

光学定位机器人微创手术系统视觉伺服控制^①

陈国栋^② 贾培发 宋亦旭

(清华大学计算机科学与技术系智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

摘 要 为满足机器人辅助微创手术系统手术中轨迹跟踪和绝对定位的高精度要求,为其研制了一个基于光学定位的视觉伺服系统。该系统采用光学跟踪定位手段,实时测量机器人末端位姿并反馈,在光学测量空间实现全局闭环的位姿校正控制,使影响机器人轨迹跟踪和定位精度的主要误差因素得到有效校正,从而保证了机器人跟踪和定位的高精确度。分析了系统的组成和工作原理,提出一种笛卡儿空间位姿校正和关节空间速度控制综合的轨迹跟踪控制方法,仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词 外科辅助机器人,位姿闭环控制,视觉伺服,光学定位

0 引 言

机器人辅助微创手术系统(robot-assisted micro-invasive surgery system)主要应用于进行精细外科(如脑神经外科)辅助手术^[1-4]。它借助医学成像设备如CT、MRI等提供病患部位的解剖学图像,利用计算机进行三维医学模型重构,由医生进行手术前规划,并预先确定机器人的工具路径。一旦路径确定并完成机器人、医学模型和病患的相对位置的注册和标定^[5],机器人就可以按照位置命令执行任务而不再需要进一步的干预。外科辅助机器人对器械运动的绝对精度要求非常严格^[2,3]。因为在虚拟图像空间进行的手术规划,最终要由机器人的运动实现。由于机构误差的因素,期望的位置命令和机器人实际达到的位置之间不可避免地存在误差,这种偏差必须严格控制在安全范围内。在工业应用中,机器人绝对精度可以通过各种方式的标定来保证,但作为一种辅助手术设备,其应用情况差别很大,对每一例手术都要求进行严格的现场精度标定是不适合的,而且一些非几何误差因素如机构弹性形变、关节间隙和柔性等的影响,也难以依靠标定解决^[6],因此,需要寻求新的解决途径。

20世纪90年代以来,空间测量系统和医疗影像的结合形成了图像导航技术^[7]。通过高精度动态光学跟踪定位系统,可以实时观察手术器械当前位置和周围的组织结构信息。同样,将光学定位系统与主动式外科辅助机器人系统结合,利用光学定位

系统实时测量机器人末端手术器械的位置并反馈,就使得在手术操作空间进行机器人的位姿闭环校正成为可能。由此,出现了高精度的基于光学定位视觉伺服的机器人辅助微创手术系统。目前,机器人视觉伺服研究已成机器人研究领域的一个热点,且较多研究的是基于图像或混合的视觉伺服控制^[5]。本文无意探讨视觉伺服和控制的深层次问题,而意在探讨一种实用的解决实际问题的方法。

1 基于光学定位的机器人辅助微创手术系统

如图1所示,基于光学定位视觉伺服的机器人辅助微创手术系统由三个子系统组成:(1)计算机辅助手术规划与导引子系统;(2)机器人本体及其控制器子系统;(3)光学跟踪定位子系统。其中, $\{M\}$ 是光学测量坐标系, $\{T\}$ 是工具坐标系, $\{R\}$ 是机器人基座坐标系, $\{P\}$ 是患者坐标系, $\{V\}$ 是三维医学模型坐标系。计算机辅助规划与导引子系统是系统的核心^[4],主要完成CT、MRI等提供的医学图像信息的处理和三维重构,进行虚拟手术规划,并在手术过程中向机器人控制器发出运动指令以控制机器人运动等。

光学跟踪定位系统在手术机器人系统中有两种功用,一是用于注册和标定^[8],即注册预先粘贴在患者解剖学骨架上的基准标志点,标定机器人本体的基座坐标系,建立虚拟图像空间到机器人现实操作

① 863计划(2003AA421060)资助项目。

② 男,1968年生,博士生,高工;研究方向:智能控制,机器人;联系人,E-mail:chengd03@mails.tsinghua.edu.cn
(收稿日期:2008-05-05)

