

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2024.06.003

# 混联艾灸辅疗机器人设计与运动学分析

孙琦, 汤腾飞\*

(浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对现有艾灸辅助设备自动化程度低、成本高及精度低等问题,笔者提出了一种3UPS-UP-2R型的混联艾灸机器人。该机器人结合了3UPS-UP并联结构稳定性高和2R串联结构灵巧性好的优点来实现稳定且灵活地艾灸操作;采用螺旋理论进行3UPS-UP自由度分析,确定该艾灸机器人的运动特征;推导并联模块和串联模块的运动学逆解的解析解,并通过切片分层搜索算法求解艾灸机器人的可达工作空间。结果表明:该混联艾灸机器人具有5自由度的灵巧运动能力,可达工作空间大,能够较好地满足艾灸辅助理疗的使用需求。

**关键词:**机器人;艾灸;混联机构;螺旋理论;工作空间

中图分类号:TH112 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2024)06-0023-09

## Design and Kinematics Analysis of Hybrid Moxibustion Auxiliary Therapy Robot

SUN Qi, TANG Tengfei\*

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low automation, high cost, and low precision of existing moxibustion-assisted equipments, the author proposed a 3UPS-UP-2R hybrid moxibustion robot. This robot combined the advantages of high stability of the 3UPS-UP parallel structure and the good agility of the 2R series structure to achieve stable and flexible moxibustion operation. The motion characteristics of the moxibustion robot were determined through the analysis of the 3UPS-UP degrees of freedom using the screw theory. The analytical solutions for inverse kinematics of parallel module and series module were derived, and the reachable workspace of the moxibustion robot was solved by the slicing hierarchical search algorithm. The results demonstrate that the proposed hybrid moxibustion robot with 5 degrees of freedom possesses agile motion capability, a large reachable workspace, and can effectively meet the usage requirements of moxibustion-assisted therapy.

**Keywords:** robot; moxibustion; hybrid mechanism; screw theory; workspace

艾灸是一种传统的中医疗法,它使用燃烧的艾叶对特定的身体部位进行热刺激,具有温通经络、调和气血等功效,应用十分广泛。但是传统艾灸治疗需要专业医师进行精确的穴位定位,治疗过程存在烟雾污染问题,对医师体力的要求也较高<sup>[1]</sup>。现有的艾灸辅助机构仍多借助艾灸盒<sup>[2-3]</sup>、艾灸架<sup>[4]</sup>等装置进行人工操作,难以实现完全自动化地艾灸辅疗操作。

近年来,随着机器人相关技术的发展,市面上出现了采用串联机械臂进行自动化艾灸的设备。乐文辉等<sup>[5]</sup>提出了一种4自由度的艾灸辅助机器人,仿真研究表明该机器人能够平稳地实现基础艾灸功能;白善明等<sup>[6]</sup>提出了一种基于6自由度机械臂的艾灸机器人及控制算法,该机器人能够模拟复杂多变的艾灸手法,实现了机器人代替医生进行艾灸治疗;Dong等<sup>[7]</sup>设计

收稿日期:2024-06-07;修回日期:2024-08-28

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y202353493)。

第一作者简介:孙琦(2003),男,本科,主要研究方向为并联机构性能评估。通信作者:汤腾飞(1991),男,博士,副教授,主要研究方向为并联机器人技术。E-mail:tengfei@zstu.edu.cn

了一种集成视觉识别和运动规划的移动式串联艾灸机器人,能够在诊室内自主导航和自动艾灸。这些设备的出现表明机器人代替传统人工艾灸操作具有可行性。

然而,上述自动化艾灸机器人均采用串联机械臂,此类串联式艾灸机器人必须采用价格昂贵的关节减速器,在实际应用中存在成本较高、移动精度低等问题,限制了其在临床上的推广应用<sup>[8]</sup>。通过在并联机构基础上集成串联机构而搭建的混联机器人,往往具有优异的稳定性和灵巧的运动能力,目前已被广泛应用于雕刻加工<sup>[9]</sup>、康复训练<sup>[10]</sup>和大型复杂构件加工<sup>[11]</sup>等领域。但鲜有将混联机构应用于艾灸辅助机构的设计与应用。

为此,本团队设计了一种 5 自由度的混联艾灸辅助机器人,其并联构型为 3UPS-UP,串联构型为 2R 转动头,U、S 和 P 分别表示虎克铰、球铰和移动副。采用螺旋理论<sup>[12]</sup>分析艾灸辅助机器人中 3UPS-UP 构型的自由度,对混联机器人中集成的并联模块和串联模块进行了运动学逆解<sup>[13]</sup>推导,运用切片分层搜索算法求解得到机构工作空间,并进行了并联机构尺寸参数影响分析。该艾灸辅助机器人结构稳定、运动灵活,具有自动化艾灸理疗的应用潜力。

### 1 结构设计以及坐标系建立

设计的混联艾灸机器人主要包括可移动滑座、静平台、动平台、第 1 运动链、第 2 运动链、第 3 运动链、第 4 运动链、操作台和 2 自由度旋转头,其结构如图 1 所示。静平台固定于可移动滑座的顶面;第 1 运动链连接于静平台的上侧,第 2 运动链连接于静平台的右侧,第 3 运动链连接于静平台的左侧,第 4 运动链连接于静平台的中部;动平台设于静平台的前侧,经第 1 运动链、第 2 运动链、第 3 运动链和第 4 运动链连接于静平台上;2 自由度旋转头设于动平台上,其上装有艾灸组件;操作台装于可移动滑座侧面,用于控制艾灸机器人的工作模式以及急停操作。利用第 1 运动链、第 2 运动链、第 3 运动链和 2 自由度旋转头的 2 个旋转自由度的运动控制来实现艾灸组件沿指定运动轨迹移动。该混联艾灸机器人所控制的艾灸头定位精准、移

