

1-13-2022

## Kinematics Analysis and Simulation of Automatically Tracking Dental Surgery Lamp

Zerui Jiang

*Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710043, China;*

Lijun Yang

*Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710043, China;*

Li Jun

*Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710043, China;*

Xiaolong Jiao

*Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710043, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Kinematics Analysis and Simulation of Automatically Tracking Dental Surgery Lamp

## Abstract

**Abstract:** In order to solve the problem that the oral surgical lamp cannot automatically adjust the irradiation posture of the surgical lamp according to the face direction and oral cavity position, a *six-degree-of-freedom automatic tracking visual manipulator solution is proposed. Coordinate conversion is achieved through binocular vision to obtain three-dimensional information of oral cavity position and face normal vector. The geometric method is introduced into the kinematics calculation, and the closed solution of the inverse kinematics is obtained.* The correctness is verified by the Matlab programming and the introduction of numerical values. Five-degree polynomial motion planning is performed on the manipulator, and the effect of trajectory control is analyzed. *The distance error is within 28.73 mm, and the direction deviation is within 1.369 7°.* After simulation, the solution can complete automatic positioning, tracking, and alignment as expected, providing a theoretical basis for automatically tracking oral surgical lights.

## Keywords

robotic arm, dental surgery lamp, binocular vision, robot kinematics, trajectory planning, simulation

## Authors

Zerui Jiang, Lijun Yang, Li Jun, Xiaolong Jiao, and Zheng Hang

## Recommended Citation

Jiang Zerui, Yang Lijun, Li Jun, Jiao Xiaolong, Zheng Hang. Kinematics Analysis and Simulation of Automatically Tracking Dental Surgery Lamp[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(12): 2864-2879.

# 自动跟踪口腔手术灯的运动学分析与仿真

蒋泽睿, 杨立军, 李俊, 焦晓龙, 郑航

(陕西科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 为解决口腔手术灯无法根据人脸方向和口腔位置自动调整手术灯照射姿态的问题, 提出一种六自由度自动跟踪视觉机械臂的方案。通过双目视觉实现坐标转换, 获得口腔位置和人脸面部法向量的三维信息。在运动学计算中引入几何法, 得到了逆运动学的封闭解, 通过 Matlab 编程并带入数值验证了其正确性。对机械臂进行了五次多项式运动规划, 分析了轨迹控制效果, 距离误差在 28.73 mm 内, 方向偏移在 1.369° 内。该方案通过仿真实验后可以完成自动定位、跟踪、对正, 为自动跟踪口腔手术灯提供了理论基础。

**关键词:** 机械臂; 口腔手术灯; 双目视觉; 机器人运动学; 轨迹规划; 仿真

中图分类号: TH39; TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 12-2864-16

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0457

## Kinematics Analysis and Simulation of Automatically Tracking Dental Surgery Lamp

Jiang Zerui, Yang Lijun, Li Jun, Jiao Xiaolong, Zheng Hang

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the oral surgical lamp cannot automatically adjust the irradiation posture of the surgical lamp according to the face direction and oral cavity position, a six-degree-of-freedom automatic tracking visual manipulator solution is proposed. Coordinate conversion is achieved through binocular vision to obtain three-dimensional information of oral cavity position and face normal vector. The geometric method is introduced into the kinematics calculation, and the closed solution of the inverse kinematics is obtained. The correctness is verified by the Matlab programming and the introduction of numerical values. Five-degree polynomial motion planning is performed on the manipulator, and the effect of trajectory control is analyzed. The distance error is within 28.73 mm, and the direction deviation is within 1.369°. After simulation, the solution can complete automatic positioning, tracking, and alignment as expected, providing a theoretical basis for automatically tracking oral surgical lights.

**Keywords:** robotic arm; dental surgery lamp; binocular vision; robot kinematics; trajectory planning; simulation

## 引言

口腔灯, 是一种为口腔科诊断和治疗提供照明的常用设备, 它主要由灯头和灯臂组成。近年来, 口腔灯<sup>[1]</sup>凭借其体积小、节能和环保等方面的优势, 在牙科领域中得到越来越广泛的应用,

能够为牙科医生及其助手提供能使他们工作时最合适视觉放松感和舒适度。由于室内光照不足, 所以在牙科手术治疗的过程中一般都配备有口腔灯, 因此研发新技术来应用到口腔灯上一直是国内外的研究热点。市场上的牙科口腔灯存在

收稿日期: 2020-07-08 修回日期: 2020-08-24

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划(2020KJRC0008)

第一作者: 蒋泽睿(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为机器人运动学。E-mail: kerfg@qq.com

的重要缺陷, 在治疗过程中, 由于患者口腔内不同区域的照明需要, 医生需要反复转动口腔灯, 来使得照明区域符合治疗要求。不断地调整手术灯, 会使医生在治疗过程中分心分神, 目前市场缺乏自动化程度高的视觉自动跟踪口腔手术灯<sup>[2]</sup>。医生在调整口腔灯照射方向时, 手动的矫正手术灯照射方向存在着不稳定性, 偏移的光线容易刺伤患者眼睛, 所以手术灯光需要准确地射向口腔。并且在照明过程中需要对口腔手术灯与口腔之间进行距离和方向的把控, 手动的调整对光线的方向控制不够精细, 会导致光线的分配不均, 口腔内会存在许多光源所不能达到的角落, 给医护人员提供的手术视野有限。为了解决以上系列问题, 设计了一种视觉<sup>[3]</sup>自动跟踪照明口腔手术灯<sup>[4]</sup>, 手术灯灯臂为六自由度机械臂<sup>[5]</sup>, 采用 5 次插值多项式轨迹规划。它能够协助医生自动地将灯光对准口腔, 调整适当的距离, 并且能够准确的将灯光正对口腔照射, 减少照射盲区, 实现自动定位、跟踪、对正的功能<sup>[6]</sup>。

## 1 双目视觉自动跟踪口腔手术灯

根据牙科手术灯的特点, 选用由 6 个运动关节组成的多自由度机械手, 双目视觉自动跟踪口腔手术灯的机械结构是属于串联开链式结构。该基于电机传动与双摄像头结合的口腔手术灯机械臂简易 SolidWorks 结构模型如图 1 所示。图 1 中: 1 为手术灯基座, 2 为旋臂, 3 为平衡臂壳体, 4 为平衡臂弹簧轴, 5 为灯头吊臂, 6 为灯头腕关节, 7 为灯盘固定点, 8 为双目视觉摄像头。

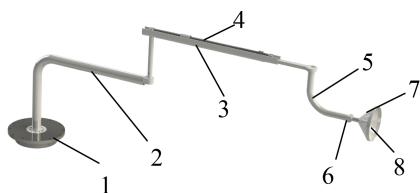


图 1 简易结构模型图

Fig. 1 Simple structure model diagram

由图 1 可知, 双目视觉自对正手术灯机械臂由旋臂、平衡臂、灯头吊臂、灯头和双目摄像头 5 部分组成, 其工作原理设计为: 旋臂通过基座与地面相连, 平衡臂通过平衡杆与旋臂的另一端相连, 灯头通过灯头吊臂与平衡臂的另一端相连, 双目摄像头则固定在灯头的正中心, 6 个活动关节均为旋转关节。当双目视觉自对正手术灯接收到自动跟踪命令运动到目标位置时, 机械臂就会按规划的路径通过旋臂、平衡臂及灯头吊臂的旋转将末端灯头输送到指定的位置, 然后通过灯头腕关节的旋转调整末端灯头的姿态, 完成跟踪人脸的要求。

人脸特征位置信息属于三维特征, 不能通过单目摄像头采集图像信息获得, 需要借助于双目视觉的二维坐标信息到三维坐标信息转换技术。双目视觉自动对正口腔手术灯可以通过 2 个摄像头采集人脸的图像, 提取双眼和口腔的特征, 对 3 个特征定位, 得到 3 个独立目标的像素坐标, 后将左目和右目摄像头中的相同特征通过双目视觉原理解算出它们相对于灯盘中心的三维相对坐标, 流程如图 2 所示。

