

## 智能双臂无影灯系统的协同运动控制

雷上钧<sup>1,2</sup>, 张秋菊<sup>1,2</sup>

1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214222; 2. 江苏省食品先进制造装备与技术重点实验室, 江苏 无锡 214222

**【摘要】**在当前手术照明系统中,手动调节光照位置以消除遮挡物阴影的操作会导致外科医生的注意力分散,且存在污染手术区域无菌环境的可能性,为解决这一问题,提出了一种智能双臂无影灯系统解决方案。采用串联型五自由度双机械臂构建照明系统并建立了D-H数学模型,对机械臂的正、逆运动学进行了求解;针对交叉聚焦照射和主从补光照射两种临床光照场景,提出了相应的双臂协同运动约束机制和运动规划方法;最后,在MATLAB环境中对双臂无影灯系统的协同运动控制算法进行了仿真分析。研究结果表明:双臂协同运动控制算法可行且效果良好,双臂末端和各关节的运动轨迹均柔顺、无突变,智能双臂无影灯系统能够很好地满足手术中的光照调节要求。

**【关键词】**手术无影灯;智能无影灯系统;双臂机器人;协同控制;轨迹规划

**【中图分类号】**R318;TP24

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)05-0600-10

## Cooperative control of intelligent dual-arm shadowless lamp system

LEI Shangjun<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiuju<sup>1,2</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214222, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214222, China

**Abstract:** For the current lighting system for operating room, the manual adjustment of lighting position to eliminate shadow caused by obstruction will lead to distraction of surgeons' attention and potential contamination of the sterile environment in the surgical area. To address this issue, an intelligent dual-arm shadowless lamp system is proposed. A serial-type 5-degree-of-freedom dual-arm robotic system is adopted to construct the lighting system, and a D-H mathematical model is established to solve the forward and inverse kinematics of the robotic arms. For the clinical lighting scenarios of cross-focused illumination and master-slave supplementary illumination, the corresponding constraint mechanisms and motion planning methods are proposed for dual-arm cooperative control. Finally, a simulation analysis on the algorithm for the cooperative control of the dual-arm shadowless lamp system is conducted in MATLAB environment. The research results show that the dual-arm cooperative control algorithm is feasible and performs well, and that the motion trajectories of both the end effectors and joints of the arms are smooth and continuous, demonstrating that the intelligent dual-arm shadowless lamp system can meet the lighting adjustment requirements during operation.

**Keywords:** operation shadowless lamp; intelligent shadowless lamp system; dual-arm robot; cooperative control; trajectory planning

### 前言

手术无影灯作为手术室的关键照明设备,通过

引导光源从多个方向对手术部位进行照射,来减小局部遮挡光束造成的工作区域阴影影响<sup>[1]</sup>。手术过程中,医护人员身体的移动遮挡和手术照明区域的改变导致无影灯无法完全消除阴影,医护人员需要反复手动调整无影灯来使照明条件符合治疗要求,这一操作会导致主刀医生的注意力分散,与非手术无菌区的过多接触也可能引起感染风险<sup>[2]</sup>。现代手术室普遍采用两个手术无影灯组成手术室照明系统<sup>[3]</sup>,以应对更复杂的照明需求,这也对医护人员提出了更高的操作要求。

**【收稿日期】**2024-03-10

**【作者简介】**雷上钧,硕士研究生,研究方向:双臂机器人协同控制, E-mail: 6210810062@stu.jiangnan.edu.cn

**【通信作者】**张秋菊,博士,教授,博士生导师,研究方向:机械动态分析与优化设计、数控与机器人技术等, E-mail: qjzhang@jiangnan.edu.cn

实现手术无影灯的智能化、自动化,使其能根据手术进程自主调节光照是医疗照明技术未来的发展方向。国外一些学者对传统无影灯系统的操作方式进行了优化<sup>[4-6]</sup>,如文献[4]开发了一种手势指令集合来对光照强度和灯头位姿进行控制,在术前对灯流程中取得了良好的应用效果。一些国内学者则通过将无影灯系统与现代传感器、控制技术相结合,运用立体视觉技术<sup>[7]</sup>、模糊逻辑数据融合<sup>[8]</sup>等方法,实现了手术过程中对遮挡物的检测和灯头自动调光控制。上述研究均是针对单个无影灯的自动调光控制,针对双灯头协同控制的研究相对较少。

将机器人技术应用在医疗照明领域是实现无影灯智能化的新发展方向<sup>[9]</sup>。双臂机器人通过双臂的协同配合能够完成更复杂的作业任务,极大地拓展了机器人的应用领域<sup>[10]</sup>。双臂机器人的协同作业轨迹规划以及作业过程中的双臂运动约束机制是双臂机器人的控制难点<sup>[11]</sup>。本文设计了一种基于双臂协作机器人的智能无影灯系统,采用两个五自由度串联关节机械臂,分别搭载两个无影灯头,利用灯头的双目视觉系统<sup>[12]</sup>检测阴影遮挡的空间信息,通过双臂协同控制算法自动调节两灯头准确对准手术区域,灵活、安全地实现无影照明任务。

### 1 基于双协作臂的智能无影灯系统

根据无影灯的运动控制要求<sup>[13]</sup>,本文采用两个五自由度串联关节机械臂,搭建具有对称结构的智能双臂无影灯系统,如图1所示。基座固定在天花板上,灯头安装在机械臂的末端,控制机械臂末端位姿即可实现灯头位置和光束方向的调整。



图1 智能双臂无影灯系统示意图  
Figure 1 Schematic diagram of intelligent dual-arm shadowless lamp system

双臂无影灯控制系统由两个子系统构成<sup>[14]</sup>:基于双目视觉的检测系统和机械臂的运动控制系统,

如图2所示。视觉检测系统在术前可以对病人的手术部位进行识别定位,在手术过程中,可用于识别遮挡物和照明阴影,为机械臂的轨迹规划和运动控制提供依据<sup>[15]</sup>。机械臂运动控制系统用于实现双臂的协同运动控制,使得灯头能够在手术台上方空间的任意位置以任意姿态悬停,光束照射位置能够覆盖整个手术台,同时保证两灯头在协同任务中不会发生碰撞。



图2 智能双臂无影灯系统构成示意图  
Figure 2 Schematic diagram of the composition of the intelligent dual-arm shadowless lamp system

