文章编号：1002-2082(2008)06-0878-06

基于光斑重心的交锁髓内钉远端定位方法研究

崔 菊[1]，王海涛[1]，陈 勇[2]，万 敏[1]，朱永凯[1]，赵建宁[2]
(1. 南京航空航天大学 自动化学院，江苏 南京 210016；2. 南京军区总医院，江苏 南京 210016)

摘 要：提出基于光斑重心的交锁髓内钉远端定位方法，即用光纤传像束传输照明光、接收并传送交锁髓内钉远端像的光斑到CCD靶面，由计算机接收并计算出光斑重心的方法来测量和定位交锁髓内钉远端锁孔。介绍了交锁髓内钉远端定位检测系统的组成，阐述了基于重心的光斑中心定位算法。该方法用VC++对光斑中心位置进行了精确测量，为了避免二值变换引起的毛刺，先用改进的阈值变换，然后用一种直观的画圆方法把光斑框起来求重心，通过计算交锁髓内钉变形前后其远端锁孔像的重心位置，求出交锁髓内钉远端锁孔的实际位置。实验结果表明：该系统定位精度可以达到0.1 mm，满足系统指标要求，且具有较高的稳定性。

关键词：交锁髓内钉；光斑重心；定位测量；Visual C++
中图分类号：TN253-3 **文献标志码**：A

Distal location method of interlocking intramedullary nails based on gravity center of light spot

CUI Ju[1], WANG Hai-tao[1], CHEN Yong[2], WAN Min[1], ZHU Yong-kai[1], ZHAO Jian-ning[2]
(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Nanjing General Hospital of Nanjing Military Command, Nanjing 210016, China)

Abstract: A novel distal location method of interlocking intramedullary nails based on gravity center of light spot is presented. The components of the measurement system are described. To measure and position distal lockholes for interlocking intramedullary nails, an image transmission fiber bundle is used to send illuminating beam, as well as receive and deliver the distal image spot of interlocking intramedullary nails to the CCD target surface. A real-time system based on VC++ was exploited to get the gravity center of the light spot. During image processing, a modified threshold transform is used to avoid the defect caused by the binary transform. A circle is drawn directly around the light spot to get the gravity center. It is easy to get the actual position of distal lockholes for interlocking intramedullary nails by computing the change of gravity center of the spot before and after deformation. In addition, a lot of measurement experiments were performed. The quantitative analysis of the result shows that the alignment accuracy is up to 0.1 mm. It meets the requirement of the measurement system.

Key words: interlocking intramedullary nails; gravity center of light spot; location measurement; Visual C++

收稿日期：2008-04-18； **修回日期**：2008-05-20
基金项目：江苏省科技厅资助项目(BS2006054)
作者简介：崔菊(1982－)，女，安徽灵璧人，南京航空航天大学在读工学硕士，主要从事检测技术与自动化装置研究工作。
E-mail：cuiju657150@163.com

引言

交锁髓内钉的出现并广泛使用是骨折治疗领域的最大进展之一,用它来固定股骨干骨折部位,可以使患者的恢复效果比用钢板固定等方式治疗的效果好许多。但由于手术过程中固定髓内钉是在骨腔内进行的,骨腔内的狭窄区域将导致远端锁孔偏移,使远端锁孔位置难以精确定位,导致手术不得不长时间在X 光照射下进行,这严重威胁了医生和患者的健康[1]。为了克服以上的缺点和局限性,本文提出了基于光斑重心的交锁髓内钉远端定位方法,并建立了适合现代化骨科手术需要的远端锁孔定位系统。本系统基于光电检测原理,通过光纤传像束传输照明光,接收并传送交锁髓内钉远端像的光斑到CCD 靶面,最终由计算机接收并计算出光斑重心来测量和定位交锁髓内钉远端锁孔位置,即由交锁髓内钉变形前后光斑中心的偏移推算出交锁髓内钉远端锁孔的实际偏移。光斑中心定位的精度影响着整个系统的检测精度,是一项关键技术,常用的光斑中心定位算法有:重心法[2]、Hough 变换法和最小二乘法等[3]。Hough 变换法需要逐点投票和记录,所用时间较多,而且精度也不够高;最小二乘法虽然可以达到亚像素精度,但抗干扰性能差,易受干扰点或噪声的影响。这些算法各有其优缺点,其中重心法精度高,稳定性好,计算处理时间短。本文利用重心算法对特定环境下采集到的光斑图像进行检测,确定光斑中心在相邻2 幅图像中的位移量,从而达到测量远端锁孔位置的目的。

