

大型回转类锻件的三维重建方法

林洪彬 刘 彬 张玉存

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 提出一种基于单幅图像的回转类锻件三维重建方法。利用图像中提取的锻件截面椭圆求解圆环点图像,并结合极线约束建立绝对二次曲线像的三参数约束方程,进而求取相机的内参数矩阵。利用平行截面椭圆间的平面投影特性,进行回转体表面经线和纬线的求解,进而通过对经线进行校正实现被测锻件形状的三维重建。利用拉盖尔(Laguerre)公式进行截面椭圆可见区域求解,提出了一种等弧长纹理采样方法,解决了传统纹理提取中纹理分辨率不一致的问题。实验结果表明,在只利用被测对象自身几何约束,不借助辅助标定设备条件下,形状重建及纹理映射结果较为有效。

关键词 机器视觉;三维重建;回转类锻件;圆环点;纹理映射

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0715001

Three-Dimensional Reconstruction Method of Large Axisymmetric Forge Workpieces

Lin Hongbin Liu Bin Zhang Yucun

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A single-image-based three-dimensional (3D) reconstruction method of an axisymmetric forge piece is proposed. The imaged circular points are solved from two parallel cross sections extracted from the image. Combining with the epipolar constraint, the 3-parameter constraint equations of the imaged absolute conic are established and the intrinsic parameters are solved. The imaged meridian and latitude of the surface of the axisymmetric forge piece are extracted based on the planar projection characteristics between two parallel cross sections. Then 3D shape of the axisymmetric forge piece is reconstructed based on the corrected imaged meridian. The visible region of the cross section is computed based on Laguerre formula, and an equal-arc sampling strategy is proposed based on the extracted imaged meridian, solving the inconsistent resolution problem of conventional texture extraction algorithm. Experimental results indicate that the large axisymmetric forge piece can be reconstructed with its own geometrical constraint from single image without any auxiliary calibration equipment and the reconstructed shape and effective texture can be obtained.

Key words machine vision; three-dimensional reconstruction; axisymmetric forge piece; circular points; texture mapping

OCIS codes 150.1135; 150.6910; 100.3010

1 引 言

大型回转类锻件的生产能力和制造技术是衡量一个国家的重工业发展水平与重大、关键技术设备自给能力的主要标志之一^[1]。当前,大型锻件三维

(3D)形状测量方法主要有:接触式测量法、激光测量法^[2~4]、电荷耦合器件(CCD)视觉测量法^[5,6]和编码结构光测量法^[7~9]等。在基于 CCD 视觉大型锻件三维形状测量方面张玉存等^[4]进行了较为深入的

收稿日期: 2011-01-27; **收到修改稿日期**: 2011-03-04

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX04017-013)、河北省科学技术研究与发展计划(10212152)和秦皇岛市科学技术研究与发展计划(201001A077)资助课题。

作者简介: 林洪彬(1979—),男,博士研究生,主要从事视觉检测技术方面的研究。E-mail: honphin@ysu.edu.cn

导师简介: 刘 彬(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测技术和信号处理等方面的研究。

E-mail: liubin@ysu.edu.cn

研究, Y. Bokhabrine 等^[5]对热态金属表面三维重建问题进行了研究, Zhenyuan Jia 等^[6]提出了一种用以提高热态锻件成像质量的谱选择方法, 提高了测量精度。这类方法的难点在于锻造现场场景复杂, 增加了特征匹配的难度, 而且锻造过程的强震动、高温和粉尘等恶劣条件增加了测量标定的难度, 制约了系统用于大型锻件尺寸的在线测量。在回转体三维重建方面, 吴毅红等^[10]对利用共面圆和平行圆进行相机标定方法进行了研究, C. Colombo 等^[11]对回转体三维重建系统参数标定进行了研究, K. Y. K. Wong 等^[12]基于回转体对象射影不变量对相机焦距标定和侧影曲线校正问题进行了研究, 郑顺义等^[13]研究了基于旋转平台的旋转体三维重建方法, 胡龙等^[14]提出了基于双目立体视觉的旋转体三维重建方法。此外, 胡春海等^[15]还提出了一种基于镜像几何约束的单摄像机三维重构方法, 郑旭等^[16]提出了一种基于调制度层析的在线三维测量方法。