双灯头无影灯系统通常包括主灯和副灯,将其搭载的机械臂分别定义为主臂和从臂。双臂无影灯系统采用主从式协同控制方法<sup>[16]</sup>,当系统需要调整照射位姿时,首先由视觉系统检测手术区域的遮挡情况,判断光源的调整需求,确定两灯头的约束配合关系。然后,由机械臂的控制系统对主机机械臂的运动轨迹进行规划,再根据双臂末端的约束关系计算从臂的期望轨迹。最后通过机器人运动学逆解对双臂关节角进行控制,实现两灯头位姿的协同调控,将光斑聚焦在目标位置。

### 2 双臂无影灯系统的运动学建模

#### 2.1 双臂系统参数化描述

双臂无影灯系统中,每个臂均包含5个旋转关节,采用Denavit和Hartenberg提出的D-H方法<sup>[17]</sup>对双臂结构进行参数化描述,建立系统的基坐标系、双臂的基坐标系以及各个关节坐标系。在双臂基座处,建立各自的基坐标系 $\{M_B\}$ 、 $\{S_B\}$ ,在两基座的对称中心建立了无影灯系统的基础坐标系 $\{R_B\}$ ,双臂的基坐标系相对于系统坐标系只存在沿x轴方向的平移。标记基坐标系为0,按照机械臂每个关节从基座到末端执行器的顺序进

行编号,依次为关节1~关节5。图3给出了双臂无影灯系统中主臂结构简图和建立完成的D-H坐标系。

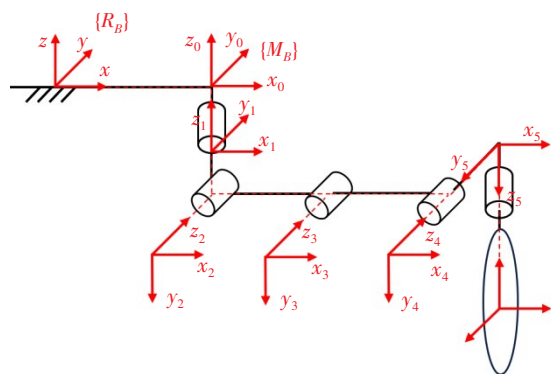


图3 双臂无影灯系统主臂结构简图及D-H坐标系

Figure 3 Master arm structure and D-H coordinate system of the dual-arm shadowless lamp system

主臂和从臂采用左右对称结构安装,因此双臂的D-H参数完全一致,其运动学模型的推导过程也是相同的。以主臂为例,关节间各连杆用4个参数来描述:连杆转角 $\theta_i$ 、连杆长度 $a_i$ 、连杆距离 $d_i$ 和连杆扭角 $\alpha_i$ ,其D-H参数如表1所示。

表1 主机械臂D-H参数表

Table 1 Master arm D-H parameters

关节 <i>i</i>	连杆转角 $\theta_i/^\circ$	连杆长度 $a_i/\text{mm}$	连杆距离 $d_i/\text{mm}$	连杆扭角 $\alpha_i/^\circ$
1	0	0	96	-90
2	0	352	0	0
3	0	370	0	0
4	0	0	122	-90
5	0	0	98	-90

## 2.2 机械臂运动学分析

机器人运动学是指用矩阵描述机械臂各关节与末端执行器在笛卡尔空间下的位置、速度等映射关系<sup>[18]</sup>。用 $T_B^A$ 表示坐标系*B*在坐标系*A*中的齐次变换矩阵,根据D-H坐标系变换原则,按顺序沿各关节*z*轴、*x*轴进行旋转、平移变换,推导相邻两连杆之间的齐次坐标变换矩阵为:

$$T_i^{i-1} = \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(z, d_i) \text{Trans}(x, a_i) \text{Rot}(x, \alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表1中的参数代入以上矩阵即可得到各关节

坐标系的正向变换矩阵。将相邻坐标系的变换矩阵依次相乘,获得机械臂基座坐标系到灯头坐标系的变换矩阵:

$$T_5^0 = T_1^0(\theta_1) \times T_2^1(\theta_2) \times T_3^2(\theta_3) \times T_4^3(\theta_4) \times T_5^4(\theta_5) \quad (2)$$

其齐次矩阵形式为:

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

这个变换矩阵包含了机械臂的几何参数和关节的运动参数,其中 $R$ 是末端关节5相对于机械臂基坐标系的姿态旋转矩阵,用法向矢量 $n$ 、方位矢量 $o$ 和接近矢量 $a$ 表示; $P$ 是关节5相对于基坐标系的位移矩阵,用位移矢量 $p$ 表示。通过这个正向运动学方程,可以实现对机械臂的运动控制,计算出机械臂上灯头的位姿。

需要注意的是,这里的正向变换矩阵表示机械臂末端连接灯头相对于该机械臂基坐标系的位姿。其相对于双臂系统的基础坐标系还需进行一步沿着*x*轴进行平移变换,左右臂平移的距离相同、方向相反。

机械臂逆运动学的求解可以将机械臂末端预期位姿信息转换到关节空间中的角度值进行实时控制。本文采用反变换法(代数法)来计算运动学逆解<sup>[19]</sup>。

$$\theta_1 = \arctan \frac{p_y}{p_x} - \arctan \frac{-d_2 - d_4}{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - (d_2 + d_4)^2}} \quad (4)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2} \quad (5)$$

$$\theta_3 = \pm \arccos \frac{(a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2)^2 + (a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \sin\theta_2)^2 - a_3^2 - a_2^2}{2a_2 a_3} \quad (6)$$

$$\theta_4 = \arctan \left( \frac{\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)}{\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)} \right) - \theta_3 - \theta_2 \quad (7)$$

$$\theta_5 = \pm \arccos(a_x \sin\theta_1 - a_y \cos\theta_1) \quad (8)$$

上述即为该机械臂各关节变量的求解方程。给出期望末端灯头的位姿,可通过上述方程求解各个关节所对应的角度,从而控制机械臂末端到达相应位置。

## 3 双臂无影灯系统协同运动的位姿约束机制

双臂无影灯系统与单臂无影灯系统的不同具体体现在:两灯头间存在实时的约束关系,当一个灯头做出动作变化时,另一个灯头也能做出对应改变,配



合完成照射。双臂无影灯系统协同运动的目的在于使双臂在工作空间中能够协调配合完成照射任务,同时避免碰撞。本节主要讨论灯头在协同照射任务中的位姿约束机制,碰撞检测部分则在第四节中进行阐述。

