微创外科机器人灵活工作空间分析

刘 达 王田苗

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083)

摘 要：微创手术给外科机器人提出了较高的灵活性要求，但是机器人很难具有完全灵活的工作空间. 首先提出象限分割的方法，即把手术工作空间分割为 8 个象限，确定微创外科机器人所需灵活工作空间只需要为手术工作空间的 1/8. 然后，给出微创外科机器人灵活工作空间与工作空间之间的解析关系，从而确定机器人的运动学参数. 在此基础上，对自行设计的微创外科机器人结构进行了运动学参数优化设计. 这种方法有效降低了微创外科机器人的灵活性要求，解决了机器人结构尺寸与灵活性之间的矛盾.

关 键 词：微创外科机器人；灵活性；灵活工作空间；微创手术

中图分类号：TP 24

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)02-0188-04

Dexterous workspace analysis of surgical robot

Liu Da Wang Tianmiao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Although it is difficult for surgical robot to have full dexterous workspace, surgical robot must have high dexterity orienting to minimally invasive surgery. Firstly, according to the practical requirement of surgery, quadrant segmentation principle was proposed. The surgical workspace was divided into 8 quadrants, so the dexterous workspace occupied only eighth workspace. And then, the analysis relation was derived between dexterous workspace and workspace of surgical robot. The workspace area of surgical robot could be obtained from the analysis relation, and then the kinematics parameters of surgical robot could be confirmed. Finally, kinematics parameters of the self-defined surgical robot were optimized. Therefore, this principle decreases the demand on dexterity of surgical robot and resolves the conflict between structure and dexterity of robot.

Key words: surgical robot; dexterity; dexterous workspace; minimally invasive surgery

随着信息和自动化技术的迅速发展，机器人在外科手术中越来越发挥出巨大的作用. 微创外科机器人能够自主地将手术工具按医生所规划好的路径送达病灶位置. 因此不仅要求机器人末端能够在一定连续的空间范围内工作，而且关心其能否在该空间内的全部位置上实现给定范围内的姿态变化，以便医生能够按手术需要的最佳姿态进行路径规划. 也就是说，微创外科机器人必须具有完全灵活的工作空间[1-2].

然而，机器人很难具有完全灵活的工作空间[3]. 首先，机器人手腕的各个关节由于结构限制，不能同时具有 360°的运动范围，因此末端工具无法实现空间全方位的姿态. 其次，灵活工作空间由机器人工作空间和手术工具长度共同决定，微创手术使用的工具普遍较长，要使机器人具有完全灵活的工作空间，必须加大机器人的工作空间，这就需要加大机器人的结构尺寸[4]. 机器人结构尺寸的增加不仅会提高其机械加工的难度，而且会降低其精度. 同时，机器人结构尺寸和运动空间过大都会降低其在手术过程中使用的安全性.

收稿日期：2006-03-27

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60525314)；国际科技合作计划资助项目(2006DFA1229)；教育部留学归国基金资助项目

作者简介：刘 达(1972－)，男，北京人，讲师，drliuda@buaa.edu.cn.

因此,有必要分析微创手术对微创外科机器人灵活性的特殊要求,并在此基础上,确定微创外科机器人灵活工作空间和工作空间之间的关系.

1　微创手术对机器人灵活性的要求

微创外科机器人的末端工具可以表示为空间矢量,机器人灵活性完全取决于末端工具在工作空间中任意一点的姿态取向的多少.姿态取向越多,则灵活性越高.因此,可以采用末端工具姿态球表示机器人灵活性.

若将末端工具的基准点取作腕点(P_w),则在任一个 $P_{w,i}$ 处,末端工具矢量 $\boldsymbol{L}$ 的集合都形成部分球体或整个球体.该球体的半径为矢量 $\boldsymbol{L}$ 的范数 L,称作末端工具姿态球,如图 1 所示.该集合越接近整个球体,末端工具就越灵活.如果用 2 个互相垂直的过球心的剖面将末端工具姿态球剖开,可以得到 2 个扇面,2 个扇面角 α 和 β 的大小就表示了末端工具的灵活性能.