动灵活,且第 4 运动链大大提高了机器人的稳定性和负载力。

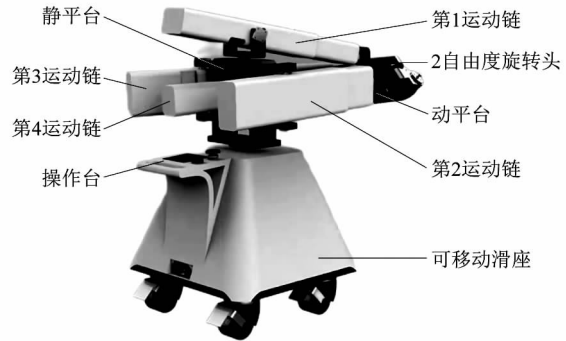


图 1 混联艾灸机器人结构

Figure 1 Structure of hybrid moxibustion robot

基于此机械结构的混联式艾灸机器人空间运动连续、动态稳定性好,通过适配的驱控程序,能够满足复杂的艾灸轨迹调控需求,模拟实现多种艾灸手法。

建立静平台坐标系  $O-xyz$ 、动平台坐标系  $O'-uvw$ 、第 1 旋转头坐标系  $O''-x_1y_1z_1$  和第 2 旋转头坐标系  $O'''-x_2y_2z_2$ ,如图 2 所示。

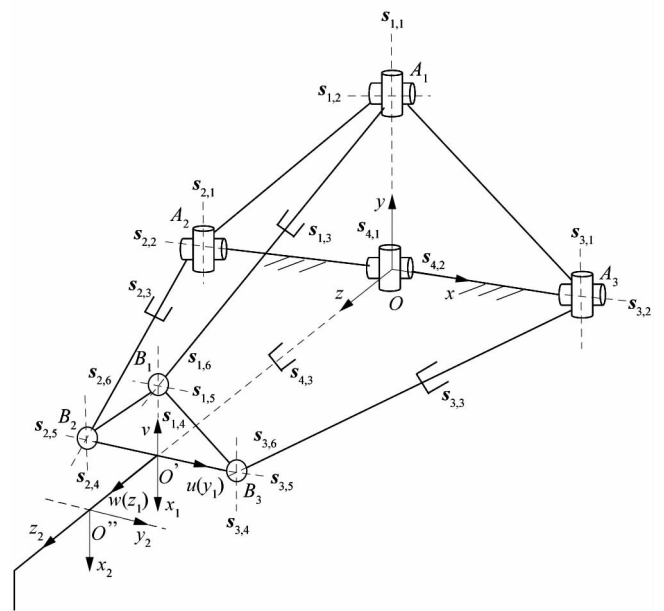


图 2 3UPS-UP-2R 机构坐标系

Figure 2 Coordinate system of 3UPS-UP-2R mechanism

图 2 中,第  $i(i=1,2,3)$  运动链上和静平台相连的虎克铰中心点位置为  $A_i$ ,第  $i(i=1,2,3)$  运动链上和动平台相连的球副中心点位置为  $B_i$ 。 $O$  和  $O'$  点分别是

$A_2A_3$  和  $B_2B_3$  的中点,  $x$  轴与  $A_2A_3$  方向相同,  $y$  轴在  $OA_1$  方向上且垂直于  $x$  轴,  $z$  轴垂直于  $xy$  平面向前。  $u$  轴与  $B_2B_3$  方向相同,  $v$  轴在  $OB_1$  方向上且垂直于  $u$  轴,  $w$  轴垂直于  $uw$  平面向前。第1旋转头坐标系中  $y_1$  轴和  $z_1$  轴分别与  $u$  轴和  $w$  轴重合,  $x_1$  轴与  $v$  轴共线但方向相反。第1旋转头轴线与第2旋转头轴线的交点为  $O''$ ,  $y_2$  轴在第2旋转头的轴线上,  $x_2$  轴方向与艾灸头的方向相同, 根据  $x_2y_2$  的方向, 用右手定则可得出  $z_2$  轴的方向。其中,  $\Delta A_1A_2A_3$  和  $\Delta B_1B_2B_3$  均为等腰三角形, 且  $OA_1 = OA_2 = OA_3$ ,  $O'B_1 = O'B_2 = O'B_3$ ,  $s_{i,j}$  是静平台坐标系  $O-xyz$  下的第  $i$  运动链中第  $j$  运动副的单位方向矢量, 其中  $i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6$ 。