本文提出一种基于回转对象自约束特征的回转类锻件三维重建方法。通过图像中两个截面椭圆方程求取圆环点图像, 并结合极线约束建立测量系统绝对二次曲线像约束方程, 进而实现系统内部参数的标定。利用平行截面椭圆间的平面投影特性, 进行经线和纬线的求解, 平面变换实现被测锻件形状的三维重建。基于拉盖尔(Laguerre)公式进行截面可见区域求解, 并提出了一种等弧长纹理采样策略。

2 摄像机成像模型与内参数标定

三维空间中的点 $\mathbf{M}=[x, y, z]^T$ 在摄像机获取的二维图像上的成像点记为 $\mathbf{m}=[u, v]^T$, 相应的齐次坐标分别记为 $\tilde{\mathbf{M}}=[x, y, z, t]^T$ 和 $\tilde{\mathbf{m}}=[u, v, t]^T$ 。假设摄像机满足针孔成像模型, 则空间点 \mathbf{M} 与图像点 \mathbf{m} 之间的射影关系可表示为^[14]

$$z_c \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]\tilde{\mathbf{M}}, \quad (1)$$

式中 z_c 为非零尺度因子, $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$ 为摄像机坐标系相对世界坐标系变换矩阵, \mathbf{K} 为摄像机内参数矩阵:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

\mathbf{R} 是摄像机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵, \mathbf{T} 是摄像机在世界坐标系中的空间坐标。

在三维投影空间中, 满足 $t=0$ 的点称为无穷远点, 所有无穷远点构成无穷远平面。无穷远平面上满足 $\tilde{\mathbf{M}}^T \tilde{\mathbf{M}}=0$ 的点构成了绝对二次曲线 Ω 。而 Ω

的像 ω 与摄像机内参数矩阵之间满足^[9]

$$\omega = \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1}, \quad (3)$$

因此若能确定绝对二次曲线的像即可通过 Cholesky 分解确定摄像机的内参数矩阵 \mathbf{K} 。无穷远直线 l_∞ 上的两个点 $\mathbf{I}=(1, i, 0, 0)^T, \mathbf{J}=(1, -i, 0, 0)^T$ 称为圆环点。若用 i, j 分别表示 \mathbf{I}, \mathbf{J} 的像, 则有

$$\begin{cases} i^T \omega i = 0 \\ j^T \omega j = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由于 \mathbf{I}, \mathbf{J} 互为共轭, 故其透视投影 i, j 也互为共轭, 因此(4)式等价于

$$\begin{cases} \text{Re}(i^T \omega i) = 0 \\ \text{Im}(i^T \omega i) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

(5)式表明若能通过测得图像获得圆环点图像坐标, 则可以建立相机内参数的两个约束方程。

筒类锻件可以通过边缘检测提取图像中两个相互平行截面的椭圆图像, 进而通过两个椭圆的交点确定圆环点的像。设 C_1, C_2 分别是图像中提取的相互平行截面椭圆, 则通过

$$\begin{cases} \mathbf{x}^T C_1 \mathbf{x} = 0 \\ \mathbf{x}^T C_2 \mathbf{x} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

可以解得两个椭圆的四个交点: $\mathbf{x}_i (i=1, 2, 3, 4)$ 。当 \mathbf{x}_i 为一对共轭复交点和两个实交点时, 共轭复交点即为圆环点的像, 当 \mathbf{x}_i 为两对共轭复交点时, 可以通过图像中旋转体的遮挡关系确定圆环点的像^[10]。

