文章编号: 1002-0446(2005)03-0231-05

一种用于锁定髓内钉的新型计算机辅助整形外科系统*

张 剑, 孙立宁, 富历新, 杜志江
(哈尔滨工业大学机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 介绍了一套用于整形外科的全自动机器人系统. 该系统中的并联机器人取代了传统的复位工具, 并提出了一种简单、准确的基于几何模型的对准方法, 得到一条能够穿过髓内钉远端孔的三维路径, 引导串联机器人锁定髓内钉. 实验结果表明, 该系统有足够的定位精度和稳定性, 并可以大大减少手术所需时间.

关键词: 计算机辅助; 整形外科系统; 荧光透视法; 复位; 髓内钉
中图分类号: TP24 文献标识码: B

A New Computer-assisted Orthopaedic System for Locking Intramedullary Nails

ZHANG Jian, SUN Li-ning, FU Li-xin, DU Zhi-jiang
(*Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: An automatic robot system for orthopaedic operation is introduced, and the parallel robot in this system replaces the traditional reduction tools. A simple and precise targeting method based on a geometric model to get the 3-D path that passes the distal hole of the intramedullary nail is presented, for guiding the serial robot to lock the intramedullary nail. Experimental results indicate that the positioning accuracy and stability of this system are very high, and it reduces the operating time dramatically.

Keywords: computer-assisted; orthopaedic system; fluoroscopy; reduction; intramedullary nail

1 引言 (Introduction)

闭合整复和髓内钉目前已经成为治疗股骨和胫骨骨折的常规方法.但是,诸如手术时间长、精度低、图像畸变、意外创伤以及髓内钉在插入时变形等问题,大大降低了锁钉的成功率.机器人辅助介入式外科手术近年来已进入实用阶段.它具有准确度高、手术时间短、创伤小等特点[1,2]. 1995年,英国的 HULL大学提出了一种帮助外科医生锁定髓内钉的新方法[3].该方法需要对两张带有畸变的 X光图像进行处理,并提取髓内钉边缘和钉孔的轮廓. 2002年,以色列的希伯莱大学研制了一种机器人系统,利用少量的 X光图像锁定长骨髓内钉[4].该系统使用了一个紧凑的导向机构,用于在断骨上钻锁定螺钉的导向孔.

本文介绍了一种新的全自动计算机辅助整形外科系统, 该系统能够完成复位、锁钉功能,并可以通过网络实现遥操作.这里将着重讨论图像畸变的校正和基于图像导航的机器人锁定髓内钉远端孔的使用方法.

2 计算机辅助整形外科系统总体结构 (General structure of the computer-assisted orthopaedic system)

该系统包括一个六自由度的并联主手和一个六自由度的并联从手,一张整形外科手术床,一个六自由度的全自动 C型臂,以及一个六自由度的串联机器人.图 1为该系统的组成原理图.为了完成复位功能,需要从病灶的正、侧位拍摄两张 X光片,从中计算出复位参数,并依据这些位置和角度值通过主手来控制从手进行复位.在这个牵引装置上安装了一

* 基金项目: 国家 863计划资助项目 (2002AA420100-1).
收稿日期: 2004-10-10

个六维力传感器,以避免并联机器人的奇异问题.

2.2 辅助整形外科手术的机械原理图

把髓内钉植入断腿骨头的狭窄髓腔内.

腿部肌肉所能承受的范围.复位完成后,医生就可以

Fig. 1 The prototype of a computer-assisted orthopaedic system

为了保证患者和医生的安全.医生必须完全控制机器人系统,反过来机器人系统也应满足所有必要的安全措施.医生可以控制一个紧急制动手柄操作,并在系统中安装机电安全设备,在控制软件中加入安全协议来满足操作要求.

在手术过程中,当过多软组织受到破坏时,患者受感染率高达 40%[5].对于机器人系统,在手术室中,防止感染是极为重要的设计准则.因此使用了已消毒的覆盖物把操作设备从手术室中的消毒区隔开.系统中的所有附件都由不锈钢制成,以确保足够的抗腐能力和适应力.

