

基于投影光刀关节面轮廓旋转检测

王小娟^{1*}, 刘丙才²

¹西安工业大学理学院, 陕西 西安 710032;

²西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032

摘要 设计了基于投影光刀关节面三维轮廓旋转检测系统。采用摄像机针孔模型, 实现了检测系统的快速标定; 通过优化的重心算法, 提取出投影光刀的中心线, 获取了关节面的截面轮廓线; 通过分析投影光刀平面与转轴之间的夹角, 完成了截面轮廓线的倾斜校正, 实现了关节面三维轮廓数据的准确重建。结果表明, 该检测系统具有非接触、高精度等特点, 可有效解决股骨假体关节面的复杂轮廓检测问题。

关键词 测量; 投影光刀; 旋转检测; 三维轮廓; 系统标定; 中心线提取; 倾斜校正

中图分类号 TP302

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091205

Rotation Detection of Prosthetic Joint Surface Profile Based on Projection Light Knife

Wang Xiaojuan^{1*}, Liu Bingcai²

¹ School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China;

² School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China

Abstract A rotation detection system of three-dimensional (3D) joint surface profile based on projection light knife is designed. The rapid calibration of the detection system is realized by the use of the camera pinhole model. The center-line of the projection light knife is extracted through the optimized center of gravity algorithm, and thus the contour line of the joint surface is acquired. The oblique correction of section profile is realized by the analysis of the angle between the projection light knife plane and the rotation axis. The 3D profile data of joint surface are accurately reconstructed. The results show that the detection system possesses the advantages such as non-contact and high precision, which can be used to solve the detection problem of prosthetic joint surface profile.

Key words measurement; projection light knife; rotation detection; 3D profile; system calibration; center-line extraction; oblique correction

OCIS codes 120.4820; 100.3020; 170.3010; 150.3045

1 引言

随着人类医疗技术的革新, 丧失的人体关节功能可通过人工关节置换术重新获得, 而人工关节置换重建的成功不仅取决于外科手术, 还受到假体设计的影响, 比如人工全膝关节中股骨假体关节面的几何形状和材料性质决定了假体的匹配程度和应力状况, 因此, 股骨假体关节面的三维(3D)轮廓直接影响了股骨和胫骨的配合程序, 决定了人工膝关节的使用寿命^[1-2]。投影光刀(线结构光)算法可以较

好地反映物体轮廓变化, 已被广泛应用于医学图像的三维重建中。苏显渝等^[3-4]采用基于傅里叶条纹分析、相移条纹分析和动态过程三维成像等方法, 获得了人脸3D、兔子活体心脏的成像结果, 推动了投影光刀法在生物学中的应用。李泽宇等^[5]针对经典光学投影算法中图像渲染速度慢、交互时间长等问题, 以人体胸腔电子计算机断层扫描(CT)图像为例, 对采样频率和图像合成算子进行了改进, 有效提高了图像的渲染速度和图像质量。欧攀等^[6]针对牙齿模型的三维轮廓重建问题, 利用结构光投影建立

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-03-29; 录用日期: 2018-04-16

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目(17JS048)、西安工业大学校长基金(XAGDXJJ17002)

* E-mail: jellywxj@163.com

了牙齿三维轮廓测量系统,通过提高系统的标定精度,实现了牙模的精确三维轮廓数据重构。

为准确获得股骨假体关节面的三维轮廓数据,本文基于投影光刀原理,建立了旋转扫描测量系统,并对旋转测量系统中系统标定、截面轮廓线的中心线提取以及倾斜校正等关键问题进行了详细分析,最终通过搭建实验装置实现了股骨假体关节的三维轮廓数据重构。

2 检测原理及装置

基于投影光刀的三角法测量原理^[7],建立股骨假体关节面轮廓旋转检测系统,其主要由投影光刀、电荷耦合元件(CCD)成像系统和旋转台组成,如图1所示。将假体关节面固定在旋转台上,当投影光刀落在不同高度处的旋转台基准平面 M 和 M' 时,在 CCD 像面上会形成不同的成像位置,故可以采用三角法进行测量。投影光刀由半导体激光器配以精确设计的柱面镜生成,CCD 相机配合成像镜头组成 CCD 成像系统。进行假体关节面三维扫描时,投影光刀落在关节面上,受关节面表面轮廓的调制,投影光刀会产生变形,CCD 成像系统采集该变形图像,并经图像处理可获得投影光刀所在位置处假体关节面的截面轮廓线;配合旋转台的旋转扫描,即可实现关节面的三维轮廓数据重构,其重构公式为

