

文章编号: 1002-0446(2005)01-0026-05

用于髓内钉远端锁钉手术的矫形外科机器人系统*

赵永涛, 王田苗, 胡磊

(北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100083)

摘要: 介绍了一套用于髓内钉远端锁钉的矫形外科机器人系统. 给出了其结构和功能、视觉标定方法, 并对机器人的结构特点、运动学及其控制结构进行了详细的分析说明.

关键词: 医疗机器人; 运动学; 视觉标定; 矫形外科

中图分类号: TP24

文献标识码: B

An Orthopedic Robot System for Distal Locking of Intramedullary Nail

ZHAO Yong-tao, WANG Tian-miao, HU Lei

(Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper describes an orthopedic robot system used for distal locking of intramedullary nail. Its architecture, function and calibration method are presented, and the characteristics, kinematics and control architecture of the robot are analyzed and shown in detail.

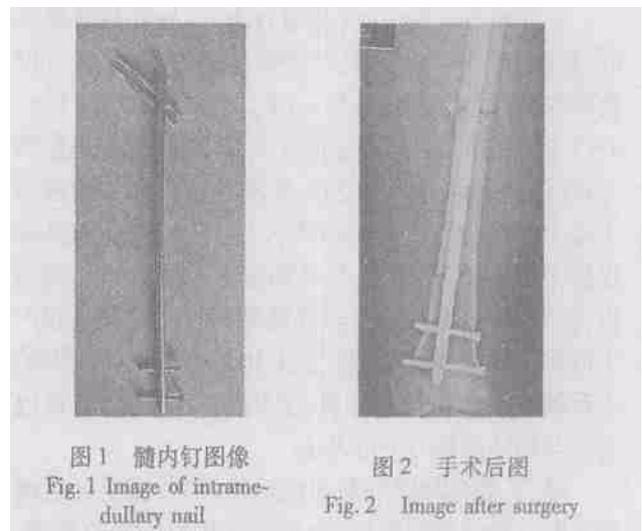
Keywords: surgical robot; kinematics; visual calibration; orthopedics

1 引言 (Introduction)

机器人技术在外科手术中的应用是一个有巨大发展潜力的研究领域.

90 年代初, 为了解决矫形外科手术中存在的问题, 出现了一个新的研究领域——计算机辅助矫形外科手术 (CAOS). 它将机器人、医学成像、虚拟现实等先进技术综合应用到矫形外科手术中, 以达到克服传统矫形外科手术中存在问题的目的. 骨折手术是矫形外科手术中最常见的一种. 固定一直是骨折手术的核心问题, 固定原则和方法的发展也基本上反映并制约着骨折治疗的发展. 髓内钉锁定手术就是其中一个重要的方面. 虽然传统的治疗方法能够完成骨折手术, 但是在手术的过程中存在很多缺点, 例如: 病人的创伤大、手术时间长、X 线辐射时间长等. 基于传统骨折手术中的种种缺陷, 针对髓内钉锁定手术, 我们开发出一套矫形外科机器人系统. 系统涉及到医学图像处理、机器人、计算机和空间配准等先进的科学技术.

2 系统功能和结构 (System function and architecture)



髓内钉 (图 1) 锁定是骨折手术的难点之一. 髓内钉的锁定就是通过交锁的螺钉横行穿过髓内钉而固定于两侧骨皮质上, 可以有效地防止骨折部位的旋转、缩短及成角等畸形的发生. 图 2 是手术完成后的 X 光图像. 锁定技术的难点在于, 将髓内钉打入骨髓腔后, 找出锁定的入点和方向. 传统手术方法主要依靠外科医生的手术经验和空间想象能力, 它会引起

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA420110-1).