3 图像畸变校正 (Correction of image distortion)

从 X光图像中进行距离、面积和体积的测量时,为了保证精度,必须对成像设备进行标定.对于影像增强器,产生畸变的因素有:电子束从曲面投影到平面,电子聚焦系统的精度,外部磁场的影响以及光学系统的偏差.这些因素导致了图像的枕形畸变和 S形畸变.其中,枕形畸变和增强器的位置无关;而 S形畸变则取决于增强器的方位,尤其当增强器运动时,该畸变的方式和大小会有很大变化.

为了消除畸变,这里采用了“局部法”,即在对变形图像和标准图像进行匹配时,先把图像分割成局部区域,然后求出这些相应图像区域间的转换关系.我们设计了一个薄圆盘来代替标准图像.在圆盘的中央是一个直径为 4.2mm的圆孔,其余的圆孔直径均为 3.1mm,所有圆孔的圆心都均匀分布在间距为 6mm的网格上,并把该圆盘安装在增强器的表面上,如图 2所示.标定圆盘安装在影像增强器的表面上

Fig. 2 The plate on the surface of image intensifier

实验中,我们先对圆盘投影所产生的畸变图像进行增强和二值化,然后使用种子填充法计算出图像中每个圆孔投影的形心.我们利用这些大量的形心坐标以及与之相对应的圆盘上的圆孔把两幅图像分割成许多四边形区域.假定畸变图像中每个四边形的顶点坐标为 (u, v),与之对应的圆盘上圆孔中心的坐标为 (x, y),而这些点之间的几何对应关系可以由一阶多项式来描述,其式:

$$\begin{cases} x = p_{11}uv + p_{10}u + p_{01}v + p_{00} \\ y = q_{11}uv + q_{10}u + q_{01}v + q_{00} \end{cases} \quad (1)$$

每一对四边形区域都可列出 8个方程,因此可以求出相应的参数 p_{ij}和 q_{ij},其中 $i, j = 0, 1$.这些系数可建立将四边形区域内的所有点进行空间映射的公式.然后把每个区域对应的 8个系数存到一个表格中,用于整幅图像的校正.

由于畸变图像的像素在标准图像中没有对应的整数值,我们利用双线性变换来进行灰度插值.

4 计算锁孔路径 (Computation of path of locking distal hole)

总的来说,三维图像导航有两种方法.一种是使用 MRI或者 CT直接进行三维图像导航[6,7].另一种是用有立体感的图像进行导航[8].在本文所介绍的系统中,使用几何方法计算出锁钉路径.此方法需要将一个标定盒安装在串联机器人的末端关节上,在这个标定盒的上、下表面分别嵌有 3个钢球.

锁定髓内钉远端孔需要找到经过髓内钉孔上、下两个圆的圆心的直线.图 3所示为系统数学模型的原理图.

图 3　系统算法原理图

Fig. 3　Principle diagram of system algorithm

该图是立方体,上下表面各有 3点,分别为 (A, B, C)和 (D, E, F),而且这两组点各自形成一个等腰直角三角形.点 O为 C型臂的光源,平面 $A'B'C'$为影像增强器的投影平面.如图 3中所示,我们建立笛卡尔坐标系 $\{O1\}$.给定投影平面方程:

$$Ax + by + z + D = 0 \tag{2}$$

如果给定点 A、B、C、D、E和 F的坐标,并假定该立方体的高为 H,就能得到点 A、B、C、D、E、F在坐标系 $\{O1\}$下的坐标,分别为 $A(a, 0, 0)$、$B(0, 0, 0)$、$C(0, a, 0)$、$D(r, s, H)$、$E(s, s, H)$和 $F(s, r, H)$.然后我们假设光源 O在坐标系 $\{O1\}$下的坐标为 $O(x_0, y_0, z_0)$,于是就能推出直线 OAA'、OBB'、OCC'、ODD'、OEE'、OFF'的方程,其中 A'、B'、C'、D'、E'、F'为这 6条直线和投影平面的交点.于是,可以得到点 A'、B'、C'、D'、E'、F'的坐标.