## 2 双目视觉自动对正系统设计

为了实现口腔手术灯的自主化对正口腔工作, 使用了自动化控制系统, 通过对人脸图像采集和处理, 定位人脸关键特征点坐标。所谓关键特征点, 即人脸中明显和不易与其他特征混淆, 并且最能够体现人脸三维方向信息的特征, 综合以上几点选用双眼为 2 个辅助特征点, 双眼之间和它们与口腔之间都有着适当的间距, 因而对人脸方向信息计算结果误差影响较小。口腔手术灯是跟踪口腔照射, 所以第 3 个特征点选用口腔中心。

### 2.1 Dlib 人脸检测

眼部和嘴部特征提取使用的是 Dlib 库<sup>[7]</sup>提供的人脸 68 点标记方法, Dlib 是具有预先训练模型的面部特征检测器, 它用于估计 68 个坐标 $(x, y)$ 的位置, 如图 3 所示。这些点是从使用 iBUG300-W

数据集的预训练模型中识别的。通过数据集训练好的模型(shape\_predictor\_68\_face\_landmarks.dat)快速地实现精确的人脸特征定位。其中左眼为点 37~42, 右眼为点 43~48, 嘴部为点 49~68。将左眼 37~42

的像素坐标取均值获得左眼中心坐标, 右眼同理。嘴部取 63, 67, 61 和 65 点的均值获得口腔中心坐标。左摄像头与右摄像头分别执行上述流程获得各自的人脸特征坐标, 供后续双目视觉的计算使用。

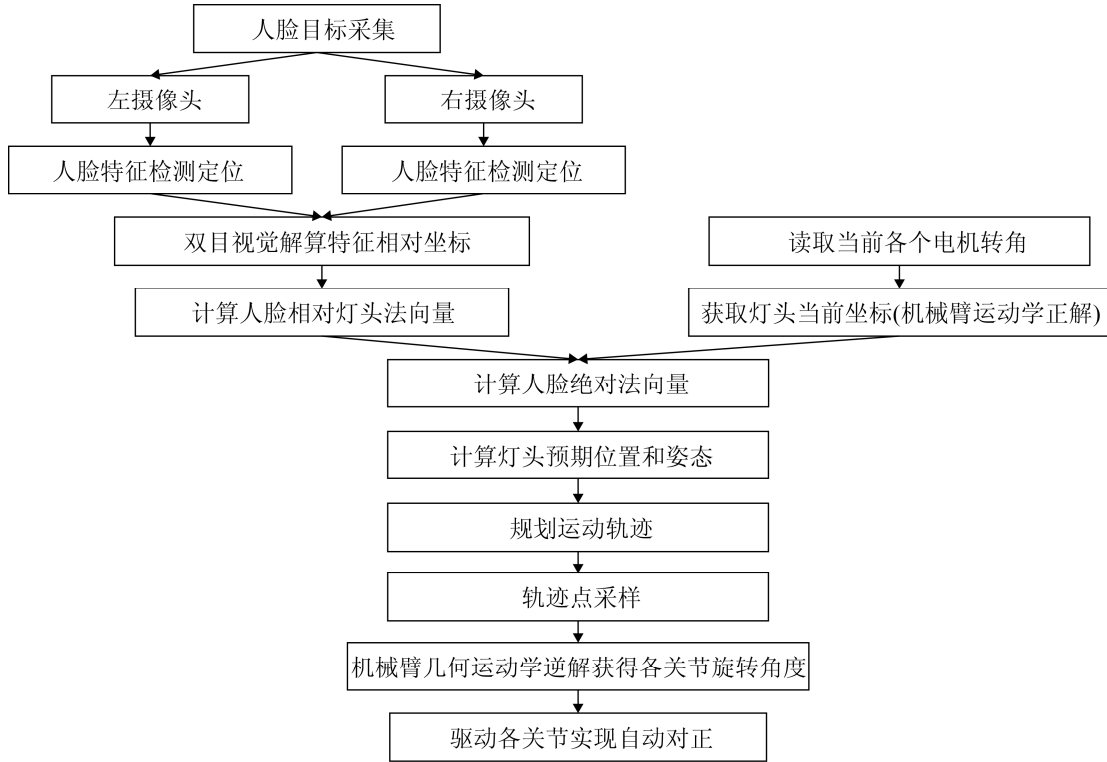


图 2 对正口腔流程图  
Fig. 2 Aiming at the mouth chart

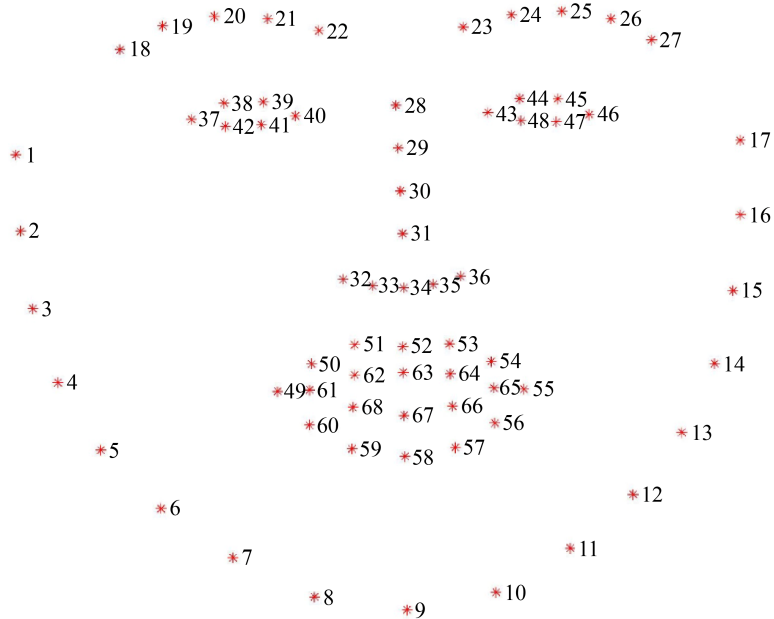


图 3 Dlib68 点坐标图  
Fig. 3 Dlib68 point coordinate diagram

## 2.2 双目视觉系统

本双目视觉系统<sup>[8]</sup>三维定位系统, 主要由双目摄像机、灯盘、灯体等组成, 机构简图如图 4 所示。为排除手术灯的强光对人脸检测的影响, 双目视觉系统首先要对人脸表面的亮度进行检测, 通过反馈的亮度值进行适当补光, 减少人脸检测误差的影响; 其次基于人脸 3 个关键特征点约束, 采用向量

叉积原理获得人脸平面在三维空间法向量。

双摄像头固定在灯腕关节的末端(坐标系 7), 通过两个摄像头在不同位置采集到的图像, 同一个面部特征点在双目摄像头中形成的图像会有视觉误差, 通过这视觉误差进行几何解算就可以得到它的三维坐标信息。双目视觉示意图如图 5 所示。

