

主从式外科手术机器人实时控制算法*

丁杰男¹ 王树新¹ 贞今天¹ 李群智¹ 韩宝平²

(1. 天津大学机械工程学院 天津 300072; 2. 天津医院显微手术科 天津 300211)

摘要: 针对机器人运动模型的非线性, 导致异构型主从式外科手术机器人系统控制算法需要大量的计算的问题。基于线性化的思想, 利用逆 Jacobian 矩阵将笛卡尔速度映射到关节速度, 并用关节瞬时速度代替微小时间段内位移, 线性化机器人运动学模型, 减小计算量, 满足机器人实现缝合打结等手术操作的实时性要求。通过增加反馈环节, 消除机器人在工作空间下线性化模型的误差累积, 提高系统整体大范围运动精度。关节空间内的样条插值方法, 有效改善机器人运动特性, 消除人手的抖动。本算法应用在“妙手”外科手术机器人系统上, 成功地对兔子腿部微细动脉进行血管吻合手术操作。

关键词: 外科机器人 遥操作 人手抖动 样条插值 轨迹规划

中图分类号: TP24

0 前言

外科手术机器人有效地结合了手术医生的经验和机器人定位精确、运行稳定和操作精度高的特性, 可以协助医生完成精细的手术动作, 减少手术中因为疲劳产生的误操作和手部的震颤造成的损伤, 从而提高手术质量与安全性, 缩短治疗时间, 降低医疗成本^[1]。早期的医疗机器人由于手术操作要求简单, 多采用主从同构方式^[2], 该方式控制简单易实现。但随着机器人与医疗事业的发展, 当今的医疗机器人不仅要完成更加复杂的动作, 而且还要具有方便、舒适的人机操作界面。近期的医疗机器人, 如已经获得美国 FDA 认证的 Da Vinci 系统、Zeus 系统^[3], 和日本东京大学通过互联网实现了 700 km 以外的 1 mm 血管吻合的显微外科手术机器人系统^[4]都采用异构模式。

医疗机器人在向异构方向发展的同时, 机器人控制方面遇到了较大的难题。异构型机器人的主从操作手之间需要在世界坐标系下建立映射关系, 因此要实现主从实时控制, 必须在短时间内完成主手运动学正解、从手运动学逆解和轨迹规划等计算。目前, 机器人的运动控制基本以 PAUL^[5]和 TAYLOR^[6]的方法为基础, 需要预知运动轨迹, 离线计算, 不能满足异构型医疗机器人实时控制的要求。此外, 人手的抖动也会影响主从操作的精细^[7]。根据美国 Stanford 和 Carnegie Mellon 大学的研究结果^[8], 人手抖动频率的有效运动范围在 7~17 Hz 内。

因此, 多数研究者通过滤波的方法来消除人手抖动。如 RIVIERE 等^[9]通过设计 WFLC 滤波器, 成功地将 69% 的抖动消除。然而, 上述方法由于受到传感器和滤波器本身精度的影响, 无法绝对消除人手抖动。

基于线性化思想, 利用逆 Jacobian 矩阵将机器人笛卡尔速度映射到关节速度, 再用关节瞬时速度代替微小时间段内的位移, 减少机器人运动学求解次数, 提高主从响应速度。采用基于关节空间的样条插值方法, 对机器人笛卡尔空间内的轨迹进行规划, 有效改善了机器人运动特性。在整个过程中, 人手的抖动作为噪声被成功消除。最后, 通过增加反馈环节, 可以消除机器人模型线性化的积累误差, 使其能够在较大范围内精确运动, 满足显微外科手术的精度要求。

1 显微外科手术机器人系统“妙手”

1.1 系统总体描述

“妙手”系统包括主操作手(左手和右手)、从操作手(左手和右手)、图像系统、控制系统、各种手术器械和其他辅助器械^[10]。该系统采用主从操作方式, 并且主从操作手结构为异构形式。主操作手采用美国 SensAble Technologies 公司的 PHANTOM Desktop^[11], 该装置具有三维力感觉功能。从操作手是针对显微外科手术的特点而设计高精度关节型机器人, 末端安装有六维力传感器, 可以检测从操作手与手术环境的力信息, 并反馈至主操作手, 从而使手术医生通过 PHANTOM Desktop 感受手术环境的三维力信息。图 1 所示为“妙手”系统照片。

