

# 多种路径形式组合的柔性针二维路径优化

赵燕江<sup>1</sup> 张艳华<sup>2</sup> 陈浩<sup>1</sup> 张永德<sup>1</sup> Yan Yu<sup>3</sup>

1. 哈尔滨理工大学, 哈尔滨, 150080    2. 哈尔滨医科大学, 哈尔滨, 150081  
3. 托马斯·杰斐逊大学, 费城, PA19107, 美国

**摘要:**针对斜尖柔性针在二维组织中的路径优化问题,首先引入了针的 Unicycle 运动学模型,并利用旋量理论和指数积方程计算了运动学正解,从运动学的角度证明了穿刺直线路径的可行性。基于运动学模型,分析了柔性针穿刺路径的形式,考虑入针姿态的优化,提出了采用多种路径形式组合的路径优化算法,建立了优化目标函数。在有无障碍两种情况下分别对针的穿刺路径进行了优化计算和仿真研究。仿真结果证明,采用该算法能有效地绕过障碍,准确达到靶点,并保证路径最优。在通常临床情况下,最优路径一般为控制度为2的包含直线形式的路径。

**关键词:**柔性针;旋量理论;路径优化;微创手术

中图分类号: TP24

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.002

## 2D Path Optimization for Flexible Needle Based on Combination of Multiform Paths

Zhao Yanjiang<sup>1</sup> Zhang Yanhua<sup>2</sup> Chen Hao<sup>1</sup> Zhang Yongde<sup>1</sup> Yan Yu<sup>3</sup>

1. Harbin University of Science and Technology, Harbin, 150080  
2. Harbin Medical University, Harbin, 150081  
3. Thomas Jefferson University, Philadelphia, PA19107, USA

**Abstract:** Aiming at the path optimization of bevel tip flexible needle in 2D tissue, firstly, the Unicycle kinematic model was introduced for the needle, and then the forward kinematics was calculated using screw theory and product of exponentials formula. The feasibility of linear path was proved through kinematic calculation. On the basis of the kinematic model, the path styles were analyzed, and a novel path planning algorithm was proposed based on combination of the multiform paths, and the objective function was established taking account of the optimization of needle insertion pose. Then the optimal calculation and simulation were performed under the environments with and without obstacles respectively. Simulation results show that this algorithm effectively makes the needle steer clear of obstacles and reaches the target precisely, and guarantees the optimal path, which usually contains a linear path with control degree of 2 in common clinical conditions.

**Key words:** flexible needle; screw theory; path optimization; minimally invasive surgery

## 0 引言

在微创介入治疗领域, 穿刺可能是最古老也是最普遍的一项外科技技术, 广泛应用于活体组织病理检查、局部投送放射性药物治疗癌症等手术中。微创医疗将成为未来外科临床医学发展的必然趋势。本文研究采用斜尖柔性针(简称柔性针)进行穿刺时的路径优化问题。与传统手术的穿刺钢针不同, 柔性针相对于组织具有足够的柔性, 利用进针时斜尖与组织的侧向作用力使针轴产生弯曲, 可以刺出弧线轨迹。更重要的是它恰好利用针轴的弯曲来避开重要器官(如神经、血管等)和障碍物(如骨骼等), 灵活、精确地达到传统钢针所达不到的靶点位置<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2011-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075105); 黑龙江省教育厅海外学人科研资助项目(1154H03); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目资助(12511086); 哈尔滨市科技创新基金人才项目(2011RFXXS075)