$$\Delta = \frac{d_0}{\frac{d_1 \sin \theta}{\delta} + \cos \theta}, \quad (1)$$

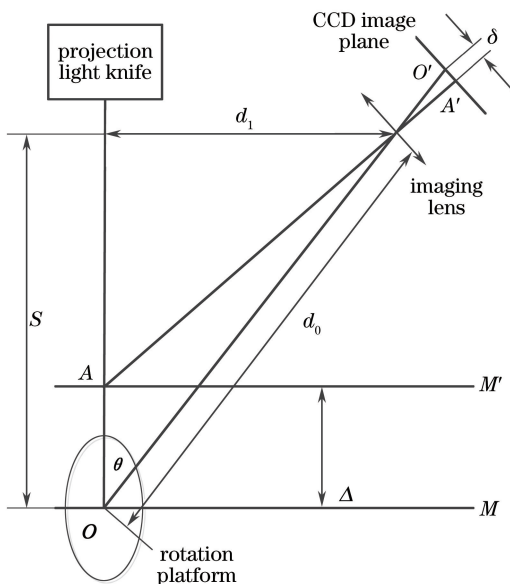


图1 测量原理图

Fig. 1 Schematic of measurement

式中 Δ 为基准平面的不同高度差, d_0 为 CCD 与旋转台中心 O 之间的距离, d_1 为 CCD 与旋转轴间的距离, θ 为投影光刀与成像面的夹角, δ 为 CCD 像面上不同成像位置之间的距离。

3 检测系统分析

3.1 系统标定

在股骨假体关节面检测系统中,受关节面调制的投影光刀相当于实际的物平面,而 CCD 摄像机的成像面相当于实际的像平面,二者与安装在 CCD 摄像机前端的成像镜头相结合,恰好符合摄像机的针孔成像模型^[8-10],即实际物平面上的一点 P 与所对应的图像平面上的像点 P' 、成像镜头光心在一条直线上。为了实现检测系统的标定,物平面上某点 $P(x, y)$ 与像平面上对应的像点 $P'(x_w, y_w)$ 满足关系 $\mathbf{P} = \mathbf{R}\mathbf{P}' + \mathbf{T}$, 即

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{R} 为 2×2 的旋转矩阵, \mathbf{T} 为 2×1 的平移向量。即

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其归一化矩阵为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & t_1 \\ c & d & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

3.2 改进的重心算法

由于投影光刀的不均匀性、假体关节面表面反射率以及投影光刀入射角度的不同,投影光刀落在关节面表面的光斑并不完全对称,如果直接采用阈值法、边缘法、中线法、深度约束法、极值法、高斯曲线拟合法、重心法等常用的中心线提取算法^[11-13],会造成投影光刀中心线的提取产生偏移,引入较大的误差。

针对投影光刀所获得的光带图像的特点,结合二值算法的特点,将重心法和二值算法进行结合,提出了改进的重心算法,如图2所示。根据投影光刀的极值,选择二值化的阈值 K , 取 $K = I_{\max}/2$, 其中 I_{\max} 为灰度最大值。进行半二值化操作,将灰度值小于 K 的像素点置为 0, 而大于 K 的像素点,其灰度值不变,即

$$I_i = \begin{cases} I_i, & I_i \geq K \\ 0, & I_i < K \end{cases}, \quad (5)$$

式中 I_i 为第 i 个像素点的灰度值。对所有灰度值

大于 K 的像素点采用重心算法进行处理,从而获得投影光刀的中心位置 x_c :

$$x_c = \frac{\sum_{i=0}^N I_i \times x_i}{\sum_{i=0}^N I_i}, \quad (6)$$

式中 x_i 为第 i 个像素点的位置。

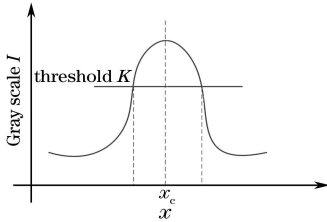


图 2 优化的重心算法

Fig. 2 Optimized center of gravity algorithm

为说明优化后的重心算法对激光投影光刀中心线提取的准确性和可靠性的影响,对激光光束进行了仿真,如图 3 所示。可以看出,该结果满足高斯分布,其理想中心点位于 5 mm 处,光照原因造成高斯光束左右两侧存在不同强度的随机误差,如果采用普通的重心算法直接提取中心线,获得的中心坐标为 5.32 mm,其相对误差为 6.4%;而采用优化后的重心算法,获得的中心坐标为 4.95 mm,其相对误差为 1%。由此可以看出,在激光光斑左右不均匀的情况下,优化后的重心算法可大大提高中心线提取的准确性。

