激光辅助的大型回转类零件直径实时测量方法

樊超楠,刘 巍,刘 阳,王灵丽,贾振元

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:针对工业现场中需要对大型回转类零件直径实现实时、非接触测量的需求,提出了一种基于相交激光光条的双目视觉测量方法。结合双目立体视觉测量技术与直径测量的几何约束,采用强度高、方向性强的线型激光构造直径重建的特征信息;通过向待测零件表面投射相交的激光光条构造用于测量的特征点,提出了一种大型回转体表面激光光条交点的精确提取方法;利用摄像机标定结果重建激光光条交点的空间坐标,进而建立符合直径测量的椭圆模型并计算直径。在实验室环境下进行圆柱件直径测量实验,实验结果表明,待测物体的直径测量误差为 0.5%,直径重建时间为 1.026 s,所提出的测量方法为大型回转体直径的实时非接触测量提供可靠的技术手段。

关键词:激光光条交点; 双目视觉; 实时测量; 非接触测量

中图分类号:TB853.1;TB811^{+}.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.1106006

On-line measurement method for diameters of large rotatory parts based on laser-assisted technology

Fan Chaonan, Liu Wei, Liu Yang, Wang Lingli, Jia Zhenyuan

(School of Mechanic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A machine vision measurement method for diameters of large rotary parts based on the intersections of laser stripes was proposed to realize on-line and non-contact measurement in industrial field. Combined with geometric constraints, feature information of measurement for diameters was constructed with high-strength and high-directivity lasers. Feature points for measurement were emphasized by projecting intersecting laser stripes on the surfaces of large rotary parts. A high-precision extraction method was proposed based on the distribution character of intersections on the surfaces of large rotary parts. The space coordinates of intersections were reconstructed through calibration results and the diameters can be calculated by modeling the corresponding elliptic. Measurement experiment for diameters was carried out in a laboratory, of which the results show that the measurement error was 0.5%. It provides a reliable technology for on-line and non-contact measurement for large rotary parts.

Key words: intersections of laser stripes; binocular vision; on-line measurement; non-contact measurement

收稿日期:2016-03-06; **修订日期**:2016-04-08

基金项目:国家自然科学基金(51227004,51375075);辽宁省自然科学基金(2014028010);国家 973 计划(2014CB46504);创新研究群体科学基金(51321004)

作者简介:樊超楠(1990-),女,硕士生,主要从事视觉测量方面的研究。Email:superme4226@163.com

导师简介:刘巍(1979-),男,副教授,博士生导师,博士,主要从事视觉测量、光学精密测量、精密控制、微执行器、微机器人等方面的研究。Email:lw2007@dlut.edu.cn

0 引 言

大型回转类如钢管、轴等,在航空航天、核电、造船、化工和钢铁等国家重大工程核心装备中应用极为广泛。加工制造过程中,大型回转类的直径是研究加工工艺、控制加工过程的核心信息,需要进行实时在线测量。然而,在实际加工过程中,由于加工现场环境复杂,利用传统的直接接触方式难以准确获知其直径信息。例如风电转子、船用曲轴等大型重载装备中的关键零部件通常采用锻造工艺制造,在锻造过程中由于环境恶劣,传统人工卡钳的测量方式,其测量精度难以保证,以致冷加工余量过大,造成巨大的耗能及高昂的生产成本,并且难以保证测量人员的安全[1]。因而,进行零件直径尺寸的非接触在线测量对提高加工效率和材料利用率,改善加工工艺具有重大意义,也是目前实际生产测量中亟待解决的难题。