柔性针的路径优化研究对于准确穿刺具有重要意义。目前, 美国一些大学和研究机构开始了柔性针路径优化的研究。Alterovitz等<sup>[3-5]</sup>基于刺针时的不确定性, 利用随机问题决策原理, 提出了二维环境下绕过障碍的运动优化算法。Park等<sup>[6-7]</sup>建立了针尖可达概率密度函数, 通过计算概率密度来规划针的路径。Duindam等<sup>[8]</sup>分别采用弧线和螺旋线形式的路径对柔性针绕过三维障碍穿刺路径进行了优化, 但此方法存在着盲区, 后来他们又提出了利用运动学反解来进行柔性针的三维路径规划的算法<sup>[9]</sup>。Xu等<sup>[10-11]</sup>采用快速搜索随机树的算法(RRTs), 在有障碍的三维环境下, 对斜尖柔性针的路径进行规划, 并利用路径的可逆性, 从靶点出发优化了入针点, 但此算法运算量非常大。Patil等<sup>[12]</sup>基于RRTs算法利用可达性导航样本启发式算法搜索可行路径, 在三维障碍的复杂环境下, 使计算速度大幅提高。

综上, 不论是二维还是三维路径优化的算法

均不完善,有必要进一步研究。上述所有路径采用的形式都比较单一,或者采用弧线,或者采用螺旋线,而且多数没有考虑入针姿态的优化。两点之间线段最短,在没有或局部没有障碍的情况下大可不必走那么多弧线,所以可以把直线和弧线融合起来,采用“直线/弧线+弧线/直线+……”的形式实现穿针路径,并考虑入针姿态的优化。本文提出基于运动学的多种路径形式组合的二维路径优化算法,该算法可以扩展到三维空间。

## 1 Unicycle 运动学建模与运动学分析

### 1.1 模型的建立

为了得到可控的运动学模型,进行如下合理假设<sup>[2,8]</sup>:①假设组织是均匀的,而且具有各向同性;②针相对组织具有足够的柔性,即针刺入组织时,组织的变形可忽略不计;③假设针的运动完全取决于针尖,即针体完全沿着针尖的轨迹运动。

带斜尖的柔性针是由两个输入驱动的,即针的进给速度  $u_1$  和针的自转速度  $u_2$ 。当它刺入组织里时,组织会给斜尖一个反作用力,使得针尖沿固定半径为  $r$  的圆弧运动,而针的自转改变其斜尖的方向,此系统为非完整约束系统<sup>[2,13]</sup>,相当于单轮车的运动,在此引入 Unicycle 模型,如图 1 所示。在世界坐标系  $A$  下,建立物体坐标系  $B$  与针尖固联,如图 1 所示。同时沿坐标系  $B$  的  $x_B$  轴正向会有一个驱动角速度  $\omega_x$ ,并且有

$$\omega_x = u_1/r \quad (1)$$

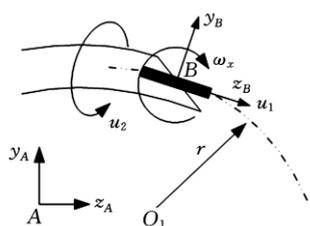


图 1 运动学模型

### 1.2 运动学计算

柔性针不像传统的机器人具有关节和连杆,无法用 D-H 法来表达其运动学问题,在此引入指数积公式。指数积公式最有吸引力的特点之一就是它只用两个坐标系,即世界坐标系和物体坐标系。该特点与运动螺旋的几何特征相结合,使得指数积公式成为 D-H 参数的最佳替代<sup>[13]</sup>。

图 1 所示为两个坐标系:世界坐标系  $A$  和物体坐标系  $B$ 。定义  $B$  系相对  $A$  系位形的齐次变换矩阵为

$$g_{ab} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ab} & \mathbf{p}_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in SE(3) \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{R}_{ab}$  为  $B$  系相对  $A$  系的姿态,即旋转矩阵,  $\mathbf{R}_{ab} \in SO(3)$ ;  $SO(3)$  为三维旋转群;  $\mathbf{p}_{ab}$  为  $B$  系相对  $A$  系的位置矢量,  $\mathbf{p}_{ab} \in \mathbf{R}^3$ ;  $SE(3)$  为系统位形空间和  $SO(3)$  的乘积空间,为欧氏群。