1.2 机械系统

“妙手”系统从操作手的两个机械臂(左手和右

* 国家自然科学基金(50575162)、教育部博士点基金(20030056030)和教育部新世纪优秀人才支持计划(2005)资助项目。20050927 收到初稿, 20060523 收到修改稿

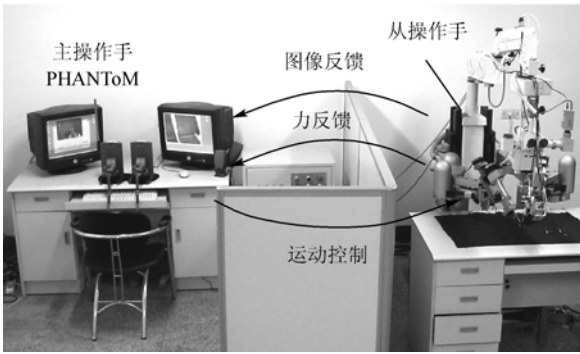


图 1 “妙手”系统照片

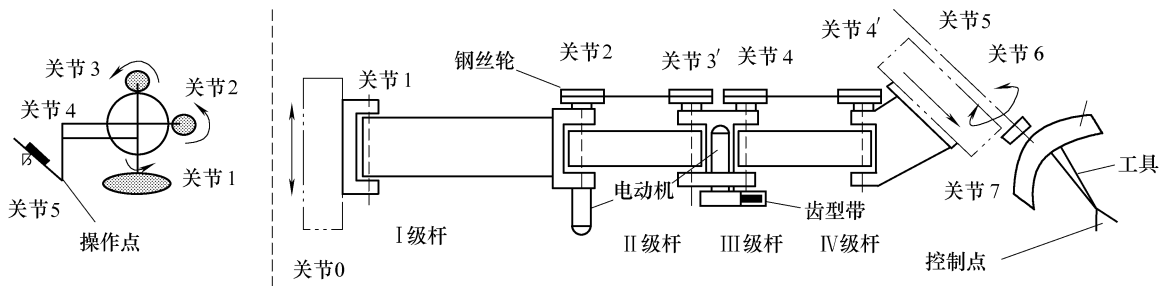


图 2 “妙手”右臂结构示意图

主操作手具有 6 自由度，关节 1、关节 2 和关节 3 组成位置机构，关节 4、关节 5 和关节 6 组成姿态机构，位置和姿态相互解耦。此外，末端手柄上有一个按钮开关，可控制开关量。

1.3 主从控制系统

“妙手”系统采用基于 PC 机的开放式控制系统结构，主手通过扩展并口(EPP)与计算机通信，从操作手的运动控制器，通过 PCI 总线与计算机通讯。从手的位置执行机构则由交流伺服电动机驱动实现，而末端姿态关节的驱动全部采用步进电动机。主从控制系统的结构如图 3 所示。

2 “异构”型手术机器人控制算法

首先，以 100 Hz 的频率分别对主从手码盘进行

手)，分别安装于医用显微手术放大镜立柱的两侧，与显微手术放大镜共同构成从手操作系统，图 2 所示为右臂结构示意图，具有粗调与精调机构。粗调部分具有 2 自由度，即垂直升降关节 0 和水平转动关节 1。精调部分具有 6 自由度，其中 3 自由度调整位置，即大臂回转关节 2、小臂回转关节 4 和斜导轨的直线副 6；另外 3 自由度调整姿态，即弧形导轨的自旋转 7、弧形导轨的圆弧运动 8 和手指工具的自旋转 9。系统手指具有开合动作自由度。从操作手末端工具的姿态采用三转动轴相交于一点设计。从操作手的位置和姿态相互解耦。

离散采样，通过主从操作手的数学模型计算出采样时刻各自位姿矩阵 T_{m6} 和 T_{s6} ，并在世界坐标系下建立映射关系。然后，计算相邻两个采样时刻之间的主手位姿变化 Δm ，并将微小时间段内的位姿变化量作为速度，通过从手逆雅各比矩阵求出其各关节的平均速度。利用样条函数对离散的关节平均速度进行插值，得到连续平稳的机器人运动轨迹。最后，将主从误差 e 作为反馈量，消除由线性化和初始化对应引起的误差。在控制算法过程中，人手的抖动作为噪声的一部分，也被有效消除。主从控制系统如图 3 所示。