### 3.1 双灯头无影灯术中协同照射任务



a: 交叉聚焦



b: 主从补光

图4 双灯头无影灯常见临床使用方式

Figure 4 Common clinical uses of dual-lamp shadowless lamps

交叉聚焦照射要求两灯头保持形成光斑的状态,随着光斑移动仅调整灯头的空间位置,灯头的姿态保持不变;主从补光照射要求主灯保持位置不变,而副灯能够在遮挡产生时改变位姿对阴影进行补光,灯头间的齐次变换矩阵会根据遮挡位置产生改变。这两种照射任务对机械臂末端的位姿、速度等有不同的约束要求。双臂无影灯系统在手术中的协同运动控制问题,实际上可简化为机械臂末端的位姿约束问题。因此,针对两种协同照射任务,建立双臂协同运动中的位姿约束机制是实现双臂无影灯系统协同运动控制的关键。

### 3.2 交叉聚焦照射中的双臂协同位姿约束机制

在交叉聚焦照射中,两灯头保持固定约束以确保光束交叉形成的光斑具有恒定的照度和大小,如图5所示。其中,主、从机械臂的末端坐标系分别为 $\{M_T\}$ 、 $\{S_T\}$ ,主、副灯头中心坐标系为 $\{M_L\}$ 、 $\{S_L\}$ 。

在调节过程中,双臂末端保持相对静止,即双臂末端的工具坐标系和光斑位置中心坐标系之间不发生相对运动。因此,可以假设两个机械臂末端和光斑被一个刚性物体连接,从而形成了一个具有完整约束的闭链系统来描述双臂末端的约束关系。光斑中心位置的坐标系为 $\{F_O\}$ ,其相对于双臂系统基坐标系的齐次变换矩阵 $T_{F_O}^{R_B}$ 可通过主臂和从臂的坐标变

根据无影灯在临床场景中的需求<sup>[20]</sup>,将双头无影灯的协同照射任务分为两种。(1)交叉聚焦照射:使两个灯头的光束在手术区域交叉,形成重叠光斑,确保均匀照明,适用于术中光斑移动。(2)主从补光照射:主灯直接照射手术区域中心,当出现遮挡时,副灯从周边进行补光以消除阴影。如图4所示。

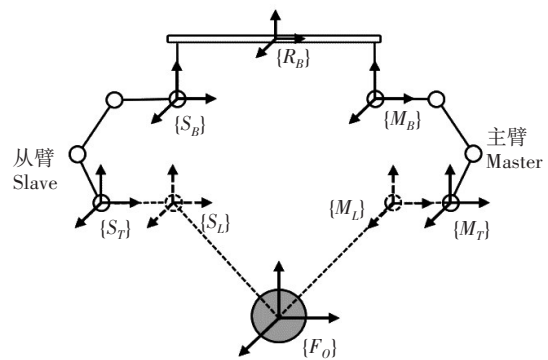


图5 交叉聚焦照射示意图

Figure 5 Schematic diagram of cross-focused illumination

换分别计算得出:

$$\begin{cases} T_{F_O}^{R_B} = T_{M_B}^{R_B} \times T_{M_T}^{M_B} \times T_{M_L}^{M_T} \times T_{F_O}^{M_L} \\ T_{F_O}^{R_B} = T_{S_B}^{R_B} \times T_{S_T}^{S_B} \times T_{S_L}^{S_T} \times T_{F_O}^{S_L} \end{cases} \quad (9)$$

$T_{F_O}^{M_L}$  和  $T_{F_O}^{S_L}$  分别表示光斑中心坐标系相对于主灯、副灯中心坐标系的齐次变换矩阵,在术前光斑定位完成后即可确定; $T_{M_B}^{R_B}$ 、 $T_{S_B}^{R_B}$  表示两臂基座坐标系到整个无影灯系统基坐标系的齐次变换矩阵, $T_{M_T}^{M_L}$ 、 $T_{S_T}^{S_L}$  表示灯头到机械臂末端的变换矩阵,均在系统安装完成后就确定。联立这些等式,得到双臂末端之间的位姿约束方程:

$$\mathbf{T}_{M_B}^{R_B} \times \mathbf{T}_{M_r}^{M_r} \times \mathbf{T}_{M_L}^{M_L} \times \mathbf{T}_{F_o}^{F_o} = \mathbf{T}_{S_B}^{R_B} \times \mathbf{T}_{S_r}^{S_r} \times \mathbf{T}_{S_L}^{S_L} \times \mathbf{T}_{F_o}^{S_L} \quad (10)$$

在协同运动过程中从臂末端相对于系统基坐标系的变换矩阵  $\mathbf{T}_{S_r}^{R_B}$  满足以下关系:

$$\mathbf{T}_{S_r}^{R_B} = \mathbf{T}_{S_B}^{R_B} \times \mathbf{T}_{S_r}^{S_r} = \mathbf{T}_{M_B}^{R_B} \times \mathbf{T}_{M_r}^{M_r} \times \mathbf{T}_{M_L}^{M_L} \times \mathbf{T}_{F_o}^{F_o} \times (\mathbf{T}_{S_L}^{S_L})^{-1} \times (\mathbf{T}_{F_o}^{S_L})^{-1} \quad (11)$$

因此,在协同运动开始时刻,依据主臂末端的时变齐次变换矩阵  $\mathbf{T}_{M_r}^{M_r}$  可以得到从臂末端的齐次变换矩阵  $\mathbf{T}_{S_r}^{S_r}$ ,再根据上一小节求出的运动学逆解,即可得到从臂各关节的角度。

将位姿约束方程按齐次变换矩阵形式展开:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{F_o}^{R_B} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{M_B}^{R_B} & \mathbf{P}_{M_B}^{R_B} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{M_r}^{M_r} & \mathbf{P}_{M_r}^{M_r} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{M_L}^{M_L} & \mathbf{P}_{M_L}^{M_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{F_o}^{F_o} & \mathbf{P}_{F_o}^{F_o} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_{F_o}^{R_B} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{S_B}^{R_B} & \mathbf{P}_{S_B}^{R_B} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{S_r}^{S_r} & \mathbf{P}_{S_r}^{S_r} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{O_s}^{S_r} & \mathbf{P}_{O_s}^{S_r} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{F_o}^{S_L} & \mathbf{P}_{F_o}^{S_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

