

基于拓扑模型的打结操作规划^①王 哲^② 杨 洋 康天瑞

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘 要 通过分析线结的形成过程,提出了一种针对机器人进行缝线打结的操作规划方法。首先,建立缝线的拓扑学模型,将线结的状态描述为一系列交叉点的有序排列,然后,定义四种基本操作模式以及操作器对缝线的抓持点及移动方向,从而通过实现四种基本操作模式来得到缝线从最初状态到目标线结所有可能的转换序列,进而,以抓持点数目最小、状态转换路径最短及抓持点变化次数最少为原则,从初始状态到目标状态的所有操作序列中选择最优的操作方法。以一个外科手术单结的操作规划为例,说明这种规划方法的可行性。

关键词 打结, 操作, 拓扑模型, 规划方法

0 引 言

打结是手术的基本技术之一,手术打结操作是否正确、打结的熟练程度高低将直接关系到手术的质量和伤口的愈合效果。而外科医生的手工灵巧程度影响了手术的打结质量,手的颤抖、疲劳以及缺乏肌肉运动知觉反馈也会影响手术效果。而机器人定位精确,运行稳定,操作精度高,能很好地克服这一缺点,可以完成更精细的打结动作^[1]。但由于缝线本身的非线性变形特征,在运用机器人进行缝合打结时,缝线的形状难以控制,因此研究机器人缝合打结规律对于提高机器人的打结精度和效率以及加快机器人的临床应用进程具有重要意义^[2]。目前对外科手术机器人打结的研究主要集中于对机器人本体及其控制系统的改进^[3]。本文通过分析线结的形成过程进行缝线的打结规划。首先,建立缝线的拓扑学模型,将线结的状态描述为一系列交叉点的有序排列,并通过四种基本操作模式实现这些交叉点状态之间的转换。然后,定义了操作器对缝线的抓持点及移动方向,并以抓持点数目最小、状态转换路径最短及抓持点变化次数最少为原则,从初始状态到目标状态的所有操作路径中,选择最佳的操作路径。在此基础上,提出了打结作业的规划方法。最后,以一个外科手术单结的操作规划为例,说明这种规划方法的可行性。

1 线结的拓扑建模

实际的打结操作是在三维空间内进行的,为了研究方便,将三维空间内的缝线投影到二维平面中,如图 1 所示。为了研究线结的形成过程,下面运用拓扑学对给定的线结进行描述。在图 1 中,用 E_l 表示缝线的左端点, E_r 表示缝线的右端点,规定缝线为有向线 $E_l - E_r$ 。同时,用 C_i 表示第 i 个交叉点,这样一个线结就可以描述为一系列交叉点的有序排列。为了便于区别,将交叉点分为两种。在交叉点的重叠处,当位于上方的线段从位于下方的线段的前进方向的左侧通过,此时形成的交叉点定义为 C^+ , 由于可以通过右手定则判断,也称为右手螺旋交叉点,反之称为左手螺旋交叉点 C^- 。这样,图 1 所示线结的交叉点状态可以表示为: $E_l - C_1^+ - C_2^- - C_3^+ - C_4^+ - C_5^- - C_1^- - C_2^- - C_5^- - C_4^+ - C_3^+ - E_r$ 。

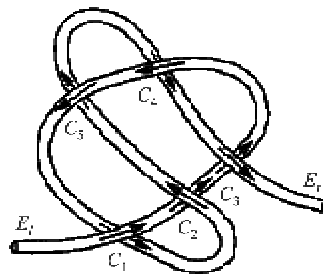


图 1 有向线结

① 国家自然科学基金(50675008)资助项目。

② 男,1984 年生,硕士;研究方向:机器人技术;联系人,E-mail: jlj3478@sina.com
(收稿日期:2009-07-08)

2 缝线的操作规划

线结实际上是通过改变一系列交叉点的状态而得到。通过对各种线结数目或者交点排列状态进行分析可以归纳出四种基本操作,如图2所示。图中,操作1、操作2、操作3是通过改变交叉点的个数来形成不同的缝线状态,而操作4则是通过改变交叉点的排列。在此基础上,定义增加交叉点数目的操作为 CO ,减少交叉点数目的操作为 RO ,改变交叉点排列的操作为 AO 。这样,通过这四种基本操作的组合就可以实现复杂交叉点状态间的转换。