则物体的速度可表示为

$$\mathbf{V}_{ab}^b = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ab}^b \\ \boldsymbol{\omega}_{ab}^b \end{bmatrix} = (\mathbf{g}_{ab}^{-1} \dot{\mathbf{g}}_{ab})^\vee = \boldsymbol{\xi} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{v}_{ab}^b$  为物体坐标系下的线速度,  $\mathbf{v}_{ab}^b = \mathbf{R}_{ab}^T \dot{\mathbf{p}}_{ab}$ ;  $\boldsymbol{\omega}_{ab}^b$  为物体坐标系下的角速度,  $\boldsymbol{\omega}_{ab}^b = (\mathbf{R}_{ab}^T \dot{\mathbf{R}}_{ab})^\vee$ ;  $\boldsymbol{\xi}$  为运动旋量  $\boldsymbol{\xi}$  的运动旋量坐标,  $\boldsymbol{\xi} \in \mathbf{R}^6$ ,  $\boldsymbol{\xi} \in se(3)$ ,  $se(3)$  为欧氏群的李代数表达形式;  $\vee$  表示将旋量转化成旋量坐标的运算符号。

因此,此系统的运动旋量坐标为

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ab}^b \\ \boldsymbol{\omega}_{ab}^b \end{bmatrix} = [0 \ 0 \ u_1 \ u_1/r \ 0 \ u_2]^T \quad (4)$$

其旋量为

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & -u_2 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & -u_1/r & 0 \\ 0 & u_1/r & 0 & u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(3)可得运动学齐次变换矩阵的指数积形式:

$$\mathbf{g}_{ab}(t) = \mathbf{g}_{ab}(0) \exp(\boldsymbol{\xi} t) \quad (6)$$

由于要考虑入针姿态,所以令  $\mathbf{g}_{ab}(0)$  为入针前绕  $x$  轴旋转某一角度的变换矩阵:

$$\mathbf{g}_{ab}(0) = \mathbf{g}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

当只有  $u_1$  作用时,针做圆弧运动,式(6)中  $\exp(\boldsymbol{\xi} t)$  项可化简为

$$\exp(\boldsymbol{\xi} t) = \mathbf{g}_x(t) = \exp(u_1 \begin{bmatrix} \mathbf{e}_3 \\ \mathbf{e}_1/r \end{bmatrix}^\wedge t) \quad (8)$$

式中,  $\wedge$  表示将旋量坐标转化成旋量的运算符号。

当只有  $u_2$  作用时,针绕  $z$  轴自转,式(6)中  $\exp(\boldsymbol{\xi} t)$  项可化简为

$$\exp(\boldsymbol{\xi} t) = \mathbf{g}_z(t) = \begin{bmatrix} \cos u_2 t & -\sin u_2 t & 0 & 0 \\ \sin u_2 t & \cos u_2 t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{g}_z(t)$  为沿着  $z$  轴旋转的齐次变换矩阵。

当进给运动和自转运动同时作用时,针做螺旋运动,其节距  $h$  和螺旋运动的轴  $l$  分别为

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{v}}{\|\boldsymbol{\omega}\|^2} \\ l &= \frac{\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}}{\|\boldsymbol{\omega}\|^2} + \lambda \boldsymbol{\omega} \quad \lambda \in \mathbf{R} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_{ab}^b \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_{ab}^b$

将式(4)代入式(10)得

$$h = \frac{r^2(u_2/u_1)\cos\varphi}{1+r^2(u_2/u_1)^2}$$

$$l = \left. \begin{aligned} & \left[ \begin{array}{c} \frac{r^2(u_2/u_1)\sin\varphi}{1+r^2(u_2/u_1)^2} \\ -\frac{r\cos\varphi}{1+r^2(u_2/u_1)^2} \\ -\frac{r\sin\varphi}{1+r^2(u_2/u_1)^2} \end{array} \right] + \lambda \left[ \begin{array}{c} u_1/(u_2r) \\ 0 \\ 1 \end{array} \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其轨迹为三维曲线,但从式(11)可以看出,当进给和自转运动同时进行时所产生的螺旋运动只由  $u_2/u_1$  决定。当  $u_2$  远大于  $u_1$  时,有

$$\lim_{u_2/u_1 \rightarrow \infty} l = \lambda [0 \ 0 \ 1]^T \quad (12)$$

这时其轨迹就是一条沿入射方向的直线,可认为是二维路径,它能应用在二维路径优化求解过程中,也能应用在三维路径优化中。此时,运动学方程近似为

$$g_{ab}(t) = g_{ab}(0)\exp(\xi t) \approx g_{ab}(0)g_i(t)g_z(t) \quad u_2 \gg u_1 \quad (13)$$