收稿日期: 2004-06-10

上面所述的缺点。

基于传统手术中存在的问题,我们开发出一套矫形外科机器人系统.它通过对包含标志点的医疗图像进行处理,计算出髓内钉孔的位姿,然后由机器人的末端运动到此位姿进行导航.图 3 所示,系统主要由以下部分组成:

6 5 自由度 PPRRR 型机器人,由两个移动关节和 3 个转动关节构成.这个机器人为外科医生提供手术中锁钉的切入点和钻孔的方向,克服了人手稳定性差的缺点,充分发挥了机器人的定位方便和精度高的优点.

6 用于系统规划的工作站,通过视频采集卡将 C 型臂 X 光机采集的图像传入上位机,然后由图像标定软件确定一个参考坐标系,最后根据双目视觉理论求出锁钉孔的位置和方向.规划工作站还可以进行手术模拟,并调整手术路径,以提高手术成功率.

6 机器人控制工作站,采用开环控制方式,主要由上位机、可编程控制器和继电器组成.使用可编程控制器的控制系统具有结构简单、维修方便和抗干扰能力强等一系列优点.

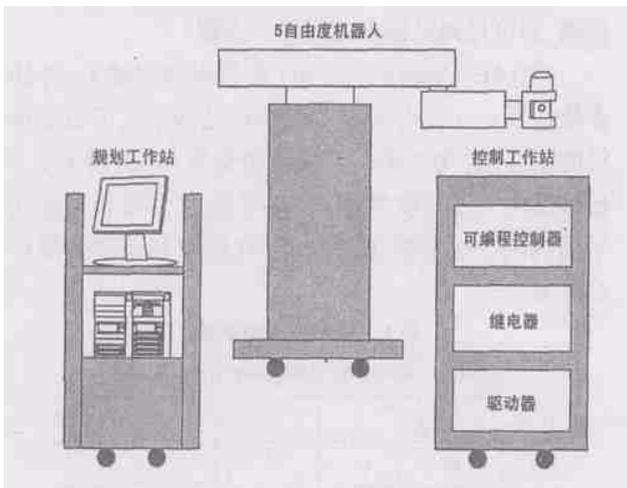


图 3 系统结构图

Fig.3 System architecture

3 视觉标定 (Visual calibration)

在计算机辅助矫形外科手术中,视觉标定是手术过程中的重要步骤,它将影响手术成功与否.视觉标定就是通过对医疗图像的处理建立机器人空间和手术操作空间之间的精确的几何关系.本系统标定方法如下:

6 首先,对 C 型臂 X 光机进行定标,确定其内外参数.其中,内部参数包括 C 型臂 X 光机的焦距、图像中心偏移和图像的放大率,外部参数是 C 型臂 X

光机的位置和姿态;

6 其次,求出待测点的像点的空间坐标,将求出的像点坐标和 C 型臂 X 光机光源点连接,确定一条过待测点的空间直线 l_1 ;

6 再次,将 C 型臂 X 光机旋转一个角度,重做上面两个步骤,再求出一条过待测点的直线 l_2 ,计算 l_1 、 l_2 两条直线的交点,即可求出待测点的坐标;

6 最后,将待测点的坐标映射到机器人坐标系中.

马颂德和张正友编写的《计算机视觉》^[1]中介绍了一种线性模型摄像机定标方法.根据线性摄像机模型所遵循的透视投影关系,建立投影矩阵.所谓透视投影,即任何空间一点 P 在图像上的投影位置 p ,为光心 O 与 P 点的连线 OP 与图像平面的交点,如图 4 所示.