1 实验测量系统

1.1 测量原理

目前我国使用的交锁髓内钉规格型号很多,相互间都存在着细微差别。实验中所用的交锁髓内钉为一只长约400 mm,Φ8 mm,弧半径1 000 mm 的圆弧形中空钢管,其远端和近端各有2 个锁孔,如图1 所示。锁钉经骨皮质进入锁孔即形成三维结构,达到了防止骨折部分压缩、分离和旋转的目的,因而固定牢靠,使膝关节功能得到最大限度的恢复。交锁髓内钉远端锁孔测量原理如图2 所示。开始测量时,在髓内钉远端端面放置一个“十字形”靶面,如图3 所示。光源发出的光经过光纤传像束传输照射到髓内钉远端端面上,经端面反射被光纤传像束接收并成像于CCD 上,经图像卡采集显示在电脑屏幕上[4],其中光斑的清晰度可以通过CCD 前面的自聚焦透镜调节。在髓内钉未进入骨腔时,采集其远端端面的光斑图像,由软件计算光斑的重心位置坐标;交锁髓内钉被打入骨腔后,其远端端面发生了移动,采集此时光斑图像(保证光纤传像束和交锁髓内钉相对固定),计算2 幅图像的重心位置及重心偏移量。根据实验得出的髓内钉远端端面移动量与光斑重心移动量的线性关系,反推出实际髓内钉远端的位移量,并转换为远端2 个锁孔的实际位移量,进而可以顺利安装锁钉。

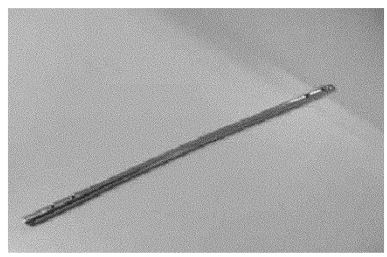

图1 交锁髓内钉

Fig. 1 Interlocking intramedullary nail

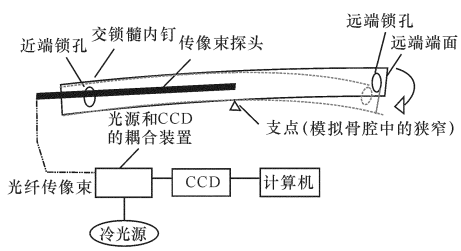

图2 交锁髓内钉远端锁孔定位原理

Fig. 2 Location principle for lockhole of interlocking intrame dullary nails

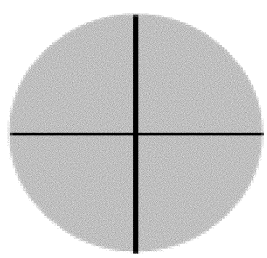

图3 远端端面

Fig. 3 End face of distal

1.2 测量系统

图4 为系统原理方框图,该系统由硬件和软件2 部分组成。硬件部分主要由冷光源、光纤传像束、

CCD 图像传感器、图像采集卡和计算机组成;软件为 VC++6.0 应用程序。冷光源发出的光经光纤传像束传输投射到髓内钉远端端面上,端面上的光斑经光纤传像束成像于 CCD 靶面上,经过图像采集卡输入到后续的图像采集处理系统。由于交锁髓内钉锁孔的直径约 4 mm,锁孔的定位精度只要小于 2 mm 便能顺利交锁。