实际上,通过合理的建系即可将  $\mathbf{T}_{M_r}^{M_r}$ 、 $\mathbf{T}_{S_r}^{S_r}$  变为单位矩阵。从而将上式化简得到双臂间的位置、姿态约束方程:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{M_r}^{R_B} \times \mathbf{P}_{F_o}^{M_r} + \mathbf{R}_{M_B}^{R_B} \times \mathbf{P}_{M_r}^{M_r} + \mathbf{P}_{M_B}^{R_B} = \mathbf{R}_{S_r}^{R_B} \times \mathbf{P}_{F_o}^{S_r} + \mathbf{R}_{S_B}^{R_B} \times \mathbf{P}_{S_r}^{S_r} + \mathbf{P}_{S_B}^{R_B} \\ \mathbf{R}_{M_B}^{R_B} \times \mathbf{R}_{M_r}^{M_r} \times \mathbf{R}_{F_o}^{F_o} = \mathbf{R}_{S_B}^{R_B} \times \mathbf{R}_{S_r}^{S_r} \times \mathbf{R}_{F_o}^{S_L} \end{cases} \quad (13)$$

### 3.3 主从补光照射中的双臂协同位姿约束机制

在主从补光照射中,两灯头呈现相对运动趋势:主灯头保持固定,副灯头围绕主灯头以倾斜的角度进行圆弧运动,根据遮挡产生的方位调整照射角度和位置,从不同的角度照亮手术区域,如图6所示。双臂的末端与光斑区域形成一个不完全封闭的半闭链系统。

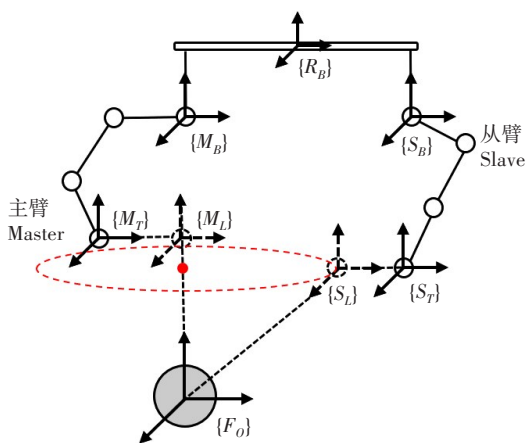


图6 主从补光照射示意图

Figure 6 Schematic diagram of master-slave supplementary illumination

在运动过程中,两灯头的相对运动趋势可以用灯头中心坐标系的齐次变换矩阵  $\mathbf{T}_{S_L}^{M_L}$  来描述,其具体

参数取决于主灯和遮挡物的空间位置:

$$\mathbf{T}_{S_L}^{M_L} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{S_L}^{M_L} & \mathbf{P}_{S_L}^{M_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

副灯头中心相对系统基坐标系的变换矩阵  $\mathbf{T}_{S_L}^{R_B}$  沿着主灯所在机械臂通路满足:

$$\mathbf{T}_{S_L}^{R_B} = \mathbf{T}_{M_r}^{R_B} \times \mathbf{T}_{M_L}^{M_r} \times \mathbf{T}_{S_L}^{M_L} \quad (15)$$

在确定副灯头相对于主灯头位姿的相对运动趋势  $\mathbf{T}_{S_L}^{M_L}$  后,依据主机械臂末端的时变齐次变换矩阵  $\mathbf{T}_{M_r}^{R_B}$ ,可以得到从臂末端相对于系统基坐标系的约束矩阵  $\mathbf{T}_{S_L}^{R_B}$ :

$$\mathbf{T}_{S_r}^{R_B} = \mathbf{T}_{S_L}^{R_B} \times \mathbf{T}_{S_r}^{S_L} = \mathbf{T}_{M_r}^{R_B} \times \mathbf{T}_{M_L}^{M_r} \times \mathbf{T}_{S_L}^{M_L} \times \mathbf{T}_{S_r}^{S_L} \quad (16)$$

与交叉聚焦中的控制方法相似,在实际控制过程中,首先确定主臂末端的齐次变换矩阵与遮挡物位置,得到两灯头间的约束关系,再求解从臂末端的齐次变换矩阵  $\mathbf{T}_{S_r}^{R_B}$ ,使副灯头按照主灯头和遮挡位置解算出的运动约束完成相应协同运动。

将上式写为齐次矩阵形式,得到:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{S_r}^{R_B} & \mathbf{P}_{S_r}^{R_B} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{M_r}^{R_B} & \mathbf{P}_{M_r}^{R_B} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{M_L}^{M_r} & \mathbf{P}_{M_L}^{M_r} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{S_L}^{M_L} & \mathbf{P}_{S_L}^{M_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{S_r}^{S_L} & \mathbf{P}_{S_r}^{S_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

展开后可得到如下从臂的末端相对于双臂系统基坐标系的位置和姿态约束关系:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{S_r}^{R_B} = \mathbf{R}_{M_r}^{R_B} \times \mathbf{R}_{M_L}^{M_r} \times \mathbf{R}_{S_L}^{M_L} \times \mathbf{R}_{S_r}^{S_L} \times \mathbf{P}_{S_r}^{S_L} + \mathbf{R}_{M_r}^{R_B} \times \mathbf{R}_{M_L}^{M_r} \times \mathbf{P}_{S_L}^{M_L} + \\ \quad \mathbf{R}_{M_r}^{R_B} \times \mathbf{R}_{M_L}^{M_r} \times \mathbf{P}_{M_r}^{M_r} \\ \mathbf{R}_{S_r}^{R_B} = \mathbf{R}_{M_r}^{R_B} \times \mathbf{R}_{M_L}^{M_r} \times \mathbf{R}_{S_L}^{M_L} \times \mathbf{R}_{S_r}^{S_L} \end{cases} \quad (18)$$

## 4 双臂无影灯系统的协同运动规划

双臂无影灯系统的运动规划包含轨迹规划和碰撞检测两个目的。轨迹规划是指根据协同照射任务的要求,计算出一条灯头初始位姿到目标位姿的最快路径,使机械臂平稳柔顺地达到目标位置<sup>[21]</sup>;碰撞检测则是对规划出的轨迹点进行检测,确保轨迹没有重叠部分,同时通过灯头间的距离来判断是否会发生碰撞<sup>[22]</sup>。