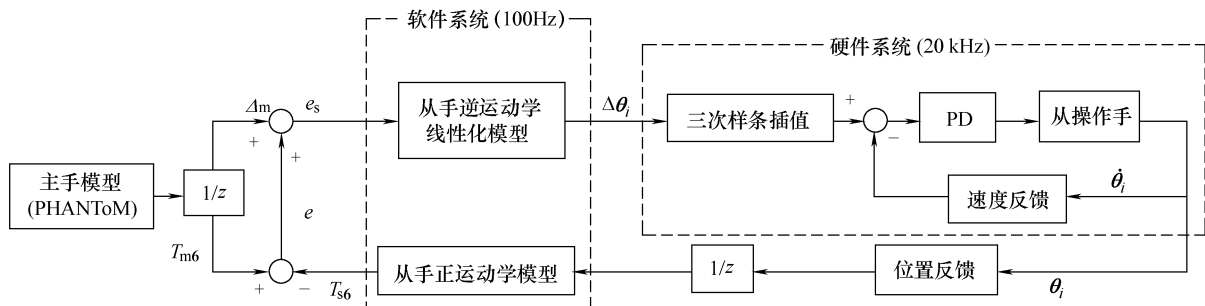


图 3 主从控制系统结构示意图

2.1 机器人模型线性化

异构型机器人主从操作手之间需要在世界坐

标系下建立映射关系。因此，担任控制任务的计算机必须在很短时间内完成主手运动学正解、从手运

动学逆解和从手运动轨迹规划等任务。“妙手”系统还需具有图像显示和力传感等功能。这些在现今计算机水平条件下，很难实现。为简化计算，以实现多任务实时控制的目的，基于线性化思想，对机器人非线性模型进行简化。其方法如下所述。

在定点附近将机器人模型泰勒展开

$$T(\theta + \Delta\theta) = T'(\theta)\Delta\theta + T''(\theta)\Delta\theta^2/2 + \dots + T^n(\theta)\Delta\theta^n/n! + \dots \quad (1)$$

式中 θ 为关节角度， $T(\theta)$ 表示机器人位姿矩阵。忽略高阶项，可以将非线性模型线性化为

$$T(\theta + \Delta\theta) = T(\theta) + J(\theta)\Delta\theta + e \quad (2)$$

式中 $J(\theta)$ 为雅可比矩阵， e 为高阶误差。

通过逆雅可比矩阵 $\dot{\theta} = J^{-1}(\dot{x})$ 得到机器人各个关节的瞬时速度，用该值代替小时间段内关节的位移量。此方法由于只对离散的轨迹点求逆，大大减少了运动学求解次数，从而减小了计算量。忽略高阶项而产生误差的表达式为

$$e = \|\Delta x - J(\theta)\Delta\theta\| \quad (3)$$

根据式(3)，对“妙手”机器人的误差进行测量。取工作空间内任一点为中心，其周围 2 mm×2 mm 的范围内计算线性化误差，其结果如图 4 所示。该结果表明线性化误差与运动距离成正比。

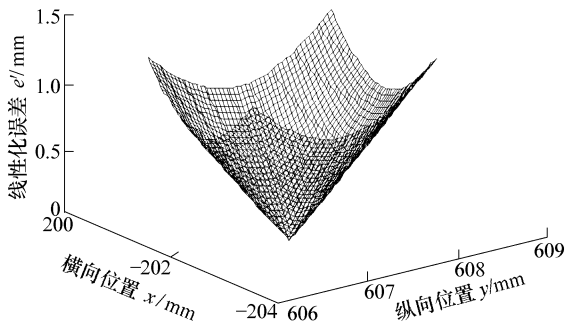


图4 Jacobian 在定点附近的线性化误差

由于存在线性化误差，机器人在工作空间大范围运动时会造成误差不断积累，从而难以实现精确的大范围整体运动。为了解决上述问题，首先应用插值方法改善关节空间运动，然后，通过增加反馈环节减少系统的累积误差。

2.2 关节空间轨迹规划

对于工业机器人的离线轨迹规划，PAUL 和 TAYLOR 分别提出了在笛卡尔路径规划和有限关节偏差规划方法。其中 TAYLOR 的算法通过控制关节轨迹中点笛卡儿误差，实现了机器人控制，该方法虽然比 PAUL 的方法减少了计算量，但没有考虑到机器人的运动特性，其关节运动轨迹的速度和加速度不连续，导致机器人运动不平稳。为了避免上

