

# 基于误差标定的医疗机器人视觉跟踪方法研究\*

朱晓明 席文明

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 影像在疾病诊断和手术计划中占有重要地位, 随着机器人技术的发展以及微创手术的广泛采用, 影像与机器人构成一体, 形成计算机集成外科手术系统。影像不仅是疾病诊断的重要工具, 它也对手术机器人进行定位、引导, 对手术器械进行跟踪和控制。由于视觉和机器人具有各自的坐标系统, 它们之间存在误差, 当在视觉空间控制机器人运动时, 该误差会映射到机器人的轨迹上。在前期手术计划、机器人视觉控制、自动显微操作的研究成果基础上, 研究计算机集成外科中的手术机器人轨迹精确控制问题。采用机器人在视觉空间的运动误差对视觉系统和机器人系统间的坐标系误差进行标定, 从而精确控制机器人的轨迹。误差标定方法只需要让机器人走三个点就可以完成系统坐标标定。在实验中, 利用视觉系统控制机器人运动, 模仿微创手术中对机器人末端器械的导引, 结果表明, 采用递归标定方法可以将机器人的轨迹误差控制在 2 个像素范围内。

**关键词:** 医疗机器人; 视觉跟踪; 误差标定

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4801(2011)03-002-04

随着影像技术、计算机图形学技术、虚拟现实技术、机器人技术的发展, 在外科手术中出现了一种新的手术模式——计算机集成外科手术系统。不同于传统的手术模式, 计算机集成外科手术过程为: 手术前利用影像(包括核磁共振成像、CT 成像、X 射线成像、超声成像), 借助于计算机图形学技术, 在计算机中构造手术区域的三维虚拟模型, 在该模型上完成外科手术计划。在手术过程中, 借助于实时视觉系统对虚拟模型上产生的手术计划进行修正, 对机器人末端的手术器械进行引导并完成手术, 最后, 利用影像技术评估手术结果。计算机集成外科概念提出者, 霍普金斯大学的 R. H. Taylor 教授认为<sup>[1]</sup>: 在未来 20 年计算机集成外科对医学的影响, 就像过去 20 年计算机集成制造对制造业的影响一样。

在计算机集成外科中, 影像和视觉不仅用于诊断、计划, 也用于机器人的定位、引导和控制。在内窥镜手术中, 内窥镜支撑机器人必须控制内窥镜实时跟踪手术器械或者内窥镜对手术机器人进行视觉控制<sup>[2-4]</sup>。在放射性粒子植入中, 需要利用超声图像或核磁共振图像对植入针进行精确控制, 从而将粒子正确植入肿瘤, 最大限度杀死癌细胞<sup>[5-6]</sup>。在脊椎和骨置换手术中, 需要将销钉精确打入脊椎, 利用视觉控制人工关节的打磨, 使得人工关节的尺寸与置换关节的尺寸一

致<sup>[7-8]</sup>。

当前, 在视觉控制中, 普遍采用基于图像的视觉跟踪方法<sup>[9-10]</sup>, 该方法利用特征点与目标点的距离差驱动机器人运动, 通过在每个采样周期中对机器人运动方向的调整, 消除机器人与视觉系统坐标间的误差, 该方法图像处理量大, 系统实时性差, 机器人轨迹精度取决于视觉系统的采样频率, 上述特点使得该跟踪方法并不适用于对医疗机器人的控制。

本文发展一种误差标定方法<sup>[11]</sup>, 该方法通过建立误差矩阵方程, 然后利用视觉系统的闭环特性求取该矩阵, 从而将系统各部分的位置误差调整到误差矩阵中。整个标定过程由软件自动完成, 简单快捷。在该标定方法的基础上, 可利用基于位置的视觉跟踪方法对机器人进行控制, 使系统获得更好的实时性和精度, 满足医疗机器人对图像处理的速度要求。

## 1 误差标定概念

将视觉系统安装在工作台上, 机器人末端处于视觉系统视场内, 当在视觉空间控制机器人运动时, 机器人末端工具上特征与目标间形成偏差, 该偏差是由视觉和机器人坐标系不平行造成的, 见图 1 所示, 利用该偏差可以将两坐标系调整到平行。