## 2 运动学分析

### 2.1 自由度分析

任意位姿下, 前3个运动链即 UPS 支链的运动螺旋系可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathcal{S}}_{i,1} &= [s_{i,1}; r_{U,i} \times s_{i,1}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{i,2} &= [s_{i,2}; r_{U,i} \times s_{i,2}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{i,3} &= [O_{1 \times 3}; s_{i,3}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{i,4} &= [s_{i,4}; r_{S,i} \times s_{i,4}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{i,5} &= [s_{i,5}; r_{S,i} \times s_{i,5}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{i,6} &= [s_{i,6}; r_{S,i} \times s_{i,6}]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $i=1, 2, 3; O_{1 \times 3}$  为维度为  $1 \times 3$  的零向量;  $\hat{\mathcal{S}}_{i,j}$  为第  $i$  运动链中第  $j$  运动副的运动螺旋;  $r_{U,i}$  为第  $i$  个运动链中 U 副的几何中心点在静平台坐标系下的位置矢量;  $r_{S,i}$  为第  $i$  个运动链中 S 副的几何中心点在静平台坐标系下的位置矢量。

基于互易螺旋理论可以得出前3个运动链不存在

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \cos \gamma \sin \alpha & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta \\ \cos \beta \sin \alpha & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \gamma \sin \alpha \sin \beta - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (5)$$

根据图2所示的并联机构坐标系, 得到并联模块的运动副单位方向矢量的约束条件为:

$$\left. \begin{aligned} s_{1,2} // s_{4,2}, s_{2,2} // s_{3,2}, s_{1,1} // s_{4,1}, s_{2,1} // s_{3,1}; \\ s_{1,1} \perp s_{3,5}, s_{1,4} \perp s_{4,3}, s_{3,5} \perp s_{4,3} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

约束螺旋。

进一步, 对第4运动链即 UP 支链进行分析, 其运动螺旋系可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathcal{S}}_{4,1} &= [s_{4,1}; O_{1 \times 3}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{4,2} &= [s_{4,2}; O_{1 \times 3}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{4,3} &= [O_{1 \times 3}; s_{4,3}]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

同理, 对第4运动链的运动螺旋系求反螺旋得到:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathcal{S}}_{4,1,r} &= [O_{1 \times 3}; s_{4,1} \times s_{4,2}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{4,2,r} &= [s_{4,2} \times s_{4,3}; O_{1 \times 3}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{4,3,r} &= [s_{4,1} \times s_{4,3}; O_{1 \times 3}]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据式(3)可得该动平台的运动螺旋系为:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathcal{S}}_{1,m} &= [O_{1 \times 3}; s_{4,1} \times s_{4,2}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{2,m} &= [s_{4,1}; O_{1 \times 3}]; \\ \hat{\mathcal{S}}_{3,m} &= [s_{4,2}; O_{1 \times 3}]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $\hat{\mathcal{S}}_{1,m}$  的几何意义为动平台沿着  $w$  轴移动的自由度,  $\hat{\mathcal{S}}_{2,m}$  和  $\hat{\mathcal{S}}_{3,m}$  的几何意义分别为动平台绕  $v$  轴方向和  $u$  轴方向的旋转自由度。

由此可得该并联模块具有3个自由度, 再加上安装在动平台上的2自由度旋转头, 该混联机构能够实现4R1T, 一共5自由度的运动。

### 2.2 并联模块位置逆解

3UPS-UP 并联机构的位置逆解指的是已知并联机构中动平台的姿态, 求动平台的位置即3个运动链中移动副的位移  $q_i$  的过程。记动平台绕当前坐标系的  $z, y$  和  $x$  轴的3个姿态角分别为  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$ , 可以得到动平台坐标系  $O'-uvw$  相对静平台坐标系  $O-xyz$  的姿态变换矩阵为:

由约束关系可以得到:

$$\left. \begin{aligned} s_{1,1} \cdot s_{3,5} &= 0; \\ r_{O'} \cdot s_{1,4} &= 0; \\ r_{O'} \cdot s_{3,5} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_{O'} &= [x_{O'} \quad y_{O'} \quad z_{O'}]; \\ \mathbf{s}_{1,1} &= [0 \quad 1 \quad 0]; \\ \mathbf{s}_{1,4} &= \mathbf{R} \cdot [0 \quad 1 \quad 0]^T; \\ \mathbf{s}_{3,5} &= \mathbf{R} \cdot [1 \quad 0 \quad 0]^T. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{r}_{O'}$ 表示动平台坐标系原点 $O'$ 在静平台坐标系下的位置矢量; $x_{O'}$ 、 $y_{O'}$ 和 $z_{O'}$ 分别表示 $\mathbf{r}_{O'}$ 在动平台坐标系 $O'-uvw$ 下关于 $x$ 轴、 $y$ 轴和 $z$ 轴的分变量。

综合式(7)和式(8),可求得并联机构的耦合条件为:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0; \\ x_{O'} &= z_{O'} \tan \beta; \\ y_{O'} &= -z_{O'} \tan \gamma \sec \beta. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据图2可得出 $A_i$ 的位置矢量和 $B_i$ 的位置矢量,具体可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= [0 \quad d_{a,1} \quad 0]^T; \\ \mathbf{a}_2 &= [-d_{a,2} \quad 0 \quad 0]^T; \\ \mathbf{a}_3 &= [d_{a,3} \quad 0 \quad 0]^T; \\ \mathbf{b}_1 &= [0 \quad d_{b,1} \quad 0]^T; \\ \mathbf{b}_2 &= [-d_{b,2} \quad 0 \quad 0]^T; \\ \mathbf{b}_3 &= [d_{b,3} \quad 0 \quad 0]^T. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{a}_i$ 表示 $A_i$ 在静平台坐标系 $O-xyz$ 下的位置矢量, $\mathbf{b}_i$ 表示 $B_i$ 在动平台坐标系 $O'-uvw$ 下的位置矢量, $d_{a,i}$ 和 $d_{b,i}$ 分别表示静平台和动平台第 $i$ 运动链的关节点到各对应的坐标系原点的距离, $i=1,2,3$ 。