式中,  $g_i(t)$  为沿  $z$  轴平移的齐次变换矩阵。

运动学正解可离散为

$$g_{ab}(t) = g_{ab}(0)g_1(t_1)g_2(t_2)\cdots g_n(t_n) \quad (14)$$

$$t = \sum_{i=1}^n t_i$$

式中,  $t_1 \sim t_n$  为各段路径运动的时间;  $g_i$  为路径  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 的运动学变换矩阵。

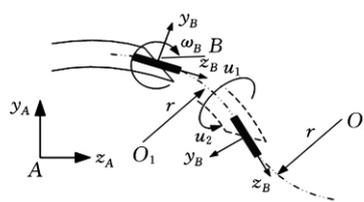
## 2 路径优化

### 2.1 路径优化分析

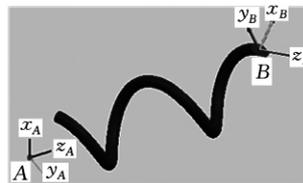
柔性针的路径优化与普通移动机器人的路径优化不同,它不能像普通移动机器人那样可以走出任意曲线或折线,它的轨迹只能是弧线、螺旋线或直线。当只有  $u_1$  没有  $u_2$  时,针尖将沿着圆弧运动,刺入一段距离后,使针自转  $180^\circ$ ,然后继续进给,针尖将沿着相反方向的圆弧继续运动。而且两段圆弧相切,半径相同(图 2a),且与针的进给速度无关<sup>[1]</sup>。当  $u_1, u_2$  同时作用时,针尖就会做螺旋运动(图 2b),当  $u_2 \gg u_1$  时,运动轨迹为直线(式(10)~式(12)得证,图 2c)。

众所周知,两点之间线段最短,在局部没有障碍的情况下我们大可不必走那么多弧线或螺旋线,所以我们提出把直线和弧线融合起来。本文提出基于单轮车运动学模型的多种路径形式组合的路径优化,采用“直线/弧线+弧线/直线+……”的多种轨迹形式实现穿刺路径,并考虑入针姿态的优化。

但是弧线的曲率也受到限制,即它的轨迹是受运动学限制的。所以它的路径只能是圆弧与圆



(a)  $u_1$  和  $u_2$  分时输入



(b)  $u_1$  和  $u_2$  同时输入



(c)  $u_2 \gg u_1$  时

图 2 路径形式

弧或圆弧与直线之间的切换,而不能是任意曲线的路径。这也正是柔性针路径优化的难点所在。为了说明问题,先定义一个概念:控制度。控制度为整个路径中需要控制不同形式路径的次数,即包含的直线或圆弧的段数。

由于不同形式的路径有不同的运动学计算方式,所以在路径形式不确定时就无法进行计算,也就是说无法将所有形式的路径同时进行优化计算,所以我们采取“优中选优”的方法进行优化,即先把路径按控制度划分,分别优化同一控制度内不同形式路径的优化解,得到一个控制度的最优解,再比较不同控制度下的最优解,最终可得到总体的最优解。我们可以为拟优化路径选择控制度,即选择在某个控制度下进行优化,也可以在所有控制度范围内进行整体优化。

