CT导航混联医疗机器人灵活性研究

贠 超 唐 粲

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：总结了目前医疗机器人灵活性的分析方法，基于服务球的数值法，对5R串联机器人和4H并联机器人进行了灵活度计算，得到了各自的任务灵活度.针对9-DOF冗余度串并混联医疗机器人运动学的复杂性以及难以获得逆解的解析解的状况，给出了串联部分、并联部分的位移流形，推导了混联机器人的位移流形.提出了混联机器人的灵活性分析方法，即基于位移流形(黎曼流形)的方法，并定义了混联机器人灵活度的通用解析表达式.基于黎曼曲面外接椭球面的面积计算，得到混联机器人的灵活度超过了CT导航手术所需的灵活度，满足手术要求，为微创外科混联机器人灵活性分析和度量提供了新的参考.

关 键 词：灵活性；微创外科；混联机器人；位移流形；拓扑结构

中图分类号：TP 242.3

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)07-0857-04

Topological structure optimization of medical hybrid robot based on dexterity

Yun Chao Tang Can

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The current methods for dexterity analysis of medical robot were summarized. With numerical approach based on service sphere, dexterity calculation for 5R serial robot and for 4H parallel robot was implemented, and each task dexterity was obtained. Because of kinematics' complexity of hybrid redundant 9-DOF robot, and also because of being difficult to gain analytic solution of inverse kinematics, the displacement manifold for serial robot and displacement manifold for parallel robot were provided. At the same time, the displacement manifold for hybrid robot was deduced. In terms of above investigation, the dexterity analysis method was put forward, namely method based on Riemann manifold. The general analytic expression of hybrid robot dexterity was defined. On the base of area calculation for circumscribed ellipsoid surface of Riemann surface, a conclusion that hybrid robot dexterity is much greater than the dexterity needed for CT-guided surgery was drew. A novel idea for analysis and measurement of dexterity which is an important performance for hybrid robot in minimally invasive surgery was provided.

Key words: dexterity; minimally invasive surgery; hybrid robot; displacement manifold; topological structure

在CT导航手术[1]中引入机器人的目的是：提高手术穿刺定位精度；减少手术时间消耗；提高手术可视化程度，方便医生手术规划；避免“X”射线对医生和患者的辐射伤害等.灵活度[2]作为医疗机器人的重要指标，反映了机器人末端操作器可能获得的姿态的多少.分析机器人灵活性是为了指导机器人拓扑结构设计和方便手术规划，使医疗机器人尽可能拥有较大的灵活工作空间[3].目前使用灵活性分析的传统数值方法和解析方法的前提是获得机器人运动学的解析解，或者求解机器人雅克比矩阵.此类方法只适用于简单的串联机器人或并联机器人.而对于拓扑结构复杂的

收稿日期：2007-07-04

基金项目：科技部国际科技合作项目(2006DFA12290)

作者简介：贠 超(1952—)，男，陕西三原人，教授，cyun18@sina.com.

机器人，如冗余度[4]串并混联机器人，由于逆解非常复杂，也难以得到逆解的解析表达和机器人雅克比矩阵.因此上述方法不适合混联机器人的灵活性分析.基于以上考虑，提出了基于黎曼流形[5]的医疗机器人灵活性分析方法，给出了灵活度的解析表达.通过求解黎曼曲面的外接椭球的表面积，得到了混联机器人的灵活度.临床模拟实验验证该机器人灵活性满足手术要求.

1 医疗机器人灵活性分析方法

在CT导航微创外科手术中，手术机器人操作空间狭小，CT导航手术要求机器人空间姿态尽可能多，故需要灵活性分析.目前研究方法如下.

基于服务球和等值线的数值法.服务球方法是经典方法，也是目前常用方法.等值线方法[6]用等灵活度曲线来寻找该工作空间中灵活性最好的截面，得到等灵活度曲线.

解析法.构造机器人最小奇异值、条件数、可操作性3种常用的局部灵活度评价指标[7]，得到机器人的局部灵活度与其结构尺寸间的解析关系，为机器人性能指标的评价及其尺度综合提供了一种较好的依据.