\*基金项目: 国家自然科学基金资助(50875222); 福建省自然科学基金资助(2009J01265)。

作者简介: 朱晓明(1986-), 男, 硕士研究生。主要研究方向为智能工业机器人, 机器人力觉控制, 微操作与微装配。

假设视觉空间中的特征与目标存在误差，由图 1 可得到它们之间的映射关系

$$X' = JU \quad (1)$$

式中： $X' = X - \Delta X$  为机器人在自身空间走的距离  $U$  在视觉空间的映射； $X$  是特征与目标不存在误差时映射的距离； $\Delta X$  是视觉空间中特征与目标存在误差时映射产生的偏差； $J$  为机器人到视觉空间的坐标系映射矩阵。式中  $X'$ 、 $U$ 、 $X$ 、 $\Delta X$ 、为  $3 \times 1$  列向量， $J$  为  $3 \times 3$  矩阵。

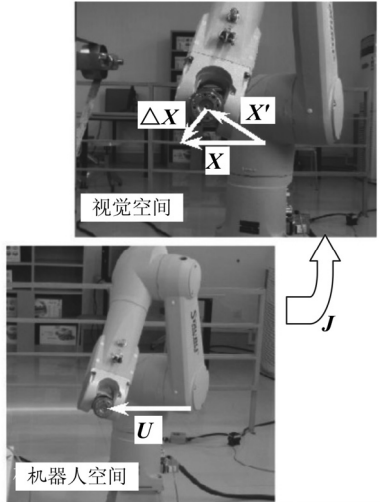


图 1 误差标定概念

为了消除特征与目标误差，在式 (1) 中设置误差矩阵

$$X = J(I + W_0)U \quad (2)$$

其中， $W_0$  为  $3 \times 3$  误差矩阵。

用 (2) — (1)

$$\Delta X = JW_0U \quad (3)$$

$$\Delta X = \tilde{U}^T \tilde{W}_0 \quad (4)$$

式中：

$$\tilde{W}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{w}_{11} & \tilde{w}_{12} & \tilde{w}_{13} & \tilde{w}_{21} & \tilde{w}_{22} & \tilde{w}_{23} & \tilde{w}_{31} & \tilde{w}_{32} & \tilde{w}_{33} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\tilde{U} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_2 & u_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

其中， $\tilde{W}_0$  是将  $3 \times 3$  的  $JW_0$  矩阵拉直为  $9 \times 1$  向量。

机器人在空间走三个点，根据机器人运动距离与机器人在图像空间的运动距离误差，就可以求出误差矩阵。

## 2 系统的递归标定

视觉系统坐标与机器人坐标间存在误差，精确的映射矩阵  $J$  很难得到，由于  $J$  的不精确，使得一次标定并不能完全消除误差，即方程 (2) 中的  $X$  并不与理想值重合，重写 (2) 式

$$X' = J(I + W_0)U \quad (8)$$

式中： $X' = X - \Delta X$ 。

同样，为了消除误差，在式 (8) 中设置误差矩阵

$$X = J(I + W_0 + W_1)U \quad (9)$$

用 (9) — (8)

$$\Delta X = JW_1U \quad (10)$$

用求  $W_0$  的方法可以容易求出  $W_1$ 。

利用特征在图像上的走偏量递归求取误差矩阵，总可以将机器人的走偏量向一个最小值逼近，该最小值与机器人的精度有关。当走偏量开始在一个值附近振荡时，停止标定。

完成系统标定后，就可以写出视觉系统控制机器人运动的方程，该方程可以控制机器人完成点到点的运动

$$X_{k+1} = X_k + tJW(U_k / t) \quad (11)$$

式中： $W = I + W_0 + W_1 + \dots + W_n$ ， $t$  为采样时间， $k$  为采样序列点，令  $V_k = U_k / t$ ， $J_V = JW$

$$X_{k+1} = X_k + tJ_V V_k \quad (12)$$

为了进一步减小机器人跟踪误差，建立以下的能量函数

$$E_{k+1} = (X_{k+1} - X_k)^T W_e (X_{k+1} - X_k) + V_k^T W_{in} V_k \quad (13)$$