目前大型回转类加工现场的直径测量方法除传统的接触测量法外,还包括经纬仪测量、激光扫描、激光干涉仪、机器视觉法等非接触测量方法[2-4]。其中视觉测量方法[5]因具有操作简便灵活,满足实时性要求等特点,广泛应用于工业现场对回转类零件直径的测量,成为非接触测量领域研究的热点。已有众多学者针对视觉测量方法在直径测量中的应用开展了相关研究。张广军等人针对测量中光条椭圆弧短造成椭圆中心定位精度低的问题,利用两个视觉传感器加长光条椭圆弧,解决了实际应用光条椭圆弧对不能严格共面问题[6]。W Liu 等人研发了一种大尺寸高温构建几何尺寸在线测量系统,通过向轴类锻件表面投射编码结构光构造重建直径的特征信息[7]。Jun He 等人设计了一种适用于大型回转表面的测量机器人,将脉冲激光器应用于该测量机器人,实现了大型热态回转类钢壳的尺寸测量[8]。王颖等人提出了一种管道内表面视觉测量系统,针对空间约束利用纵向排列的视觉传感器搭建检测系统,实现了管道内表面的三维测量[9]。为进一步提高视觉测量的精度,张刘等人通过建立双目系统成像点坐标测量方程,综合分析了各误差因素对目标位置的影响[10]。

针对大型回转类零件加工制造现场的实时、非接触测量问题,文中提出了一种基于激光辅助的大型回转类零件直径视觉测量方法,该方法利用激光高强度、高度方向性等优点构造直径重建特征信息,提出一种基于激光光条中心点在大型回转体上分布特性的特征信息精确提取方法,结合直径测量的几何约束,建立适用于加工现场复杂环境下回转类零件的直径重建模型。首先介绍了基于双目视觉的直径测量方法;构造基于激光光条交点的特征信息,并精确提取特征点;利用标定结果重建特征点三维信息,建立拟合圆柱光条椭圆截面的模型,最终计算出待测直径。最后,对提出的直径测量方法进行了验证实验。

1 测量原理

双目立体视觉测量系统基于视差原理重构物体特征,由三角法获取特征的三维信息。基于双目立体视觉的空间点三维重建模型,已知两摄像机间的位置关系,可获取两摄像机公共视场内物体特征点的三维坐标[11-12]。

双目立体视觉测量的关键是由二维图像信息还原出待测的空间三维信息,因而合理构造、准确提取能够反映待测零件特征信息,并建立用于还原三维信息的模型对重建的速度和测量的精度至关重要。

如图 1 所示,文中采用双目视觉测量系统进行大型回转类零件的直径测量,测量方法的基本原理为:根据待测回转类零件的几何特性,采用激光器阵列投射激光光条构造用于重建直径的特征信息,提取左右图像中特征信息,根据对双目视觉测量系统的标定结果重建其三维坐标,拟合并求取待测零件的直径。

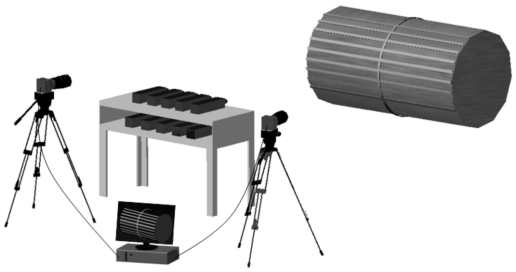


图 1 大型回转类零件的直径测量方法

Fig.1 Measurement method for diameters of large rotary parts

2 图像处理

利用双目视觉测量原理,以激光光条交点构造零件表面的特征信息,提出一种先粗后精的激光光

条交点精确提取方法。

2.1 构造特征信息

大型零件的加工现场环境通常较为复杂，摄像机获取的图像极易受到干扰光线、烟尘等强噪声干扰。以常见的张贴靶标方式构造特征信息不能满足非接触测量的要求，在测量现场难以实施。根据激光亮度高、准直性好、光束的发散度极小、且受环境干扰影响较小等优点[13-14]，采用激光构造待测物体表面的特征信息。根据测量现场对特征信息提取与匹配的需求，设计了一种基于激光辅助的特征投影方式，采用激光器阵列在零件表面投射出激光光条并使激光光条相交，提取相交特征点。