### 2.2 目标函数的建立

如图 3 所示,轨迹规划算法的目的就是控制  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$ ,使针从起始点  $S$  开始绕过障碍到达目标点  $G$  所通过的安全合理的最短路径。采用“直线/弧线+弧线/直线+……”的形式实现穿针路径,当没有障碍时,完全可以沿着一条直线刺入,当需要弯转时再对圆弧路径进行穿刺。这样不但会有效缩短路径的长度,而且还会明显减少对针尖方向的控制(对针尖方向的精确控制是非常难以实现的)。我们要求的最优路径为,在考虑入针角度的优化的同时,使得路径最短、绕过障碍、最安全并且控制最少。因此,建立轨迹优化目标函数为

$$\min F(\theta, \omega_{ab}^b, v_{ab}^b, T) = \min(\alpha_1 L + \alpha_2 D + \alpha_3 H + \alpha_4 N)$$

$$\text{s. t.} \quad \|p_{ng}\| \leq 0.1 \quad (15)$$

式中,  $T$  为运动总时间;  $L$  为针从起点到靶点的路径长度,  $L = \int_0^T |v(t)| dt$ ;  $v(t)$  为  $v_{ab}^b$  的标量值;  $D$  为危险度,即

针在保证路径最短的情况下应尽量远离障碍,以防多方面误差引起的危险; $H$ 为针刺到障碍的惩罚度; $N$ 为控制度, $N = 1, 2, \dots; \alpha_1 \sim \alpha_4$ 分别为各子目标函数的权重系数; $\|p_{ng}\|$ 为针尖末端到靶点的距离。

我们的目的就是找到这个目标函数取最小值时,对应两个输入的作用过程。

式(15)中含有关于时间的积分,很难计算,所以要把函数离散化。首先,不妨设  $u_1(t) \equiv 1$ ,但要允许  $u_2(t)$  可以脉冲形式输入,即针尖倾斜方向的改变不需要时间。 $u_2(t)$  的输入形式如图4所示。

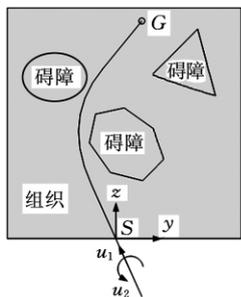


图3 路径规划图

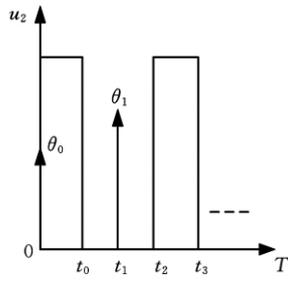


图4  $u_2(t)$  的输入形式

其次,把刺针的时间离散化。 $T_j \in \{0, \Delta, 2\Delta, \dots, T\}$ ,存在一个适当的时间段(或步长) $\Delta > 0$ ,使得离散化后的函数值近似等于式(15)的值。离散化的函数可表示为

$$\begin{aligned} \min \tilde{F} &= \min(\alpha_1 T + \alpha_2 D + \alpha_3 H + \alpha_4 N) \\ \text{s. t. } \|p_{ng}\| &\leq 0.1 \end{aligned} \quad (16)$$

路径的形式和控制度的取值有关,如表1所示,其中直线用L表示,弧线用R表示。不同的路径形式有不同的运动学计算方式。

表1 不同控制度下的路径形式

控制度	路径形式
1	L、R
2	LR、RL、RR
3	LRR、RLR、RRL、LRL、RRR
4	有8种
⋮	⋮

### 3 仿真结果

采用 Levenberg - Marquardt 优化算法,用 MATLAB 编写优化计算程序。取离散时间段(或步长) $\Delta = 0.01s$ 。圆弧半径  $r = 50mm$ ,与以前实验结果接近<sup>[1,14-15]</sup>。选择入针点为(0,0)。仿真时,选择  $u_1(t) = 1, u_2$  不必选择,因为由式(13)可知,当  $u_2 \gg u_1$  时,螺旋运动可近似于沿  $z$  轴的平移,然后再调整一定角度(平面问题为  $0^\circ$  或  $180^\circ$ )。