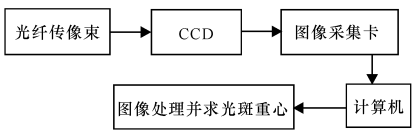

图 4 原理方框图

Fig. 4 Working principle of system

检测装置中照明光源选用冷光源。在实验中,曾经选用 He-Ne 激光器作为照明光源,检测结果偏差较大。原因之一是激光器发出的光功率较强,如此强的光束一部分由光纤传像束传送到交锁髓内钉远端;另一部分光强照射在交锁髓内钉内部管壁再反射到交锁髓内钉远端锁孔上,且激光属于相干光源,造成 2 部分重叠。被光纤传像束中的带自聚焦透镜的接收光纤束接收后,成像在 CCD 靶面上,一方面造成像的模糊,另一方面,强光的像会导致CCD 靶面被烧坏。经过多次光源的选择和实验,最后选用南京玻纤院生产的冷光源进行照明。冷光源是利用化学能、电能、生物能激发的光源,物体发光时它的温度并不比环境温度高,把其他的能量几乎全部转化为可见光。实验表明:本测量系统所选用的冷光源可以得到清晰的成像光斑,满足测量要求[5]。

在试验系统中,基于光纤传像束使用的空间自由度大,易实现细长结构传像的特点,南京玻纤院为此试验系统设计了自带光源的光纤传像束及传像束与 CCD 的耦合装置和光纤传像束探头,如图 5 所示。光纤传像束是将多根一定长度的光纤有规则地集合成束而达到能传递图像的纤维光学元件,是一种可任意弯曲的传输图像的无源器件[6]。

图 5 和图 6 是实验室搭建的硬件平台。图 5 中①为交锁髓内钉,其远端端面放置一个十字形靶面;②为光纤传像束探头,放入髓内钉内部,使其端面位于髓内钉中心处并用套筒固定;③为加力装置,用来模拟骨腔中髓内钉远端的受力;④为 2 排固定磁铁,当加力装置加力时磁铁前端端面则起到了支点的作用;⑤为游标卡尺,当髓内钉远端端面发生偏移时用来记录其位移量,精度为 0.02 mm。图 6 中①为实验中所用到的冷光源;②为光纤传像束与 CCD 的耦合装置;③为光纤传像束;④为一接口,与 CCD 相连接。

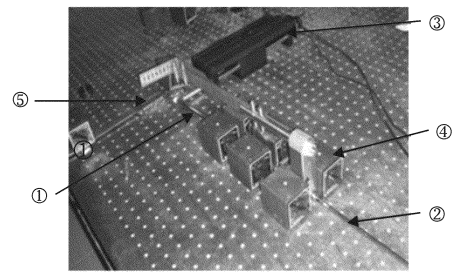

图 5 交锁髓内钉定位装置

Fig. 5 Location equipment of interlocking intramedullary nails

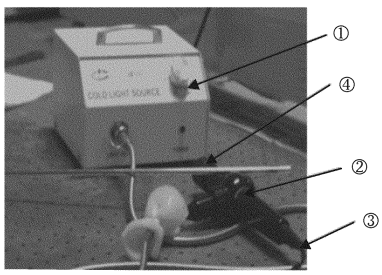

图 6 冷光源和光纤传像束

Fig. 6 Cold light source and image transmission fiber bundles

2 光斑检测算法

由计算机采集的光斑数字图像如图 7 所示,中间规则的小圆斑即是髓内钉远端端面的成像光斑,而周围的亮区域是髓内钉管壁反射造成的。传统的光斑中心检测算法有重心法和 Hough 变换法等。其中重心法简单明了,计算速度较快,在光斑光强分布均匀、对称的情况下,计算精度高,稳定性好,

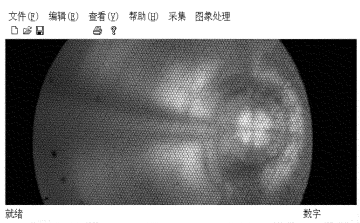

图 7 图像卡采集的光斑图像

Fig. 7 Light spot image viewed by image gathering card

处理时间短。“重心法”是基于平面几何中求重心的原理对光斑的灰度图像进行灰度加权平均,所得到的特征点为光斑的“重心”。设某个光斑由 m 个像素组成,每个像素都对应于确定的空间坐标 x,y 及灰度值 $p(x,y)$,则该光斑的重心坐标为

$$X=\frac{\sum_{i=1}^{m}x_i p_i(x_i,y_i)}{\sum_{i=1}^{m}p_i(x_i,y_i)}$$
$$Y=\frac{\sum_{i=1}^{m}y_i p_i(x_i,y_i)}{\sum_{i=1}^{m}p_i(x_i,y_i)} \quad (1)$$