述问题，许多学者通过控制机器人速度和转矩的方法^[12-13]，改善了运动特性，但都需要进行大量的计算，因而无法实现实时控制。

“妙手”系统对第 2.1 节中由线性化得到的离散关节速度进行插值运算，得到连续平滑的关节轨迹。样条函数具有高阶导数连续^[14]，计算量小和易于实现等特点，被选作插补函数。其具体算法如下所述。

以“妙手”系统的一个关节运动为例，关节轨迹上离散点 $P_1(x_1, s_1)$, $P_2(x_2, s_2)$, ..., $P_n(x_n, s_n)$ ，设 P_k 和 P_{k+1} 是其中两个连续点，该段的样条函数 $s_k(x)$ 表示为

$$s_k(x) = A_k(x - x_k)^3 + B_k(x - x_k)^2 + C_k(x - x_k) + D_k \quad (4)$$

式中 $x_k \leq x \leq x_{k+1}$ ，对于整段函数 $s(x)$ 中有 $4(n-1)$ 个系数 A_k, B_k, C_k, D_k 未知，根据样条函数连续性

$$s_k(x_{k+1}) = s_{k+1} \quad (5)$$

$$\dot{s}_k(x_{k+1}) = \dot{s}_{k+1} \quad (6)$$

$$\ddot{s}_k(x_{k+1}) = \ddot{s}_{k+1} \quad (7)$$

选取自然样条函数进行插值，其初始条件为

$$\ddot{s}_1 = 0 \quad (8)$$

$$\ddot{s}_n = 0 \quad (9)$$

由式(5)~(9)，建立 $4(n-1)$ 个方程组便可以确定每段系数 A_k, B_k, C_k, D_k ，即得到样条函数 $s(x)$ 。

“妙手”系统利用高性能的 DSP 芯片，实现高速的插补计算。该方法在提高机器人运动的动力学特性的同时，也满足医疗机器人实时性操作的要求。

2.3 线性化积累误差的消除

由第 2 节中的试验结果可知，线性化误差的存在，使得机器人无法在大范围内精确运动。图 5 所示为迭代步骤中，运动的实际点和目标点的关系， p'_i 和 p_i 分别为第 i 步运动的目标位置矢量和实际位置矢量， e_i 为第 i 步的线性化误差，为了消除第 i 步误差， e_i 将作为反馈量控制量，在第 $i+1$ 步被消除。这样线性化误差无法积累，机器人便可在大范围内精确运动，其具体算法如下。

开始 $\Delta p_i = p'_{i+1} - p'_i + e_i$

$$\Delta\theta_i = J^{-1}(\Delta p_i)$$

$$\text{cubic}(\theta_i, \dot{\theta}_i, \theta_{i+1}, \dot{\theta}_{i+1}) = (\Delta\theta_{i1} \dots \Delta\theta_{ik} \dots)$$

如果 $\|\Delta\theta_{ik}\| \geq \varepsilon_v$ ，停止

否则 $\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta_i \quad p_{i+1} = T(\theta_{i+1})$

$$e_{i+1} = p'_{i+1} - p_{i+1}$$

返回开始

其中, Δp 为操作点的期望位置矢量值 p' 与当前迭代位置矢量 p 的差; $\Delta \theta_{ik}$ 为第 i 步迭代中关节任意时刻的插值速度, $\|\Delta \theta_{ik}\|$ 取最大数范数; ε_v 为关节最大速度。

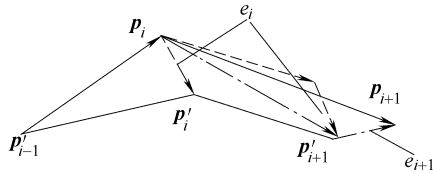


图5 运动实际点和目标点关系图

2.4 人手抖动的消除

主从操作控制工作模式下, 主操作手需要记录操作者的手部动作。由人的生理特征决定, 人手操作不可避免伴随抖动。如何有效分辨手部运动和手部生理造成的抖动, 如何消除人手抖动对系统操作的影响, 是主从操作控制时必须解决的问题。RIVIERE 等^[9]通过设计 WFLC(Weighted-frequency Fourier linear combiner)滤波器, 采用频域消抖的方法, 成功地将 69% 的抖动消除, 并将人手抖动的平均值从 91 μm 降到 60 μm 。但是在频域内消除抖动具有很大局限性。首先, 人手的抖动因人而异, 很难找到标准的阈值准确滤去所有人的抖动; 其次, 受到传感器和滤波器本身精度的影响, 绝对消除人手抖动是不可能的。