在没有障碍时,选择靶点为(30,90)mm,最优解为一条连接入射点S和靶点G的线段,如图

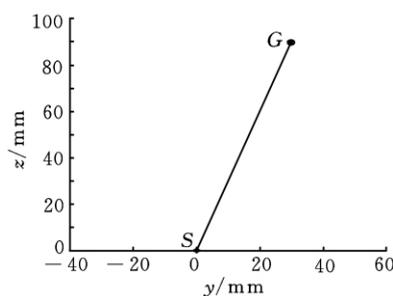


图5 无障碍时的最优路径

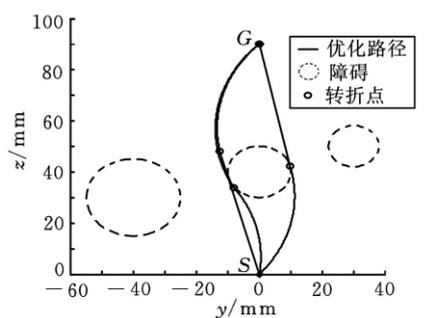
5所示。优化结果:绕  $x$  轴转角(入针姿态)为  $-18.4378^\circ$ ,路径长度为  $94.7683mm$ 。

有障碍时,选取靶点为(0,90)mm,设3个障碍的外包圆的圆心分别为(0,40)mm、(-40,30)mm、(30,50)mm,半径分别为10mm、15mm、8mm,仿真结果如图6所示。结果控制度为1时无解,控制度为2时,3种路径形式(LR、RL、RR,表1)的优化解如图6a所示,其中最优路径为RL形式(图6b),亦为整体最优路径,RL为两段路径:第一段为R,第二段为L。图中两段路径的连接点,由于是由一段形式的路径转折到下一段形式的路径,故称“转折点”,其他相同。控制度为3时,5种路径形式(表1)的优化解如图6c所示,其中最优路径为LRL形式(图6d),由三段路径组成。RL和LRL的结果见表2。

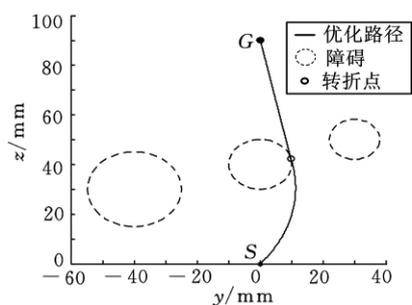
由图6和表2可知:①各控制度中的最优路径都含有直线式,这是可以理解的,因为两点之间线段最短;②虽然LRL形式的路径比RL形式的路径缩短0.93mm,但前者增加了一个控制度,使得路径形式复杂,难于控制,导致函数的总体评价价值增大,所以总体最优路径为RL形式。

### 4 结束语

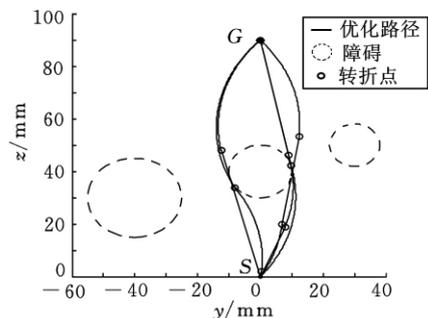
本文基于运动学模型,提出了采用多种路径形式的路径优化算法,算法包含了对入针姿态的优化。仿真结果表明:该算法能够有效优化出无障碍情况下的最优路径,并考虑了入针角度的优化;在各种路径形式的规划中,最优路径一般是包含直线形式的路径;增大控制度会在一定程度上缩短路径,但会增大控制难度,可能使整体的路径成本(目标函数的值)增大,因此在环境不是很复杂的情况下,整体路径的最优解的控制度一般为2。该算法可以扩展到三维空间,未来的工作将集中在如何精确控制针的进给和转角,以及研究柔性针的入针点的优化问题,并扩展到三维环境中的路径优化,同时在动物组织中进行进一步实验研究。