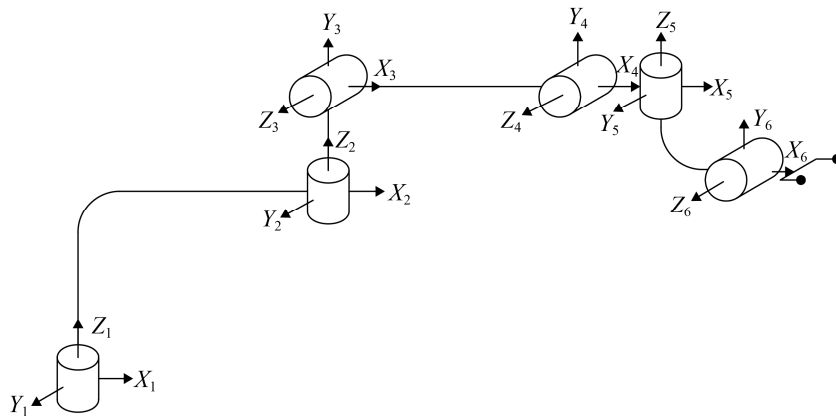


图 4 机构简图

Fig. 4 Schematic diagram

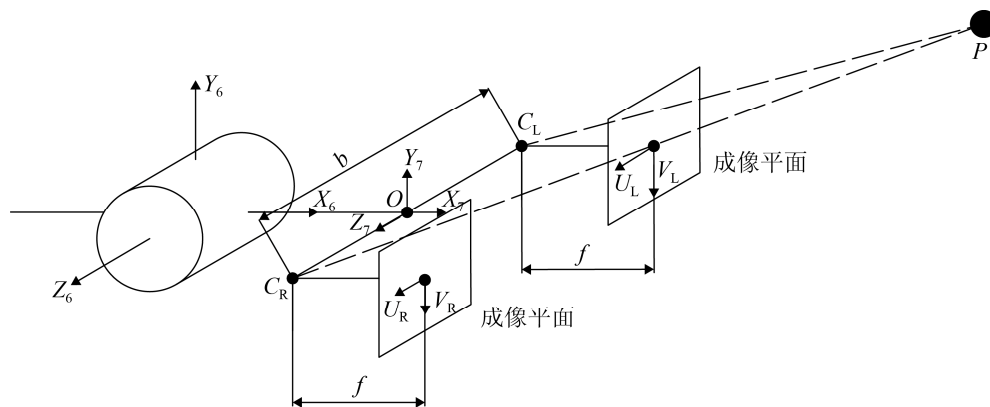


图 5 双目视觉示意图

Fig. 5 Schematic diagram of binocular vision

从图 5 可以得到: 双目视觉基准为坐标系 7, 坐标系中心为点  $O$ , 双目摄像头之间的间距为  $b$ ,  $C_L$  和  $C_R$  分别为左摄像头、右摄像头的光心位置,  $f$  为摄像头焦距,  $(U_L, V_L)$ 、 $(U_R, V_R)$  为特征点  $P$  分别在左摄像头、右摄像头的成像平面上得到的像素横纵坐标, 2 个像平面成像坐标系相互平行, 2 个光心到基准坐标系的距离相等为  $b/2$ 。

在解算  $P$  点三维坐标之前, 需要将像素坐标转换为距离坐标, 由坐标转换公式可知:

$$u \cdot \text{PixelSize} = z \quad (1)$$

$$v \cdot (-\text{PixelSize}) = y \quad (2)$$

$\text{Pixel Size}$  是相机固有参数名称为像素尺寸, 该参数表示的是在图片中每一个像素颗粒对应实际中的大小数值, 通过它可以像素坐标转换为分

别基于原点  $C_L, C_R$  下  $(Z_L, Y_L), (Z_R, Y_R)$  2 个实际距离坐标。 $P$  点的三维坐标解算分为 2 个步骤, 首先在  $OXZ$  平面上将  $P$  点在  $X$  轴上的位置信息求出来, 平面  $OXZ1$  如图 6 所示, 其中  $a, h$  为未知量。

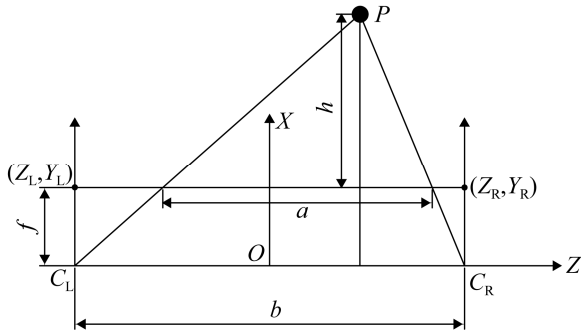


图 6 OXZ1 平面图  
Fig. 6 OXZ1 plan view

$$a = b + Z_R - Z_L \quad (3)$$

$P$  点  $X$  轴坐标为

$$x = h + f \quad (4)$$

根据三角形相似定理可知:

$$\frac{a}{b} = \frac{h}{h + f} \quad (5)$$

联合式(3)~(5)可得

$$x = \frac{b \cdot f + Z_R \cdot f - Z_L \cdot f}{Z_L - Z_R} \quad (6)$$

在  $OXZ$  平面上将  $P$  点在  $Z$  轴上的位置信息求出来, 平面  $OXZ2$  如图 7 所示。

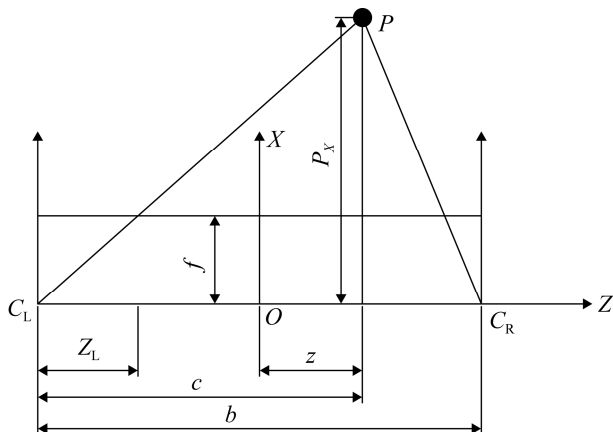


图 7 OXZ2 平面图  
Fig. 7 OXZ2 plan view

$P$  点  $Z$  轴坐标为

$$z = c - \frac{b}{2} \quad (7)$$

根据三角形相似定理可知:

$$\frac{f}{Z_L} = \frac{X}{c} \quad (8)$$

联合式(6), (7)和(8)可得

$$z = \frac{Z_L \cdot b \cdot f + Z_L \cdot Z_R \cdot f - Z_L^2 \cdot f}{Z_L \cdot f - Z_R \cdot f} - \frac{b}{2} \quad (9)$$

在  $OXY$  平面上将  $P$  点在  $Z$  轴上的位置信息求出来, 平面  $OXY$  如图 8 所示。

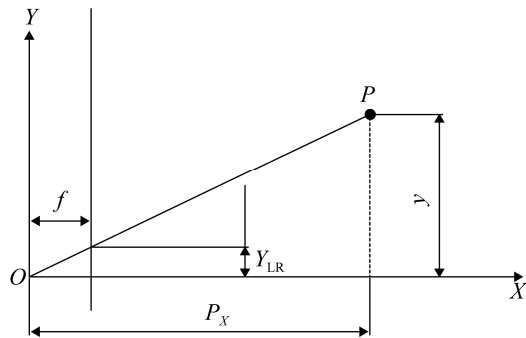


图 8 OXY 平面图  
Fig. 8 OXY plan view

2 个像平面相互平行, 所以  $Y_L$  和  $Y_R$  是相等的, 式中用  $Y_{LR}$  来表示。根据三角形相似定理可知:

$$\frac{Y_{LR}}{f} = \frac{y}{x} \quad (10)$$

联合式(6)和(10)可得

$$y = \frac{b \cdot Y_{LR} + Z_R \cdot Y_{LR} - Z_L \cdot Y_{LR}}{Z_L - Z_R} \quad (11)$$

通过以上双目视觉解算后可以获得左右眼和口腔的中心坐标, 如图 9 人脸法向量。从图中可以看出,  $R_E(X_{R_E}, Y_{R_E}, Z_{R_E})$ ,  $L_E(X_{L_E}, Y_{L_E}, Z_{L_E})$ ,  $M(X_M, Y_M, Z_M)$  分别为右眼、左眼和口腔中心点坐标,  $N(X_N, Y_N, Z_N)$  为人脸法向量。

$$L_E - M = \mathbf{ML}_E \quad (12)$$

$$R_E - M = \mathbf{MR}_E \quad (13)$$

根据向量叉积原理, 右手定则获得人脸法向量  $N_O$  为

$$\mathbf{ML}_E \cdot \mathbf{MR}_E = N_O = \begin{bmatrix} N_{O_x} \\ N_{O_y} \\ N_{O_z} \end{bmatrix} \quad (14)$$