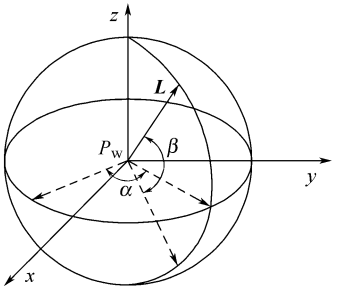


图 1　末端工具姿态球

微创手术是医生借助于各种图像设备将手术工具经过小切口送入患者体内病变位置.医生规划手术路径,就是确定切口位置,使手术工具以合理的姿态到达病灶.医生选择手术路径时遵循以下原则[5]:

保证安全:手术路径应避免碰到重要的组织和血管;

路径最短:手术路径尽量选择切口到病灶位置距离最短;

工具垂直:手术工具垂直于切口.

按照以上原则,可以采取象限分割法,即把病灶可能存在的区域(手术工作空间)分为 8 个象限,如图 2 所示(为方便分析,设手术工作空间是一个边长为 a 的正方体,则每一个象限的边长为 $a/2$).当病灶位置在某一象限时,根据手术路径的选取原则,机器人末端工具姿态球的扇面角 α 和 β 的变化范围将会缩小.例如病灶 T 位于象限Ⅰ的任意位置,在 Oxz 平面内,医生可选择的 β 变化范围由[0,2π]缩小为[0,π/2];在 Oxy 平面内,可选择的 α 的变化范围由[0,2π]缩小为[0,π/2],如图 3 所示.同样,当病灶 T 在其它 7 个象限中的任意位置时,α 和 β 的变化范围也都缩小为[0,π/2],末端工具姿态球是半径为 L 的 1/8 球.

由于医生在手术前就可以通过医学图像判断病灶位于手术最大工作空间的哪一个象限,随后手术工具末端只可能在此象限内运动,因此确定微创外科机器人所需灵活工作空间的大小只需要为手术最大工作空间体积的 1/8,末端工具姿态球的扇面角变化范围只需要为[0,π/2].

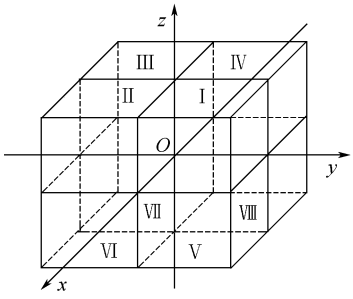
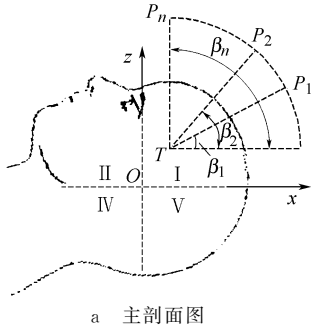
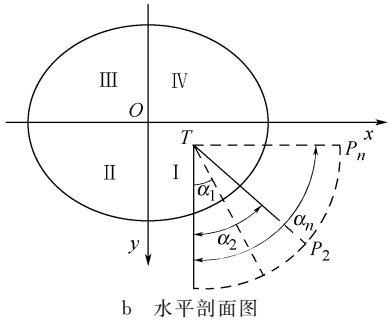


图 2　手术工作空间象限划分



a　主剖面图



b　水平剖面图

图 3　手术工具在一个象限内的姿态变化范围

2　微创外科机器人灵活工作空间

在明确了微创手术对微创外科机器人灵活性的要求后,需要进一步分析微创外科机器人灵活工作空间与工作空间之间的关系,然后确定机器人的运动学参数.

首先对单个点进行分析，假设病灶位于象限Ⅰ，α 和 β 的变化范围都为$[0,\pi/2]$. 根据机器人的腕部结构可知，其末端工具和机器人末端关节所在的平面参见图 4，点 $P_t(x_t,y_t,z_t)$代表工具头部，点 $P_r(x_r,y_r,z_r)$代表工具尾部，点 $P_w(x_w,y_w,z_w)$为机器人腕点，矢量 $\boldsymbol{L}$ 为末端工具的任一可达姿态，Z_4 为机器人末端关节轴线. 此时，机器人腕点 P_w 的位置如图 4 所示，点 P_w 到点 P_r 的距离为 a_5，向量$\overrightarrow{P_wP_r}$平行于水平面且垂直于矢量 $\boldsymbol{L}$. 因此，在象限Ⅰ，点 P_w 的坐标表达式为

$$\left.\begin{aligned} x_w &= x_t+\sqrt{a_5^2+L^2\cos^2\beta}\cos\left(\alpha\pm\arctan\frac{a_5}{L\cos\beta}\right)\\ y_w &= y_t+\sqrt{a_5^2+L^2\cos^2\beta}\sin\left(\alpha\pm\arctan\frac{a_5}{L\cos\beta}\right)\\ z_w &= z_t+L\sin\beta \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