基于关节样条插值的主从算法, 首先利用主手对人手动作进行离散采样。然后, 经运动学变化得到从手离散的关节速度, 再通过样条函数插值出连续的关节速度, 实现了主手运动轨迹的复现。在整个过程中, 人手的抖动作为噪声被成功地消除。

3 试验研究

3.1 反馈环节消除积累误差试验

为了验证该方法的有效性, 用增加反馈和不增加反馈两种方法控制方法对“妙手”机器人进行了比较试验。图6为机器人沿 x 方向直线运动时误差结果, 从试验结果可见, 该方法成功地消除了线性化误差, 使其无法积累。这样机器人便可在大范围内精确运动, 完成打结缝合等手术操作。由于受到机器人传感技术的限制, 无法精确地测量机器人在工具坐标系下的误差。因此试验采用半闭环测量方式, 即将机器人关节码盘值作为反馈量。

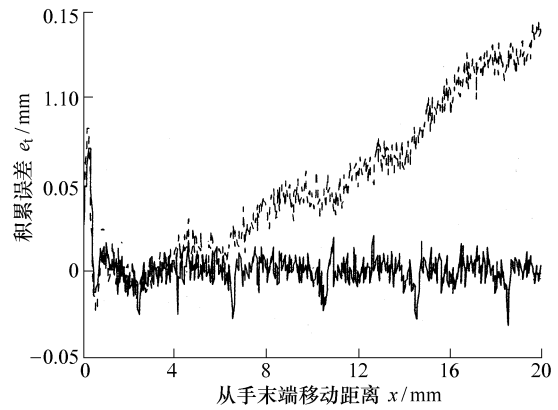


图6 机器人沿 x 方向直线运动时误差结果

3.2 消除人手抖动试验

记录医生打结时手的运动轨迹, 每隔 10 ms 进行一次运动学逆解, 以单关节 1 为例, 图7中虚线为直接求逆的结果, 实线为经过样条插值后结果。从图7中可见关节的运动特性被明显改善了。由插值后的关节轨迹, 经过从手正运动学计算, 即可得到机器人坐标系下的运行轨迹。