根据圆柱空间特性，光条投射所截得的圆柱截面为椭圆，该椭圆短轴即为圆柱直径。为减小特征点提取对模型拟合的影响，同时排除由于特征点数量过多造成的误匹配，文中采用 9 个点进行椭圆的拟合与优化。首先向待测零件表面投射单根近似垂直于轴线方向的激光光条构造待测圆柱的一个截面，而后投射 9 根近似沿轴线方向的激光光条分布于零件表面并使其与垂直于轴线方向的光条相交，得到 9 个同一圆柱面内的交点作为特征点。

2.2 提取特征信息

为准确还原左右图像中特征点的三维坐标，采用先粗后精的策略提取特征点。提取流程如图 2 所示，首先对图像进行预处理实现特征点的粗提取获取交点初始位置，以交点初始位置构造图片感兴趣区域，而后对感兴趣区域内的激光光条进行精确提取，获取交点的精确位置。

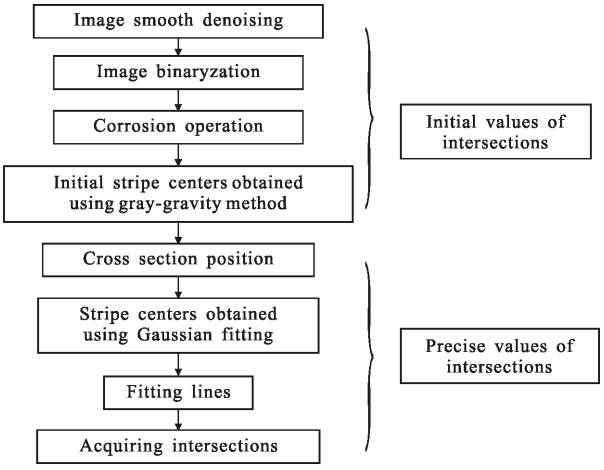


图 2 交点提取的流程图

Fig.2 Flow chart of extraction for intersections

2.2.1 获取交点初始位置，构造感兴趣区域

利用中值滤波的方法对图像进行平滑去噪：

$$g(u,v)=\mathrm{med}\{f(u-k,v-l)\},(k,l)\in W \tag{1}$$

式中：$f(u,v)$为原始图像中(u,v)对应的灰度值；$g(u,v)$为处理后图像中(u,v)对应的灰度值；W 为 3×3 二维模板。

对滤波后图像进行二值化，并对二值化后的激光光条图像进行腐蚀操作，使边界向内部收缩：

$$G(u,v)=g'(u,v)\otimes C=\{u,v|C_{u,v}\subseteq g'(u,v)\} \tag{2}$$

式中：$G(u,v)$表示腐蚀后的二值图像中(u,v)对应的灰度值；$g'(u,v)$表示原图像经过二值化后的图像中(u,v)对应的灰度值；C 表示用来进行腐蚀的结构元素，结构元素内的每一个元素取值为 0 或 1。

获取孤立的连通区域 $G'(u,v)$，计算连通区域的灰度中心：

$$\begin{cases} u_c=\dfrac{\sum_{i=1}^{n} G'(u_i,v_i)\cdot u_i}{\sum_{i=1}^{n} G'(u_i,v_i)} \\ v_c=\dfrac{\sum_{i=1}^{n} G'(u_i,v_i)\cdot v_i}{\sum_{i=1}^{n} G'(u_i,v_i)} \end{cases} \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{3}$$

式中：(u_c,v_c)为计算得到的灰度中心，将(u_c,v_c)作为交点像素坐标的初始值，构成激光光条交点初始像素坐标的点集 p_0，根据激光光条间隔距离选取半径 r，则图像中以(u_c,v_c)为圆心、半径为 r 的区域即为感兴趣区域。