根据并联机构的结构可以得到该机构的闭环矢量方程为:

$$q_i + \mathbf{a}_i = \mathbf{r}_{O'} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{b}_i. \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} x_{AT} \\ y_{AT} \\ z_{AT} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \sin \beta \sin \gamma \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \sin \beta \cos \gamma \cos \theta_2 \\ \cos \gamma \sin \theta_1 \sin \theta_2 - \sin \gamma \cos \theta_2 \\ -\sin \beta \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \beta \sin \gamma \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \beta \cos \gamma \cos \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

对式(15)进行化简可以得到:

$$\sin \gamma \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \gamma \cos \theta_2 = x_{AT} \sin \beta + z_{AT} \cos \beta; \quad (16)$$

$$\cos \gamma \sin \theta_1 \sin \theta_2 - \sin \gamma \cos \theta_2 = y_{AT}; \quad (17)$$

$$\cos \theta_1 \sin \theta_2 = x_{AT} \cos \beta - z_{AT} \sin \beta. \quad (18)$$

机构末端点的位置坐标在动平台坐标系下可表

式中, $i=1,2,3$ 。

可以解得3个运动链的位移 $q_i$ 以及其单位方向矢量 $\mathbf{w}_i$ ,具体可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} q_i &= |\mathbf{r}_{O'} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i|; \\ \mathbf{w}_i &= \frac{\mathbf{r}_{O'} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i}{q_i}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中, $i=1,2,3$ 。

### 2.3 串联模块位置逆解

第1旋转头坐标系 $O'-x_1y_1z_1$ 相对于动平台坐标系 $O'-uvw$ 的姿态转换可以视作绕着 $z_1$ 轴旋转,旋转角度为 $\theta_1$ ,旋转变换矩阵可记为 $\mathbf{R}_{z_1}(\theta_1)$ 。第2旋转头坐标系 $O''-x_2y_2z_2$ 相对于第1旋转头坐标系 $O'-x_1y_1z_1$ 的姿态转换可视为绕着 $y_2$ 轴旋转,旋转角度为 $\theta_2$ ,旋转变换矩阵可记为 $\mathbf{R}_{y_2}(\theta_2)$ 。由此可以得出第2旋转头坐标系 $O''-x_2y_2z_2$ 相对于动平台坐标系 $O'-uvw$ 的姿态转换矩阵 $\mathbf{R}_1$ ,具体可以表示为:

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_{z_1} \cdot \mathbf{R}_{y_2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

根据上一节得到的动平台坐标系 $O'-uvw$ 相对于静平台坐标系 $O-xyz$ 的变换矩阵,可以得到第2旋转头坐标系 $O''-x_2y_2z_2$ 相对于静平台坐标系 $O-xyz$ 的姿态变换矩阵,具体可表示为:

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_1. \quad (14)$$

因此,该艾灸机器人混联机构的末端姿态在静平台坐标系 $O-xyz$ 下表示为:

示为:

$$\begin{bmatrix} u_{LOC} \\ v_{LOC} \\ w_{LOC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_1 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ e_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ e_1 + e_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

式中: $e_1$ 表示第1旋转头坐标系 $O'-x_1y_1z_1$ 的原点 $O'$ 和第2旋转头坐标系 $O''-x_2y_2z_2$ 的原点 $O''$ 之间的距离, $e_2$

表示机构末端点与第2旋转头坐标系  $O''-x_2y_2z_2$  的原点  $O''$  之间的距离。

因此,末端点的位置坐标在静平台坐标系下表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{\text{LOC}} \\ y_{\text{LOC}} \\ z_{\text{LOC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{O'} \\ y_{O'} \\ z_{O'} \end{bmatrix} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} u_{\text{LOC}} \\ v_{\text{LOC}} \\ w_{\text{LOC}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

对上述表示进行运算并化简得到:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \arctan \frac{x_{\text{LOC}} - e_2 x_{\text{AT}}}{z_{\text{LOC}} - e_2 z_{\text{AT}}}; \\ \gamma &= \arctan \frac{e_2 y_{\text{AT}} \cos \beta - y_{\text{LOC}} \cos \beta}{z_{\text{LOC}} + e_2 \sin \beta (x_{\text{AT}} \cos \beta - z_{\text{AT}} \sin \beta) - e_2 \cos \beta (x_{\text{AT}} \sin \beta + z_{\text{AT}} \cos \beta)}; \\ \theta_1 &= \arcsin \frac{y_{\text{AT}} + \sin \gamma \cos \theta_2}{\cos \gamma \sin \theta_2}; \\ \theta_2 &= \sin (x_{\text{AT}} \cos \beta - z_{\text{AT}} \sin \beta) \times \arccos (x_{\text{AT}} \sin \beta \cos \gamma + z_{\text{AT}} \cos \beta \cos \gamma - y_{\text{AT}} \sin \gamma); \\ z_{O'} &= w_{\text{LOC}} + e_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \beta - e_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \gamma \cos \beta - (e_1 + e_2 \cos \theta_2) \cos \beta \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