式中： $W_e$  为微小误差调整矩阵，通过该矩阵可以将机器人跟踪误差进一步减小； $W_{in}$  是控制输入的权重矩阵。求 (13) 式最小值可以得到机器人的控制方程

$$V_k = (tJ_V^T W_e tJ_V + W_{in})^{-1} tJ_V^T W_e \cdot (X_{k+1} - X_k) \quad (14)$$

根据摄像机成像模型，当视觉系统与机器人间不存在误差时，即视觉系统与机器人坐标系重

合时

$$J = \begin{bmatrix} \frac{f}{zd_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{zd_y} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

从前面的递归标定可以看出,每求一次误差矩阵,实际上就是对(15)式 $J$ 的一次校正。

### 3 机器人姿态变化对标定的影响

机器人为六个自由度,其位置和姿态是解耦的,可以将位置与姿态变化对特征的影响分开进行计算,即首先认为姿态是不变化的,如果姿态发生了变化,则将姿态变化后的特征点转换到标定时坐标中,然后利用前面介绍的方法对特征点运动进行控制。

假设标定时机器人的末端姿态关节角为 $\theta_4$ 、 $\theta_5$ 、 $\theta_6$ ,姿态变化后的末端姿态关节角为 $\theta_4+\Delta\theta_4$ 、 $\theta_5+\Delta\theta_5$ 、 $\theta_6+\Delta\theta_6$ ,则将变化后的视觉系统坐标中的点变换成标定时视觉系统坐标中的点的矩阵关系为

$$X = R_x R_y R_z X'' \quad (16)$$

式中: $X''$ 是姿态变化后的坐标系, $X$ 是标定时姿态的坐标系

$$\text{令 } R = R_x R_y R_z, \quad X = RX'' \quad (17)$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\Delta\theta_4 & -s\Delta\theta_4 \\ 0 & s\Delta\theta_4 & c\Delta\theta_4 \end{bmatrix}$$

$$\text{其中: } R_y = \begin{bmatrix} c\Delta\theta_5 & 0 & s\Delta\theta_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\Delta\theta_5 & 0 & c\Delta\theta_5 \end{bmatrix}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} c\Delta\theta_6 & -s\Delta\theta_6 & 0 \\ s\Delta\theta_6 & c\Delta\theta_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由(9)式得

$$RX'' = JWU \quad (18)$$

$$X'' = R^T JWU \quad (19)$$

令 $J_v = R^T JW$ ,由(14)式得

$$V_k = (tJ_v^T W_e tJ_v + W_{in})^{-1} tJ_v^T W_e \bullet (X''_{k+1} - X''_k) \quad (20)$$

### 4 实验结果

实验系统由工业机器人(Staubli 90XT),视觉系统(UI-1540-M)和控制计算机组成,具体见图2所示。实验目标是利用视觉系统引导工业机器人运动到确定位置,本实验是将机器人末端中心引导到计算机屏幕上鼠标位置,模仿微创手术中视觉对机器人末端器械的引导。



图2 实验系统

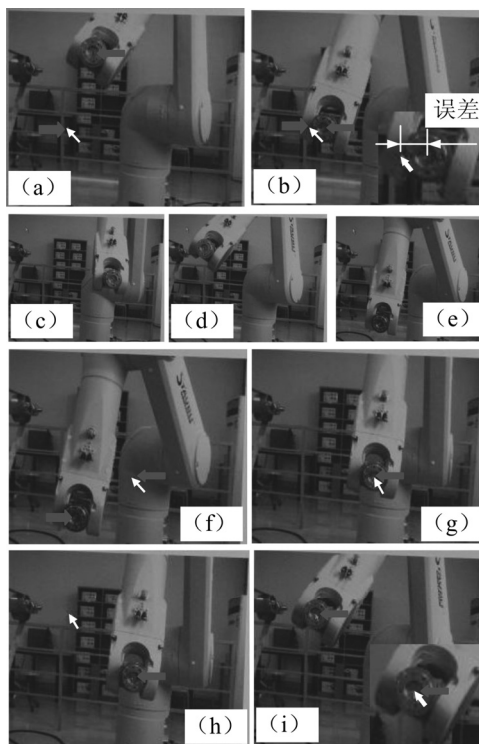


图3 实验结果

图3是实验结果,当系统未标定时,机器人末端中心和目标间存在误差,目标为图像中的白色箭头(见图3(b)所示),让机器人运动三个点(见图3(c)-图3(e)),对系统进行标定,标定后,