LMI(线性矩阵不等式)方法[8].文献[9]提出了利用全局灵巧性指标设计机器人.文献[10]使用了所有设计指标的加权价值函数.文献[11]给出了如何用LMI表达无奇异的条件，该方法也必须求机器人雅克比矩阵.

2 串联机构和并联机构的灵活性

根据CT手术环境，取工作空间 x:[−400,0]，y:[−200,0]，z:[−300,0]，并规定姿态灵活度(即姿态取向数量占整个球面姿态的比例)大于60%的点为灵活点[12].各关节转角范围均为[$-5\pi/6,5\pi/6$].将长度 $l=280$ mm 的穿刺针固定到端点 A.串联机器人拓扑结构如图1所示.

根据逆解的解析式(从略)，采用服务球方法求解.取 $d_1=40$ mm，$a_2=250$ mm，$a_3=110$ mm，$d_4=100$ mm，$a_5=50$ mm.在工作空间内取样本点(−230，−180，−100)，以该点为球心、l 为半径球面上按一定角度取900个样本点，对应穿刺针不同姿态.Matlab编程求得姿态灵活度为62.3%，遍历工作空间所有离散点，得到任务灵活度为68.6%.

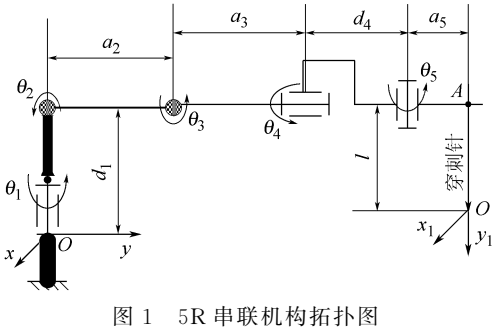


图1 5R串联机构拓扑图

并联机构工作时，由4个螺旋副(即4H结构)驱动上下平面中间的球铰在各自的平面内运动，从而实现动平台(穿刺针)的二维移动和空间的三维转动.

由图2可得运动学逆解的解析式(从略).根据手术需要，取 $h=80$ mm，(x_1,y_1,x_2,y_2) 的所有行程为0～80 mm.Matlab计算得到姿态灵活度为33.8%，任务灵活度为68.9%.

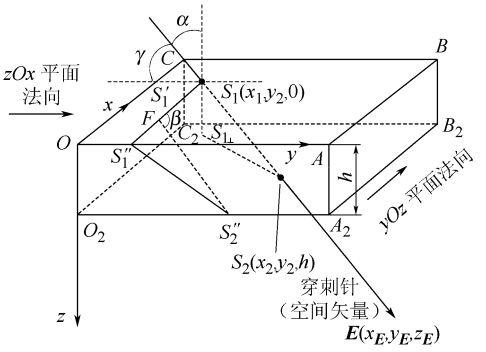


图2 并联机器人运动学分析图

3 混联机器人灵活性分析

3.1 混联机器人结构

混联机器人的拓扑结构如图3所示.它由5DOF串联机构和4DOF并联机构组成.末端操作器穿过圆柱副 C_1 和 C_2 的中心，其位姿由 C_1 和 C_2 的空间位置确定.θ 为关节转角，H 为螺旋副，S 为球面副.

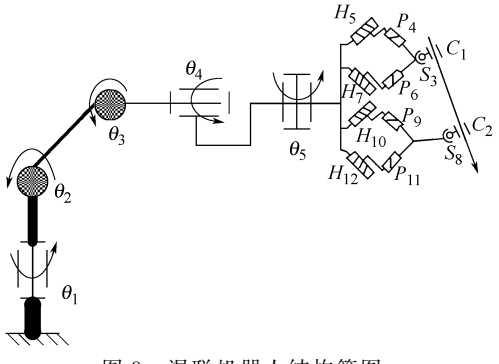


图3 混联机器人结构简图

3.2 黎曼流形和黎曼度量

机器人操作器上任意一点的运动构成一个黎

曼流形,形成黎曼曲面.设 M 为 m 维微分流形,如果在 M 上存在一个(0,2)阶对称正定的 C^k 张量场 $\boldsymbol{g}_x$(光滑函数),使对点 $x\in M$,切空间 $T_x(M)$可看作具有度量的欧氏向量空间,则$(M,\boldsymbol{g})$称为 m 维黎曼流形,$\boldsymbol{g}$ 称为 M 的黎曼度量.