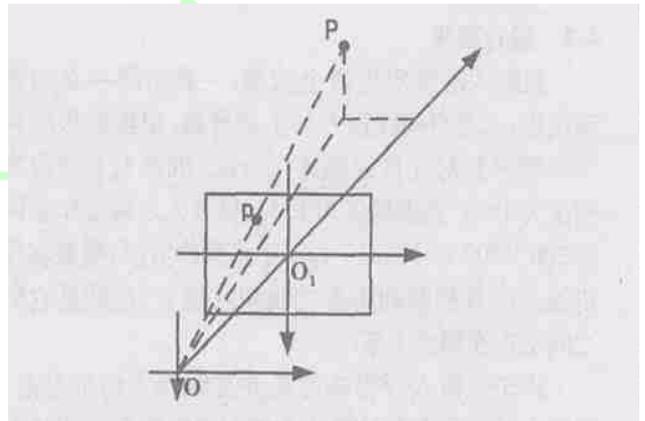


图 4 透视投影

Fig.4 Perspective projection

投影矩阵元素的线性方程的个数由标定点的数目所决定,如果有 n 个标定点,就有 $2n$ 个线性方程.由于投影矩阵中有 11 个内外参数的未知数,所以至少需要 6 个以上标志点的实际三维坐标及其二维图像坐标.为了降低误差,可以使用较多的标志点,然后用最小二乘法求解.

计算出 C 型臂 X 光机的光源点的位置、方向及其焦距后,则可以确定图像的平面方程,然后就可以求出待测点的图像点 p 的三维坐标.求出连接光源点 O 和图像点 p 的直线方程,此直线过待测点 P .重复上述过程,在不同的方向上计算出另外一条过待测点 P 的直线方程,如图 5 所示.由于标定误差的存在,一般情况下,两条过待测点的直线并不相交,而近似地将两条直线的公垂线的中点的坐标作为待测点的坐标.此时,我们是在 X 光机坐标系求出了待测点坐标,根据 X 光机和机器人坐标系之间的关系矩

阵,把待测点的坐标转换到机器人坐标系中.

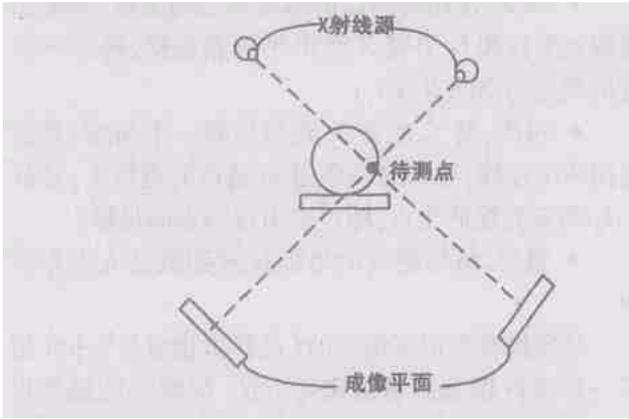


图5 双目视觉定位

Fig.5 Binocular vision location

4 机器人设计 (Robot design)

4.1 设计要求

机器人要实现两个功能:一是空间一点的精确定位;二是空间线性方向上的导航.根据矫形外科手术要求并对允许误差进行分配,机器人末端位置精度为1mm,姿态精度为1.5°,机器人末端工作空间为300×300×300mm³.为了手术操作方便,要实现机器人位置控制和姿态控制相互独立,也就是它们之间不存在耦合关系.

由于机器人所完成的任务是线性方向的导航,机器人手部的姿态只需两个相互垂直相交的旋转关节即可实现空间所有的姿态.

4.2 机器人结构

为了满足上述的任务要求,我们设计了一个5自由度PPRRR结构机器人,它由5个关节组成,其中前两个是移动关节,后3个是转动关节,如图6所示.前3个关节可以确定机器人末端位置,后2个转动关节的轴线垂直相交,并且机器人末端的导航器通过两关节轴线的交点.机器人的这一结构,可以保证机器人末端导航器在工作空间中实现任意的姿态.

这种机构使机器人末端位置和姿态之间的耦合关系变得简单化、清晰化,所以,机器人运动学正反解也将更加简单,机器人控制将更加灵活、方便.

4.3 机器人运动学

机器人手部的姿态可以用矩阵 $[\vec{n} \vec{o} \vec{a}]$ 表示,其中, \vec{n} 为法向向量, \vec{o} 为姿态矢量, \vec{a} 为接近矢量,这三个矢量构成右手矢量积.矫形外科导航机器人的手部仅仅需要确定法向向量 \vec{n} ,而姿态向量 \vec{o} 和接

近向量 \vec{a} 可以是与法向向量 \vec{n} 满足右手矢量积几何关系的任意值.也可以理解为绕法向向量 \vec{n} 旋转任意角度的手部姿态都可以满足导航的要求.