### 3 工作空间

#### 3.1 并联机构可达工作空间预测

该艾灸机器人的运动范围主要由 3UPS-UP 并联结构提供。因此采用一种分层切片的搜索算法<sup>[14]</sup>求解该艾灸机器人的并联机构工作空间,以此对混联艾

$$x_{\text{LOC}} \cos \beta - z_{\text{LOC}} \sin \beta = e_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2; \quad (21)$$

$$y_{\text{LOC}} = e_2 y_{\text{AT}} - e_1 \sin \gamma - z_{O'} \tan \gamma \sec \beta; \quad (22)$$

$$z_{\text{LOC}} + e_2 \sin \beta (x_{\text{AT}} \cos \beta - z_{\text{AT}} \sin \beta) - e_2 (x_{\text{AT}} \sin \beta + z_{\text{AT}} \cos \beta) \cos \beta = z_{O'} + e_1 \cos \beta \cos \gamma. \quad (23)$$

假设已知  $x_{\text{AT}}, y_{\text{AT}}, z_{\text{AT}}, x_{\text{LOC}}, y_{\text{LOC}}$  和  $z_{\text{LOC}}$  的值,将式(16)~(23)进行联立求解,可以用  $x_{\text{AT}}, y_{\text{AT}}, z_{\text{AT}}, x_{\text{LOC}}, y_{\text{LOC}}$  和  $z_{\text{LOC}}$  的表达式表达  $z_{O'}, \beta, \gamma, \theta_1$  和  $\theta_2$ ,具体可以表示为:

灸机器人大致工作范围进行评估。根据图1所示的混联艾灸机器人结构建模,可以得到各个运动链的行程范围以及各个关节的转角范围,由此可以确定该混联艾灸机器人并联机构 3UPS-UP 的尺寸参数,如表1所示。

表1 艾灸机器人并联机构的尺寸参数

Table 1 Dimensional parameters of parallel mechanism of moxibustion robot

$l_a/\text{mm}$	$l_b/\text{mm}$	$\theta_{U,1,1}/(^{\circ})$	$\theta_{U,1,2}/(^{\circ})$	$\theta_{U,2,1}/(^{\circ})$	$\theta_{U,2,2}/(^{\circ})$	$q/\text{mm}$	$\theta_{S,i}/(^{\circ})$
105	53	30 ~ 150	45 ~ 145	38 ~ 142	48 ~ 132	208 ~ 315	60 ~ 120

表1中  $l_a, l_b$  分别表示静平台半径和动平台半径;  $\theta_{U,1,1}, \theta_{U,1,2}, \theta_{U,2,1}, \theta_{U,2,2}$  分别表示虎克铰围绕  $s_{1,1}, s_{1,2}, s_{2,1}, s_{2,2}$  旋转的角度;  $q$  表示并联结构运动链长度调节范围;  $\theta_{S,i}$  表示球副旋转角度范围,  $i=1, 2, 3$ 。

计算可得该混联艾灸机器人的并联机构工作空间如3所示。

图3中  $z$  表示动平台坐标系原点  $O'$  在静平台坐标系  $O-xyz$  中  $z$  轴方向上的大小。由图3(b)和图3(c)可知 3UPS-UP 的并联机械臂关于  $\beta=0$  呈对称分布,与该并联机构 3UPS 的对称结构特点相对应。进一步分析可以得到该艾灸机器人在  $y$  轴上的转角能够达到

$\pm 40^{\circ}$ , 具有较大的横向工作空间,能够满足艾灸机器人对于艾灸辅助工作范围大的需求。此外,可以看出艾灸机器人在接近  $z=150 \text{ mm}$  与  $z=350 \text{ mm}$  时,工作空间急剧减小,而在  $z$  为  $200 \sim 300 \text{ mm}$  时的工作空间较大。因此在使用艾灸机器人进行辅助工作的时候,应优先选择在此范围内的工作空间进行工作,而避免接近工作空间两端的极值。