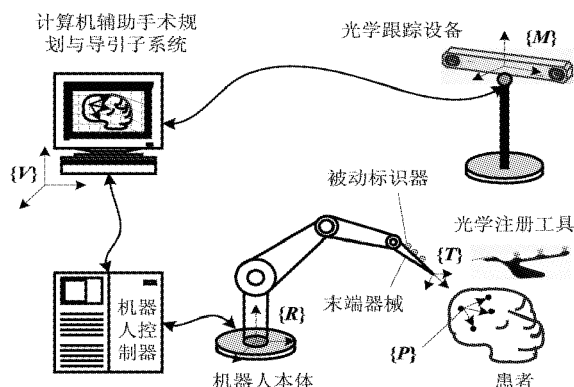


图1 视觉伺服的机器人辅助微创手术系统

空间的映射关系；二是用于实时跟踪机器人末端器械的位置和姿态，为建立笛卡儿空间的闭环校正提供位姿测量信息。

系统采用 Northern Digital Inc (NDI 公司) 的

POLARIS 光学定位设备。被动式的 POLARIS 包括一个能发射红外照明光的位置传感器和若干被动标识器或安装有被动标识器的工具。通过测量工具上标识器的空间位置，可以实时地确定工具的位置和方向。对机器人末端器械位姿的测量和跟踪是通过在其末端执行器上安装 3 个不共线的光学标识器实现的。为了让光学定位系统能自动计算出末端执行器的位置和方向，需要测定各个标识器在末端执行器上的几何位置关系，并作为自定义工具的参数文件写入光学定位设备。

基于光学定位视觉伺服的机器人辅助微创手术系统的工作原理如图 2 所示，其中， X_d 和 X_r 分别是工具坐标系 $\{T\}$ 在光学测量坐标系中的理想位姿的广义坐标和实际位姿的广义坐标， θ_d 是机器人关节的期望运动轨迹， $\Delta X = X_d - X_r$ 。

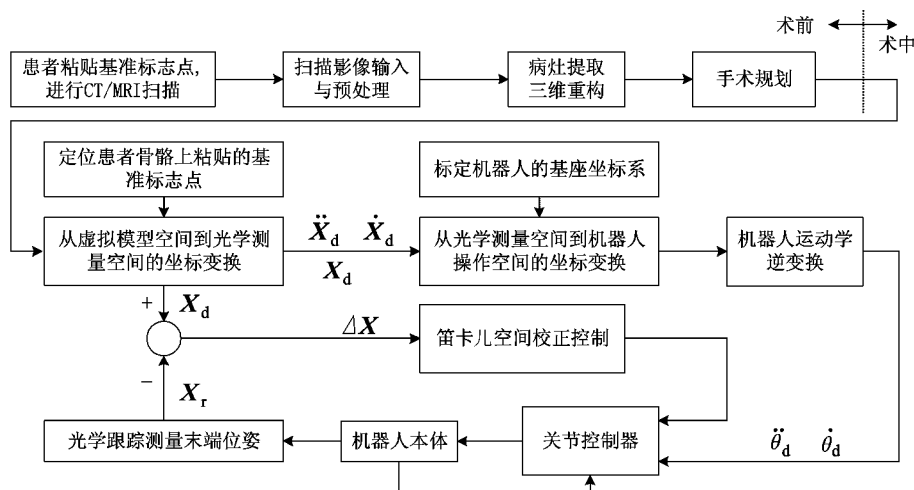


图2 视觉伺服的辅助微创手术机器人原理

2 视觉伺服控制器设计

基于位置的视觉伺服控制大都采用级联的方式，即把机器人看作一个理想的笛卡儿空间运动设备，视觉控制器与机器人的运动控制器是分离的，这种方法虽然降低了视觉控制器的设计难度，但系统的动态性能却难以保证^[5]。本文研究出了一种笛卡儿空间位姿校正和关节空间速度控制综合的动态轨迹跟踪控制方法。

如图 1 所示，以光学测量坐标系 $\{M\}$ 作为基本参考系。在机器人末端建立工具坐标系 $\{T\}$ ，其在光学测量坐标系中的理想位姿和实际位姿分别用广义坐标 X_d 和 X_r 表示，对应的齐次变换矩阵分别为 H_d 和 H_r ；一般地，记

$$H(t) = \begin{bmatrix} n(t) & s(t) & a(t) & p(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

用 $\Delta X = X_d - X_r$ 表示 X_d 和 X_r 之间的偏差，则六维位姿误差向量 ΔX 可由 H_d 和 H_r 计算^[6]：

$$\Delta X = \begin{bmatrix} p_d - p_r \\ \frac{1}{2} [n_r \times n_d + s_r \times s_d + a_r \times a_d] \end{bmatrix} \quad (1)$$

显然，可以直接设计笛卡儿空间的控制器让机器人跟踪理想的运动轨迹 X_d 、 $\dot{X}_d$ 、 $\ddot{X}_d$ ；但是考虑到视觉测量的采样频率还不够高且存在延迟，直接进行笛卡儿空间的运动控制很难取得良好效果，因此采用笛卡儿空间校正和关节空间运动控制综合的方法，如图 3 所示。