3 图像处理与实验

CCD 摄取光斑图像经过图像采集卡(北京嘉恒帕公司的OK-M10A)数字化后,送入计算机进行图像处理和分析,获取光斑重心。结合图像卡的API 函数和功能,用VC++6.0 二次开发一个实时获取光斑重心的软件界面。实验主要工作是获取交锁髓内钉远端位移和图像光斑重心位移的线性关系。为了检测系统的精度,还进行了实验测量,求出理论上锁孔的位移量,并与实际位移量作比较,检验其精度。实验中使用的摄像头是敏通公司的1881CCD,其基本参数是最大像素为 795×596,几何尺寸是 7.95 mm×6.45 mm,因此折算到每个像素的几何尺寸是10 μm×10.8 μm。

3.1 光斑重心软件的设计

交锁髓内钉远端锁孔定位系统采集得到的光斑图像具有不同灰度级(8 位),采集图像以后直接对光斑进行处理,获取光斑重心。软件系统按其功能可分为图像采集、图像直方图、改进的阈值变换,获取光斑重心等4 个模块。

由于图像中存在噪声,因此目标区域的二值化分割将产生误差,目标边界会存在一些毛刺,为了消除毛刺对算法精度的影响,能够清晰看清楚图像,采用了一种改进的阈值变换[7],变换的结果如图8 所示。其变换表达式如下:

$$f(x)=\begin{cases}0 & \text{当 } x<T\\ f(x) & \text{当 } x\geqslant T\end{cases}$$

T 的选择由直方图的灰度分布决定。为了减小光斑周围的像素点对光斑重心的影响,能够清晰地看到光斑,需要选择合适的T 值。T 值选择过小,光斑和

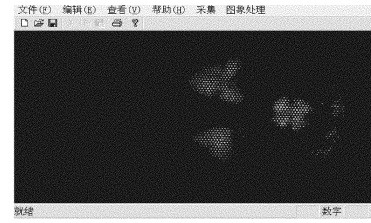

图8 阈值变换的效果

Fig. 8 Effect of threshold transform

光晕没有分开,周围像素点对重心位置影响很大;T 值选择过大,光斑的基本形状没有保留,求得的重心位置也不准确。图像经过阈值变换以后再通过画圆的方法求取光斑重心。具体的求取光斑重心的VC 编程步骤如下:

1) 根据圆斑的大小画圆,要求包含光斑中所有的像素点。圆心选择靶面十字丝的交点,这里选择半径的数值为50 像素(根据圆斑大小而定)。

2) 计算圆内区域的像素值和坐标值。在50×50 矩形区域内,如果该像素点坐标与圆心坐标的距离小于或等于圆的半径时,获取此时的灰度值和坐标值,如果不是就判别下一个像素点,以此类推。即获得圆内所有像素点的灰度值和坐标值。

3) 完成判别后,将灰度值和坐标值带入(1)式,求取光斑重心。

4) 保存并显示光斑重心。重复1)~3)步骤,求取平均值。

5) 求出光斑重心的位移。光斑重心处理界面如图9 所示,可以直接记录光斑的重心坐标,图中所示的重心坐标为(142.242 5,442.918 9),单位是像素。

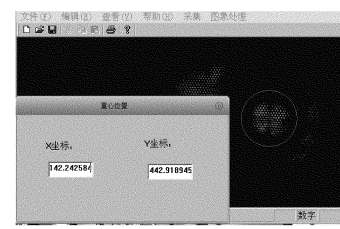

图9 光斑重心处理界面

Fig. 9 Processing interface of gravity center of light spot

3.2 定标及实验测量

3.2.1 系统定标

搭建系统,进行远端端面位移和光斑重心位移

关系的实验测量。实验中支点位于髓内钉中心处(即支点距离髓内钉的中心为 0 cm 处),光纤传像束探头固定于髓内钉的中心。移动加力装置,使远端端面做水平方向的微运动,采集 20 个位置的光斑图像,用游标卡尺记录,并分别计算出对应的光斑重心位置。然后在 EXCEL 中进行曲线拟合,实验共测量了20 次,部分曲线如图10 所示。曲线反映了当支点位于髓内钉中点时,交锁髓内钉远端端面移动的位移和图像上光斑重心位置变化之间的关系。通过对20 次的实验结果取平均值,得到支点位于 0 cm 的定标曲线:

$$Y=11.5746X+0.1544 \tag{2}$$

式中:X 为髓内钉远端端面位移量;Y 为光斑重心位移量。

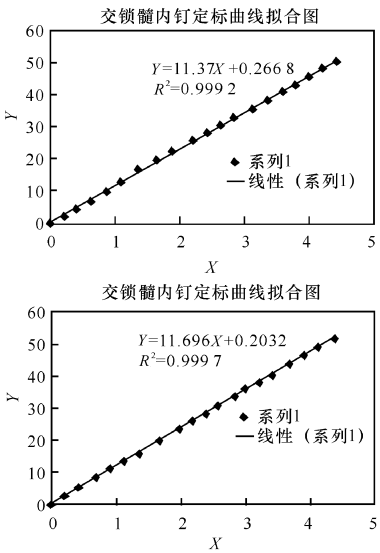

图10 支点位于交锁髓内钉中点处(即 0 cm)的部分曲线图

Fig. 10 Partial curve of fulcrum at center of interlocking intramedullary nail

在实际检测中,人体骨腔的狭窄段是不固定的,即锁内钉的支点位置是不固定的,不过其变化一般不超过 5 cm。所以本实验中分别让支点沿远端锁孔方向移动 1 cm,2 cm,3 cm,4 cm,5 cm,各测量 20 次数据。同时参照支点位置在锁内钉的中心位置处的做法,每一支点处将这 20 次的定标曲线取平均值,建立一个不同支点处定标曲线的数据库。定标曲线见表 1。

表1 不同支点处对应的定标曲线

Table 1 Calibration curves of different fulcrums

支点位置/cm	定标曲线
0	$Y=11.574X+0.154\ 4$
1	$Y=12.152X+0.389\ 9$
2	$Y=12.008X-0.086\ 6$
3	$Y=13.237X+0.177\ 3$
4	$Y=11.96X+0.167\ 6$
5	$Y=13.745X+0.219\ 9$

3.2.2 实验测量

在临床上,交锁髓内钉的安装手术具有严格的要求:1) 术前应通过 X 射线片精确测量肢体股骨干的长度及髓腔的宽度。髓内钉的长短、粗细选择一定要匹配,特别值得强调的是治疗长管状骨远段骨折时,髓内钉要足够长,保证距膝关节 10 mm 左右,远端交锁螺钉距骨折线 40 mm 以上才具有较强固定作用;2) 进钉点一定要选择准确,如果选择不准或偏移,给进钉及手术造成困难;3) 交锁髓内钉手术中必须进行扩髓处理,扩髓要大于所选髓内钉直径 1 mm,髓内钉插入髓腔前调整打入方向,避免完全打入后产生旋转。所以为了检验定标的准确性,在实验室中针对骨腔狭窄段位于髓内钉中心处(0 cm 处)的定标曲线进行实验测量,通过加力装置来模拟骨腔中髓内钉的受力,并记录远端端面的位移;然后用 VC 软件获取对应的光斑重心位置,通过 (2) 式的定标关系式计算出理论上远端端面的位移量;最后将远端端面的位移转换为远端 2 个锁孔的位移,并计算理论值与实际记录值的偏差。实验中采集了 10 个位置的光斑图像(保证交锁髓内钉远端移动量小于 4 mm),结果见表 2 所示。

表2 支点位置处于髓内钉中心处的实验结果

Table 2 Experiment results of fulcrum located at center of interlocking intramedullary nail