利用图像处理的方法,我们可以在图像平面上找到点 A'、B'、C'、D'、E'、F'对应的像素点的位置.

$$A' = \begin{vmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dfrac{-(Aa+D)(x_0-a)}{Ax_0+By_0+z_0-Aa}+a \\ \dfrac{-(Aa+D)y_0}{Ax_0+By_0+z_0-Aa} \\ \dfrac{-(Aa+D)z_0}{Ax_0+By_0+z_0-Aa} \end{vmatrix}$$

$$B' = \begin{vmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dfrac{-Dx_0}{Ax_0+By_0+z_0} \\ \dfrac{-Dy_0}{Ax_0+By_0+z_0} \\ \dfrac{-Dz_0}{Ax_0+By_0+z_0} \end{vmatrix}$$

$$C' = \begin{vmatrix} C'_x \\ C'_y \\ C'_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dfrac{-(Ba+D)x_0}{Ax_0+By_0+z_0-Ba} \\ \dfrac{-(Ba+D)(y_0-a)}{Ax_0+By_0+z_0-Ba}+a \\ \dfrac{-(Ba+D)z_0}{Ax_0+By_0+z_0-Ba} \end{vmatrix}$$

$$D' = \begin{vmatrix} D'_x \\ D'_y \\ D'_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dfrac{-(Ar+Bs+H+D)(x_0-r)}{Ax_0+By_0+z_0-Ar-Bs-H}+r \\ \dfrac{-(Ar+Bs+H+D)(y_0-s)}{Ax_0+By_0+z_0-Ar-Bs-H}+s \\ \dfrac{-(Ar+Bs+H+D)(z_0-H)}{Ax_0+By_0+z_0-Ar-Bs-H}+H \end{vmatrix}$$

$$E' = \begin{vmatrix} E'_x \\ E'_y \\ E'_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dfrac{-(As+Bs+H+D)(x_0-s)}{Ax_0+By_0+z_0-As-Bs-H}+s \\ \dfrac{-(As+Bs+H+D)(y_0-s)}{Ax_0+By_0+z_0-As-Bs-H}+s \\ \dfrac{-(As+Bs+H+D)(z_0-H)}{Ax_0+By_0+z_0-As-Bs-H}+H \end{vmatrix}$$

$$F' = \begin{vmatrix} F'_x \\ F'_y \\ F'_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dfrac{-(As+Br+H+D)(x_0-s)}{Ax_0+By_0+z_0-As-Br-H}+s \\ \dfrac{-(As+Br+H+D)(y_0-r)}{Ax_0+By_0+z_0-As-Br-H}+r \\ \dfrac{-(As+Br+H+D)(z_0-H)}{Ax_0+By_0+z_0-As-Br-H}+H \end{vmatrix}$$

这样,我们就可以在图像平面上求出像素点 A'和 B',

机器人编辑部

B'和 C', C'和 D', D'和 E', E'和 F', B'和 F'间的距离.并得到如下的方程:

$$(A'_x - B'_x)^2 + (A'_y - B'_y)^2 + (A'_z - B'_z)^2 = k^2 |A'B'|^2_{image} \quad (3)$$

$$(B'_x - C'_x)^2 + (B'_y - C'_y)^2 + (B'_z - C'_z)^2 = k^2 |B'C'|^2_{image} \quad (4)$$

$$(B'_x - D'_x)^2 + (B'_y - D'_y)^2 + (B'_z - D'_z)^2 = k^2 |B'D'|^2_{image} \quad (5)$$

$$(D'_x - E'_x)^2 + (D'_y - E'_y)^2 + (D'_z - E'_z)^2 = k^2 |D'E'|^2_{image} \quad (6)$$

$$(E'_x - F'_x)^2 + (E'_y - F'_y)^2 + (E'_z - F'_z)^2 = k^2 |E'F'|^2_{image} \quad (7)$$

$$(B'_x - F'_x)^2 + (B'_y - F'_y)^2 + (B'_z - F'_z)^2 = k^2 |B'F'|^2_{image} \quad (8)$$