2.2.2 基于激光光条中心点分布特性的交点位置精确提取

为提高还原特征信息的精度，减小因零件表面曲率变化造成的提取误差，保证重建的可靠性，需要在初始值像素坐标邻域进行搜索及不断优化，确定光条亚像素级精度的交点位置。

如图 3 所示，首先，在交点初始位置根据实际测量时的激光光条间距设置光条中心提取的像素间隔，利用高斯函数对激光光条截面进行曲线拟合，提取光条的亚像素中心点。而后，拟合激光光条中心点所在的曲线。最后，通过求取拟合曲线的交点确定激光光条交点的精确位置。

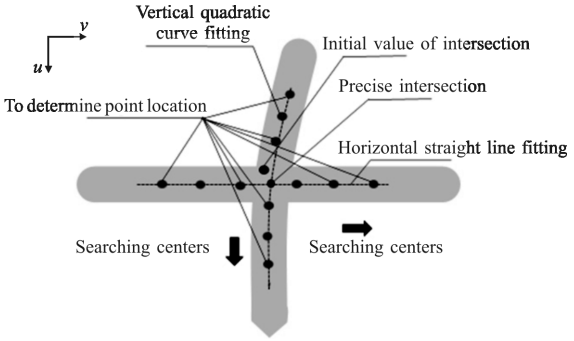


图 3 激光光条交点精提取搜索策略

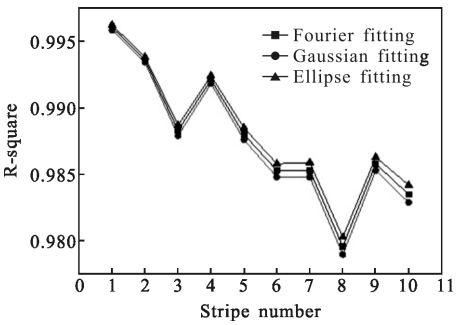
Fig.3 Search strategy of precise extraction for intersections

横向激光光条以近似于平行回转体类轴线的方向投射于其表面,其中心点在水平方向呈直线分布,将初始点位置局部的横向光条作为直线进行拟合。根据回转体表面特性,激光光条中心点服从分布椭圆模型,根据公式(4)可对其进行拟合:

$$u=B\left(1-\frac{(v-C)^2}{A^2}\right)^{\frac{1}{2}}+D \tag{4}$$

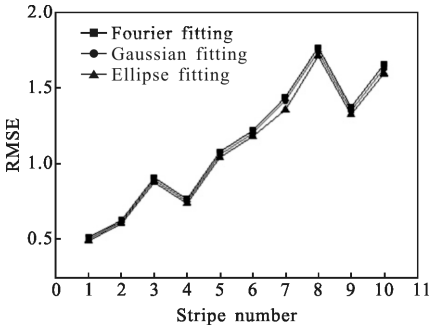
式中:(u,v)为激光光条中心点的像素坐标;A,B,C,D 分别为待拟合曲线的参数。

为验证中心点分布模型的准确性,向大型回转类零件的表面投射 10 条近似垂直轴线方向的激光光条,利用高斯函数、傅里叶函数以及椭圆拟合方法对 10 条激光光条的中心点进行拟合。将 10 条激光光条从左至右依次进行编号,如图 4 所示,利用椭圆模型拟合光条中心点得到的确定系数(R-square)较另外两种方式拟合得到的确定系数更接近 1,而其均方根(RMSE)也小于另外两种拟合方式得到的均方根,可见椭圆拟合模型更符合激光光条中心点在待测表面的实际分布情况。



(a) R-square 比较

(a) Comparison of R-square



(b) RMSE 比较

(b) Comparison of RMSE

图 4 三种拟合方式的拟合结果比较

Fig.4 Comparison of three kinds fitting model

利用公式(4)对局部的垂直轴向光条进行拟合,通过求取直线与该拟合曲线的交点确定激光光条交点的精确位置,得到激光光条交点的亚像素级坐标,构成点集 p。

3 直径重建

根据获取的精确特征信息重建零件的直径,需要确定重建的特征点所在的平面,而后将特征点的三维坐标转换为所在平面的二维坐标,建立椭圆模型并根据其平面内的二维坐标信息拟合椭圆进而重建直径。