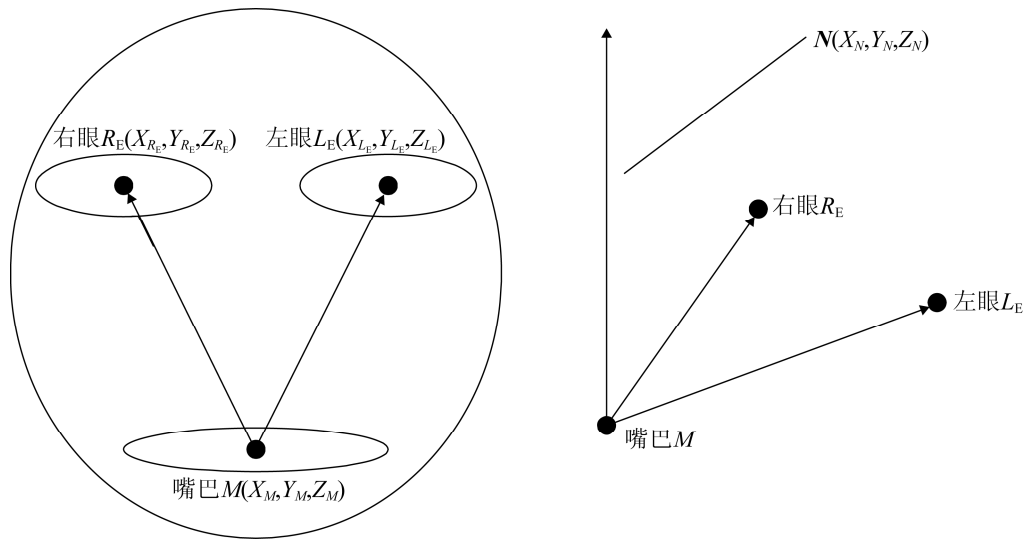


图 9 人脸法向量  
Fig. 9 Face normal vector

将  $N$  向量单位化后得到:

$$N = \frac{N_o}{\sqrt{X_{N_o}^2 + Y_{N_o}^2 + Z_{N_o}^2}} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

当前获得的法向量是以坐标系 7 中心为基准的相对坐标, 在计算手术灯末端预期坐标之前需要进行相对坐标到绝对坐标的转化, 中间包含 7 个坐标系的旋转与平移, 这里就要借助到机器人正运动学。

### 3 运动学分析

#### 3.1 机械臂正运动学

机器人正运动学<sup>[9]</sup>是通过矩阵来描述末端在笛卡尔空间下的坐标转换, 是相对坐标到绝对坐标转换的基础。通过连杆坐标系通常建立方法, 机构简图与连杆参数信息如图 10 所示, 建立了标准 D-H 参数如表 1 所示,  $d_1=452.57$  mm,  $a_1=610$  mm,  $d_2=251.5$  mm,  $a_3=600$  mm,  $a_4=200$  mm,  $d_5=-200$  mm,  $a_5=200$  mm,  $a_6=80$  mm。

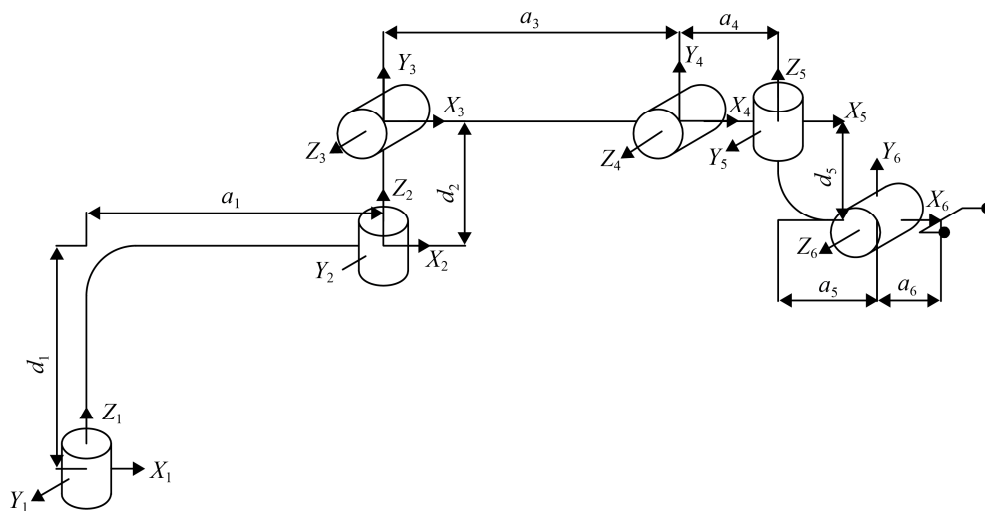


图 10 机构简图  
Fig. 10 Schematic diagram of the organization



表 1 机械臂 D-H 参数表  
Tab. 1 Robot arm D-H parameter table

连杆 $i$	关节角 $\theta_i/(\circ)$	$d_i/\text{mm}$	$a_i/\text{mm}$	$\alpha_i/(\circ)$
1	$\theta_1$	$d_1$	$a_1$	0
2	$\theta_2$	$d_2$	0	$\pi/2$
3	$\theta_3$	0	$a_3$	0
4	$\theta_4$	0	$a_4$	$-\pi/2$
5	$\theta_5$	$d_5$	$a_5$	$\pi/2$
6	$\theta_6$	0	$a_6$	0

通过机械臂相邻的 2 个坐标系之间的齐次变换矩阵为

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  ${}^{i-1}\mathbf{T}_i$  为  $i$  坐标系在  $i-1$  坐标系下描述的旋转位移矩阵, 将表 1 中 D-H 参数带入  ${}^{i-1}\mathbf{T}_i$  矩阵中可以获得各个相邻坐标系之间的变换关系, 可以以串联的方式将末端的位姿、坐标相对信息转换为绝对坐标系(坐标系 1)下的信息。机器人正运动学方程为

$${}^1\mathbf{T}_7 = {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{T}_4 {}^4\mathbf{T}_5 {}^5\mathbf{T}_6 {}^6\mathbf{T}_7 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$[n_x, n_y, n_z]^T, [o_x, o_y, o_z]^T, [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]^T$  又称为旋转矩阵, 用  ${}^1\mathbf{R}$  来表示,  $[P_x, P_y, P_z]^T$  为绝对坐标系下位置信息。然后对口腔和人脸法向量进行相对到绝对的坐标和位姿的转换。

$${}^1\mathbf{T}_7 \cdot \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{n} = {}^1\mathbf{R} \cdot \mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \mathbf{m} = \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(18)~(19)中:  $\mathbf{m}$  为人脸检测获得的口腔绝对坐标,  $\mathbf{n}$  为绝对坐标系下的人脸法向量。

在机器人逆运动学之前, 按照口腔自动对正的要求, 灯头需要正对人脸, 灯光射向口腔, 并且与人脸保证 50 cm 的距离, 此距离用  $d$  来表示。根据以上条件将  $\mathbf{m}$  点在  $\mathbf{n}$  方向上平移 50 cm 的距离可以得到坐标系 7 的预期位置。由于手术灯垂直照射人脸, 因此手术的末端  $X$  轴在绝对坐标系下方向恰好就是人脸平面法向量的反向。

$$\text{Pos7} = \mathbf{m} + d \cdot \mathbf{n} = [X_{P_7} \quad Y_{P_7} \quad Z_{P_7}] \quad (20)$$

$$\text{Pos7} = -\mathbf{n} = \begin{bmatrix} P_{7x} \\ P_{7y} \\ P_{7z} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(20)~(21)中:  $\text{Pos7}$  表示手术灯末端坐标系 7 在口腔对自动对正过程中预期达到的目标点,  $\text{Pos7}$  为手术灯末端  $X$  轴预期方向。以上结论为双目视觉手术灯自动对正的关键信息, 为后续轨迹规划与逆运动学解析提供了计算条件。