#### 3.2 串联机构可达工作空间预测

该混联式艾灸机器人的高度灵巧性主要由2自由度旋转头提供,为更直观地观察该2自由度旋转头的工作空间,对其进行工作空间仿真预测。由混联艾灸

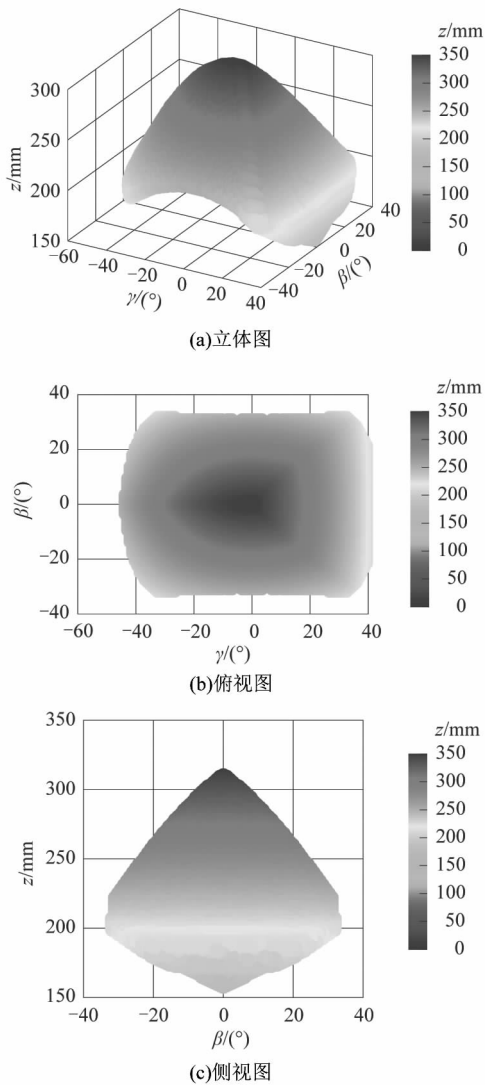


图 3 艾灸机器人并联机构工作空间

Figure 3 Workspace of moxibustion robot parallel mechanism

机器人建模可以得到 2 自由度旋转头的尺寸参数,如表 2 所示。

表 2 2 自由度旋转头的尺寸参数

Table 2 Dimensional parameters of 2-DOF rotating head

$e_1/mm$	$e_2/mm$	$\theta_3/(^\circ)$	$\theta_4/(^\circ)$
76.5	47.0	-180 ~ 180	-90 ~ 90

表 2 中, $e_1$  指第 1 旋转头坐标原点至第 2 旋转头坐标原点的距离, $e_2$  指第 2 旋转头坐标原点至艾灸头的距离, $\theta_3$  表示第 1 旋转头的旋转角度, $\theta_4$  表示第 2 旋转头的旋转角度。

计算得到该 2 自由度旋转头的工作空间如图 4 所示。

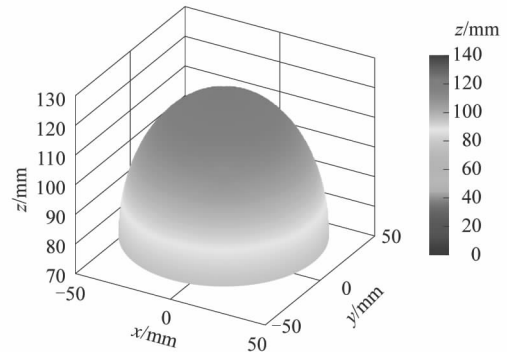


图 4 2 自由度旋转头工作空间

Figure 4 Workspace of 2-DOF rotating head

如图所示,2 自由度旋转头的工作空间为一个半球形,且关于经过  $z$  轴的任意平面对称。该 2 自由度旋转头的 2 个旋转自由度提供了较大的转动范围,第 1 自由度可以在水平面上旋转  $\pm 180^\circ$ ,第 2 个自由度可以在垂直面上旋转  $\pm 90^\circ$ ,这样的转动范围能够适应人体不同穴位的艾灸姿态。

### 3.3 参数影响分析

为进一步探究艾灸机器人中并联机构不同的尺寸参数对于艾灸机器人的工作空间的影响,以可达工作空间的体积  $V$  为主要指标,采用控制变量法分别通过改变静平台半径  $l_a$ 、动平台半径  $l_b$  和运动链的最大行程  $q_{max}$  这 3 个参数,对艾灸机器人的可达工作空间重新进行建模,并计算可达工作空间的体积  $V$ ,得到结果如图 5—7 所示。

根据图 5 所示内容分析可知:随着艾灸机器人静平台半径增大,艾灸机器人的工作空间体积随之减小,尤其是  $\beta$  转角(即静坐标系中  $y$  轴转角)的范围缩小地极为明显。鉴于此并联结构的特性,若想在横向空间中得到一个较为宽广的工作空间,应在合理的范围内选取较小的静平台半径。

根据图 6 所示内容分析可知:随着艾灸机器人动平台半径增大,艾灸机器人的工作空间体积稍有减小,但是整体工作空间体积的变化不大。因此,动平台半径尺寸并不是影响艾灸机器人工作空间体积的决定性参数。在设计艾灸机器人时,可以根据结构需要设计