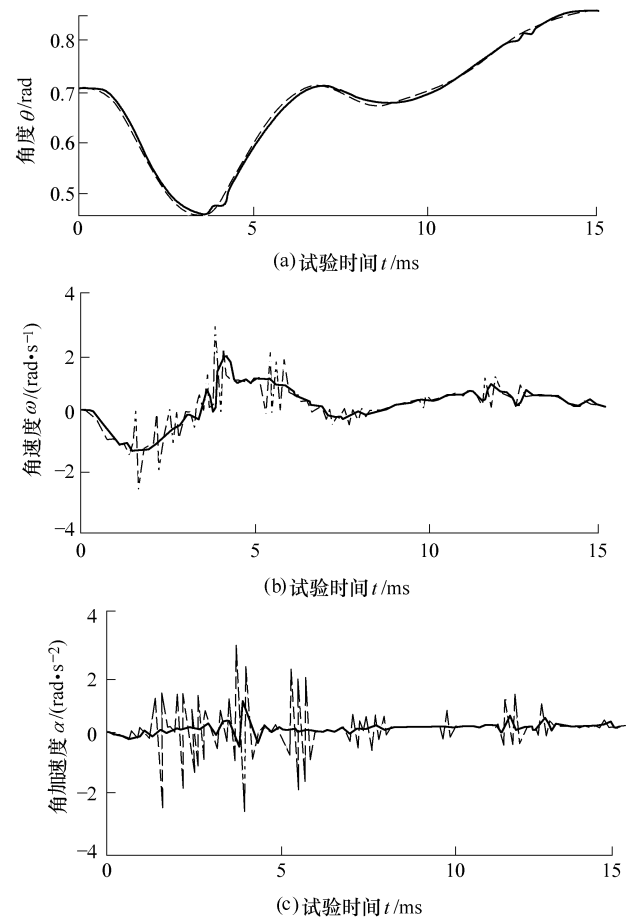


图7 消除人手抖动前后单关节轨迹

图8为机器人三个方向的消抖比较结果, 虚线表示为未经插值的轨迹, 实线为插值后的结果。可见人手的抖动被有效地消除了。

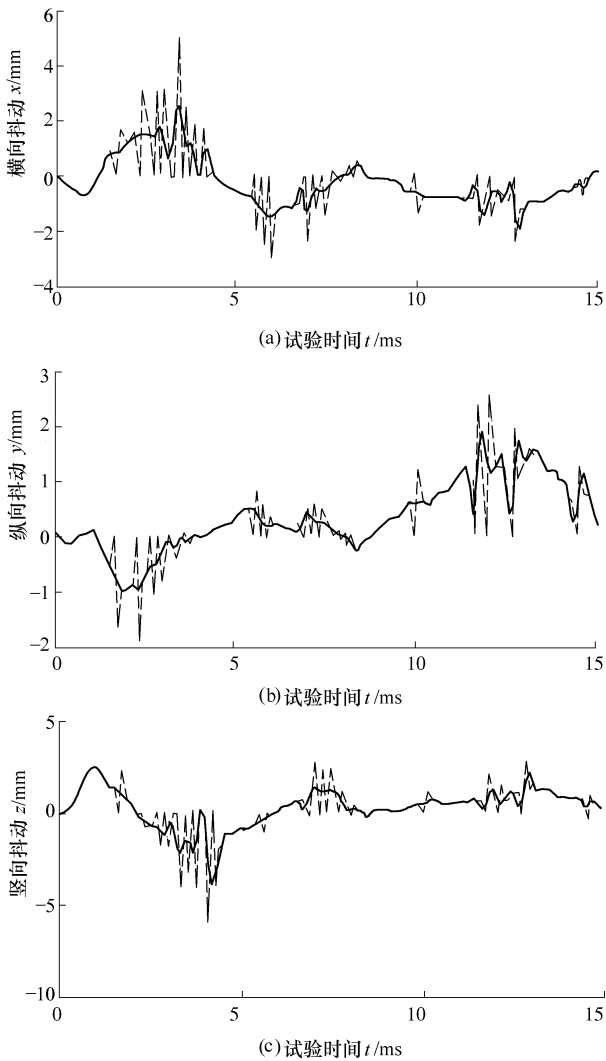


图8 机器人三个方向的消抖结果

该方法在消除抖动的同时, 仍能够保证精度。图9表示计算后的打结曲线与医生手部动作吻合情况。缝合运动轨迹的最大误差为0.39 mm(1:10的主从映射比例)。

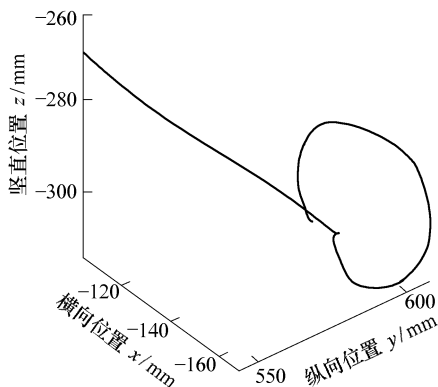


图9 缝合打结的空间轨迹

当然该方法在消除抖动方面具有局限性, 即人手在极低的速度下运动时, 抖动消除的效果会降低。但在显微外科手术中, 该种运动比较少, 并且多为不关键动作, 不会影响手术。

3.3 动物试验

应用“妙手”外科手术机器人系统, 对兔子腿部动脉1 mm血管进行了血管缝合试验。动物试验内容包括: 切开兔子表皮, 用剪刀将血管剪断, 血管外膜的剥离, 血管缝合6处, 每处打一个正结和一个反结, 整个手术共耗时40 min。图10为“妙手”缝合时的照片。