### 4.1 交叉聚焦照射任务的轨迹规划

交叉聚焦照射要求两个灯头能沿某一轴保持固定约束进行移动,使机械臂末端的移动轨迹与目标手术区域一致。令光斑中心位置的坐标系为  $\{F_o\}$ ,  $F_o(x_o, y_o, z_o)$  是其原点在全局坐标系中的坐标。光斑初始位置和目标位置  $F_i(x_i, y_i, z_i)$  形成一个向量:

$$\mathbf{V} = F_o - F_i \quad (19)$$

考虑手术室照明场景对光斑移动过程的平滑性

要求不高,因此采用多段直线轨迹,轨迹长度为:

$$\|V\| = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} \quad (20)$$

设光斑起始位置与目标位置中间有  $N$  个插补点,

那么第  $i$  ( $i \leq N$ ) 个插补点的坐标  $F_i(x_i, y_i, z_i)$  满足:

$$\begin{cases} x_i = x_s + i \cdot \frac{x_t - x_s}{N + 1} \\ y_i = y_s + i \cdot \frac{y_t - y_s}{N + 1} \\ z_i = z_s + i \cdot \frac{z_t - z_s}{N + 1} \end{cases} \quad (21)$$

$T_{F_0}^{M_i}$  表示光斑中心坐标系相对于主臂末端坐标

系的齐次变换矩阵,完成术前灯头对正后即可确定。通过坐标转换,将光斑移动轨迹规划点转换为主臂末端的插补点  $M_{Ti}$ :

$$M_{Ti} = (T_{F_0}^{M_i})^{-1} \times F_i = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

由机械臂逆运动学可求得移动过程中主臂末端的插补变换矩阵  $T_{M_i}^{R_a}$ ,再通过双臂末端的约束关系可求得从臂末端的插补变换矩阵  $T_{S_i}^{R_a}$ ,实现交叉照射中从臂末端的协作轨迹规划。

#### 4.2 主从补光照射任务的轨迹规划

在聚焦照射中,主灯头在手术区域正上方提供直射光线,副灯头在一定高度约束下绕光斑坐标系  $z$  轴进行圆弧运动,寻找角度进行补光。两灯头高度差和副灯头圆弧运动半径在术前对灯后即可确定,关键在于如何根据遮挡物位置求解圆弧上副灯的目标位置点与方向角,得到两灯头间齐次变换矩阵  $T_{S_i}^{M_i}$ 。

设光斑中心  $F_0(x_0, y_0, z_0)$ , 光斑焦点为点  $F'$ , 光斑期望直径为  $d$ , 灯头直径为  $D$ , 光斑距灯头的距离为  $L$ , 图7展示了主灯照射光路中遮挡物的投影原理,可算出光斑中心  $F_0$  距焦点  $F'$  距离  $H$  为:

$$H = \frac{L \cdot d}{D - d} \quad (23)$$

遮挡物上某点坐标  $P(x, y, z)$  在光斑平面上的投影  $P'(x', y', z')$  满足关系:

$$\begin{cases} x' = \frac{H \cdot x}{z} \\ y' = \frac{H \cdot y}{z} \\ z' = z_0 \end{cases} \quad (24)$$

当遮挡物  $P$  对手术区域光斑产生遮挡阴影时,投

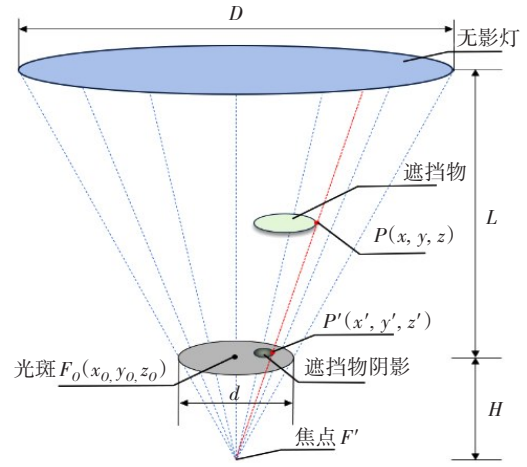


图7 遮挡物投影原理图

Figure 7 Schematic diagram of obstruction projection

影点  $P'$  满足下式:

$$(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2 \leq d^2 \quad (25)$$

聚焦照射任务开始时刻,主副灯头初始位置分别为  $M_L(x_M, y_M, z_M)$ 、 $S_L(x_S, y_S, z_S)$ , 副灯头保持在该高度的水平面下以  $O_c(x_0, y_0, z_s)$  为圆心,  $r$  为约束半径进行圆弧运动。将投影点  $P'$  垂直投影到副灯头水平面,可得阴影的映射点  $P''$  在全局坐标系下坐标为  $(x_p, y_p, z_s)$ , 取圆心  $O_c$  和  $P''$ , 得到向量:

$$V' = O_c - P'' \quad (26)$$

将该向量单位化后得到:

$$v' = \frac{V'}{\sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2 + (z_c - z_s)^2}} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (27)$$

沿该方向向量从圆心  $O_c$  坐标处平移距离  $r$ , 即可得到副灯圆弧上的目标点  $S_i$ :

$$S_i = O_c + r \cdot v' = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (28)$$

以点  $O_c$  为圆心, 副灯头初始位置  $S_L$  为起始点, 圆弧上  $S_i$  为目标点进行轨迹规划。在该平面内以  $O_c$  为原点,  $O_c S_L$  为  $x$  轴正方向建立坐标系  $\{O_c\}$ , 如图8所示。

坐标系  $\{O_c\}$  的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向向量分别为:

$$\begin{cases} \overline{X}_c = \overline{O_c S_L} = (x_x, y_x, z_x) \\ \overline{Y}_c = \overline{O_c S_L} \times \overline{O_c S_i} = (x_y, y_y, z_y) \\ \overline{Z}_c = \overline{X}_c \times \overline{Y}_c = (x_z, y_z, z_z) \end{cases} \quad (29)$$

其在系统基座系  $\{R_B\}$  的方向余弦为:



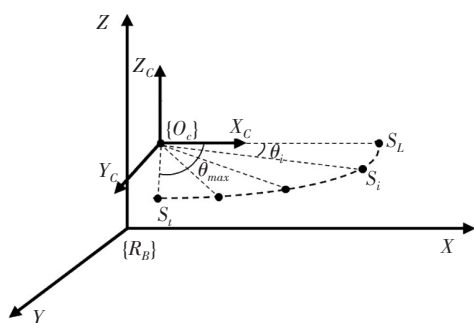


图8 聚焦照射插补点坐标求解  
Figure 8 Solving the coordinates of focused illumination interpolation points

$$\begin{cases} (\cos\alpha_x, \cos\beta_x, \cos\gamma_x) = \left( \frac{x_x}{|\overline{X_c}|}, \frac{y_x}{|\overline{Y_c}|}, \frac{z_x}{|\overline{Z_c}|} \right) \\ (\cos\alpha_y, \cos\beta_y, \cos\gamma_y) = \left( \frac{x_y}{|\overline{X_c}|}, \frac{y_y}{|\overline{Y_c}|}, \frac{z_y}{|\overline{Z_c}|} \right) \\ (\cos\alpha_z, \cos\beta_z, \cos\gamma_z) = \left( \frac{x_z}{|\overline{X_c}|}, \frac{y_z}{|\overline{Y_c}|}, \frac{z_z}{|\overline{Z_c}|} \right) \end{cases} \quad (30)$$