在此基础上, $\mathbf{x}_i (i=1, 2, 3, 4)$ 与回转轴的像 l_s 、正交于回转轴的截面族的隐消线 l_∞ 和回转轴的隐消点 v_∞ 之间的关系如图 1 所示。通过 l_s 和 v_∞ 极线约束可以建立绝对二次曲线的一个约束条件: $l_s = \omega v_\infty$ 。结合(5)式可建立约束方程组:

$$\begin{cases} \text{Re}(i^T \omega i) = 0 \\ \text{Im}(i^T \omega i) = 0 \\ l_s = \omega v_\infty \end{cases} \quad (7)$$

若场景中存在 n 个相互不平行的回转体, 则可以建立绝对二次曲线的 $3n$ 个独立约束方程。在不考虑相机畸变的情况下, 相机内部参数矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

由(3)式可知, 绝对二次曲线的像 ω 共有 3 个独立参数, 故通过场景中的一个回转体可以确定无畸变相机绝对二次曲线图像 ω 。对 ω 进行 Cholesky 分解, 可以确定相机的内参数矩阵 \mathbf{K} 。

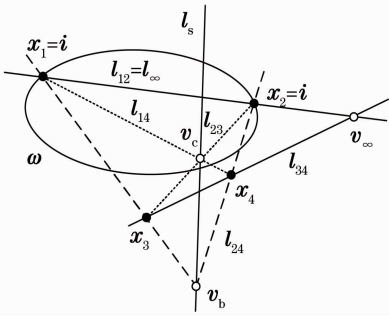


图1 椭圆交点与隐消线、旋转轴图像之间的关系
Fig.1 Relation among cross points of two ellipses, vanishing line and the imaged axis

3 筒类锻件表面经线与纬线的求解与三维重建

回转体图像的大部分特性可以通过如下定义的平面投影变换 W 进行描述：

$$W = I + (\mu - 1) \frac{vl^T}{v^T l}, \quad (9)$$

式中 I 为 3 阶单位阵, l 为投射轴, v 为一个固定点。将矩阵 W 的特征值表示为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 则 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 均为实数, 且满足 $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3, \mu = \lambda_3 / \lambda_1$ 。将筒类锻件的两个截面分别用椭圆 C_1 和 C_2 表示, 侧轮廓线图像用平面曲线 Γ 表示。把正交于回转轴的截面曲线称为纬线, 把由曲面上与所有纬线正交的曲线称为经线。如图 2 所示, C_1 和 C_2 是回转体的两个条纬线, 满足 $C_2 = W^{-T} C_1 W^{-1}$ 。此时, W 的投射轴线 l 为隐消线 l_∞ , 固定点 v 位于回转轴 l_s 上。 x_1 为 C_1 上的一个固定点, x_2 为 C_2 上的一点, 且 $x_1 = Wx_2$, 则将 x_2 称为 x_1 同质点。 x_1 的所有同质点都位于同一条经线上。过 x_1, x_2 的纬线 C_1, C_2 的切线 l_1, l_2 具有相同的隐消点 u_∞ 且该点位于隐消线 l_∞ 上。当隐消线 l_∞ 、轮廓线 Γ 、任意给定纬线 C_2 参数方程已知时, 求取过 Γ 上任意一点的纬线: 1) 在轮廓曲线 Γ

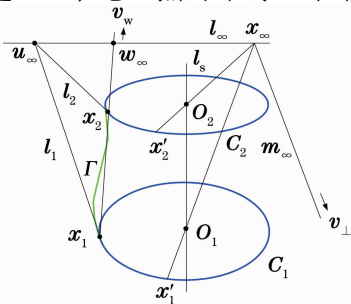


图2 经线、纬线与各特征量的关系
Fig.2 Relation among the meridian, latitude and other characteristic parameters