现代微分几何中的几何曲面属于二维黎曼流形,它是 $\boldsymbol{R}^3$ 中的曲面 $S(u,v)/\rightarrow(x(u,v),\ y(u,v),\ z(y,x))\in\boldsymbol{R}^3$,其诱导度量 $\mathrm{d}s^2=E\mathrm{d}u^2+2F\mathrm{d}u\mathrm{d}v+G\mathrm{d}v^2$ 是一个二维黎曼流形$(S,\boldsymbol{g})$,其中,$g=E\mathrm{d}u\otimes\mathrm{d}u+2F\mathrm{d}u\otimes\mathrm{d}v+G\mathrm{d}v\otimes\mathrm{d}v$.定义不同的黎曼度量,就会得到代表不同几何意义的黎曼几何曲面,如面积、能量、弧长等.

3.3　混联机器人的位移流形

串联机器人末端操作器的位移集合是各关节位移的并集,而并联机器人动平台位移集合是各支链末端位移集合的交集.5R 串联机构的位移流形如下:

$$\{M_{\mathrm{serial}}\}=\{R(N_1),\boldsymbol{u}\}\cdot\{R(N_1,\boldsymbol{v})\}\cdot\{R(N_2,\boldsymbol{v})\}\cdot\{R(N_2,\boldsymbol{w}_1)\}\cdot\{R(N_3,\boldsymbol{w}_2)\}\tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{u}$,$\boldsymbol{v}$,$\boldsymbol{w}$ 为与各关节轴线重合的单位矢量[13];R 为转动副.并联机构第 1 支链的位移流形为$\{M_1\}=\{H(N_4,\boldsymbol{u},p)\}\cdot\{H(N_5,\boldsymbol{u},p)\}$,类似地,第 2 支链的位移流形为$\{M_2\}=\{H(N_6,\boldsymbol{u},p)\}\cdot\{H(N_7,\boldsymbol{u},p)\}$,则并联机构的位移流形为$\{M_{\mathrm{para}}\}=\{M_1\}\bigcap\{M_2\}$.从而得到串并混联机器人的位移流形为

$$\{M_{\mathrm{hybrid}}\}=\{M_{\mathrm{serial}}\}\bigcup\{M_{\mathrm{para}}\}\tag{2}$$

如图 3 所示,从机器人串联部分 θ_1 所在的转动副到并联平台任意一个圆柱副,均为串联拓扑结构,它们的位移流形分别为

$$\left.\begin{aligned}\{M_{\mathrm{root}}\}&=\{M_{\mathrm{serial}}\}\cdot\{H(N_4,\boldsymbol{u},p)\}\cdot\{H(N_5,\boldsymbol{u},p)\}\\\{M_{\mathrm{tip}}\}&=\{M_{\mathrm{serial}}\}\cdot\{H(N_6,\boldsymbol{u},p)\}\cdot\{H(N_7,\boldsymbol{u},p)\}\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

机器人姿态由并联平台上圆柱副 C_1 和 C_2 的中心点位置确定,其位移流形(黎曼流形)决定了穿刺针姿态范围,即决定了混联机器人灵活度.

3.4　混联机器人的灵活性

将位移流形[14]理论引入机器人灵活性分析当中,计算操作器末端某点形成的黎曼流形或黎曼超曲面的面积来求解机器人的灵活度.

在机器人工作空间内,设末端穿刺针上与 C_1 和 C_2 中心重合的点能够形成的黎曼曲面的面积分别为 S_1 和 S_2,连接动平台的铰链构成的多边形内切圆半径为 R_{int},定义混联机器人灵活度:

$$D_{\mathrm{hybrid}}=(S_2/(S_1+S_2))\cdot[1+2(\arctan(R_{\mathrm{int}}/2h))/\pi]\tag{4}$$

式中,$S_i=\iint\sqrt{E_i\mathrm{d}u_i^2+2F_i\mathrm{d}u_i\mathrm{d}v_i+G_i\mathrm{d}v_i^2}\,\mathrm{d}u\mathrm{d}v$,$i=1,2$;$[1+2(\arctan(R_{\mathrm{int}}/2h))/\pi]$ 是考虑了并联部分对提高整个混联机器人灵活性的贡献.