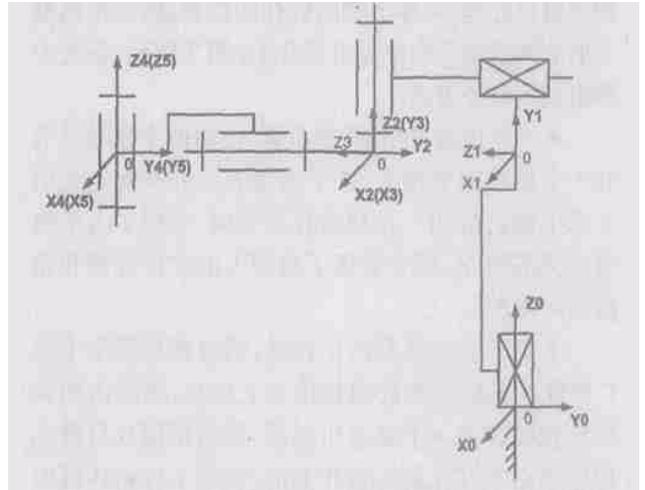


图6 机器人结构

Fig.6 Robot architecture

4.3.1 机器人正解

首先使用 Denavit-Hartenberg 方法,建立机器人杆件坐标系(图6),确定杆件参数.然后依次求出各杆件坐标系之间的变换矩阵,最后将各个变换矩阵连乘,即可得到机器人的运动学方程.

建立杆件坐标系后,杆件参数也随之确定.杆件参数包括 a_n, α_n, d_n 和 θ_n .其中 a_n 是两个关节沿公垂线的距离, α_n 为两个关节轴线的夹角, d_n 为沿关节 n 的轴线两个公垂线的距离, θ_n 是垂直于关节 n 轴线平面内两个公垂线的夹角.杆件参数和关节变量见表1.

表1 机器人结构参数

Table1 Robot architecture parameters

杆号	关节变量	θ	d	a	α
1	d_1	0°	d_1	0	90°
2	d_2	0°	d_2	0	-90°
3	θ_3	θ_3	0	0	90°
4	θ_4	θ_4	386.5	0	-90°
5	θ_5	θ_5	0	0	0

其中 $n-1$ 系到 n 系的变换矩阵通式为:

$$A_n = Rot(Z, \theta_n) Trans(0, 0, d_n) Trans(a_n, 0, 0) Rot(X, \alpha_n)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_n & -s\theta_n c\alpha_n & s\theta_n s\alpha_n & a_n c\theta_n \\ s\theta_n & c\theta_n c\alpha_n & -c\theta_n s\alpha_n & a_n s\theta_n \\ 0 & s\alpha_n & c\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据上述结构参数和变换矩阵通式,依次求出各个关节的变换矩阵.机器人机构可以认为是一系列杆件由关节连接起来, A_i 表示一个杆件与下一个杆件之间关系的齐次变换矩阵,各个 A_i 依次右乘的结果表示相对于固定坐标系的手部位姿,即机器人的运动方程.

$${}^0 T_5 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5$$

$$= \begin{pmatrix} c3c4c5 - s3s5 & -c3c4s5 - s3c5 & -c3s4 & d_4 - d_4s3 \\ s3c4c5 + c3s5 & -s3c4s5 + c3c5 & -s3s4 & -d_2 - d_4c3 \\ s4c5 & -s4s5 & c4 & d_1 + d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 s_i 、 c_i 分别表示 $\sin \theta_i$ 、 $\cos \theta_i$, $i=3,4,5$.