故坐标系 $\{O_c\}$ 下某点 $(x_c, y_c, z_c)$ 到全局坐标系的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_x}{|\overline{X_c}|} & \frac{x_y}{|\overline{Y_c}|} & \frac{x_z}{|\overline{Z_c}|} & x_o \\ \frac{y_x}{|\overline{X_c}|} & \frac{y_y}{|\overline{Y_c}|} & \frac{y_z}{|\overline{Z_c}|} & y_o \\ \frac{z_x}{|\overline{X_c}|} & \frac{z_y}{|\overline{Y_c}|} & \frac{z_z}{|\overline{Z_c}|} & z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

以 $O_c$ 为原点,  $O_cS_L$ 为极轴建立极坐标系, 设到达目标点的过程中极角从0变化到 $\theta_{\max}$ 且中间有 $N$ 个轨迹点, 则第 $i$ 个轨迹点在极坐标系下的极角为:

$$\theta_i = \frac{\theta_{\max}}{N+1} \times i \quad (32)$$

第 $i$ 个轨迹点在坐标系 $\{O_c\}$ 中的坐标可表示为:

$$\theta = \arccos \left( \frac{z_s - z_o}{\sqrt{(x_i - x')^2 + (y_i - y')^2 + (z_i - z')^2}} \right) \quad (33)$$

由式(31)可将轨迹点从极坐标转换到全局坐标系。令目标轨迹点 $S_i(x_i, y_i, z_i)$ 上灯头照射方向始终指向光斑平面内阴影位置 $P'(x', y', z')$ , 与空间垂直轴夹角为 $\theta$ 满足下式:

$$\theta = \arccos \left( \frac{z_s - z_o}{\sqrt{(x_i - x')^2 + (y_i - y')^2 + (z_i - z')^2}} \right) \quad (34)$$

主灯头末端齐次变换矩阵 $T_{M_r}^{R_B}$ 保持不变, 两灯头间的相对运动趋势矩阵 $T_{S_L}^{M_L}$ 可由规划点 $S_i$ 和目标方向角 $\theta$ 求出, 求出对应的从臂末端齐次变换矩阵 $T_{S_r}^{R_B}$ , 即可通过正运动学控制副灯头按规划圆弧轨迹移动。

### 4.3 双臂无影灯系统协同运动中的碰撞检测

术前对灯操作和交叉聚焦照射任务中两灯头同时运动, 属于动态碰撞检测问题; 主从补光照射任务中主灯头位姿保持不变, 属于静态碰撞检测<sup>[23]</sup>。由于灯头半径远大于机械臂连杆半径, 双臂无影灯系统的碰撞检测主要包含灯头与连杆之间的碰撞、两灯头之间的碰撞。灯头与连杆的碰撞可通过限制机械臂第五关节的角度进行检测, 两灯头间的碰撞则需要额外计算。为简化计算, 采用球体包围盒技术<sup>[24]</sup>, 定义了半径为 $R_M$ 、 $R_S$ 的球体将灯头包围, 如图9所示。

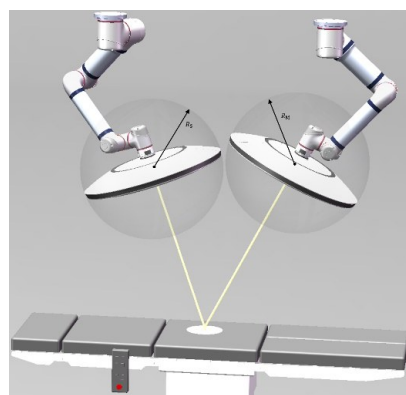


图9 灯头球体包围盒  
Figure 9 Lamp head sphere enclosure box

此时两个灯头均被简化为球体, 取灯头位置 $M_L(x_M, y_M, z_M)$ 、 $S_L(x_S, y_S, z_S)$ 为球心, 当轨迹点上两球心间的距离满足式(35)时, 则判断该点不会发生碰撞。

$$\sqrt{(x_M - x_S)^2 + (y_M - y_S)^2 + (z_M - z_S)^2} \geq R_M + R_S \quad (35)$$

为实现动态、静态两种检测, 本系统采用主从式控制方法<sup>[25]</sup>, 先规划出主臂的运动轨迹, 再根据双臂之间的协同运动约束机制推导出从臂的运动轨迹。利用简化球体的碰撞检测方法对主从臂的轨迹进行检测, 若轨迹中没有碰撞点, 则完成运动规划; 若检测到轨迹中有碰撞点, 可将主灯视为障碍物, 调整两灯头间的约束关系, 重新规划从臂的运动, 直至双臂之间的运动轨迹不出现碰撞点为止。

5 仿真分析

图1为本文设计的双臂无影灯系统三维图,按照表1给出的D-H参数在SolidWorks中设置各组件外形、材料和安装尺寸等参数。设无影灯系统基坐标系 $\{R_b\}$ 坐标为(0, 0, 300),主从臂基坐标系 $\{M_B\}$ 、 $\{S_B\}$ 坐标分别为(200, 0, 300)、(-200, 0, 300)。通过MATLAB编程,编写双臂协同运动、机器人运动学等API来仿真双臂在完成不同照射任务时的运动状态和灯头位姿。

5.1 交叉聚焦照射任务仿真分析

设灯头照射深度为1 000 mm,在初始位姿下两灯头形成初始光斑,其坐标为(0, 122, -1417),取目标光斑坐标(263.37, 122, -1417),双臂系统经运动规划后移动到目标点并形成新的光斑,如图10所示。