其中, $|A'B'|_{image}$是点 A'和 B'在图像平面的距离, 单位是像素, $|B'C'|_{image}$、$|B'D'|_{image}$、$|D'E'|_{image}$、$|E'F'|_{image}$、$|B'F'|_{image}$类同.常数 k可以事先测得, 单位是 mm/pixel.测量方法如下,将一根 100mm长的铁丝放在增强器表面,成像后,除以像的长度.

这样,就得到参数 A、B、D、x^0、y^0和 z^0的值.如图 3所示,经过髓内钉远端孔 (用圆柱体表示)上下两个圆的圆心的直线交立方体上、下表面于点 m和 n,这两点在图像平面上的投影为 m'和 n'.同理,我们也可以计算出点 m'和 n'到点 A'、B'、C'、D'、E'、F'之间的距离,然后利用已经得到的参数 A、B、D、x^0、y^0和 z^0,就可求出点 m和 n在坐标系 $\{O1\}$下的坐标.这样,我们就得到了经过髓内钉远端孔的直线方程.

髓内钉孔由于受到 X光的照射在影像增强器上成像.理论上,如果 X光的照射方向合适,髓内钉孔在影像增强器中央的投影正好是一个圆.假如照射方向偏离理想位置,所成的像外形上类似于椭圆.旋转 C型臂使之绕该椭圆投影的长轴旋转一个角度 θ可以使该投影变成一个圆,这时点 m和 n'重合.在具体实验中,我们把投影当作一个椭圆来处理.标定盒与串联机器人末端关节固联,这样得到标定盒坐标系下的穿孔路径后,再转换到机器人工具坐标系下,就可以完成图像导航下机器人锁钉.

5 实验结果和分析 (Experimental results and analysis)

我们进行了多次试验,验证理论的正确性,并对实验数据进行了仔细分析.实验中采集的数字图像均为 768×576像素的 8位灰度图像.所有的算法都用 VC++实现.

5.1 误差分析

实验过程中,为了提高精度,我们首先把采集到的图像进行畸变校正.然后利用 Canny算子提取髓内钉远端孔和钢球的轮廓.为了验证该几何模型的准确度,我们在标定盒的上、下表面又分别安装了两个钢球,利用该算法得出的结果表明,误差范围在 ±1.5mm内,满足锁孔的误差要求.该误差来源有:计算钢球圆心时的误差,算法的误差.但是,当我们把锁钉路径由标钉盒坐标系转换到机器人工具坐标系下时,发现位置误差达到 ±0.85mm.为了降低误差,我们校正了两个坐标系间的转换矩阵.最后,位置误差减少到 ±0.45mm.

5.2 实验结果

图 4和图 5的对比,显示了用局部法校正图像的结果.

图 4 标定圆盘的畸变图像
Fig. 4 Acquired image of the calibration plate

图 5 标定圆盘的矫正图像
Fig. 5 Corrected image of the calibration plate

在对猪腿骨和塑料胫骨所做的穿孔试验中,平均操作时间为 4.8min,平均位置误差为 0.45mm,平均照射时间为 0.86min,锁钉成功率为 99.2%.而使用传统的穿钉方法,平均操作时间为 10.3min,平均照射时间为 5.25min,锁钉成功率为 97.1%.从中我们可以看出,照射时间大大减少.

6 结论 (Conclusion)

本文介绍了一种用于锁定髓内钉远端孔的计算机辅助整形外科系统.此系统适用于多种髓内钉.在找到合适的拍摄角度后,该系统仅需一张照片就可以定位,在图像采集和机器人控制过程中使用远程控制,减少 X线对医生的照射时间.此外,我们在并联从手和串联机器人上各自安装了一个六维力传感器.其中一个传感器用于监控并联机器人施加在患者腿上的力;另外一个传感器用于监控安装在串联机器人末端关节上的骨钻对腿骨施加的力.在机器人控制中采用安全设计,并使用已消毒的覆盖物把操作设备从手术室中的消毒区隔开,以降低临床使用中的风险.