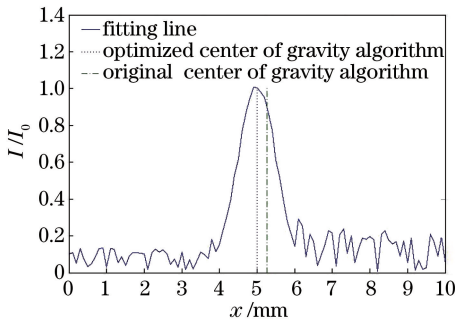


图 3 优化重心算法的仿真结果

Fig. 3 Simulation result by optimized center of gravity algorithm

3.3 截面轮廓线的倾斜校正

图 4 所示为截面轮廓的倾斜分析,以旋转台的旋转中心为原点 O ,以基准面 M 为 XOY 平面,建立坐标系,理想状态下,投影光刀沿 YOZ 平面投射至关节面上,所得关节面截面轮廓线恰好落在 YOZ 平面内,与旋转台的转轴重合;而实际状态下,由于投影光刀平面与转轴间存在较小的夹角 θ ,则轮廓线

BPC 处于平面 ABC 内。当旋转台绕着转轴 OD 进行扫描测量时,测得轮廓线所在平面始终与转轴存在有 θ 夹角,因此,假设实际测量所得截面轮廓线任意一点 $P_s(y, z)$,则该点位于该坐标系中的坐标为 $P_r(x_r, y_r, z_r)$,且有

$$\begin{cases} x_r = z \tan \theta \\ y_r = y \\ z_r = z \end{cases}. \quad (7)$$

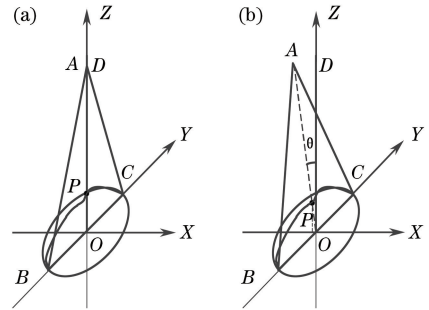


图 4 截面轮廓线的倾斜分析。(a)理想状态;(b)实际状态

Fig. 4 Tilt analysis of sectional profile.

(a) Perfect state; (b) actual state

4 实验数据及分析

根据图 1 的测量原理图,以股骨假体的关节面为测量对象,搭建关节面三维轮廓旋转检测系统。其中投影光刀由波长为 650 nm 的半导体激光器生成,工作距离为 500 mm,线宽为 0.5 mm;成像系统由北京微视新纪元科技有限公司的 MVC1000SAM-GE30 型 CMOS 相机和焦距为 50 mm 的定焦镜头构成;旋转扫描机构由北京微纳光科自动化设备有限公司的 WN01RA60M 型旋转台和 MPC08 型运动控制器组成。调试完成后可获得图 5 所示的某扫描位置处的采集图像。



图 5 股骨假体关节面的实验图像

Fig. 5 Experimental image of femoral prosthetic joint surface

4.1 检测系统的标定

针对检测实验装置,选用 30 mm × 30 mm 棋盘

格(方格尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$)作为标定板。首先,采集获得图 6(a)所示的标定图案;然后通过 MATLAB 软件进行角点坐标检测,其检测结果如图 6(b)所示;最后,将角点坐标数据与标定板的实际坐标值代入(4)式,通过矩阵变换可获得检测实验装置的标定数据 M' :

$$M' = \begin{bmatrix} 0.1190 & 0.0038 & -70.8292 \\ -0.0055 & 0.0644 & -14.0796 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

4.2 截面轮廓线的提取

为获得图 6 所示的截面轮廓线,针对图像中的每一行数据,通过改进的重心算法,可获得每一行数据的中心点,从而获得截面轮廓线数据,如图 7(a)