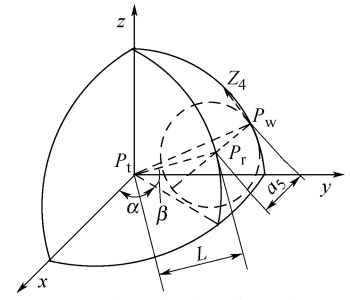


图 4 工具姿态与腕点位置关系

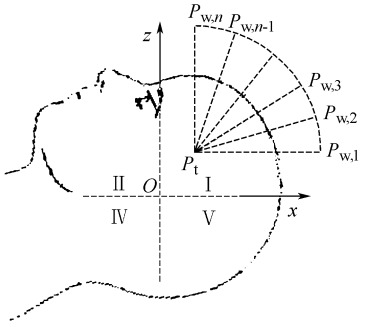
点 P_w 在主剖面和水平剖面的包络线如图 5 所示，可以得到点 P_w 坐标的最大值和最小值：

$$\left.\begin{aligned} x_{w,max} &= x_t+\sqrt{L^2+a_5^2}\\ x_{w,min} &= x_t-a_5\\ y_{w,max} &= y_t+\sqrt{L^2+a_5^2}\\ y_{w,min} &= y_t-a_5\\ z_{w,max} &= z_t+L\\ z_{w,min} &= z_t \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

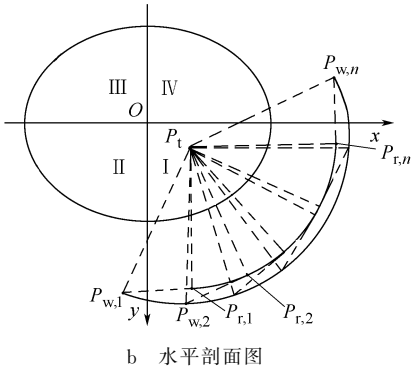
当 P_t点在灵活工作空间内任意变化时，机器人腕点 P_w 的最大活动范围即为工作空间. 其在主剖面和水平剖面的包络线如图 6 所示，P_w 的坐标变化范围分别是

$$\left.\begin{aligned} x_{w,max} &= \frac{a}{2}+\sqrt{L^2+a_5^2}\\ x_{w,min} &= -a_5\\ y_{w,max} &= \frac{a}{2}+\sqrt{L^2+a_5^2}\\ y_{w,min} &= -a_5\\ z_{w,max} &= \frac{a}{2}+L\\ z_{w,min} &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中，$a/2$ 为机器人灵活工作空间的边长；L 为手术工具的长度；a_5 为轴向偏距. 式(3)代表了在机器人末端工具姿态球的扇面角在$[0,\pi/2]$变化范围内，微创手术所要求的灵活空间与微创外科机器人的工作空间之间的位置关系. 通过这个关系可以求得微创外科机器人工作空间的范围，然后确定机器人的运动学参数.