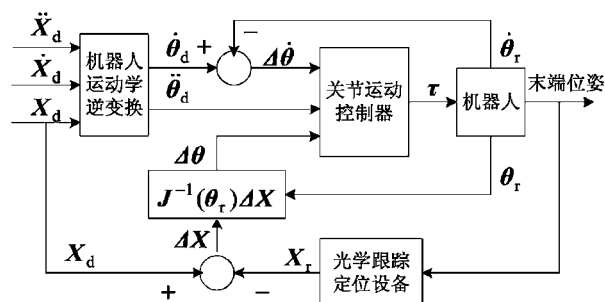
假设机器人关节的期望运动轨迹 θ_d 、 $\dot{\theta}_d$ 和 $\ddot{\theta}_d$ 是连续有界的，且实际关节角 θ_r 和角速度 $\dot{\theta}_r$ 可测

量,则可以设计如下的关节独立比例微分(PD)控制:

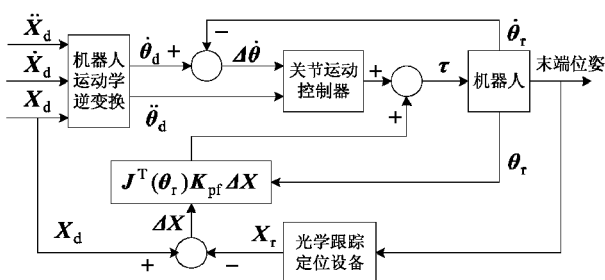
$$\tau = \ddot{\theta}_d + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_r) + K_p(\theta_d - \theta_r) \quad (2)$$

其中 K_p 和 K_v 分别为各关节 PD 控制参数组成的正定对角常数矩阵。适当选择 K_p 和 K_v 可以使系统稳定。

下面考虑两种综合笛卡儿空间位姿校正的方法。



(a)雅可比矩阵逆方法



(b)雅可比矩阵转置方法

图3 两种视觉伺服控制器

图3(a)是一种雅可比矩阵逆方法。假设 X_d 和 X_r 之间偏差不大,则笛卡儿空间的位姿偏差可以通过雅可比矩阵逆转换成关节角偏差:

$$\Delta \theta = \theta_d - \theta_r = J^{-1}(\theta_r) \Delta X \quad (3)$$

因此,可以设计改进的关节 PD 控制为:

$$\tau = \ddot{\theta}_d + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_r) + K_p J^{-1}(\theta_r) \Delta X \quad (4)$$

图3(b)是一种雅可比矩阵转置方法。为了使笛卡儿空间的位姿偏差 $\Delta \theta$ 减小,应该在机器人末端施加虚拟作用力 $f = K_{pf} \Delta X$, 其中 K_{pf} 为比例系数组成的对角矩阵;对应到关节空间,应该对各关节施加的关节力矩为:

$$\tau_x = J^T(\theta_r) K_{pf} \Delta X \quad (5)$$

结合关节速度控制,可以设计综合控制律为:

$$\tau = \ddot{\theta}_d + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_r) + J^T(\theta_r) K_{pf} \Delta X \quad (6)$$

可以证明,采用式(4)、(6)控制的机器人系统是全局一致最终有界稳定的,限于篇幅不再叙述。

3 仿真结果

针对 PUMA560 机械手进行了视觉伺服的轨迹跟踪控制仿真。关节空间的采样控制周期取为 2ms,笛卡儿空间的视觉校正周期取为 20ms。让机械手末端跟踪一个半径 0.2m 的 XY 平面圆轨迹,圆心的空间坐标为 $(-0.40, -0.15, -0.45)$,沿圆周的运动等速率,周期为 5s。

由于机构上的几何和非几何误差以及机座标定误差等因素的影响,根据机器人的逆运动学模型求解的关节空间期望轨迹 $(\theta_d, \dot{\theta}_d$ 和 $\ddot{\theta}_d)$ 必然是有偏差的;同时,雅可比矩阵与实际情况也存在差异。为了模拟这两种效果,在仿真中假定,机器人的关节角规划 θ_d 存在 5° 的偏差,关节角速度规划 $\dot{\theta}_d$ 也存在 5% 的偏差,同时在计算雅可比矩阵时对实际关节角度 θ_r 附加了 5° 偏差。

比较了三种控制的效果:(1)雅可比矩阵逆方法;(2)雅可比矩阵转置方法;(3)关节独立 PD 控制方法。为了使结果具有可比性,控制参数统一取为 $K_p = \text{diag}[3600 \ 3600 \ 1600 \ 100 \ 100 \ 100]$, $K_v = \text{diag}[120 \ 120 \ 80 \ 20 \ 20 \ 20]$, $K_{pf} = K_p$ 。图4