S_1 和 S_2 均由 7 个变量决定,故均为超曲面.介于该曲面的复杂性,对两超曲面分别做外接椭球,将求超曲面的面积转化为求外接椭球表面积.C_1 和 C_2 中心位置方程均可通过正解获得,求外接椭球的表面积实际上就是求位置方程的极值.

因对位置方程 7 个变量求偏导数建立的 7 个方程组成的方程组求解复杂,故通过 Matlab 数值求解.正解得到 C_1 和 C_2 点空间坐标方程为

$$\left.\begin{aligned}x_{C_i}&=f(a_2,a_3,a_5,d_4,\Delta x_{C_i},\Delta y_{C_i},\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5)\\y_{C_i}&=f(a_2,a_3,a_5,d_4,\Delta x_{C_i},\Delta y_{C_i},\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5)\\z_{C_i}&=f(a_2,a_3,a_5,d_4,d_1,\Delta x_{C_i},\Delta y_{C_i},\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5)\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

篇幅所限,上述方程具体表达式从略.式中,$i=1,2$;$\theta_1\sim\theta_5$ 为关节变量;Δx_{C_i},Δy_{C_i} 表示并联平台圆柱副 C_i 中心沿坐标系 x 轴和 y 轴的位移(变量);其余为机器人 D-H 参数(常量).

对前面提供的 D-H 参数中的关节角度变化取离散点,根据式(5)计算空间坐标的最大值:

$$\left.\begin{aligned}a_1&=\max(x_{C_1})=543\ \mathrm{mm}=b_1\\a_2&=\max(x_{C_2})=598\ \mathrm{mm}=b_2\\c_1&=\max(z_{C_1})=530\ \mathrm{mm}\\c_2&=\max(z_{C_2})=610\ \mathrm{mm}\end{aligned}\right\}\tag{6}$$

椭球面积由公式 $S(a,b,c)=2\pi\sqrt{t_1+t_2}$ 计算,其中,$t_1=a^2b^2+b^2c^2+c^2a^2$,$t_2=(a^2bc+ab^2c+abc^2)/3$.将式(6)代入得到 $S_1=3.6462\times10^6\ (\mathrm{mm}^2)$,$S_2=4.5540\times10^6\ (\mathrm{mm}^2)$.

内切圆半径 R_{int} 实际上是并联平台关节行程的一半,即取 40 mm.则混联机器人的灵活度为

$$D_{\mathrm{hybrid}}=(4.554/(4.554+3.6462))\cdot(1+2\arctan(40/80/2)/\pi)=0.833=83.3\%\tag{7}$$

4　混联机器人临床实验

本课题组与北京某医院腹胸外科肿瘤治疗中心合作,开展氩氦刀 CT 导航微创外科机器人手术.由于最多需要 4 把刀完成手术[1],无机器人参与的手术定位时间一般超过了 1 h.

图 4 是 CT 导航微创外科机器人手术的临床模拟现场.医生在导航规划软件上选择好穿刺路径和靶点,机器人自动完成空间的位姿定位,而且手术过程只需一次调整机器人的姿态,表明该混

联机器人有较好的灵活性.与无机器人引入的普通手术相比,手术规划和穿刺的时间(平均20 min)缩短为原来的1/3.



图4 CT导航混联机器人临床模拟试验

5 结 论

1) 提出了基于位移流形(黎曼流形)的混联机器人灵活性分析方法,同时定义了混联医疗机器人的灵活度.该方法只需知道机器人末端操作器上与运动副中心重合的两点在空间形成的黎曼超曲面的面积即可求解混联机器人灵活度.