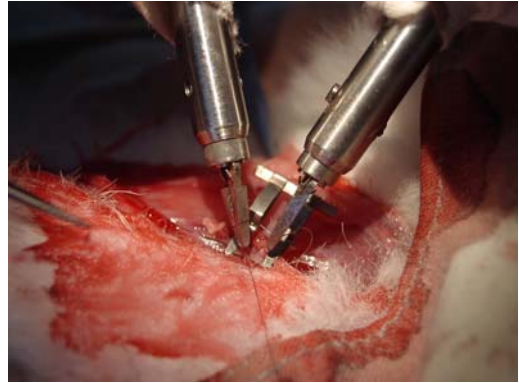


图10 血管缝合试验

4 结论

(1) 线性化模型简化了异构型主从操作系统的计算量, 反馈环节的増加, 消除了线形化带来的积累误差。

(2) 关节空间内插值的方法有效地消除了人手抖动, 缝合操作运动轨迹的最大误差小于0.4 mm(1:10的主从映射比例)。

将该算法应用在“妙手”系统, 成功地对兔子腿部微细动脉进行了血管吻合手术操作。

参 考 文 献

- [1] RUSSELL T, DAN S. Medical robotics in computer-integrated surgery[J]. IEEE Transactions on Robotic and Automation, 2003, 19(5): 765-781.
- [2] HARI D, HAYA Z, JASON J. Evaluation of a telerobotic system to surgeons in microsurgery[J]. Computer Aided Surgery, 1999, 4(1): 15-25.
- [3] MISUSHI M, LIZUKA Y, WATANABE H, et al. Remote operation of a micro-surgical system[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotic and Automation, May 16-20, 1998, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium. New Jersey: IEEE, 1998: 1 013-1 019.
- [4] Intuitive Surgical Inc. Intuitive surgical[EB/OL]. [2005-5-10] <http://www.intuitivesurgical.com>.
- [5] RICHARD P. Modelling trajectory calculation, and ser-

- voing of a computer controlled arm[D]. Stanford: Artificial Intelligence Laboratory, 1972.
- [6] RUSSELL T. Planning and execution of straight line manipulator trajectories[J]. IBM J. Res. Develop., 1979, 23(3): 424-436.
- [7] JUAN G, EDWIN A, KENNETH E, et al. Optimal digital filtering for tremor suppression[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2000, 47(5): 664-673.
- [8] SINGHY S, RIVIERE C. Physiological tremor amplitude during retinal microsurgery[C]//Proceedings of IEEE Bioengineering Conference, April 20-21, 2002, Drexel University, Philadelphia, PA. New Jersey: IEEE, 2002: 171-172.
- [9] ANG W T, PRADEEP P K, RIVIERE C N. Active tremor compensation in microsurgery[C]//Proceedings of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, May 12-1, 2004, San Francisco, California. New Jersey: IEEE 2004: 2 738-2 741.
- [10] WANG Shuxin, DING Jienan, YUN Jintian, et al. A robotic system with force feedback for micro-surgery[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, April 18-22, 2005, Technical University of Catalonia Barcelona, Spain. New Jersey: IEEE, 2005: 200-205.
- [11] THOMAS H, KENNETH S. Force reflecting haptic interface: US, 6,405,158B1[P]. 2002-6-11.
- [12] BAZAZ S, TONDU B. 3-Cubic spline for on-line Cartesian space trajectory planning of an industrial manipulator[C]//Proceedings of Advanced Motion Control, June 29-July 1, 1998, Coimbra University, Coimbra, Postal. New Jersey: IEEE, 1998: 493-498.
- [13] LIN C, HYONGSUK K. Manipulator control with torque interpolation systems[C]//Proceedings of IEEE Man. and Cybernetics, May 12-16, 1990, University of Southern California Los Angeles, California. New Jersey: IEEE, 1990: 624-626.
- [14] ANGELES J. Fundamentals of robotic mechanical systems theory methods and algorithms[M]. Germany: Springer Verlag, 2002.

REALTIME CONTROL ALGORITHM FOR TELEOPERATED SURGERY ROBOT

*DING Jienan¹ WANG Shuxin¹ YUN Jintian¹
LI Qunzhi¹ HAN Baoping²*

*(1. School of Mechanical Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072;*

*2. Department of Microsurgery, Tianjin Hospital,
Tianjin 300211)*

Abstract: As a result of isomery between master and slave, teleoperated surgical robot must process enormous calculation. Based on linearize ideology, a novel algorithm which can satisfy the surgical operation that requires quick response, high precise and safety is presented. At first, the velocity in cartesian frame is mapped to the velocity in joint frame through the inverse Jacobian matrix, and then makes the instant velocity instead of the distance of the joint. Therefore the calculation is simplified to satisfy the realtime requirement of surgery. As a feedback signal, error between master and slave is applied to eliminate error generated by approximate linear kinematics. Cubic interaction in joint space is used to eliminate surgeon's tremor and control the robot safely and smoothly. Based on the algorithm, MicroHand system accomplishes the vas suturing experiment for a rabbit's leg micro artery.

Key words: Surgical robot Teleoperation Hand tremor
Cubic interaction Trajectory plan

作者简介: 丁杰男, 男, 1980 年出生, 博士研究生。主要研究方向为医疗机器人。

E-mail: dingjienan_tju@yahoo.com.cn