上任取一点 x_1 作 Γ 的切线 l_1 ; 2) 求取切线 l_1 与隐消线 l_∞ 的交点 u_∞ , 并过 u_∞ 作椭圆 C_2 的切线, 切点为 x_2 ; 3) 求取直线 x_1, x_2 的隐消点 w_∞ ; 4) 求取直线 x_1, x_2 与回转轴 l_s 的交点 v_w ; 5) 由(9)式求变换矩阵 W , 其中 $v = v_w, l = l_\infty, \mu = (x_1, x_2; w_\infty, v_w)$ 为 x_1, x_2, w_∞, v_w 四点的交比; 6) 过 x_1 的纬线方程为

$$x^T C_1 x = 0,$$

式中 $C_1 = W^{-T} C_2 W^{-1}$ 。

确定纬线 C_1 后, 求椭圆 C_2 上任一点 x'_2 在 C_1 上的同质点: 1) 由椭圆方程 $x^T C_2 x = 0$ 求取椭圆中心 O_2 , 并进一步求取直线 $x'_2 O_2$; 2) 求取直线 $x'_2 O_2$ 与隐消线 l_∞ 的交点 x_∞ ; 3) 求直线 $x_\infty O_1$ 与椭圆 C_1 的交点 x'_1 , 则 x'_1 即为 x'_2 在 C_1 上的同质点。

在实际计算过程中, 也可以按照(9)式计算出 $x_i (i=1, 2, \dots)$ 处的变换矩阵 W_i , 再直接计算 x'_1 的同质点:

$$x'_i = W_i x'_2. (i = 1, 2, \dots) \quad (10)$$

由(10)式计算得到的 x'_1 的同质点 $x'_i (i=1, 2, \dots)$ 与 x'_1 位于经线 ξ 上。经线和纬线提取结果如图 3 所示。

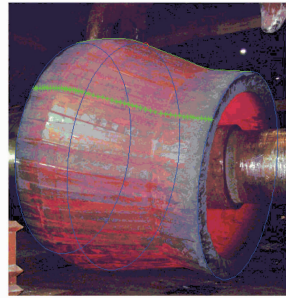


图3 锻件表面提取的经线和纬线
Fig.3 Meridian and latitude extracted from the forge piece's surface

通过回转体图像的截面曲线和侧轮廓曲线可以确定回转体曲面的经线和纬线。由投影变换可知, 若已知经线 ξ 与回转轴 l_s 所在平面 π 与成像平面之间的变换矩阵 M_r , 则可获得平面 π 的正视投影, 进而确定 ξ 上任一点与回转轴 l_s 之间的距离 ρ , 进而实现回转曲面的三维重建^[15]: 1) 通过一定的标定方法确定绝对二次曲线的像 ω ; 2) 求取平面 π 的隐消线 m_∞, m_∞ 由 $x'_1 O_1$ 与 l_∞ 的交点 x_∞ 及点 $v_\perp = \omega l_\infty$ 确定; 3) 求取隐消线 m_∞ 与绝对二次曲线图像 ω 的交点 i_ξ, j_ξ ; 4) 求取变换矩阵:

$$M_r = \begin{bmatrix} \beta^{-1} & -\alpha\beta^{-1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ m_1 & m_2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

并且 $m_\infty = [m_1 \ m_2 \ 1]^T, \alpha = \text{Re } i_\xi, \beta = -\text{Im } i_\xi$; 5)

求取正视投影:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_\rho(i) = \mathbf{M}_r \mathbf{x}'_i, & \mathbf{x}'_i \in \xi \\ \mathbf{l}_\rho = \mathbf{M}_r^{-T} \mathbf{l}_s \end{cases} \quad (12)$$

通过求 $\mathbf{x}_\rho(i), i=1, 2, \dots$ 与轴 \mathbf{l}_ρ 之间的距离可以重建被测锻件三维模型。筒类锻件的重建效果如图 4 所示。