2) 介于冗余度混联机器人黎曼超曲面面积求解的复杂性,提出基于黎曼超曲面的外接椭球面面积的简化方法,并根据混联机器人的结构参数,求得其灵活度为83.3%.实际CT导航手术需要的灵活度为60%,因此满足要求.

3) 混联的灵活度并非二者的简单线性叠加,同时验证了并联机构加入串联拓扑结构以后,混联的灵活性显著提高.

参考文献(References)

[1] 王洪武,段蕴铀,张燕群,等. CT引导下经皮穿刺氩氦靶向治疗肺癌的临床应用[J].海军总医院学报,2004,17(1):8-15
Wang Hongwu, Duan Yunyou, Zhang Yanqun, et al. Percutaneous lung cancer cryotherapy guided by computer tomography[J]. The Transaction of Naval General Hospital,2004,17(1):8-15(in Chinese)

[2] 黄田,汪劲松. Stewart并联机器人局部灵活度与其各向同性条件解析[J].机械工程学报,1999,35(5):41-45
Huang Tian, Wang Jinsong. Closed form solution to the local dexterity and isotropy of Stewart parallet manipulators[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,1999,35(5):41-45(in Chinese)

[3] Sakakibara Y. Foot trajectory for a quadruped walking machine[C]//IEEE International workshop on Intelligent Robots and Systems. Ibaraki:IEEE,1990:315-322

[4] 徐礼钜,高翔.冗余自由度变几何桁架机器人的轨迹规划[J].四川联合大学学报(工程科学版),1999,3(5):129-133
Xu Liju, Gao Xiang. The path planning of variable geometry truss manipulators with redundant degree of freedom[J]. Journal of Sichuan Union University (Engineering Science Edition),1999,3(5):129-133(in Chinese)

[5] 陆启韶.现代数学基础[M].北京:北京航空航天大学出版社,2001:168-171
Lu Qishao. Modern math foundation[M]. Beijing:Beijng University of Aeronautics and Astronautics Press, 2001:168-171(in Chinese)

[6] 刘巍,张玉茹.脑外科机器人灵活度分析和设计[J].机械设计和研究,2006,22(4):39-45
Liu Wei, Zhang Yuru. Dexterity analysis and design of robot for neurosurgery[J]. Machine Design and Research,2006,22(4):39-45(in Chinese)

[7] Trejos A L, Patel R V. Port placement for endoscopic cardiac surgery based on robot dexterity optimization[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona:IEEE,2005:912-917

[8] 丛爽,马翔,张耀新. LMI在并联机构的奇异性、灵巧度及刚度分析与设计中的应用[J].机械设计,2005,22(12):10-18
Cong Shuang, Ma Xiang, Zhang Yaoxin. Application of LMI in the analysis and design of singularity, dexterity and rigidity of parallel mechanism[J]. Journal of Machine Design,2005,22(12):10-18(in Chinese)

[9] Gosselin C, Angeles J. A global performance index for the kinematics optimization of robotic manipulators[J]. ASME Journal of Mechanical Design,1991,113:220-226

[10] Merlet J P. Redundant parallel manipulators [J]. Journal of Laboratory Robotics and Automation,1996,8:17-24

[11] Stamper R E, Tsai L W, Walsh G C. Optimization of a three dof translational platform for well-conditioned workspace[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ:IEEE,1997:3250-3255

[12] 王洪武.现代肿瘤靶向治疗技术[M].北京:中国医药科技出版社, 2005:77-123
Wang Hongwu. Modern targeted therapy technique for tumors[M]. Beijing:China Press of Medicine Sci & Tech, 2005:77-123 (in Chinese)

[13] 李秦川. 对称少自由度并联机器人型综合理论及新机型综合[D].秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2003
Li Qinchuan. Type synthesis theory of lower-mobility parallel mechanisms and synthesis of new architectures[D]. Qinhuangdao:School of Mechanical Engineering, Yanshan University,2003(in Chinese)

[14] 沈辉.并联机器人的几何分析理论和控制方法研究[D].长沙:国防科学技术大学控制科学与工程系,2003
Shen Hui. Geometric analysis theory and control methods for parallel robots[D]. Changsha: Department of Control Science and Engineering, National University of Defense and Technology, 2003(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)