位置序号	光斑重心位移量/像素	实际锁孔1位移量/mm	理论锁孔1位移量/mm	绝对误差/mm	实际锁孔2位移量/mm	理论锁孔2位移量mm	绝对误差/mm
1	0.323 7	0.00	−0.013	0.013	0.000	−0.011	0.011
2	4.999	0.40	0.372	0.028	0.325	0.302	0.023
3	10.988	0.88	0.832	0.048	0.715	0.676	0.039
4	18.918	1.36	1.441	0.081	1.105	1.171	0.066
5	24.986	1.88	1.907	0.027	1.527	1.549	0.022
6	31.640	2.42	2.418	0.002	1.966	1.965	0.001
7	36.706	2.84	2.807	0.033	2.307	2.280	0.027
8	42.943	3.34	3.286	0.054	2.714	2.670	0.044
9	48.334	3.78	3.7	0.080	3.071	3.001	0.070
10	53.933	4.22	4.13	0.090	3.429	3.356	0.073

实验结果表明:当交锁内钉远端端面发生偏转时,光斑的重心位置也依次发生偏转,且交锁髓内钉远端端面位移量与测量的光斑重心移动量呈一确定的线性关系。在临床上,锁孔1的位移不会超出4 mm,而实验中让锁孔1位移量达到4.22 mm,满足了实际的测量范围。由表2可以看出,锁孔1定位的最大误差为0.09 mm,锁孔2定位的最大误差为0.073 mm,满足系统精度要求。

4 结束语

使用"重心法"提取交锁髓内钉远端端面光斑的位置,精度较高,稳定性好。通过检测光斑重心特征点的位移,可以反映出CCD光敏面上光斑的位移,由光斑的位移反推出远端锁孔的位移。实验表明:系统定位精度可以达到0.1 mm,满足系统指标要求,是一种可行的方案。

光斑重心位置偏差的误差主要来源于面阵CCD的固有噪声以及背景光干扰,这些干扰的结果可能造成目标元和背景元之间的误判,在实际临床应用中,可以通过改进光源,使用高精度面阵CCD进一步提高系统的稳定性,使该系统具有较高的应用和推广价值。

参考文献:

[1] ARAZI M, OGUN T C, OKTAR M N. Early weight-bearing after statically locked reamed intramedullary nailing of comminuted femoral fractures: it is a safe procedure[J]. J. Trauma, 2001,50(4):711-716.

[2] 黄燕群,田爱玲.光栅投影测量物体三维轮廓的条纹中心线相对偏移量的获取[J].应用光学,2004,25(6):57-60.
HUANG Yan-qun, TIAN Ai-ling. Obtain the relative displacement of the fringe-centerlines in the 3-D profilometry measurement using grating projection[J]. Journal of Applied Optics, 2004,25(6):57-60. (in Chinese)

[3] 孔兵,王昭,谭玉山.基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J].红外与激光工程,2002,31(3):275-279.
KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002,31(3):275-279. (in Chinese)

[4] 王春阳,李金石.激光光斑漂移的检测[J].应用光学,2007,28(2):205-208.
WANG Chun-yang, Li Jin-shi. Detection of laser spot drift[J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(2):205-208. (in Chinese)

[5] 郑毅.基于空间矩的激光光斑中心亚像素定位[J].激光与红外,2005,35(7):522-523.
ZHENG Yi. Sub pixel location of the center of laser spot based on spatial moments[J]. Laser and Infrared, 2005,35(7):522-523. (in Chinese)

[6] 黄天智,薛晋生.传像束光纤在望远瞄准镜中角分辨率的计算方法[J].光学技术,2004,30(1):101-103.
HUANG Tian-zhi. XUE Jin-sheng. Calculate method of angular resolving power of image fiber bundles in telescopic sight[J]. Optical Technique, 2004,30(1):101-103. (in Chinese)

[7] 郭宏瑞,谭吉春,王晓锋.颜色失真二维彩色条形码的自适应阈值机读法[J].应用光学,2007,28(3):257-261.
GUO Hong-rui, TAN Ji-chun WANG Xiao-feng. Machine-read method for faded 2-D color barcodes using self-adaptive threshold[J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(3):257-261. (in Chinese)