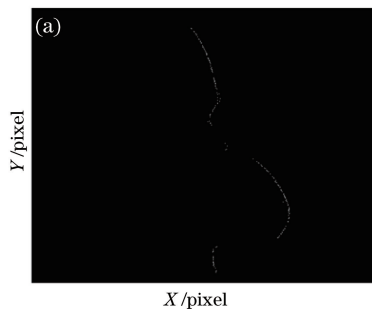


图 7 截面轮廓线数据结果。(a)重心算法提取结果;(b)实际截面线

Fig. 7 Data results of sectional profile. (a) Extraction result by center of gravity algorithm; (b) actual sectional line

4.3 投影光刀平面与转轴间的夹角计算

为了获得投影光刀平面与旋转轴间的夹角 θ ,设计了一套实验方案。首先,将投影光刀投射于安装有黑色标志点的旋转台基准平面 M 上;然后,驱动步进电机每隔 10° 采集一次图像,初始位置的采集图像如图 8(a)所示,利用 MATLAB 软件标记出该基准平面

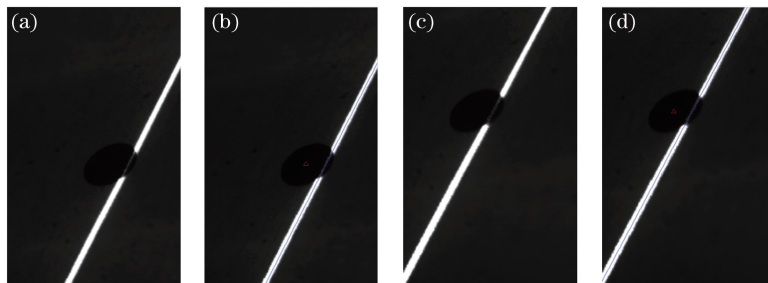


图 8 不同基准平面上的采集图像及旋转中心和投影光刀的位置。(a)基准平面 M 上的采集图像;

(b)基准平面 M 的旋转中心和投影光刀的位置;(c)基准平面 M' 上的采集图像;(d)基准平面 M' 的旋转中心和投影光刀的位置

Fig. 8 Collected images at different base plates and positions of rotation center and projection light knife.

(a) Collected image at base plate M ; (b) position of rotation center and projection light knife at base plate M ;

(c) collected image at base plate M' ; (d) position of rotation center and projection light knife at base plate M'

4.4 关节面的三维数据重构

三维数据重构的一般步骤包括图像采集、系统

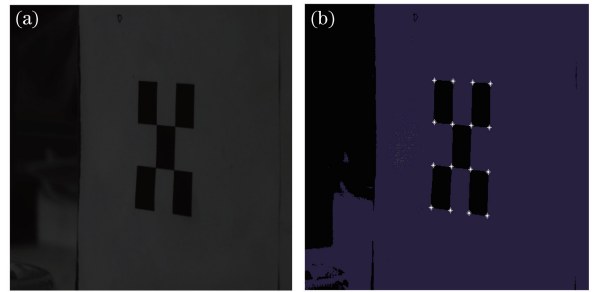
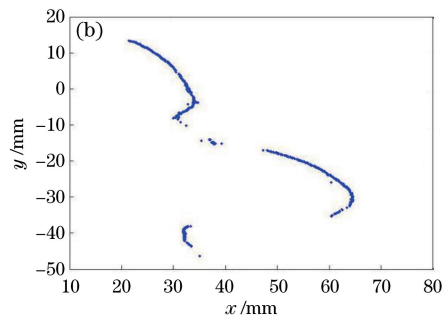


图 6 标定图案。(a)采集图案;(b)角点检测结果

Fig. 6 Calibration patterns.

(a) Collected images; (b) corner test results

所示;利用 4.1 节所获得的标定数据,可获得截面轮廓的实际坐标数据,如图 7(b)所示。



上旋转中心和投影光刀的位置,如图 8(b)所示;将黑色标志点升高至基准平面 M' ,重复上述过程,获得基准平面 M' 的旋转中心和投影光刀的位置,如图 8(c)和图 8(d)所示;通过计算不同基准平面 M 和 M' 上旋转中心到投影光刀的距离,获得投影光刀平面与旋转轴间的夹角 $\theta = 1.146^\circ$ 。