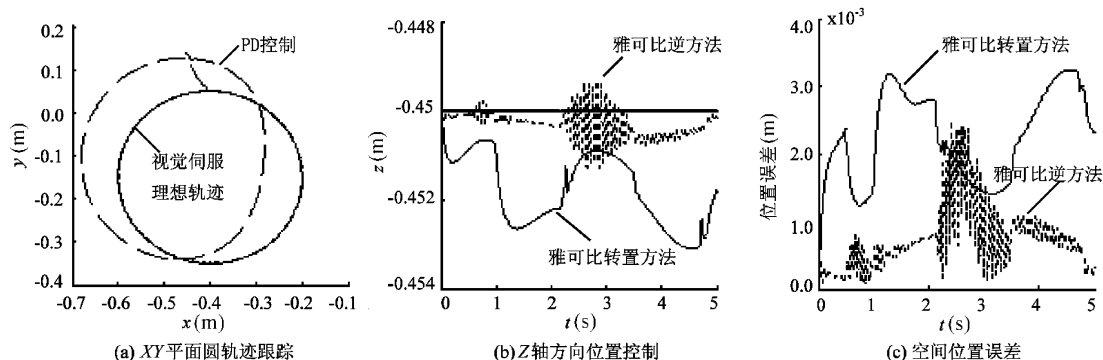


图4 两种视觉伺服控制效果比较

给出了三种控制的轨迹跟踪效果和跟踪误差对比。仿真结果表明,两种采用视觉校正的控制方法可以很好地克服各种误差因素的影响,保持了对笛卡儿空间理想轨迹的准确跟踪,其中雅可比矩阵逆方法效果更好。通过设计和应用更有效的校正控制算法,其精度可望进一步提高。

4 结 论

精度问题是影响外科手术辅助机器人临床运用的关键问题。本文研究的基于光学定位视觉伺服的机器人辅助微创外科手术系统,通过对机器人末端位姿的实时闭环校正,使影响机器人运动和定位的主要误差因素,如机器人本体机构上的几何误差和非几何误差以及坐标转换中的误差因素等得到了有效校正,从而保证了机器人本体系统在笛卡儿空间的运动和定位精度。但是应该看到,从虚拟空间到手术空间的配准误差依然存在,光学测量系统的测量误差也难以避免,本文的方法仅有助于解决部分问题。

参考文献

- [1] Speich J E, Rosen J. Medical robotics. In: Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering. New York: Marcel Dekker Inc, 2004. 983-993
- [2] Kwok Y S, Reed I S, Chen J Y, et al. A new computerized tomographic-aided robotic stereotaxis system. *Robotics Age*, 1985, 7(6):17-22
- [3] Glauser D, Flury P, Villotte N, Burckhardt C W. Mechanical concept of the neurosurgical robot Minerva. *Robotica*, 1993, 11(5):567-575
- [4] 翟伟明,赵雁南,王家钦等. 机器人辅助无框架定位脑外科手术系统. 高技术通讯,2005,15(4):33-36
- [5] 王麟琨,徐德,谭民. 机器人视觉伺服研究进展. 机器人,2004,26(3):277-282
- [6] Craig J J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Third Edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2005
- [7] Galloway R L. The process and development of image-guided procedures. *Annu Rev Biomed Eng*, 2001, 3(1):83-108
- [8] 陈国栋,贾培发,王荣军. 光学定位脑外科机器人系统及其空间配准. 仪器仪表学报,2007,28(3):499-503

Visual servoing control for robot-assisted micro-invasive surgery systems based on optical positioning

Chen Guodong, Jia Peifa, Song Yixu

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

A visual servosystem based on optical positioning for robot-assisted micro-invasive surgery systems was developed to improve the tracking and positioning accuracy of the robotic systems in the absolute coordinates. Its visual servocontrol can be described as below. A high-precision devise for optical positioning is introduced and combined with the robotic systems to sense and feedback the pose of the robot end-effector in real time. A global closed-loop pose control is applied to the robotic systems in optical measuring space. This control scheme can correct the tracking and positioning errors effectively and achieve the high-accuracy of the robot systems. The system composition and working principles are analyzed. And based on this, a method of combining the pose error correction in Cartesian space and the speed control in joint space for robot trajectory tracking is presented. The effectiveness of the proposed method was verified by the simulation results.

Key words: surgery assistant robot, position and pose closed loop control, visual servo, optical positioning