参考文献 (References)

[1] Kwoh Y S, Hou J, Jonckheere E A, *et al*. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1988, 35(2): 153 - 160.

[2] Melzer A, Schmidt A, Kipfmuller K, *et al*. Technology and principles of tomographic image-guided interventions and surgery[J]. Surgical Endoscopy, 1997, 11(9): 946 - 956.

[3] Viant W J, Phillips R, Griffiths J G, *et al*. A computer assisted orthopaedic system for distal locking of intramedullary nails[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 1997, 211(4): 293 - 300.

[4] Shoham M, Burman M, Zehavi E, *et al*. Bone-mounted miniature robot for surgical procedures: concept and clinical application[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(5): 893 - 901.

[5] Matthews I P, Gibson C, Samuel A H. Sterilisation of implantable devices[J]. Clinical Materials, 1994, 15(3): 191 - 215.

[6] Melzer A, Schmidt A, Kipfmuller K, *et al*. Technology and principles of tomographic image-guided interventions and surgery[J]. Surgical Endoscopy, 1997, 11(9): 946 - 956.

[7] Alejandro F, Wiro J, Max A. Three-dimensional modeling for functional analysis of cardiac images: a review[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 20(1): 2 - 25.

[8] Shi M Y, Liu H, Tao G. A stereo-fluoroscopic image-guided robotic biopsy scheme[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 309 - 317.

作者简介:

张　剑 (1976-), 男,博士.研究领域:图像处理,计算机视觉.

孙立宁 (1964-), 男,教授.研究领域:机器人技术,微驱动技术,微操作技术.

富历新 (1952-), 男,教授.研究领域:机器人控制技术,运动控制技术.

(上接第 230页)

5 结论 (Conclusion)

本文提出基于 UKF的地面移动机器人主动建模(在线状态及参数联合估计)方法,并将基于该方法所建的模型与逆动力学控制相结合,构成在线逆动力学自适应控制方法,实现移动机器人针对其自身不确定因素的自主性.通过全方位移动机器人仿真实验,验证了 UKF对阶跃变化和正弦连续变化的状态、参数的跟踪与预测能力,并利用基于 UKF的主动模型控制,实现了系统在无人干预的情况下自主应对参数的非预期性变化,与常规的定常参数控制相比较,明显提高了控制性能.

参考文献 (References)

[1] Brunke S, Campbell M. Estimation architecture for future autonomous vehicle[A]. Proceedings of the American Control Conference[C]. Alaska: IEEE, 2002. 1108 - 1114.

[2] Han J D, Campbell M. Artificial potential guided evolutionary path plan for target pursuit and obstacle avoidance[A]. American Institude of Aeronautics and Astronautics Guidance Navigation Control Conference[C]. Austin: 2003.

[3] Maciejowski J. Modelling and predictive control: enabling technologies for reconfiguration [J]. Annual Review in Control, 1999, 23(1): 13 - 23.

[4] Pesonen U, Steck J, Rokhsaz K. Adaptive neural network inverse controller for general aviation safety[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2004, 27(3): 434 - 443.

[5] Julier S, Uhlmann J. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Special Issue on Sequential State Estimation, 2004, 92(3): 401 - 422.

[6] 宋亦旭. 正交轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究[D]. 沈阳:中科院沈阳自动化所, 2002. 18 - 21.

[7] Spong M, Vidyasagar M. Robot Dynamic and Control[M]. New York: John Wiley & Sons, 1989.

作者简介:

宋　崎 (1978-), 女,博士研究生. 研究领域:移动机器人控制.

韩建达 (1968-), 男,研究员,博士生导师. 研究领域:基于加速度反馈的鲁棒控制,基于主动建模的故障诊断及容错控制,自主系统实时最优规划及在线学习控制等.