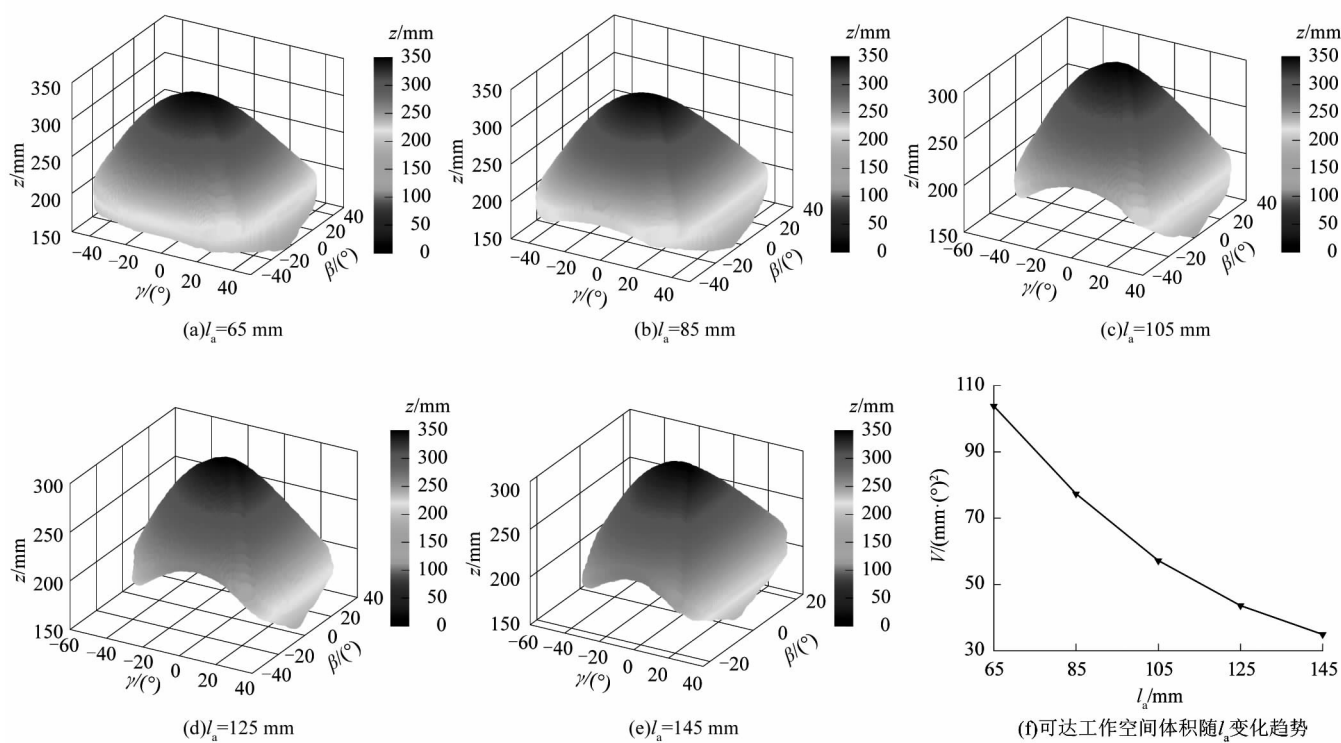


图5 不同静平台半径下机器人可达 workspace 三维图及其体积变化趋势

Figure 5 3D diagram of robot reachable workspace and its volume change trend under different static platform radii

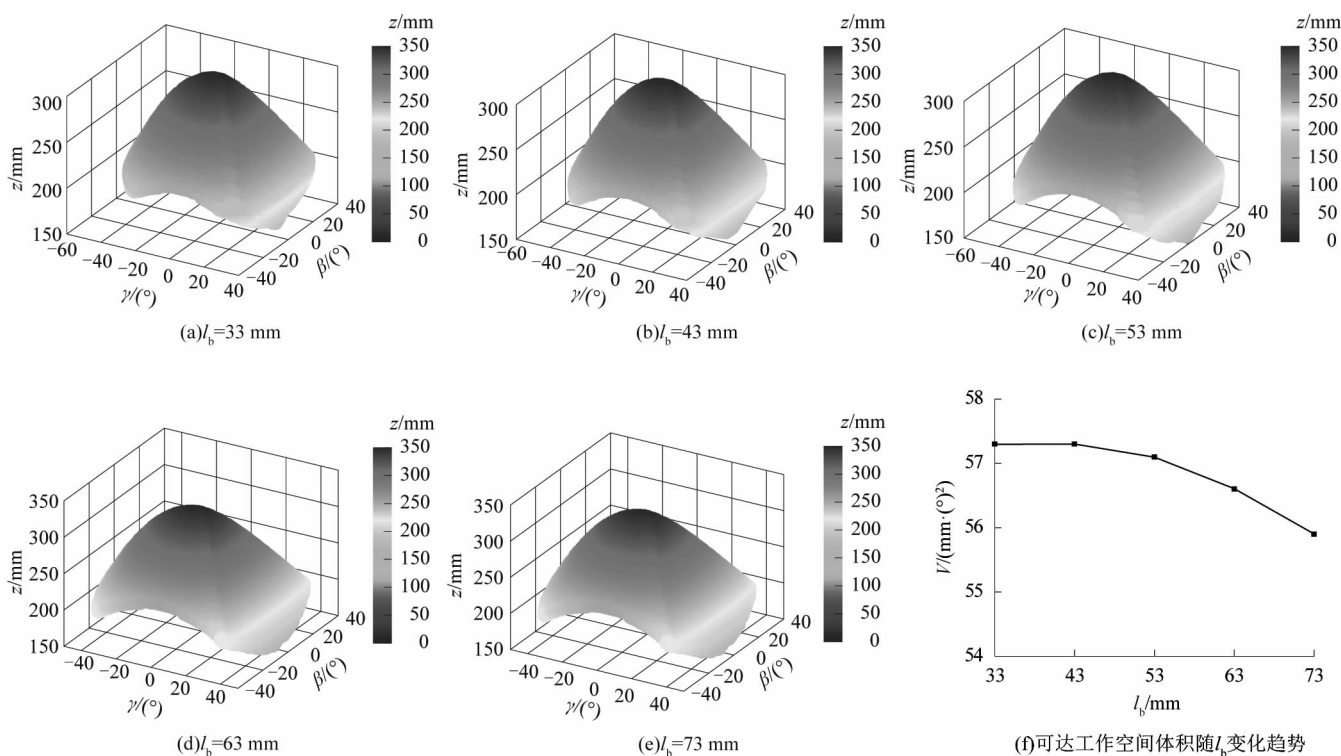


图6 不同动平台半径下机器人可达 workspace 三维图及其体积变化趋势

Figure 6 3D diagram of robot reachable workspace and its volume change trend under different moving platform radii