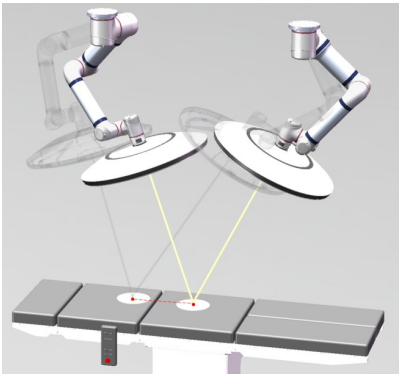


图10 交叉聚焦照射任务示意  
Figure 10 Schematic diagram of cross-focused illumination task

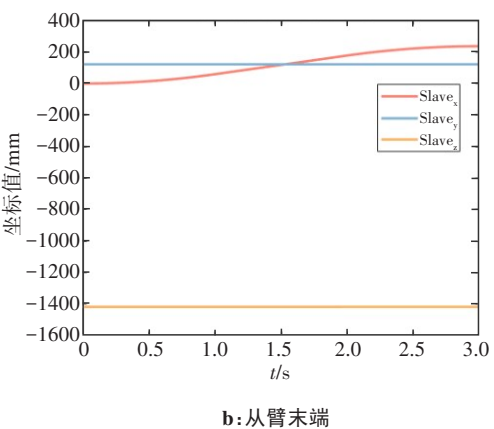
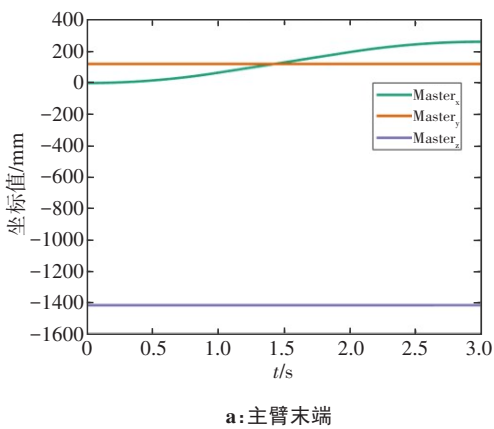


图11 交叉聚焦照射中双臂末端坐标变化曲线  
Figure 11 Curve of coordinate changes of dual-arm ends during cross-focused illumination

束机制和运动规划方法,并对双臂系统的协同运动和控制算法进行了仿真分析。研究结果表明:智能双臂无影灯系统能很好地满足传统无影灯的运动控

图11给出了运动过程中主从臂末端坐标的变化情况,末端轨迹在双臂协同约束机制下均为直线:两臂末端的 $z$ 坐标保持初始值不变, $x$ 坐标的变化趋势一致, $y$ 坐标的变化趋势也一致。图12给出了运动过程中主从臂各关节的角度变化情况。

5.2 主从补光照射任务仿真分析

主从补光照射下,设主灯坐标为(-165.97, 122, -451.19),副灯初始时刻坐标为(-165.97, 499.44, -451.19)。遮挡产生时,主灯保持初始位姿,副灯根据主灯和阴影位置计算出目标点位(-543.42, 122, -451.19),按圆弧轨迹移动到目标点进行补光,如图13所示。

图14给出了从臂末端坐标的变化情况,在约束机制下主臂末端保持不动,从臂运动轨迹为圆弧且 $z$ 坐标保持不变。图15给出了从机械臂各关节的角度变化情况,可以看出从臂在不断调整位姿使光束方向始终指向阴影位置。

根据仿真结果,智能双臂无影灯系统的协同运动控制算法有着良好的控制效果,主从臂各个关节的位移以及速度的变化都为连续且平稳的曲线,符合机器人运行的基本要求。

6 结语

针对传统手术无影灯的运动控制需求与操作缺点,提出了一种智能双臂无影灯系统的协同运动控制方案。通过分析交叉聚焦照射和主从补光照射两种临床光照场景,提出了相应的双臂协同运动的约

制需求,所提出的双臂协同运动控制算法有效,规划出的灯头轨迹无碰撞,机械臂各关节位置、速度曲线平滑无突变,加减速性能良好。



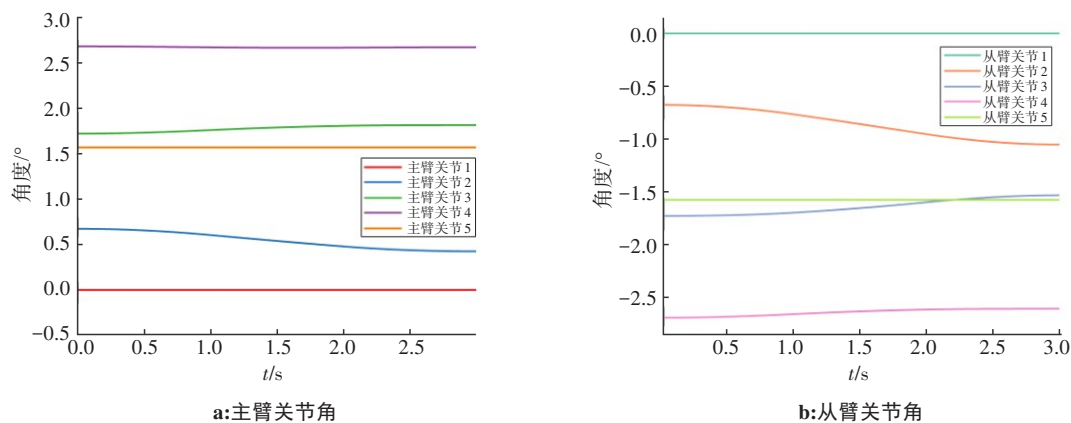


图12 交叉聚焦照射中双臂各关节角变化曲线  
Figure 12 Curves of dual-arm joint angle changes during cross-focused illumination

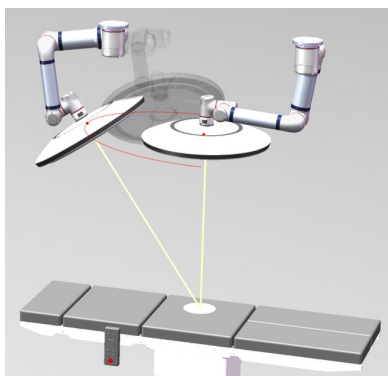


图13 主从补光照射任务示意  
Figure 13 Schematic diagram of master-slave supplementary illumination task

