [29] Zhang Y N. Integration of segmentation and stereo matching[C]. Proc. SPIE, 1993, 2094: 848-857.
- [30] Marapane S B, *et al.* Multi-primitive hierarchical(MPH) stereo analysis[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(3): 227-240.
- [31] Cochran S D, *et al.* 3-D surface description from binocular stereo[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 981-994.
- [32] Kanade T, *et al.* A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and Experiment[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(9): 920-932.
- [33] Kim Y C, *et al.* Positioning three-dimensional objects using stereo images[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 361-373.
- [34] EL-Hakim S F, *et al.* The VCM automated 3-D measurement system, theory, application and performance evaluation[C]. Proc. SPIE, 1992, 1708: 460-482.
- [35] 林宗坚等. 由双目序列影像解求运动参数的非立体匹配方法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1994, 19(1): 1-6.
- [36] 杨敬安. 由双目图像流无对应地估计 3-D 运动参数[J]. 计算机学报, 1995, 18(11): 849-857.
- [37] Dhond U R, *et al.* A Cost-benefit analysis of a third camera for stereo correspondence[J]. International Journal of Computer Vision, 1991, 6(1): 39-58.
- [38] Ayache N, *et al.* Trinocular stereo vision for robotics[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(1): 73-85.
- [39] Subbarao M, *et al.* Depth recovery from blurred edge[J]. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 1988: 498-503.
- [40] Ens J, *et al.* An investigation of methods for determining depth from focus[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(2): 97-108.

Analysis of 3-D coordinate vision measuring methods with feature points on workpiece

ZHU Shi-ping¹, QIANG Xi-fu²

- (1. *The 5th Research Unit, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;*
2. *Department of Automatic Measurement & Control, School of Computer Science and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: 3D coordinate vision measuring methods with feature points on workpiece are demonstrated, such as structured-light method, laser auto-focusing method, binocular vision method, trinocular vision method, monocular vision method, etc. The characteristics and measuring precision of each method are analyzed in detail, meanwhile the present development and application status are also introduced.

Key words: feature points; 3-D coordinates measurement; computer vision

作者简介: 祝世平(1970-), 男, 陕西西安市人。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。获得中国航空工业总公司部级科技进步二等奖一项(排名第三), 发表论文二十余篇。