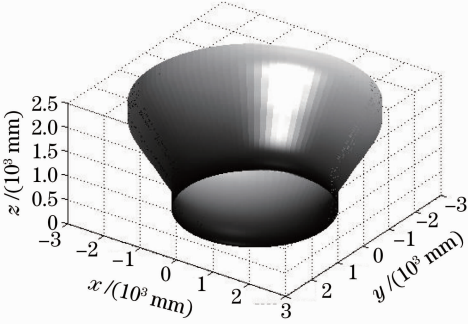


图 4 锻件的形状重建结果

Fig. 4 Shape reconstructed of the forge peice

4 锻件表面可视范围求取与纹理映射

为了真实重建锻件的三维形貌,在重建锻件三维模型的基础上需要进一步进行锻件表面纹理的映射。其关键在于锻件表面可视范围的确定和纹理图像的获取。对类似于筒类锻件的回转体,可视范围一般用某一截面的可视角度范围来描述。采用如图 3 所示的角度 θ 来描述截面 C_1 处的可视范围。如图 5 所示, θ 与各参数之间的关系可通过拉盖尔公式进行描述:

$$\theta = \frac{1}{2i} \lg(v_\theta, v_s; i, j), \quad (13)$$

式中 i, j 为 l_∞ 与 C_1 的交点, $(v_\theta, v_s; i, j)$ 为 v_θ, v_s, i, j 四点的交比。由于给定 l_∞ 与 C_1 下 v_s, i, j 均为定值,故令 v_θ 在 l_∞ 上移动可以求取截面可视范围 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 。

在 $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 范围内,对椭圆 C_1 进行采样,记 $\mathbf{x}_i (i=1, 2, \dots)$, 计算回转体在 \mathbf{x}_i 处的经线 $\xi_i (i=$

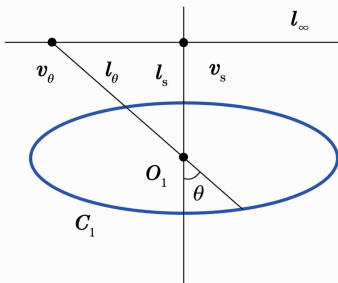


图 5 θ 与各参数间的关系

Fig. 5 Relation between θ and other parameters

$1, 2, \dots$), 由这些经线坐标可以生成一幅锻件表面纹理展开图。在对转角 θ 采样时若采用等角度采样,则会造成正对相机光轴部分采样的相对间隔大,而远离光轴部分采样相对间隔小,严重时会造成正对光轴部分纹理分辨率低的同时对远离光轴部分的区域进行重复采样。为克服此问题,提出对椭圆进行等弧长采样的方案,对椭圆进行等角度采样和等弧长采样如图 6 所示。为了验证等弧长采样对回转体表面纹理采样的效果,对图 1 中筒类锻件表面分别用两种方法沿截面椭圆可见部分采样 600 点,并以其为基点进行表面纹理提取,结果如图 7 所示。对比图 7(a), (b) 可以发现,利用本文方法进行回转体表面纹理提取不仅有效提高了正对相机主光轴部位即图像中心部分的纹理分辨率,而且有效避免了远离主光轴部位(图像的上、下两侧)由于局部区域重复采样造成的纹理混叠问题,获得了一致性更好的纹理分辨率。

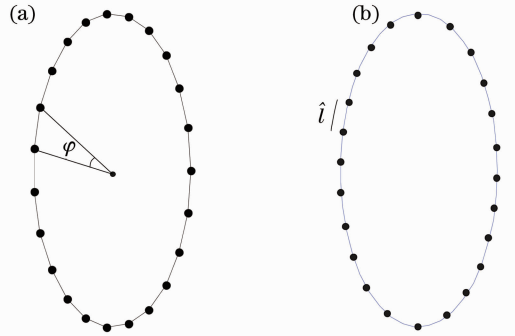


图 6 等角度采样(a)与等弧长采样(b)示意图

Fig. 6 Diagram of equal angle sampling (a) and equal arc sampling (b)

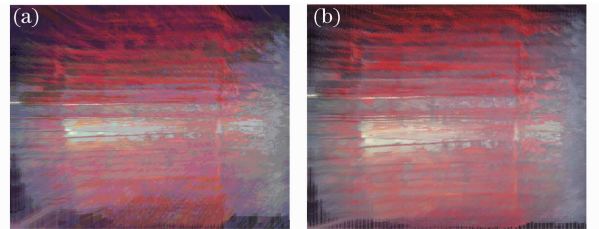


图 7 等角度采样(a)和等弧长采样(b)的锻件表面纹理提取结果

Fig. 7 Texture extracted from the equal angle (a) and arc (b) sampling of the forge workpiece