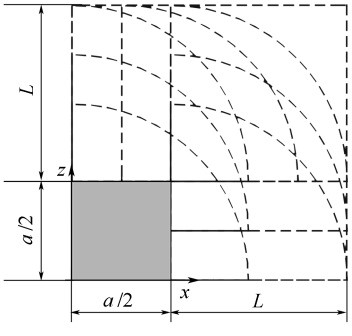


a 主剖面图

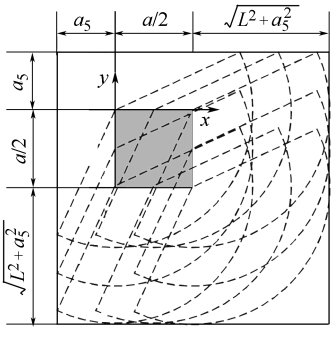


b 水平剖面图

图 5 实现所有手术姿态的腕点包络线



a 主剖面图



b 水平剖面图

图 6 实现灵活工作空间的腕点包络线

3　设计实例

根据微创外科机器人灵活工作空间的分析,作者设计了一种适用于立体定向手术的微创外科机器人.机器人的前 3 个自由度采用了 SCARA 结构,主要完成空间定位.第 1 个自由度为移动关节,限制了机器人在竖直方向的运动范围;第 2 个和第 3 个自由度都为转动关节,它们限定了整个机器人在水平面内的运动范围.构成机器人手腕的后 3 个自由度均为转动关节,实现空间的任意姿态.根据手术灵活性的要求,对机器人的灵活空间进行综合.根据立体定向手术要求,确定机器人灵活工作空间为边长 100 mm 的正方体,手术工具的长度为 150 mm,轴向偏距根据机器人机构要求为 80 mm,将数据带入式(3),得到机器人工作空间为 350 mm×350 mm×270 mm 的立方体.为方便手术操作,将范围增大,最终确定机器人工作空间为 700 mm×350 mm×270 mm 的立方体.

灵活空间分析的目标是在结构限制的前提下($\theta_3 \in [-150°,-60°] \cup [60°,150°]$),让机器人手臂末端达到工作空间(700 mm × 350 mm × 270 mm),同时手臂的尺寸最小.由于机器人的第 1 关节为移动副,d_1 的运动与其它关节独立,因此优化的变量是手臂的基座位置(m,n)和手臂尺寸(a_2,a_3),如图 7 所示.

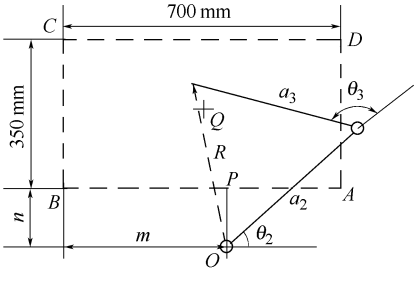


图 7　手臂尺寸的优化

对于给定的基座位置和尺寸变量,当手臂末端达到最远点(点 C 或点 D)时,有

$$|R(\theta_3=60°)| \geqslant \max(|OC|,|OD|)$$

进一步得到

$$a_2^2+a_3^2+a_2a_3 \geqslant \max[m^2+(n+300)^2,(700-m)^2+(n+300)^2] \quad (4)$$

当手臂末端达到最近点(点 P)时,有

$$|R(\theta_3=150°)| \leqslant |OP|$$

进一步得到

$$a_2^2+a_3^2-\sqrt{3}a_2a_3 \leqslant |AP| \quad (5)$$

式(4)和式(5)保证了手臂在最佳灵巧范围内可以到达手术操作空间的任意一点.需要优化的目标函数是手臂的整体尺寸(a_2+a_3)最小,实现这个目的的方法是机器人的基座位置 A 到手术操作空间中心点 Q 的距离最小,因此目标函数为

$$\min\ f(a,b)=(m-350)^2+(n-175)^2 \quad (6)$$

在式(4)和式(5)的约束下,机器人手臂的优化结果为 $a_2=a_3=300$ mm,$m=350$ mm,$n=155.3$ mm.

4　结 束 语

微创手术对于微创外科机器人具有较高的灵活性要求,为此本文提出象限分割的原则,在满足手术任务的前提下缩小微创外科机器人灵活性要求,解决了机器人结构尺寸与灵活性之间的矛盾.在这个原则基础上,应用解析法给出了微创外科机器人灵活工作空间与工作空间之间的关系.根据以上结论,对自行设计的微创外科机器人结构进行了运动学参数优化设计.

参考文献(References)

[1] Liu Da, Wang T M. Study on robot-assisted minimally invasive neurosugery and its clinical application[C]//Anna Sant. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul:Piscataway,2001:2008－2013

[2] Mark M, Ranjan M. A dexterous manipulator for minimally invasive surgery[C]//Schultz A. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Detroit: Michigan,1999:2057－2064

[3] 刘达. 微创外科机器人若干关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2003
Liu Da. Research on the key technologies of minimally invasive surgical robot[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

[4] Duffy J, Crane C. A displacement analysis of the general spatial link 7R mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory,1980,15(3):153－169

[5] 田增民. 现代立体定向神经外科学[M]. 北京:中国科技出版社, 1997
Tian Zengmin. Modern stereotactic neurosurgery[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 1997(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)