### 3.2 基于几何法的机械臂逆运动学计算与验证

为了在运动空间中将轨迹规划得出的预期位姿信息转换到关节空间中的角度值进行实时控制, 机械臂逆运动学的求解非常重要。双目视觉跟踪手术灯逆运动学求解采用几何解算法<sup>[10-12]</sup>, 通过投影原理, 将手术灯机械臂预期形态投影二维平面上。

#### 3.2.1 关节角求解

第 1 步: 由于平衡臂是一用平行四边形结构, 2 个竖杆始终保持相互平行且与地面垂直, 所以灯头吊臂始终保持与地面平衡的关系, 从上可以得知能够控制灯头俯仰角度的只有第 6 关节灯碗关节的转动角度。因而逆运动学从关节 6 的角度开始计算,  $\theta_6$  几何图如图 11 所示。

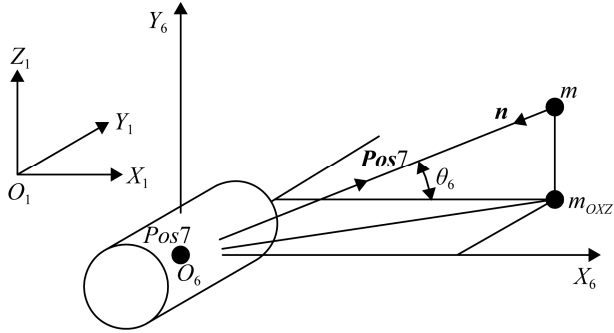


图 11  $\theta_6$  几何图  
Fig. 11  $\theta_6$  geometry

图 11 中,  $O_1$  坐标系为基坐标系,  $M_{OXZ}$  为  $M$  点在  $OXY$  平面上的投影, 从图中可以看出, 当  $OXY$  平面绕  $Y$  轴旋转至与  $M_{OXZ}$  平面重合时, 关节 6 的转角为

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{P_{7z}}{\sqrt{(P_{7x})^2 + (P_{7y})^2}}\right) \quad (22)$$

第 2 步: 在只考虑末端预期到达点  $Z$  轴坐标的情况下, 整个模型可以简化为各个转角为零并且投影在  $OXZ$  平面上的二维图,  $\theta_3$  几何图如图 12 所示, 其中  $d_x, d_6$  分别为平衡臂和杆件 6 在  $Z$  轴上投影的距离。

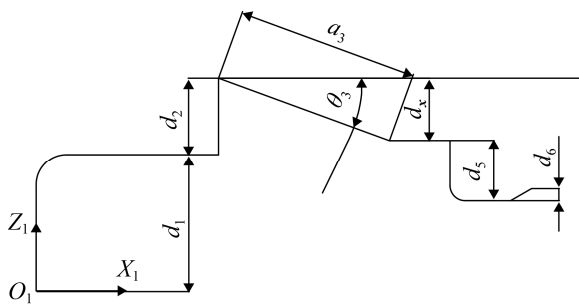


图 12  $\theta_3$  几何图  
Fig. 12  $\theta_3$  geometry

由此可知, 影响手术灯末端  $Z$  轴坐标的因素为  $\theta_3$  和  $\theta_6$  2 个角度, 可以得出:

$$Z_{P_7} = d_1 + d_2 + d_x - d_5 + d_6 \quad (23)$$

$$d_x = a_3 \cdot \sin \theta_3 \quad (24)$$

$$d_6 = a_6 \cdot \sin \theta_6 \quad (25)$$

联合式(22)~(25)可得:

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{Z_{P_7} - d_1 - d_2 + d_5 - a_6 \cdot \sin(\arctan(\frac{P_{7z}}{\sqrt{(P_{7x})^2 + (P_{7y})^2}}))}{a_3}\right) \quad (26)$$

根据平衡臂的结构可知,  $\theta_4 = -\theta_3$ 。

第 3 步: 在只考虑  $OXY$  平面上的变化情况下, 将整个模型简化为投影在  $OXZ$  平面上的二维图, 在此之前需要对关节 5 的三维坐标进行求解。Pos5 三维坐标的求解是将 Pos7 在  $n$  方向上平移  $a_6$  距离得到 Pos6 的三维坐标, 然后将 Pos6 在  $n$  的  $Z$  轴分量等于零的向量上平移  $a_5$  距离, 再在  $Z$  轴方向上平移  $d_6$  即可。

如图 13 所示,  $D$  为 Pos5 到  $O_1$  坐标中心的距离,  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为由  $a_1, a_x, D$  组成三角形的 3 个角度, 根据几何关系可以得出:

$$D = \sqrt{X_{P_5}^2 + Y_{P_5}^2} \quad (27)$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - (\cot \frac{X_{P_5}}{Y_{P_5}} - \alpha) \quad (28)$$

$$a_x = a_3 \cdot \cos \theta_3 \quad (29)$$

根据余弦定理可知:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{a_1^2 + D^2 - (a_x + a_4)^2}{2a_1D}\right) \quad (30)$$

联合式(27)~(30)可得

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \left(\arctan \frac{X_{P_5}}{Y_{P_5}} - \arcsin\left(\frac{a_1^2 + X_{P_5}^2 + Y_{P_5}^2 - (a_3 \times \cos \theta_3 + a_4)^2}{2a_1\sqrt{X_{P_5}^2 + Y_{P_5}^2}}\right)\right) \quad (31)$$

根据坐标系 2 处几何关系可以得出:

$$\theta_2 = -\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \quad (32)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{a_1^2 + (a_x + a_4)^2 - X_{P_5}^2 - Y_{P_5}^2}{2a_1(a_x + a_4)}\right) \quad (33)$$

联合式(32)和(33)可得

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{a_1^2 + (a_x + a_4)^2 - X_{P_5}^2 - Y_{P_5}^2}{2a_1(a_x + a_4)}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (34)$$

如图 14 所示, 角度  $a, b$  为未知量, 根据三角公式可知:

$$a = \arctan \frac{X_{P_5}}{Y_{P_5}} \quad (35)$$

$$b = \arctan \frac{n_x}{n_y} \quad (36)$$

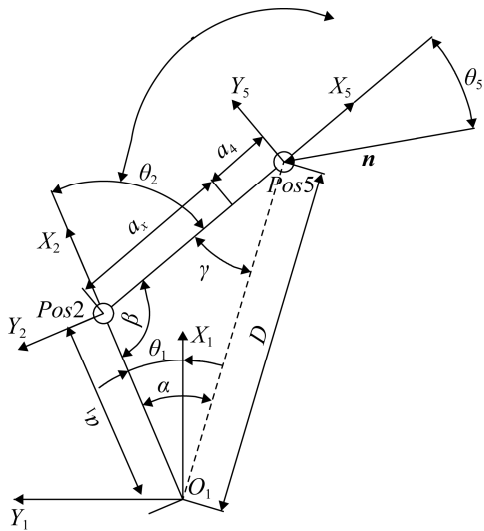


图 13  $\theta_1, \theta_2$  几何图  
Fig. 13  $\theta_1, \theta_2$  geometry

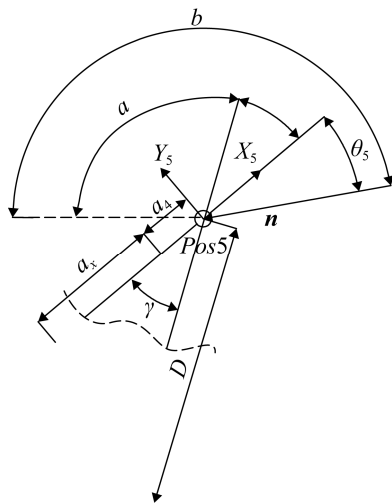


图 14  $\theta_5$  几何图  
Fig. 14  $\theta_5$  geometry

根据余弦定理可知:

$$\gamma = \arctan \left( \frac{D^2 + (a_x + a_4)^2 - a_1^2}{2(a_x + a_4)D} \right) \quad (37)$$