如图 5 所示,利用左右图像中特征点精确亚像素坐标 p 与双目摄像机标定结果可还原特征点的世界三维坐标(x_i,y_i,z_i),$i=1,2\cdots,9$,得到特征点的三维坐标点集 P。

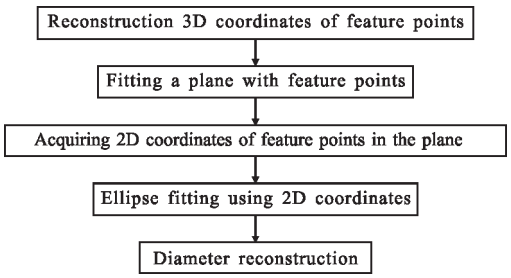


图 5 直径重建的流程图

Fig.5 Flow chart of reconstruction for diameters

由特征点的世界三维坐标拟合出特征点所在的二维平面,拟合公式为:

$$ax+by+cz=s \tag{5}$$

式中:a,b,c 为平面的法向量;s 为坐标原点到该平

面的距离。特征点(x_i,y_i,z_i)到平面的距离 s_i 为：

$$s_i=|ax_i+by_i+cz_i-s| \tag{6}$$

各个特征点到平面距离的平方和 v 为：

$$v=\sum_{i=1}^{9}(ax_i+by_i+cz_i-s)^2 \tag{7}$$

在满足条件 $a^2+b^2+c^2=1$，且 $s\geqslant 0$ 的条件下，使 v 最小的参数组合 a,b,c,s 即构成了所求平面。

在此基础上，可将特征点的空间三维坐标转换为拟合平面内的二维坐标。其过程为，将特征点投影在拟合的平面上，并以三维坐标系中的原点在平面中的投影作为平面二维坐标系的原点，在拟合的平面上建立坐标系。通过坐标转换求取特征点在该平面内的二维坐标(x_i,y_i)，$i=1,2\cdots,9$，构成平面点集P'，利用 P' 中的二维坐标进行椭圆拟合计算回转体直径。

椭圆方程的一般形式为：

$$f(\theta,\varphi)=Ax^2+Bsy+Cy^2+Dx+Ey+F=0 \tag{8}$$

式中：$\theta=[A\ \ B\ \ C\ \ D\ \ E\ \ F]$为椭圆参数矩阵；$\varphi=[x^2\ \ xy\ \ y^2\ \ x\ \ y\ \ 1]^{\mathrm{T}}$ 为待拟合特征点平面坐标构成的矩阵。

引入约束$\|\theta\|^2=1$，建立目标函数如下：

$$V(\theta)=\sum_{i=1}^{9}f(\theta,\varphi_i)^2+M(\|\theta\|^2-1)^2 \tag{9}$$

式中：M 为罚因子。利用 Levenberg-Marquardt 算法求解该无约束优化问题，可拟合出椭圆参数。

得到椭圆圆心为：

$$\begin{cases} x_c=\dfrac{BE-2CD}{AC-B^2} \\ y_c=\dfrac{BD-2AE}{AC-B^2} \end{cases} \tag{10}$$

短轴长度为：

$$D=2\sqrt{\frac{2(Ax_c^2+Cy_c^2+Bx_cy_c-1)}{A+C-\frac{1}{2}[(A-C)^2+B^2]}} \tag{11}$$

拟合出的椭圆短轴即为零件的直径。

4 实 验

在实验室搭建双目视觉测量系统，如图 6 所示。利用 10 台 450 nm 蓝紫激光器组成激光器阵列并向待测零件表面投射激光光条；利用三脚架固定 2 台分辨率为 4 008×2 688 像素型号为 SVS11002C 的 CCD 摄像机，使其与 HP-Z820 图形工作站相连。选定直径为 602 mm 的筒状样件作为待测零件，针对该样件进行测量实验，基于激光光条构造特征点，利用 2 台 CCD 摄像机获取激光光条交点的特征信息进行直径重建。