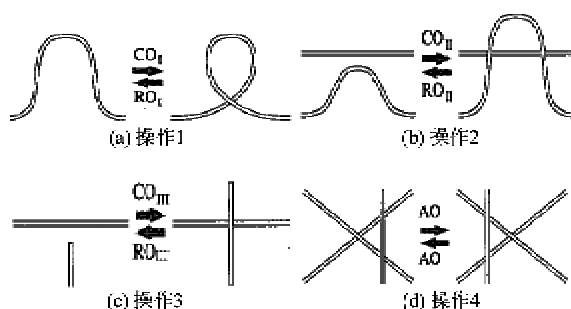


图2 四种基本操作模式

当用机械手进行缝线操作时,实现上面描述的操作还需要确定操作器的抓持点及抓持后的移动方向^[4]。这里假设操作器对缝线的操作是通过抓持交叉点两侧的线元素而实现的。根据以上的四种操作模式,归纳出了图3所示的17种抓持模式。为了便于表示,抓持点的位置由图中的圆圈表示,其中 $\otimes$ 、 $\odot$ 、 $\circ$ 分别代表操作器从前侧抓持、后侧抓持和从任意侧抓持。

在抓持点确定之后,需要操作器抓持操作点沿一定的方向进行移动来改变缝线的状态。根据线结形成特点,把这些移动归纳为图4所示的四种形式,即:(1)平行于中轴的移动;(2)垂直于中轴的移动;(3)绕中轴转动;(4)绕与中轴相垂直方向的转动。线结的形成正是通过选择合适的抓持点和移动形式来实现的。

这样,通过确定操作器的抓持点和移动方向,便可以实现上面介绍的四种基本操作。例如,对图2(a)中的操作1的 RO_I 过程,可以选择图3(a)中的两种抓持模式。而对于第一种抓持模式,操作器可选择图4(b)中绕中轴转动来实现基本操作1;对于第二种抓持模式,操作器可选图4(c)中垂直于中轴移动来实现。另外3种基本操作分析方法类似。

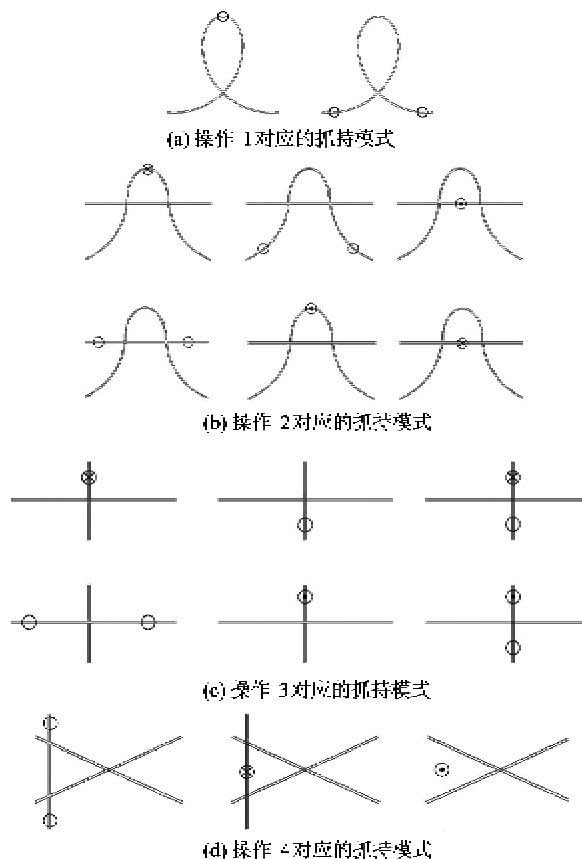


图3 实现四种基本操作的抓持模式

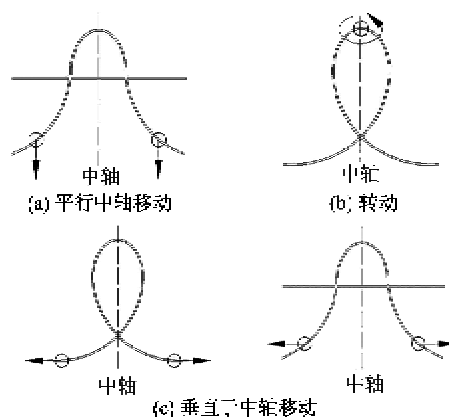


图4 操作器的移动方向

3 路径的分解与选择

为了进行路径选择,首先需要对线结的初始状态和目标状态进行分析。下面,以解开此结为例来说明路径选择的方法。

目标状态的达成需要一系列的中间操作来实现。为此,首先作如下规定:

(1) 操作缝线时,缝线上至少有一点固定,且固定点用一个方框表示。如果采用两个操作器进行,

其中一个用于固定,另一个操作器进行缝线操作。

(2) 操作器只从投影平面的正面接近缝线。

(3) 操作器不能移动固定点以及和固定点相邻的缝线段。

经过分析,最后得到图 5 所示的结果。由图中可以看出,从状态 S_1 改变到状态 S_{11} ,存在着 17 种不同的路径。而任意两个状态之间箭头的个数表达了可以完成此状态变化的不同操作方法。比如从状态 S_1 到状态 S_2 只存在一种操作方法,而从状态 S_{13} 到状态 S_{12} 存在三种操作方法。因此,从初始状态到目标状态存在多个操作路径,而同一转换又有多种操作方法,如此组合起来将是一个庞大的集合。在用机器人进行缝线操作时,如何选择合理的操作路径是进行自动打结的关键。

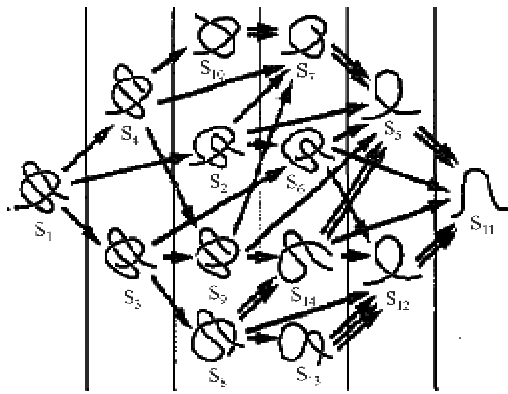


图 5 解结操作的不同路径

这里用 N_m 表示一个交叉状态的抓持点数 (N_m 不能超过操作器的个数)。为了使操作简单,尽可能采用抓持点数少的操作,对应较少的操作器个数。然后,用 N_i 表示一个转换序列中经过的中间状态数。一个转换序列经过的中间状态越少越好,也就是说,操作路径越短越好。最后,用 N_c 表示抓持点的变化次数,如果改变抓持点,那么下一个抓持位置以及运动方向都需要重新估计,操作器的移动也会花费更多时间,所以,转换过程中抓持点变化次数应尽量少。因此,抓持点数目 N_m 、中间状态数 N_i 和抓持点变化数目 N_c 都最小的操作路径是最合理的。

假定图 5 中从 S_1 到 S_{11} 整个过程可以通过两个操作器实现,因此 $N_m = 2$ 。还可以看出路径 $S_1 - S_2 - S_4 - S_{11}$ 是最短的,只有 2 个中间状态,即 $N_i = 2$,同时每个状态间只有一种操作方法,不存在对 N_c 的比较,因此这是最优方案。但这一例子不能说明当两个相邻状态间存在多种操作路径时如何进行选

择。下面以路径 $S_{10} - S_7 - S_5 - S_{11}$ 为例加以说明。

如图 6 所示,在完成第一步后,用第二步(1)比第二步(2)较好,因为可以不改变抓持点而直接进行第三步操作。同理,接下来第三步(1)不用改变抓持点,但是第三步(1)的情况下,操作器的运动距离很大,必须把线拉直才能完成任务,因此选用第三步(2)较好。所以最合理的路径应该是:第一步(RO_{III}) - 第二步(1)(RO_{III}) - 第三步(2)(RO_{III})。