根据顺时针转动为负向与几何关系可知:

$$\theta_5 = \gamma + a - b \quad (38)$$

联合式(27), (35)~(38)得到:

$$\theta_5 = \arcsin \left( \frac{X_{P_5}^2 + Y_{P_5}^2 + (a_3 \cdot \cos \theta_3 + a_4)^2 - a_1^2}{2(a_3 \cdot \cos \theta_3 + a_4) \sqrt{X_{P_5}^2 + Y_{P_5}^2}} \right) + \arcsin \frac{X_{P_5}}{Y_{P_5}} - \arcsin \frac{n_x}{n_y} \quad (39)$$

### 3.2.2 Matlab 数值验证与代码

通过 Matlab 对以上逆运动学进行验证, 设预期末端坐标  $P_7 = (1300, 321, 504)$ , 人脸面部法向量  $n = (-1, 0.3, 0.4)$ , 将末端的位姿信息代入 Matlab 逆运动学程序中得到 6 个关节角弧度值:

$$\theta = (1.1435, -1.3390, 0.0476, -0.0476, -0.0960, -0.3659) \quad (40)$$

将 6 个弧度值代入正运动学方程得到

$$T = {}_2T_3 {}_3T_4 {}_4T_5 {}_5T_6 {}_6T_7 T = \begin{bmatrix} 0.8944 & 0.3427 & -0.2873 & 1300.0 \\ -0.2683 & -0.1028 & -0.9578 & 321.0 \\ -0.3578 & 0.9338 & 0 & 504.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

旋转位移矩阵中  $[P_x \ P_y \ P_z]^T$  为  $[1300.0 \ 321.0 \ 504.0]^T$ , 与预设点  $P_7$  完全一致。

对末端坐标系 7 下  $x$  轴的空间姿态验证, 由于口腔手灯对正人脸目标是将灯头对向人脸正方向, 所以人脸面部法向量在坐标系 7 下描述应当接近  $x$  轴的负方向。

即可设置一个单位向量  $X = [-1 \ 0 \ 0]^T$ , 右乘旋转矩阵  $R$ , 如式(42)所示:

$$n = {}_7R \cdot X = \begin{bmatrix} -0.8944 \\ 0.2683 \\ 0.3578 \end{bmatrix} \quad (42)$$

将预期向量  $n$  与其计算数据进行点积得到  $X, Y, Z$  方向上 3 个分量均等于 1.118 03, 说明 2 个向量完全一致, 说明几何逆运动学结算正确, 得到封闭解<sup>[13]</sup>。

## 4 双目视觉自动跟踪手术灯轨迹规划

### 4.1 寻找人脸

Dlib 对人脸检测的准确率做不到 100%, 在自动对正的过程中有可能会位置检测错误。由于选用  $100^\circ$  视场角的双目摄像头, 视角范围有限, 双目视觉手术灯在启动的时候寻找人脸位置, 会出现人脸不在摄像头的检测范围内的情况。针对这些问题, 采用调整摄像头主动搜索的方法: 首先将灯头腕关节复位在正中间, 整个过程中保持三维坐标不变; 复位后在基坐标系  $X$  轴正方向上的视角上, 在左、中、右 3 个方位上搜索人脸。当停留在任一个方位时, 调整灯头腕关节的角度, 达到上、中、下 3 个位置。左右和上下视觉范围均覆盖  $180^\circ$ ,  $3 \times 3$  共 9 个方位, 在每一个方位中寻找人脸的位置, 搜索范围覆盖了相当于将  $OYZ$  平面平移到灯头位置, 沿  $X$  轴正方向上的大部分空间, 患者只需面朝双目视觉摄像头即可。

选用视场角  $100^\circ$  无畸变摄像头在  $OXY$  平面下分析, 阴影面积为摄像头照射范围, 复位点需在正中间即始终位于  $X$  轴上。选取复位点的  $X$  轴位置即在左中右 3 个方位下找到关节 1 上  $R_1$  点距离关节 6 上  $R_6$  点之间最小距离的最大值, 极限位置在旋臂连杆一与  $Y$  轴重合时, 如图 15~17。

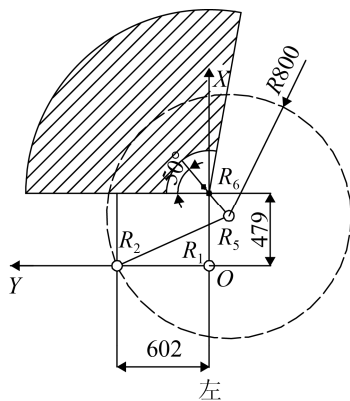


图 15 左视角  
Fig. 15 Left view

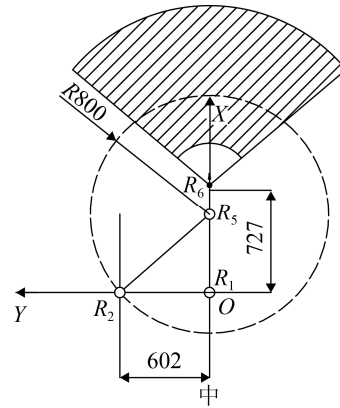


图 16 中视角  
Fig. 16 Medium view

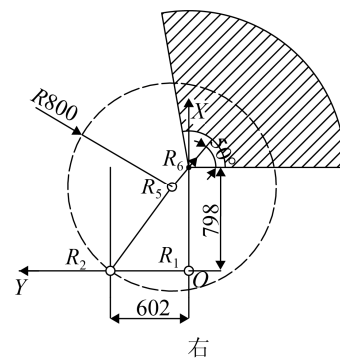


图 17 右视角  
Fig. 17 Right view

从图 15~17 中可以得知左、中、右视角在  $X$  轴上的极限距离为 479 mm, 727 mm, 798 mm, 选取最大值 798 mm。Y 轴分量为 0, Z 轴分量为平衡臂角度为  $0^\circ$  时手术灯臂的高度 505 mm。则灯头腕关节复位坐标为 (798, 0, 505)。得到关节 6 三维坐标后, 如图 18 计算 9 个位姿。在 9 个方向中进行人脸检测, 每 2 个位姿之间重叠视野范围是  $60^\circ$ , 很大程度上减少了 3 个面部特征检测不完整的情况。

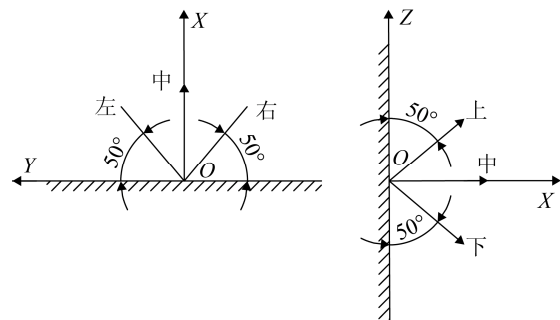


图 18 方位图  
Fig. 18 Direction graph

### 4.2 轨迹规划的路径要求

手术灯臂预期末端坐标与末端位姿计算得到后，通过程序控制，手术灯机械臂末端从初始点运动到预期点进行口腔的对正操作，这个过程中需要经过两个中间点，中途需要灯盘正对正脸，即坐标系 7 的 X 轴方向与人脸面部法向量尽可能保持重合。

本文六自由度双目视觉自动跟踪手术灯主要实现的是将灯盘与人脸保持固定距离且正对运动人脸面部特征(口腔)照射，运动流程不复杂，所以采用点到点轨迹规划方法。设灯头末端坐标系 7 中心初始位置点为  $P_0$ ，首先通过灯腕关节延长杆地旋转与平移调整与口腔的距离，并且将方向对准口腔，点  $O_7$  从  $P_0$  位置移动到了  $P_1$  位置，过程如图 19 所示。