标定、特征提取、特征匹配和三维重构等^[14]。将测量对象股骨假体关节面固定于旋转平台上,通过旋

转台每间隔 1° 进行一次旋转扫描, 获得关节面不同截面的投影光刀图像数据, 利用 4.2 节截面轮廓线提取方法获得旋转扫描各个截面的轮廓线数据, 结合 4.1 节的系统标定数据和 4.3 节计算所得的投影光刀平面与旋转轴间的夹角, 完成股骨假体的三维数据重构, 获得图 9(a) 所示的点云数据。利用 Geomagic 软件进行三维数据渲染, 获得股骨假体的三维轮廓重构结果, 如图 9(b) 所示。

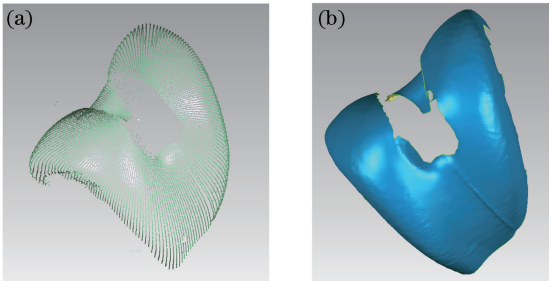


图 9 关节面三维轮廓重建结果。

(a) 三维点云; (b) 三维渲染结果

Fig. 9 3D reconstruction results of prosthetic joint surface profile. (a) 3D point cloud;

(b) 3D rendering results

5 结 论

以股骨假体的关节面轮廓旋转扫描为研究目标, 搭建了基于投影光刀的三维轮廓旋转扫描测量装置, 通过系统标定方案设计、截面轮廓线提取算法优化、投影光刀平面与旋转轴间的夹角分析等一系列研究, 准确获得了股骨假体的关节面三维轮廓数据。该检测装置可有效解决关节面轮廓的三维重构问题, 为类似的不规则物体表面轮廓的重建提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Wang J P. Human knee biomechanics modelling and research on biomechanical characteristics of flexion movement [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010: 16-29.
王建平. 膝关节力学建模与屈曲运动生物力学特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010: 16-29.
- [2] Chi Y. The individual modeling and stress analysis of artificial femoral prosthesis stem [D]. Changchun: Jilin University, 2004: 22-28.
迟岩. 人工股骨假体柄的个体化建模及应力分析[D]. 长春: 吉林大学, 2004: 22-28.
- [3] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [4] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 149-158.
- [5] Li Z Y, Chen Y M, Zhao Y, *et al.* Three dimensional reconstruction of medical images based on improved ray projection algorithm[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(12): 3866-3888.
李泽宇, 陈一民, 赵艳, 等. 基于改进光线投影算法的医学图像三维重建[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3866-3888.
- [6] Ou P, Wang T, Li R X. A three-dimensional teeth measurement system based on structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011102.
欧攀, 王婷, 李瑞祥. 一种基于结构光的牙齿三维测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011102.
- [7] Li X T, Zhang T Q, Zhang S Y, *et al.* Small object's dimension measure and three-dimension reconstruction system based on laser triangulation [J]. Optical Instruments, 2008, 30(6): 21-26.
李晓天, 张铁强, 张胜勇, 等. 基于激光三角法的小物体尺寸测量及三维重构系统[J]. 光学仪器, 2008, 30(6): 21-26.
- [8] Xu L, Zhang Z J. Calibration in structured light system using coplanar target [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(8): 1063-1069.
许丽, 张之江. 基于共面靶标的结构光标定方法[J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 1063-1069.
- [9] Zhang X, Zhang J. Summary on calibration method of line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020001.
张曦, 张健. 线结构光标定方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020001.
- [10] Chai X H, Gao F, Chu B C, *et al.* Two-dimensional vision measurement method with immediate plane calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0712001.
柴兴华, 高峰, 楚博策, 等. 一种即时平面标定的二维视觉测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0712001.
- [11] Cai H Y, Feng Z D, Huang Z H. Centerline extraction of structured light strip based on principal component analysis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201001.

2015, 42(3): 0308006.

蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308006.

- [12] Jiang Y F, Jiang K Y, Lin J Y. Extraction method for sub-pixel center of linear structured light stripe [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071502.

江永付, 江开勇, 林俊义. 线结构光光条中心亚像素精确提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52

(7): 071502.

- [13] Li Y Y, Zhang Z Y, Yuan L. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100002.

李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100002.

- [14] Wang S, Xu X. 3D reconstruction based on horopter [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0515004.

王珊, 徐晓. 基于双目单视面的三维重建[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515004.