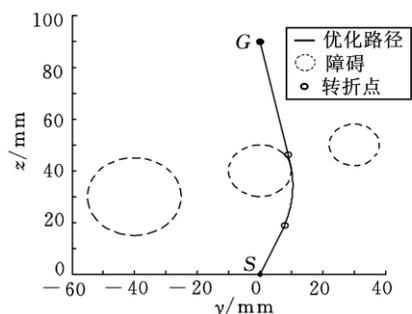
(a) 控制度为 2 时的 3 种路径形式优化解



(b) 控制度为 2 时的最优解、整体最优解



(c) 控制度为 3 时的 5 种形式路径优化解



(d) 控制度为 3 时的最优解

图 6 有障碍时路径优化结果

表 2 不同控制度的最优路径比较

路径形式	优化函数值	路径总长度 (mm)	入针姿态	
			绕 x 轴转角 (°)	针尖转角 (°)
RL	110.7385	93.72	-43.96	0
LRL	122.0137	92.79	-22.56	0
路径形式	第一段路径长度 (mm)	调整针尖角度 (°)	第二段路径长度 (mm)	第三段路径长度 (mm)
RL	45.38		48.34	
LRL	20.51	0	27.86	44.42

参考文献:

[1] Robert J. Webster III, Jasenka M. Design Considera-

tions for Robotic Needle Steering[C]//ICRA 2005. Barcelona, Spain, 2005: 3599-3605.

[2] Robert J. Webster III, KIM J S, et al. Nonholonomic Modeling of Needle Steering[J]. International Journal of Robotics Research, 2006, 25(5/6): 509-525.

[3] Alterovitz R, Lim A, Goldberg K, et al. Steering Flexible Needles Under Markov Motion Uncertainty [C]//IROS 2005. Edmonton, AB, Canada, 2005: 120-125.

[4] Alterovitz R, Branicky M, Goldberg K. Motion Planning under Uncertainty for Image-guided Medical Needle Steering [J]. Int. J. Robotics Research, 2008, 27(11/12): 1361-1374.

[5] Alterovitz R, Simeon T, Goldberg K. The Stochastic Motion Roadmap: A Sampling Framework for Planning with Markov Motion Uncertainty [C]//RSS 2007. Atlanta, GA, USA, 2007: 233-241.

[6] Park W, Kim J S, Zhou Y, et al. Diffusion-based Motion Planning for a Nonholonomic Flexible Needle Model[C]//ICRA 2005. Barcelona, Spain, 2005: 4600-4605.

[7] Park W, Liu Y, Zhou Y, et al. Kinematic State Estimation and Motion Planning for Stochastic Nonholonomic Systems Using the Exponential Map[J]. Robotica, 2008, 26: 419-434.

[8] Duindam V, Alterovitz R, Sastry S, et al. Screw-Based Motion Planning for Bevel-tip Flexible Needles in 3D Environments with Obstacles[C]//ICRA 2008. Pasadena, CA, USA, 2008: 2483-2488.

[9] Duindam V, Xu Jijie, Alterovitz R, et al. 3D Motion Planning Algorithms for Steerable Needles Using Inverse Kinematics [C]//8th International Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. Guanajuato, Mexico, 2008: 535-549.

[10] Xu Jijie, Duindam V, Alterovitz R, et al. Motion Planning for Steerable Needles in 3D Environments with Obstacles Using Rapidly-Exploring Random Trees and Backchaining [C]//4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering. Washington, D C, USA, 2008: 41-46.

[11] Xu Jijie, Duindam V, Alterovitz R, et al. Planning Fireworks Trajectories for Steerable Medical Needles to Reduce Patient Trauma[C]//IROS 2009. St. Louis, MO, USA, 2009: 4517-4522.

[12] Patil S, Alterovitz R. Interactive Motion Planning for Steerable Needles in 3D Environments with Obstacles[C]//BioRob 2010. Tokyo, Japan, 2010: 893-899.

[13] Murray R M, Li Z, Sastry S S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994.