5 实验结果

为了验证所提算法的可行性,在 Matlab 软件环境下进行实验:1)针对图 1 所示照片中大型锻件采用 Edison 算法对锻件边缘进行提取,再进行椭圆和

侧轮廓曲线的参数拟合;2)求回转轴 l 和隐消线 l_{∞} ;3)求解绝对二次曲线图像 ω 和相机内参数矩阵 K ;4)根据回转体对象的自身约束特性求得回转体表面的经线和纬线,并通过经线与回转轴所在平面与成像平面之间的变换矩阵求取回转体的三维形状;5)通过经线或纬线方程进行锻件表面纹理提取,并将其映射到前面所建立的三维回转体表面。图8为利用本文方法进行三维重建和纹理映射结果;图9为沿轴向的回转体半径测量精度分布图。利用该方法进行三维重建半径重建误差不超过 ± 20 mm。该误差主要来源于相机镜头畸变、图像轮廓曲线提取误差和利用多项式对轮廓曲线拟和的误差。因此,当相机不能用参数模型 (f, u_0, v_0) 近似时,需考虑采用两幅照片或一幅两个回转轴不相互平行的回转体的照片求取相机内参数矩阵中的完整参数 $(\alpha, \beta, \gamma, u_0, v_0)$,从而纠正相机畸变造成的失真。

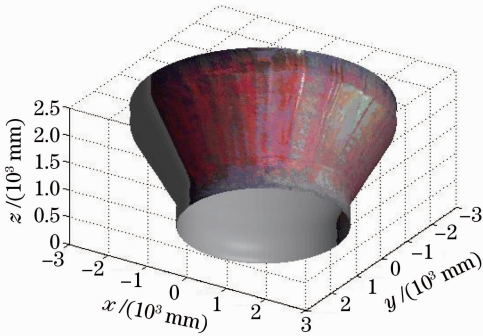


图8 三维重建结果

Fig. 8 Result of the 3D reconstruction

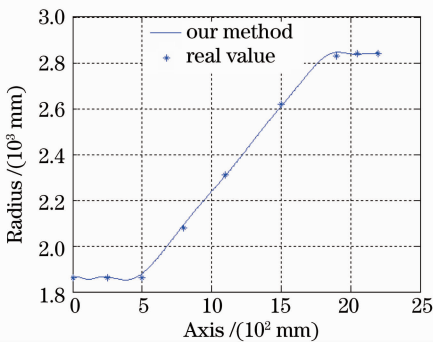


图9 沿轴向的半径测量精度

Fig. 9 Measurement accuracy of radius along axis

6 结 论

针对大型回转类锻件三维重建问题,提出了一种基于单幅图像中回转体截面曲线平面投影约束的三维重建算法。通过对锻件表面经线和纬线求解继而经线图像进行投影变换得到其正视投影,实现

锻件形状的三维重建。针对锻件表面纹理采样问题,利用拉盖尔公式对图像中纹理可见范围进行求解,并在此基础上提出了一种等弧长采样方法,克服了传统纹理采样中局部区域重复采样造成的纹理混叠问题,获得了分辨率一致的纹理图像。本方法无需其他外部辅助设备,无需特征匹配,能够获得纹理分辨率一致的三维模型。由于相机镜头畸变、图像轮廓曲线提取误差和轮廓曲线拟和误差等因素造成本方法重建精度有限,因此充分利用场景中多个回转体(或多幅图像)进行相机全参数标定、提高轮廓提取和曲线拟和精度、实现复杂回转类物体的精确三维重建等研究工作有待进一步开展。