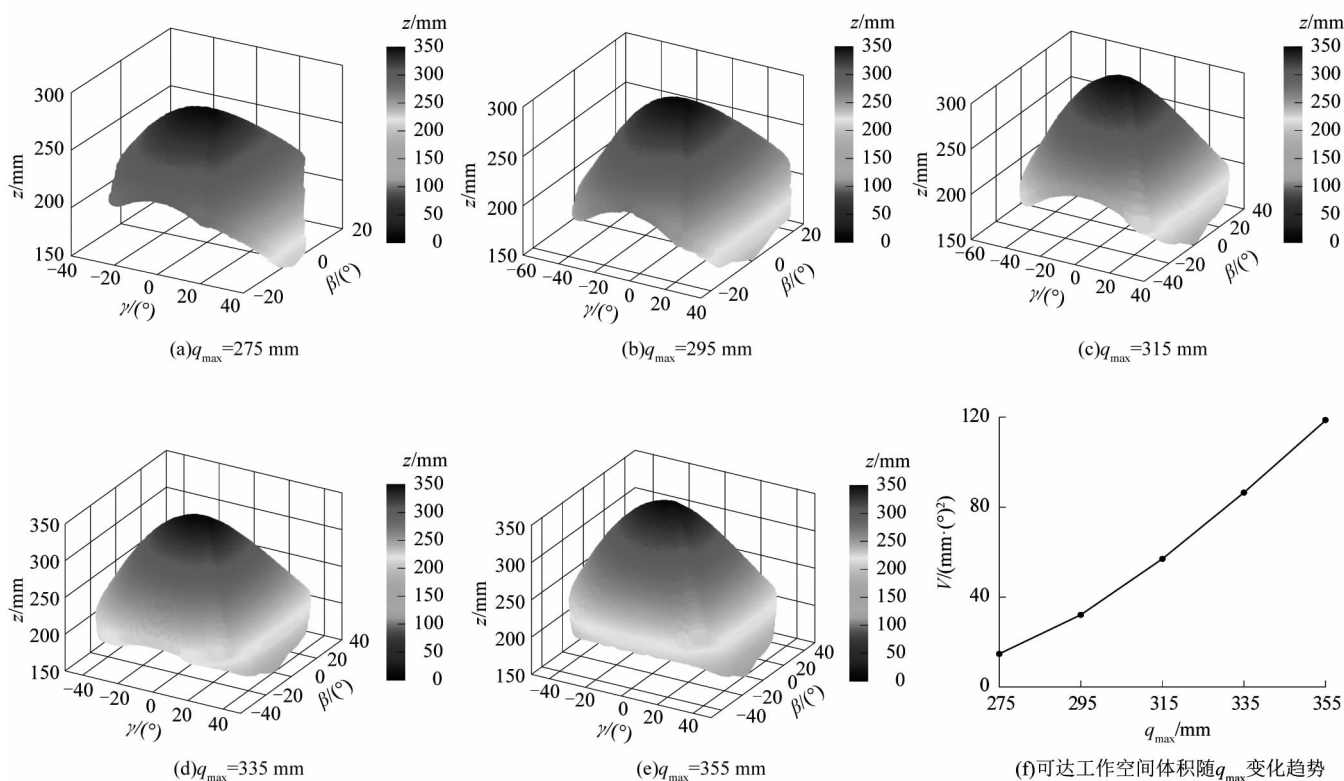


图7 不同运动链最大行程下机器人可达 workspace 三维图及其体积变化趋势  
Figure 7 3D diagram of robot reachable workspace and its volume change trend under different maximum strokes of kinematic chain

合适的动平台半径而忽略其对于艾灸机器人 workspace 体积的影响。

根据图7所示内容分析可知:随着艾灸机器人运动链最大行程的增加,艾灸机器人的 workspace 体积呈现逐渐增大的趋势,且变化幅度较大,可以看出运动链最大行程对于艾灸机器人 workspace 体积有关键影响。为满足各种古法艾灸方式,如悬停灸、回旋灸和雀啄灸等大 workspace 的需求,该艾灸机器人在参数选择时应适当增加运动链最大行程。

#### 4 结语

针对艾灸辅助器械的自动化程度低以及现有的串联式艾灸机器人成本高、精度低等问题,本团队设计了一种3UPS-UP-2R混联艾灸机器人,其结合了并联结构的稳定性高和串联结构的灵巧性好等优势,能够很好地满足机器人自动化艾灸理疗的需要。主要工作如下:

1) 设计了混联式艾灸辅助机器人,利用螺旋理论分析该混联式艾灸机器人的自由度和运动特性;

2) 应用闭环矢量方程以及串、并联姿态转换矩阵计算出艾灸机器人在运动学上的逆解表达式;

3) 运用切片分层的搜索算法评估该艾灸机器人的可达 workspace,改变串联机构的不同尺寸参数,探究其对于艾灸机器人可达 workspace 体积的影响,并总结了不同尺寸参数的改变对于艾灸机器人可达 workspace 体积的影响特点,为后续混联式艾灸机器人设计参数选型即优化提供了基础。

#### 参考文献:

- [1] 管世豪,周可艳,徐培鑫,等. 针灸机器人的研究现状[J]. 光明中医,2024,39(2):315-318.
- [2] 金煜昊,易荣,孟江琼,等. 一种自动控温艾灸仪器设计与应用[J]. 针灸临床杂志,2018,34(11):70-72.
- [3] 杨柳,江浩,王丽芳,等. 新型温控灸器具的研制与应用[J]. 中国针灸,2015,35(7):745-747.
- [4] 徐炜君,刘辉辉,陶东华. 一种智能艾灸设备的研制与应用[J]. 上海中医药杂志,2017,51(5):17-19.

(下转第39页)