# 圆柱度仪单截面自动对中调节方法的研究

张 瑞 卢好蕊 张林娜 郑 鹏

郑州大学, 郑州, 450046

**摘要:**依据倾斜圆柱横截面为椭圆,在分析圆柱度仪工作台偏心和倾角调整原理的基础上,提出了一种新的单截面椭圆测量自动对中控制算法;根据调整运动的不同,提出了两种对中调节方法;结合谱分析技术实现了椭圆特征参数的便捷提取;采用 LabView 编制了相应的算法软件。仿真结果表明,单截面自动对中调节方法耗时短、精度高,显著提高了圆柱度仪对中的效率。

**关键词:**自动对中;Labview;圆柱度仪;频谱分析

中图分类号:TH

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.003

## Research on Self-centering Control Method of Cylindricity Measuring Instrument

Zhang Rui Lu Haorui Zhang Linna Zheng Peng

Zhengzhou University, Zhengzhou, 450046

**Abstract:** This paper put forwards a new self-centering control algorithm by analyzing the principles of worktable adjustment based on that the section of angled cylinder is ellipse and put forwards two centering adjustment methods based on the differences of adjusting movements. Then the characteristic parameters of the elliptic by analyzing the spectrum were extracted. The algorithm software was finished by Labview. The simulation results show that the algorithm has features as short time, high precision and more efficiency.

**Key words:** self-centering control; Labview; cylindricity measuring instrument; spectrum analysis

## 0 引言

使用转台式圆柱度仪测量工件时,若被测工件的几何主轴与圆柱度仪回转工作台的回转主轴既不重合又存在夹角,则被测工件的安放既偏心又倾斜,其偏心量和倾斜量的大小直接影响到测量精度<sup>[1-2]</sup>。传统的圆柱度测量仪只配备手动调整工作台,调节时间和精度因操作人员的技能而异,极大地影响了圆柱度仪的测量效率以及测量精度的可靠性<sup>[3-4]</sup>。近年来,随着自动化技术的迅猛发展,已开始出现自动对中工作台,具有代表性的是泰勒公司的 Talyrond tr131 系列圆度仪,它采用的对中调节算法是双截面法,测量过程为循环迭代<sup>[1]</sup>。本文依据四自由度自动对中工作台,

提出了一种新的单截面测量法。该方法调节过程更为便捷,效率也更高,对保证圆柱度仪快速高精度的检测具有重要意义。

## 1 圆柱度仪对中调节原理

为了实现圆柱度仪的高精度测量,圆柱度仪对中需进行两方面的调节:①使工件中心与回转中心重合的调心调节;②使工件轴线垂直于水平面的调倾调节<sup>[5]</sup>。这就要求圆柱度仪的调节工作台既能实现水平面内的二维移动,又能实现空间的转动。四自由度工作台是一种可行的实现方法。图 1 为四自由度圆柱度仪的结构及坐标和调节示意图。

工作台的回转主轴位置是固定的,回转主轴轴线为坐标系 Z 轴,回转主轴轴线与工作台上表面的交点为坐标原点 O。测量传感器的测头中心

收稿日期:2011-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975262)

[14] 赵燕江,张永德,邵俊鹏. 柔性针的运动学建模及实验研究[J]. 机器人,2010,32(5):666-673.

Zhao Yanjiang, Zhang Yongde, Shao Junpeng. Kinematic Modeling and Experimental Study of Flexible Needle[J]. Robot,2010,32(5):666-673.

[15] Zhang Yongde, Zhao Yanjiang. Kinematic Modeling of Bevel Tip Flexible Needle[C]//ICIRA 2010. Shanghai, China, 2010:405-416. (编辑 郭伟)

作者简介:赵燕江,男,1979年生。哈尔滨理工大学智能机械研究所博士研究生、讲师。主要研究领域为多指灵巧手、医疗机器人。张艳华,女,1962年生。哈尔滨医科大学附属肿瘤医院主任医师。陈浩,男,1982年生。哈尔滨理工大学智能机械研究所硕士研究生。张永德,男,1965年生。哈尔滨理工大学智能机械研究所教授、博士研究生导师。Yan Yu,男,1961年生。美国托马斯·杰斐逊大学杰斐逊医学院教授、博士研究生导师。