参 考 文 献

- Nie Shaomin, Zhang Qing, Li Shukui *et al.*. The research of the mathematical model in the CCD measuring about the dimension of large-size forging workpiece [J]. *J. Plasticity Engng.*, 2006, **13**(6): 110~113
- 聂绍珉, 张庆, 李树奎等. 大型锻件尺寸 CCD 测量的数学模型研究[J]. *塑性工程学报*, 2006, **13**(6): 110~113
- Zhao Wu, Zhang Tao, Zhou Zhaofei *et al.*. Precision ranger for measuring large mechanical components [J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, **38**(5): 152~155
- 赵武, 张涛, 周肇飞等. 测量大型机件的精密测距仪[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, **38**(5): 152~155
- S. Gordon, D. Lichti, J. Franke *et al.*. Measurement of structural deformation using terrestrial laser scanners [C]. Proc. of 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, UK, 2004; TS3.2
- Zhang Yucun, Fu Xianbin, Bai Xudong. A new method for the online measurement of the shape of large forging workpieces [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2010, **31**(5): 421~425
- 张玉存, 付献斌, 白旭东. 一种大型锻件外形尺寸在线测量新方法[J]. *计量学报*, 2010, **31**(5): 421~425
- Y. Bokhabrine, Y. F. C. L. Y. Voon, R. Seulin *et al.*. 3D reconstruction of hot metallic surfaces for industrial part characterization [C]. *SPIE*, 2009, **7251**: 1~9
- Zhenyuan Jia, Bangguo Wang, Wei Liu *et al.*. An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2010, **210**(2): 267~271
- Wu Ruimin. Large Size and High Temperature Forging Binocular Stereo Vision Measurement Method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. 20~30
- 吴瑞敏. 大尺寸高温锻件双目视觉测量技术[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2008. 20~30
- Xu Gang, Zhang Wenming, Lou Fengwei *et al.*. A new 3D reconstruction method based on gray similarity of the projecting grid points [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2175~2180
- 徐刚, 张文明, 楼凤伟等. 基于网格点投影灰度相似性的三维重建新方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2175~2180
- Zhang Weiguang, Zhao Hong, Zhang Qi *et al.*. Calibration method for three-dimensional measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 182~188
- 张维光, 赵宏, 张琦等. 线结构光三维轮廓测量系统的标定

- 方法 [J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 182~188
- 10 Yihong Wu, Xinju Li, Fuchao Wu *et al.*. Coplanar circles, quasi-affine invariance and calibration [J]. *Image and Vision Computing*, 2006, **24**(4): 319~326
- 11 C. Colombo, D. Comanducci, A. D. Bimbo. Camera calibration with two arbitrary coaxial circles [J]. *ECCV*, 2006, **3951**: 265~276
- 12 K. Y. K. Wong, P. R. S. Mendonca, R. Cipolla. Reconstruction of surfaces of revolution from single uncalibrated views [J]. *Image and Vision Computing*, 2004, **22**(10): 829~836
- 13 Zheng Shunyi, Xu Gang, Zhang Zuxun *et al.*. On reconstruction of revolution [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(12): 1047~1050
郑顺义, 徐 刚, 张祖勋 等. 旋转体三维重建方法研究 [J]. 武汉大学学报, 2006, **31**(12): 1047~1050
- 14 Hu Long. The Research of 3D Reconstruction Technologies of Body of Revolution Based on Binocular Stereo Vision [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. 1~5
胡 龙. 基于双目立体视觉的旋转体三维重建技术研究 [D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2007. 1~5
- 15 Hu Chunhai, Liu Bin. Three-dimensional reconstruction method using single CCD based on geometric constraint of bilateral symmetry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2576~2581
胡春海, 刘 斌. 基于镜像几何约束的单摄像机三维重构 [J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2576~2581
- 16 Zheng Xu, Cao Yiping, Li Ku. An on-line 3D measurement method based on modulation delamination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **30**(9): 2573~2577
郑 旭, 曹益平, 李 坤. 基于调制度层析的在线三维测量方法 [J]. 光学学报, 2009, **30**(9): 2573~2577
- 17 D. Liebowitz, A. Zisserman. Metric Rectification for Perspective Images of Planes [A]. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 1998: 482~488