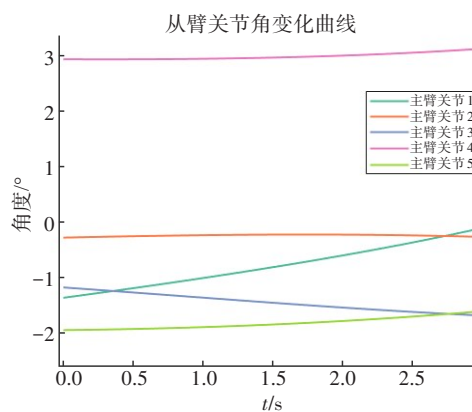


图15 主从补光照射中从臂各关节角变化曲线  
Figure 15 Curves of joint angle changes of the slave arm during master-slave supplementary illumination

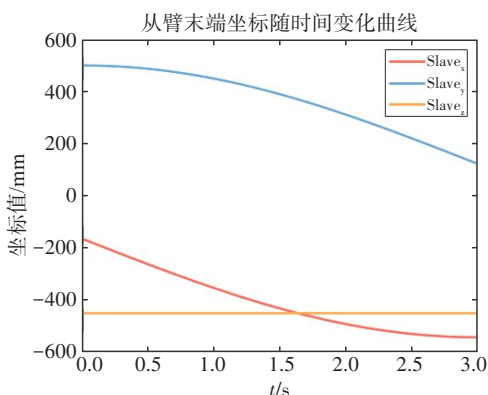


图14 主从补光照射中从臂末端坐标变化曲线  
Figure 14 Curves of coordinate changes of the slave arm end during master-slave supplementary illumination

智能双臂无影灯系统为双灯头无影灯的协同作业提供了一种创新的解决方案,极大减轻了医护人员在手术中的操作负担。后续将考虑结合无影灯的光学参数优化运动控制系统,并对手术中系统的人机交互问题展开进一步研究。

## 【参考文献】

- [1] 呼功崛. LED手术无影灯的研发[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. Hu GJ. Research and development of an LED operating shadowless lamp[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [2] Hartmann F, Schlaefer A. Feasibility of touch-less control of operating room lights[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2013, 8(2): 259-268.
- [3] IEC. Medical electrical equipment-part 2-41: particular requirements for the basic safety and essential performance of surgical luminaires and luminaires for diagnosis: IEC 60601-2-41:2021[S]. Geneva: IEC, 2021.
- [4] Joseph J, Divya DS. Hand gesture interface for smart operation theatre lighting[J]. Int J Eng Technol, 2018, 7(2): 20-23.
- [5] Sandoval J, Nouaille L, Poisson G, et al. Design process of a new lighting robotic arm for operating room[C]//Mechanism Design for Robotics. Cham: Springer International Publishing, 2019: 310-317.
- [6] Dietz A, Schröder S, Pösch A, et al. Contactless surgery light control based on 3D gesture recognition [C]//GCAI 2016. 2nd Global Conference on Artificial Intelligence. Stockport: EasyChair, 2016: 138-146.
- [7] 王欢. 基于立体视觉的LED手术无影灯自适应调光技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013. Wang H. Fundamental technology research on auto-adaptive dimming LED operation shadowless lamp based on stereo vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [8] 李乐乐. 基于模糊视觉处理的智能无影灯系统研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016. Li LL. The research of fuzzy intelligent system of shadowless lamp based on visual processing[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.

- [9] Sun X, Okamoto J, Masamune K, et al. Robotic technology in operating rooms: a review[J]. Curr Robot Rep, 2021, 2(3): 333-341.
- [10] Hayakawa S, Wan WW, Koyama K, et al. A dual-arm robot that autonomously lifts up and tumbles heavy plates using crane pulley blocks[J]. IEEE Trans Autom Sci Eng, 2022, 19(4): 3444-3458.
- [11] 江一鸣. 双臂机器人系统模型辨识及协同控制理论研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
Jiang YM. Study on model identification and cooperative control of dual-arm robot systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [12] 潘禹. 基于双目相机的场景内动态物体三维检测及追踪[D]. 天津: 天津大学, 2019.  
Pan Y. 3D detection and tracking of dynamic objects in a scene based on binocular camera[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [13] 蒋泽睿, 杨立军, 李俊, 等. 自动跟踪口腔手术灯的运动学分析与仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(12): 2864-2879.  
Jiang ZR, Yang LJ, Li J, et al. Kinematics analysis and simulation of automatically tracking dental surgery lamp[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(12): 2864-2879.
- [14] 吴启嵩. 面向手术器械分拣任务的双臂机器人协同控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
Wu QH. Research on coordinated control method of dual-arm robot for surgical instrument sorting tasks[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [15] 黄健. 基于双目视觉的手术器械定位系统研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.  
Huang J. The research on the positioning system of surgical instruments based on binocular vision [D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.
- [16] 从永正. 基于ROS的七自由度双臂协作机器人控制系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.  
Cong YZ. Research on control system of seven-degree-of-freedom dual-arm cooperative robot based on ROS[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [17] Niku SB. Introduction to robotics: analysis, control, applications[M]. 4th ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.
- [18] 林志峰. 双臂机器人协调运动规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
Lin ZF. Research on coordinated motion planning of dual manipulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [19] 侯敬岩. 五自由度机械手运动学分析与仿真研究[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(16): 28-29.  
Hou XY. Analysis of five-degree-of-freedom manipulator kinematics and simulation study[J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(16): 28-29.
- [20] Mooijweer R. The surgical lighting problem: 'manipulation problems with the surgical lighting system during surgical procedures[D]. Delft: Delft University of Technology, 2011.
- [21] Xue ZH, Zhang X, Liu JG. Trajectory planning of a dual-arm space robot for target capturing with minimizing base disturbance[J]. Adv Space Res, 2023, 72(6): 2091-2108.
- [22] Zhang CT, Mu CY, Wang Y, et al. Collision detection for six-DOF serial robots force/position hybrid control based on continuous friction model[J]. Meas Control, 2023, 56(3/4): 571-582.
- [23] Zhang CT, Mu CY, Wang Y, et al. Collision detection for six-DOF serial robots force/position hybrid control based on continuous friction model[J]. Meas Control, 2023, 56(3/4): 571-582.
- [24] 江亦涵, 王挺, 李亚伟, 等. 双七自由度臂防碰撞协同控制算法研究[J]. 高技术通讯, 2023, 33(7): 750-761.  
Jiang YH, Wang T, Li YW, et al. Research on the control system of cooperative work of double seven degrees of freedom arm robot[J]. Chinese High Technology Letters, 2023, 33(7): 750-761.
- [25] 庄照波. 双臂机器人协调运动规划研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.  
Zhuang ZB. Research on coordinated motion planning of dual-arm robot[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.

(编辑: 薛泽玲)