图 6 实验室双目视觉测量系统

Fig.6 Binocular vision measurement system in laboratory

利用张氏标定法[13]完成双目视觉测量系统的标定，将待测样件置于视场内并进行测量。如图 7 所示，采用 10 台激光器投射激光光条至样件表面，左右摄像机同时拍摄样件表面激光光条，得到其左右图像，提取激光光条交点。

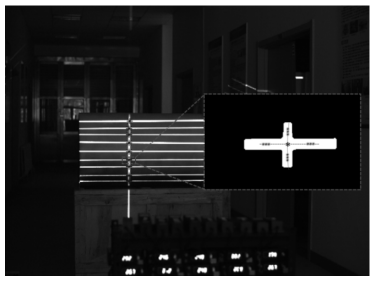


图 7 激光光条交点提取

Fig.7 Extraction for intersections of laser stripes

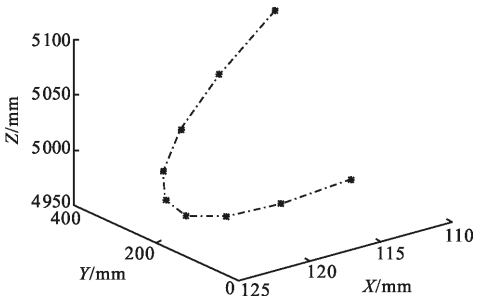
提取左右图像中激光光条中心，其像素坐标如表 1 所示。

表 1 激光光条交点像素坐标提取结果

Tab.1 Pixel coordinates of extraction results for intersctions of laser stripes

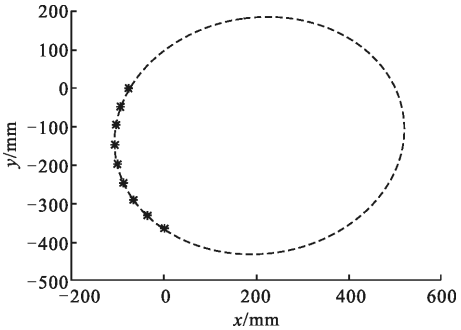
Pixel coordinates of feature points in left image	Pixel coordinates of feature points in right image
(2 099.580，1 373.711)	(2 175.782，1 311.451)
(2 104.325，1 428.568)	(2 172.629，1 365.291)
(2 107.449，1 486.590)	(2 170.728，1 421.671)
(2 109.165，1 545.724)	(2 170.469，1 479.560)
(2 108.995，1 604.578)	(2 171.998，1 537.274)
(2 107.125，1 660.628)	(2 174.837，1 592.285)
(2 103.511，1 712.489)	(2 179.116，1 642.628)
(2 098.159，1 758.036)	(2 184.805，1 687.660)
(2 091.520，1 795.393)	(2 191.342，1 724.809)

结合得到的双目立体视觉测量系统整体标定结果，利用激光光条交点提取结果与双目立体视觉测量系统的标定结果重建特征点的三维坐标，并构造激光光条交点所在的二维平面,进行椭圆拟合。如图 8 所示,得到待测样件直径测量结果 605 mm,测量误差为 0.5%,重建时间为 1.026 s,可以满足加工现场对直径测量的精度与速度要求。



(a) 特征点三维重建

(a) 3D reconstruction of feature pionts



(b) 特征点椭圆拟合

(b) Ellipse fitting for feature points

图 8 测量结果

Fig.8 Measurement results

5 结 论

利用该方法在 5 m×3 m 视场内对直径为 602 mm 的样件进行实时、非接触测量,测量结果为 605 mm,误差为 0.5%，在保证测量精度的基础上有效减少特征点数量,避免了重建中的误匹配等问题以及冗余数据量的处理。该方法无须张贴标志点,实现了实验室样件的实时、非接触直径测量,在满足了加工现场对大型回转类零件直径测量的基础上为测量的实时性奠定基础,可用于测量诸如轴类锻件、天线等难以布置标志点的大型回转类零件直径,从而为实现复杂加工环境下的现场在线非接触测量提供了理论依据。

参考文献：

[1] Jia Zhenyuan, Wang Lingli, Liu Wei, et al. A field measurement method for large objects based on a multi-view stereo vision system [J]. ***Sensors and Actuators A: Physical***, 2015, 234: 120-132.