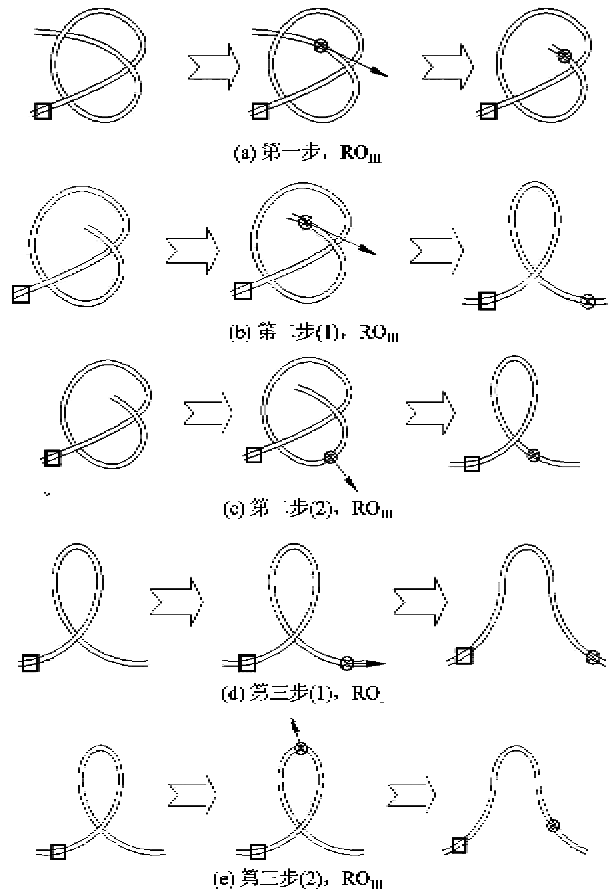


图 6 $S_{10}-S_7-S_5-S_{11}$ 的具体操作过程

4 眼科手术结的打结规划

图 7(a)是眼科手术中常用的外科单结,它由两个单结构成^[5]。两个单结虽然打结方向不一样,但

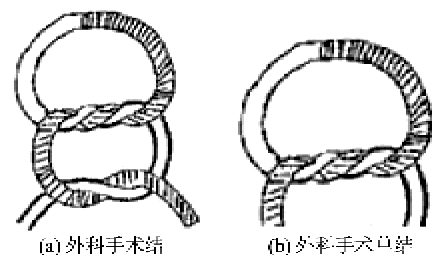


图 7 外科结示意图

是用拓扑学建模的方法进行路径规划的过程是一样的,因此这里只对图 7(b)所示外科结中较复杂的单结进行打结规划,初始状态和目标状态如图 8 所示。

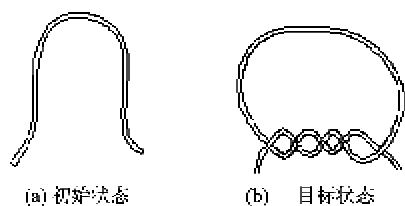


图 8 初始状态和目标状态

根据拓扑模型的建立方法,手术单结的拓扑学状态可表示为 $E_l - C_1^- - C_2^+ - C_3^- - C_4^+ - C_5^- - C_1^- - C_2^+ - C_3^- - C_4^+ - C_5^- - E_r$, 如图 9 所示。此单结的打结过程就分解为一系列交叉状态的转换过程,如图 9 所示。

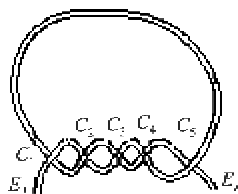


图 9 外科单结拓扑学建模

图 10 中提出了 13 种路径,利用评价标准选优,得到了一个最优方案,即图 11 中的 $S_1 - S_2 - S_4 - S_8 - S_{10} - S_{11}$ 。