4.3.2 机器人反解

根据计算机器人反解的分离变量法,由式(1)、(2)计算出的运动学方程可以依次求出机器人的各关节变量为:

$$d_1 = p_z - d_3 \quad (3)$$

$$\theta_3 = \text{tg}^{-1} \frac{a_y}{a_x} \quad (4)$$

$$d_2 = -d_4c3 - p_y \quad (5)$$

$$\theta_4 = \text{tg}^{-1} \frac{-a_x c3 - a_y s3}{a_z} \quad (6)$$

$$\theta_5 = \text{tg}^{-1} \frac{n_x s3 - n_y c3}{o_x s3 - o_y c3} \quad (7)$$

视觉标定算法所给出的仅仅是过空间某一点的线性方向,也就是说,我们只是已知机器人手部的位置向量 \vec{p} 和姿态的法向量 \vec{n} .然而,完整的机器人手部姿态还包括接近向量 \vec{o} 和姿态向量 \vec{a} .

从机器人的运动学方程可以清楚地看出第3个关节变量 θ_3 和位置向量 \vec{p} 的 p_x 分量的耦合关系.由机器人运动学方程的第一行第三列、第二行第三列和第一行第四列可得:

$$-c3s4 = a_x \quad (8)$$

$$-s3s4 = a_y \quad (9)$$

$$d_4s3 = p_x \quad (10)$$

由(8)、(9)两式相除可得:

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{a_y}{a_x} \quad (11)$$

由第(10)式可得:

$$\theta_3 = \sin^{-1} \frac{p_x}{d_4} \quad (12)$$

联立(11)、(12)两式,可得:

$$\frac{a_y}{a_x} = \tan(\sin^{-1} \frac{p_x}{d_4}) = p \quad (13)$$

上式作为求解的向量 \vec{o} 和 \vec{a} 的限制条件,再由 $\vec{n} \perp \vec{o}$ 和 $\vec{a} \perp \vec{o}$ 三向量标准正交关系,在已知 \vec{n} 的情况下,可以依次求出向量 \vec{o} 和 \vec{a} :

$$\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)^T \quad (14)$$

其中

$$a_x = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + \left(\frac{n_x + pn_y}{n_z}\right)^2}}$$

$$a_y = pa_x$$

$$a_z = -\frac{n_x a_x + n_y a_y}{n_z}$$

$$\vec{o} = \vec{a} \times \vec{n} = (a_x, a_y, a_z) \times (n_x, n_y, n_z)$$

$$= \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_x & a_y & a_z \\ n_x & n_y & n_z \end{vmatrix}$$

$$= (a_y n_z - a_z n_y) i - (a_x n_z - a_z n_x) j + (a_x n_y - a_y n_x) k \quad (15)$$

此时,我们就求出了既符合运动学方程的耦合关系,又满足手术要求的机器人手部位姿矩阵.公式的推导过程表明,在机器人的工作空间内,任何导航任务(空间的某一线性方向)都可以实现,此种结构的机器人的工作空间就是灵活空间.

4.4 机器人控制

由于机器人手部的位姿精度的要求较低,所以我们选择了由上位机、PLC(可编程控制器)、步进电机驱动器和步进电机组成的开环控制系统,控制结构如图7所示.上位机经RS232C型通信选件与PLC进行通信,并对其进行读写操作.FPsigma型号的PLC可以提供两路脉冲输出,而机器人有5个关节,也就是说,PLC不能实现对5个关节同时控制,最多能够实现两关节的联动.为实现单PLC对5个关节的控制,在PLC的脉冲输出端口和步进电机驱动器之间连接机械式的继电器,进行电动机控制之间的切换.每个关节都安装两个限位开关和一个零位开关,以保证机器人运动的安全性和确定关节零位.当机器人关节运动到零位时,零位开关发出一个控制脉冲信号,通知PLC停止脉冲输出,即停止所控制关节的运动.