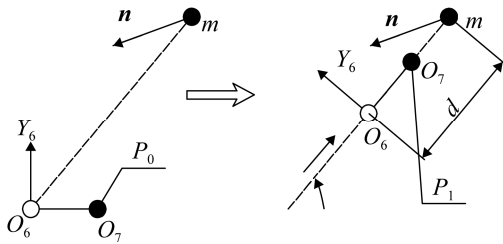


图 19 步骤 1  
Fig. 19 The first step

然后以  $m$  点为圆心，以  $d$  为半径走一个路径，由于是圆弧路径，所以设置一个中间点  $P_2$ ，由  $P_1$  点旋转至  $P_2$  点，中间保持灯光朝向口腔并且距离保持 50 公分，过程如图 20 所示。

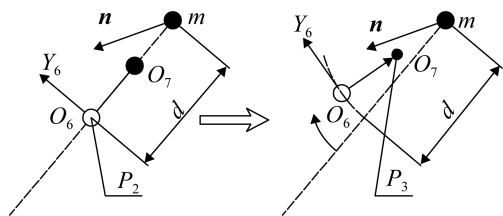


图 20 步骤 2  
Fig. 20 The second step

最后  $O_7$  由点  $P_2$  走向  $P_3$ ， $P_3$  点为终点，即点  $O_7$  位于点  $P_3$  时，灯腕关节延长杆与人脸法向量重

合，其中满足关系  $\angle P_1mP_2 = \angle P_2mP_3$ ，距离口腔 50 cm，完成手术灯的对正目标，过程如图 21 所示。

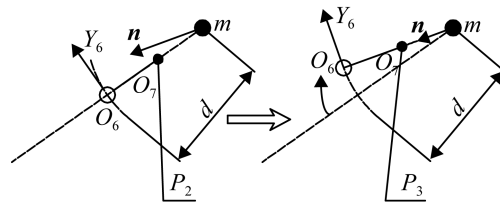


图 21 步骤 3  
Fig. 21 The third step

求解  $P_1, P_2, P_3$  3 个点坐标以及  $P_1, P_2, P_3$  3 个点时灯腕关节延长杆方向向量的方法如下，设  $P_0 = (O_x, O_y, O_z)$ ， $n = (n_x, n_y, n_z)$ 。

$$P_1 = \left( \begin{aligned} & \frac{d(O_x - m_x)}{\sqrt{(O_x - m_x)^2 + (O_y - m_y)^2 + (O_z - m_z)^2}} + m_x, \\ & \frac{d(O_y - m_y)}{\sqrt{(O_x - m_x)^2 + (O_y - m_y)^2 + (O_z - m_z)^2}} + m_y, \\ & \frac{d(O_z - m_z)}{\sqrt{(O_x - m_x)^2 + (O_y - m_y)^2 + (O_z - m_z)^2}} + m_z \end{aligned} \right) \quad (43)$$

$$P_1 = (m_x - O_x, m_y - O_y, m_z - O_z) \quad (44)$$

$$P_3 = \left( \begin{aligned} & \frac{dn_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} + m_x, \frac{dn_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} + m_y, \\ & \frac{dn_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} + m_z \end{aligned} \right) \quad (45)$$

$$P_3 = (-n_x, -n_y, -n_z) \quad (46)$$

求解  $P_2$  可以先将  $P_1, P_3$  向量单位化为  $N_{P_1}, N_{P_3}$ ，根据向量相加原理  $P_2 = N_{P_1} + N_{P_3} = (P_{2x}, P_{2y}, P_{2z})$ ，由于  $N_{P_1}, N_{P_3}$  为单位化向量，则  $j=i$ ，所以  $P_2$  处于  $P_1, P_3$  的正中间

$$P_2 = \left( \begin{aligned} & \frac{-dP_{2x}}{\sqrt{P_{2x}^2 + P_{2y}^2 + P_{2z}^2}} + m_x, \frac{-dP_{2y}}{\sqrt{P_{2x}^2 + P_{2y}^2 + P_{2z}^2}} + m_y, \\ & \frac{-dP_{2z}}{\sqrt{P_{2x}^2 + P_{2y}^2 + P_{2z}^2}} + m_z \end{aligned} \right) \quad (47)$$

### 4.3 五次多项式规划

通过采用点到点的路径运动轨迹规划, 对灯臂关节空间进行 5 次插值<sup>[14]</sup>的方法轨迹规划, 设 5 次多项式:

$$\theta(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 \quad (48)$$

设时间初始时间为  $t_1$  末尾时间为  $t_2$ , 关节角度初值为  $\theta_0$  末尾值为  $\theta_1$ , 为了保证平稳加速减速, 设初速度、末速度处加速度、末加速度均为 0, 得到 6 个约束条件:

$$\begin{cases} \theta(t_1) = \theta_1 \\ \theta(t_2) = \theta_2 \\ \dot{\theta}(t_1) = 0 \\ \dot{\theta}(t_2) = 0 \\ \ddot{\theta}(t_1) = 0 \\ \ddot{\theta}(t_2) = 0 \end{cases} \quad (49)$$

对式(48)求一阶、二阶导可得

$$\begin{cases} \dot{\theta}(x) = b + 2cx + 3dx^2 + 4ex^3 + 5fx^4 \\ \ddot{\theta}(x) = 2c + 6dx + 12ex^2 + 20fx^3 \end{cases} \quad (50)$$

将条件(49)代入式(48), (50), 提取系数以矩阵形式表达:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 & t_1^4 & t_1^5 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 & t_2^4 & t_2^5 \\ 0 & 1 & 2t_1 & 3t_1^2 & 4t_1^3 & 5t_1^4 \\ 0 & 1 & 2t_2 & 3t_2^2 & 4t_2^3 & 5t_2^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_1 & 12t_1^2 & 20t_1^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_2 & 12t_2^2 & 20t_2^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

式(51)可以简写为:

$$A \cdot k = \Theta \quad (52)$$

式中:  $A$  为提取系数后的已知变量矩阵;  $k$  为系数矩阵;  $\Theta$  为已知变量矩阵。通过式(53)在轨迹规划中主要求解系数矩阵  $k$ :

$$k_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7.032 & -12.303 & -0.964 & 0.964 & 5.393 & 1.71 \\ -10.548 & 18.455 & 1.446 & -1.446 & -8.0895 & -2.565 \\ 4.2192 & -7.3818 & -0.5784 & 0.5784 & 3.2358 & 1.026 \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$k = A^{-1} \cdot \Theta \quad (53)$$

### 4.4 建模与仿真

在 Matlab 中, 通过正运动学 DH 参数建立六自由度数值模型, 设定  $P_0 \sim P_1, P_1 \sim P_2, P_2 \sim P_3$  三段路径各用时 1 s, 共 3 s。经仿真模拟真实环境情况下, 当摄像头法向量与人脸面部法向量夹角超过  $35^\circ$  后, 会出现人脸检测失败现象, 所以选用  $P_0$  与  $P_3$  之间夹角为  $35^\circ$  的点作为已知量来测试极限情况。通过人脸检测与双目视觉的计算有已知条件:

$$\begin{aligned} P_0 &= (1689, 0, 504.1); \\ P_1 &= (1, 0, 0); \\ P_3 &= (1516.5, 278.78, 624.93); \\ m &= (1925.8, 132.3, 545). \end{aligned}$$

通过上述轨迹规划理论计算出:  $P_1=(1433.1, -3.1303, 459.91)$ ;  $P_2=(446.8, 146.22, 542.26)$ ;  $n=(-0.8185, 0.5518, 0.1599)$ ;  $P_1=(0.9853, 0.0121, 0.1702)$ ;  $P_2=(0.9580, -0.2866, 0.0054)$ ;  $P_3=(0.8185, -0.5518, -0.1599)$ 。

将以上点与向量代入逆运动学中获得到  $P_0, P_1, P_2, P_3$  点各关节角弧度为

$$\theta_{P_0} = (0, 0, 0, 0, 0, 0) \quad (54)$$

$$\theta_{P_1} = (0.7032, -1.2303, -0.0964, 0.0964, 0.5393, 0.1710) \quad (55)$$

$$\theta_{P_2} = (0.8210, -1.1138, 0.0629, -0.0629, -0.0069, 0.0055) \quad (56)$$

$$\theta_{P_3} = (0.5928, -0.4729, 0.2246, -0.2246, -0.7131, 0.16055) \quad (57)$$