系统的运动误差有效减小(见图3(f)-图3(i))。

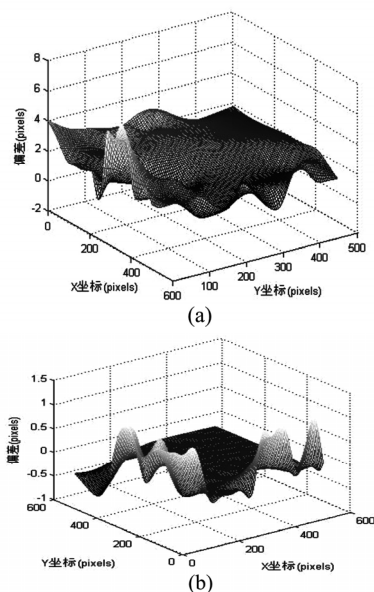


图4 一次标定与递归标定误差比较

图4是系统一次标定和递归标定误差比较,从图4(a)可以看出,一次标定时,误差被有效抑制,最大误差为5个像素。从图4(b)可以看出,递归标定后,全局最大误差为2个像素。

## 5 结论

本文针对医疗机器人中的快速、精确视觉引导,发展一种误差标定方法,该方法可以对视觉系统与机器人系统进行精确标定,从而可以利用基于位置的视觉跟踪方法对特征点进行运动控制,避免了现有基于图像的视觉跟踪方法对图像的大量处理,为医疗机器人高实时性视觉导引建立技术基础。实验结果表明,利用误差矩阵进行一次系统标定,可以将特征点的跟踪误差限制在5个像素范围内,而递归标定后,特征跟踪的最大误差在2个像素范围内。

### 参考文献:

- [1] R. H. Taylor, ect. Medical Robotics in Computer-Integrated Surgery. IEEE Transactions on Robotics and Automation, VOL.19, NO.5, October 2003, 765-781.
- [2] A. Krupa, ect. Autonomous 3-D Positioning of Surgical Instruments in Robotized Laparoscopic Surgery using Visual Servoing. IEEE Transactions on Robotics and Automation, VOL.19, NO.5, October 2003, 843-853.
- [3] F. Bourger, ect. A Model-free Vision-based Robot Control for Minimally Invasive Surgery using ESM Tracking and Pixels Color Selection. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Roma, Italy, 10-14 April 2007. 3579-3584.
- [4] M. J. H. Lum, ect. Optimization of a Spherical Mechanism for a Minimally Invasive Surgical Robot: Theoretical and Experimental Approaches. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, VOL. 53, NO.7, July 2006, 1440-1445.
- [5] A. Patriciu, ect. Automatic Brachytherapy Seed Placement Under MRI Guidance. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, VOL.54, NO.8, August 2007, 1499-1506.
- [6] Zhouping Wei, ect. Dynamic Intraoperative Prostate Brachytherapy Using 3D TRUS Guidance with Robot Assistance. Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27<sup>th</sup> Annual Conference Shanghai, China, September 1-4, 2005, 7429-7432.
- [7] Jongwon Lee, ect. Human-Guided Surgical Robot System for Spinal Fusion Surgery: CoRASS. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, May 19-23,2008, 3881-3887.
- [8] M. Shoham, ect. Bone-Mounted Miniature Robot for Surgical Procedures: Concept and Clinical Applications. IEEE Transactions on Robotics and Automation, VOL.19, NO.5, October 2003, 803-901.
- [9] Hui Xie, ect. A Flexible Microassembly System for Automated Fabrication of MEMS Sensors. IEEE 2006.
- [10] B. Tamadazte, ect. Automatic Micromanipulation using Multiscale Visual Servoing. 4<sup>th</sup> IEEE Conference on Automation Science and Engineering Key Bridge Marriott, Washington DC, USA, August 23-26,2008.
- [11] Xi, Wenming, Zhong Hui, Guo Aquan. A Error Matrix Calculation for Bio-Manipulation System Self-Calibration. 1st annual IEEE International Conference on Nano/Molecular Medicine & Engineering. August 6~9, 2007, Macau, China.