机器人控制软件主要由两部分组成,一是上位机控制软件,二是PLC程序.上位机程序主要实现机

机器人视觉标定、医疗图像处理、机器人运动学反解和对 PLC 的状态对寄存器的读写等功能。上位机程序对 PLC 进行运动参数设定,然后通知 PLC 程序激发其脉冲输出。除了上述功能外,PLC 程序还要完成对继电器的控制和零位开关信号的采集等任务。

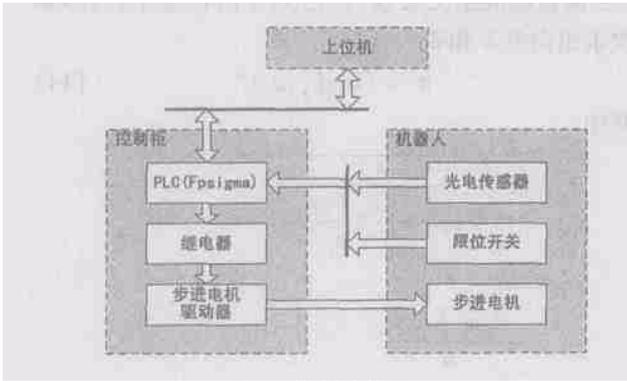


图 7 控制结构图

Fig.7 Control architecture

5 结论 (Conclusion)

以上所述的矫形外科机器人系统,在模拟手术室的环境中,成功地完成了导航试验,并且系统的精度满足胫骨髓内钉手术的要求。系统还需通过对机器人参数标定进一步提高精度,以满足股骨髓内钉

的手术要求。此系统的研究和实现为更加复杂的矫形外科手术的机器人系统的研究积累了一些技术基础和设计经验。

参考文献 (References)

- [1] Taylor R H. Robotics in orthopedic surgery [A]. Computer Assisted Orthopedic Surgery [C]. 1999 . 35 - 41 .
- [2] Liu D, Wang T M, *et al* . A surgical robot system for stereotactic neurosurgery [A]. 1st Korea-China Joint Workshop on Robotics [C]. 2001 . 27 - 28 .
- [3] Paul H A, Bargar W L, Mittelstadt B, *et al* . Robotic execution of a surgical plan [A]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C]. 1992 . 1621 - 1623 .
- [4] 罗先正,邱贵兴.髓内钉固定 [M].北京:人民卫生出版社,2000 .
- [5] Bainville E, Bricault I, Cinquin P, *et al* . Concepts and methods of registration for computer-integrated surgery [A]. Computer Assisted Orthopedic Surgery [C]. 1999 . 15 - 34 .
- [6] 马颂德,张正友.计算机视觉 [M].北京:科学出版社,1998 .
- [7] 吴瑞祥.机器人学 [M].北京:北京航空航天大学出版社,1994 .
- [8] Kazanzides P, Zuhars J, Mittelstadt B, *et al* . Architecture of a surgical robot [A]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C]. 1992 . 1624 - 1629 .

作者简介:

- 赵永涛 (1979-),男,硕士生.研究领域:机器人控制技术.
 王田苗 (1960-),男,博士,教授,博导.研究领域:先进机器人技术.
 胡磊 (1965-),男,本科,工程师.研究领域:机械设计.

(上接第 25 页)

- [6] 梅凤翔,刘瑞,罗勇.高等分析力学 [M].北京:北京理工大学出版社,1991 .
- [7] Chiu S L. Fuzzy model identification based on cluster estimation [J]. Journal of Intelligent and Fuzzy System, 1994, 2(3) : 10 - 15 .
- [8] Roger J J-S, Sun C-T. Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1993, 4(1) : 156 - 159 .
- [9] Luo M Z, Mei T. Grasp analysis of an underactuated robot hand [A].

Proceedings of the 2003 International Conference on Intelligent and Automation [C]. Hong Kong : 2003 . 591 - 596 .

作者简介:

- 骆敏舟 (1973-),男,博士研究生.研究领域:智能机器人,机电一体化.
 梅涛 (1962-),男,研究员,博士生导师.研究领域:机器人,微机电系统.