[2] Liu Zhichun, Guo Lihong, Guan Wencui, et al. Quantitative forecasting of intersection precision for theodolite [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2008, 10(10): 1822-1830. (in Chinese)
刘旨春, 郭立红, 关文翠, 等. 经纬仪交会精度的定量预测[J]. 光学 精密工程, 2008, 10(10): 1822-1830.

[3] Guan Rongfeng, Zhao Junliang, Li Fengyun, et al. Automatic measurement of turbine rotor bend using laser scanning technology [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2003, 11(5): 487-491. (in Chinese)
关荣锋,赵军良, 李凤云, 等. 大轴弯曲激光精密自动测量系统[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(5): 487-491.

[4] Zhu Shiping, Shen Gongxun, Sun Xiaoming, et al. Analysis of non-vision 3 -D coordinates measuring methods with feature points on large-scale workpiece [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 1999, 5(5): 22-29. (in Chinese)
祝世平, 申功勋, 孙晓明, 等. 工件特征点三维坐标非视觉测量方法综述[J]. 光学 精密工程, 1999, 5(5): 22-29.

[5] Jia Z, Yang J, Liu W, et al. Improved camera calibration method based on perpendicularity compensation for binocular stereo vision measurement system [J]. ***Optics Express***, 2015, 23(12): 15205-15223.

[6] Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong. Elliptical-center locating of light stripe and its simulation for structured light based 3D vision inspection [J]. ***Chinese Journal of Scientific Instrument***, 2003, 24(6): 589-593. (in Chinese)
张广军, 魏振忠. 结构光三维视觉检测中光条椭圆中心定位方法与仿真研究 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(6): 589-593.

[7] Wang B, Liu W, Jia Z, et al. Dimensional measurement of hot large forgings with stereo vision structured light system [J]. ***Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture***, 2011, 225(6):901-908.

[8] He J, Gao F, Wu S, et al. Measure dimension of rotating large hot steel shell using pulse laser on PRRR robot [J]. ***Measurement***, 2012, 45(7): 1814-1823.

[9] Wang Ying, Zhang Rui. In-pipe surface circular structured

light 3D vision inspection system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 45(7): 1814-1823. (in Chinese)
王颖, 张瑞. 管道内表面圆结构光视觉三维测量系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 891-896.

[10] Zhang Liu, Zhi Shuai. Error analysis on relative position of target of binocular measurement system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(S): 116-122. (in Chinese)
张刘, 支帅. 双目测量系统目标相对位置误差分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S): 116-122.

[11] Tang Wei, Ye Dong. 3D computer vision measurement systems [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(S): 328-332. (in Chinese)
唐巍, 叶东. 三维视觉测量系统 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 328-332.

[12] Lv Jiaguo, Jiang Xiaoyu, Zhang Pengwei, et al. Hardware design and implementation of binocular vision system for a medical robot[J]. ***Chinese Optics***, 2014, 7(2): 307-314. (in Chinese)
吕家国, 蒋晓瑜, 张鹏炜, 等. 医疗机器人双目视觉硬件系统设计与实现[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 307-314.

[13] Meng Xianfeng, Lu Chunhua, Ni Yaru, et al. Application and protection of laser technology [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2005, 35(2): 136-141. (in Chinese)
孟献丰, 陆春华, 倪亚茹, 等. 激光技术的应用与防护[J]. 红外与激光工程, 2005, 35(2): 136-141.

[14] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(7): 517-534. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体光合束进展[J]. 中国光学, 2015, 8(7): 517-534.