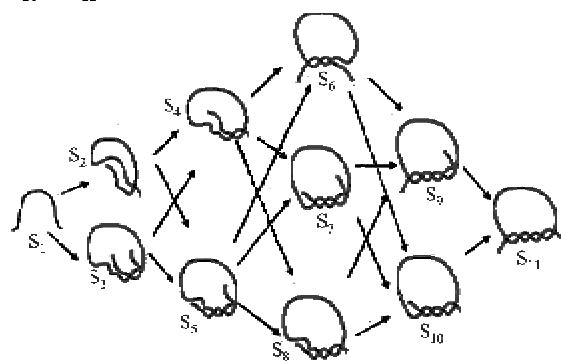


图 10 初始状态到目标状态的转换

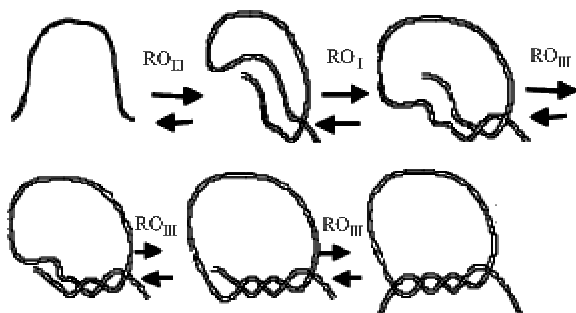


图 11 最优方案

得到打结过程的状态转换序列后,给出每次操作的抓持点和运动方向,如图 12 所示。

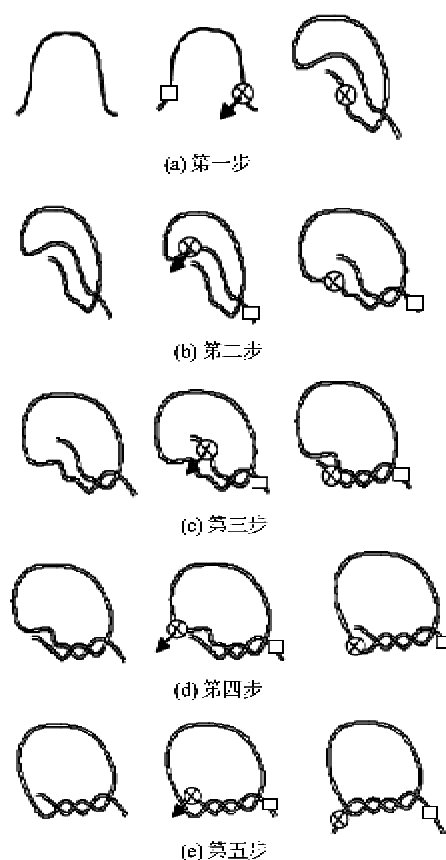


图 12 打结具体实现过程

通过对机器人进行动作控制,逐步实现上图的 5 个步骤,即可稳定快速地完成外科单节的打结作业。至此,通过此例验证了本文打结操作规划方法的可行性。

5 结 论

本文首先建立缝线的拓扑学模型,解决了缝线的状态描述,然后,把缝线的线结的形成看作是通过四种基本操作模式实现交叉点状态之间的转换的过程。接着,根据缝线的操作,规划了机器人操作器对缝线进行操作的抓持点及移动方向。以操作器数量最少、线结形成的路径最短及抓持点变化最小为准则,提出了一套完整的打结操作规划方法。最后,以一个外科手术单结的操作规划为例,说明这种规划方法的可行性。本文的研究为机器人进行外科打结操作奠定了基础。

参考文献

- [1] Taylor R H, Stoianovici D. Medical robotics in computer-integrated surgery. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(5): 765-781
- [2] Paolo D, Eugenio G. Robotics for medical application. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 1996, (9): 44-56
- [3] 魏民, 杨洋, 李成祥. 显微外科打结机器人的机构设计与运动仿真. *机械设计与研究*, 2008, 24(1): 102-105
- [4] 魏民, 杨洋, 邓世靖等. 显微外科打结作业的运动捕捉. *中国医疗器械杂志*, 2008, 32(01): 6-9
- [5] 马榕, 吕斌. 手术结及打结方法的规范与进展. *中国实用外科杂志*, 2006, 26(1): 31-32

Planning for knot-tying manipulation based on topological model

Wang Zhe, Yang Yang, Kang Tianrui

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract

A planning program for robots' knot-tying is proposed by analyzing the formation of knots. Firstly, the topological model of sutures is built up, and the states of sutures are represented as finite permutations of crossing points. Then, four basic transitions among the topological states are defined, and a method for determination of grasping points and their moving directions is proposed. So, possible sequences of crossing state transitions, that is, possible manipulation processes from an initial state to a given objective state, can be generated. Thirdly, a criterion of the smallest number of grasping points, the shortest state transition path as well as the least times of change of grasping points is introduced in order to find the optimal plan. The planning of a surgical knot is given as an example to indicate the feasibility of the planning program.

Key words: knot-tying, manipulation, topological mode, planning program