通过 5 次多项式规划以上 4 个点的路径得到一、二、三段关节空间轨迹函数<sup>[15]</sup>系数矩阵分别为  $k_1, k_2, k_3$ :

$$k_2 = \begin{bmatrix} 0.7032 & -1.2303 & -0.0964 & 0.0964 & 0.5393 & 0.171 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.2681 & 1.1650 & 1.5940 & -1.5940 & -5.4623 & -1.6553 \\ -1.9022 & -1.7475 & -2.3910 & 2.3910 & 8.1935 & 2.4830 \\ 0.7609 & 0.6990 & 0.9564 & -0.9564 & -3.2774 & -0.9932 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$k_3 = \begin{bmatrix} 0.8300 & -1.1138 & 0.0630 & -0.0630 & -0.0069 & 0.0055 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2.3720 & 6.4095 & 1.6167 & -1.6167 & -7.0613 & -1.6604 \\ 3.5580 & -9.6143 & -2.4251 & 2.4251 & 10.5920 & 2.4905 \\ -1.4232 & 3.8457 & 0.9700 & -0.9700 & -4.2368 & -0.9962 \end{bmatrix} \quad (60)$$

系数矩阵  $k_i$  每列从上到下依次为系数  $a, b, c, d, e, f$ , 每行从前到后依次为关节 1, 2, 3, 4, 5, 6, 将系数矩阵带入 5 次多项式(48), 设置采样时间为 0.01 s, 得到各关节角度变化曲线, 如图 22。带入式(50)得到各关节角速度变化曲线, 如图 23。

各个关节的位移以及速度的变化都为连续且平滑的曲线, 运行时的加速度没有突变。加速度平滑, 没有急加速急减速的现象, 对机械臂关节产生的负担较小。各个关节的运行情况正常, 各连杆没有发生错位的情况, 达到轨迹规划的基本要求。

将关节空间下描述的信息转换至笛卡尔空间下, 在相同时间下将 1~6 关节角带入正运动学方程中解出机械臂末端三维坐标点, 将每个坐标点通过 Matlab 中 scatter3 散点绘图函数绘制出来, 如图 24。

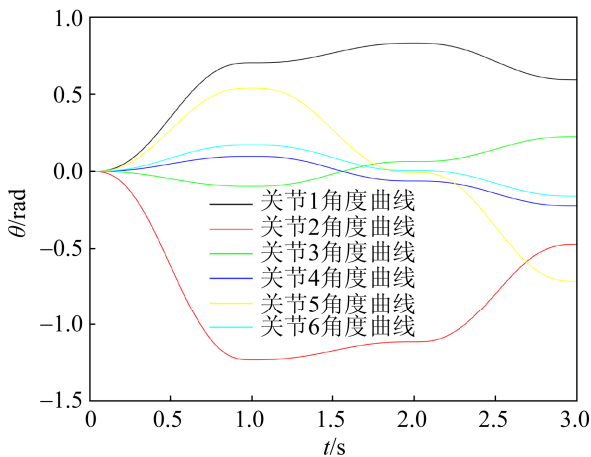


图 22 各关节角度变化曲线  
Fig. 22 Variation curve of joint angle

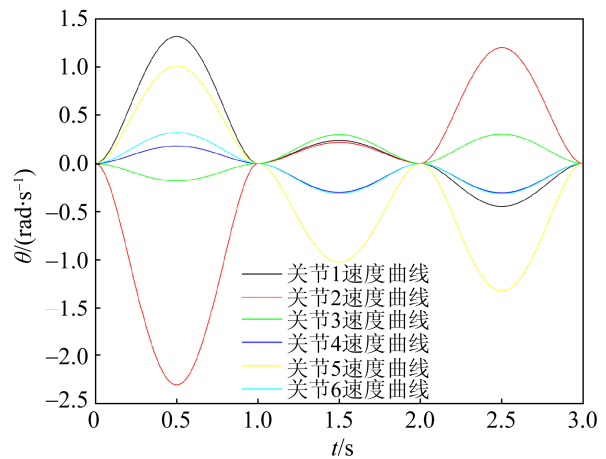


图 23 各关节角速度变化曲线  
Fig. 23 Variation curve of angular velocity of each joint

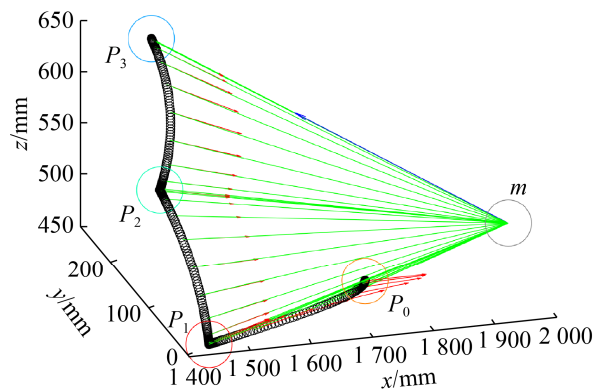


图 24 运动轨迹图  
Fig. 24 Movement track diagram

图 24 中蓝色箭头为人脸面部法向量  $n$ , 每隔 0.1 s 在轨迹上取一个点, 在每个点标出灯头的照射方向为红色箭头, 相当于坐标系 7 的  $x$  轴方向, 它

通过旋转矩阵右乘 $[1, 0, 0]$ 向量获得。将每一个取出的点通过绿线与  $m$  (口腔)点相连, 从  $P_0$  点开始偏移照射到  $P_1$  点逐渐完成照射方向对准口腔。

$P_1 \sim P_3$  阶段可以从图 24 中看出红色箭头与绿线基本重合如表 2 中灯光照射方向与人脸法向量偏移不超过  $2^\circ$ 。将每个绿线的长度进行计算得到时间与距离的表格, 如表 3 中手术灯末端与口腔直接的距离基本上保持在了 50 cm 左右, 误差不超过 30 mm, 基本上符合手术灯自动对正的预期要求。

表 2 夹角  
Tab. 2 Angle

$t/s$	$\theta/(^\circ)$	$t/s$	$\theta/(^\circ)$	$t/s$	$\theta/(^\circ)$
1.0	0.009 1	1.7	0.079 2	2.4	0.972 1
1.1	0.023 9	1.8	0.040 2	2.5	1.366 8
1.2	0.107 6	1.9	0.003 3	2.6	1.369 7
1.3	0.224 9	2.0	0.004 6	2.7	0.944 5
1.4	0.269 3	2.1	0.018 8	2.8	0.396 1
1.5	0.197 3	2.2	0.160 9	2.9	0.063 1
1.6	0.106 1	2.3	0.491 0		

表 3 距离变化表  
Tab. 3 Distance change table

$t/s$	$d/mm$	$t/s$	$d/mm$	$t/s$	$d/mm$
1.0	500.02	1.7	489.54	2.4	474.36
1.1	499.39	1.8	495.82	2.5	471.27
1.2	495.98	1.9	499.35	2.6	475.95
1.3	489.83	2.0	500	2.7	485.34
1.4	483.65	2.1	498.96	2.8	494.27
1.5	480.95	2.2	493.35	2.9	499.12
1.6	483.41	2.3	483.53		

## 5 Vrep 仿真验证

在仿真过程中, 将 SolidWorks 中的模型转为 stl 格式文件导入进 Vrep 仿真软件中建模, 设置关节, 设置双目摄像头, 如图 25, 26。在外部通过 C++编程, 通过调用 API 来调用双摄像头的画面和控制机械臂运动。

现实中人脸可以近似成为一个平面, 在仿真环境中使用照片来模拟真实情况, 如图 27。在软件中将照片作为纹理平铺到一个平面实体上, 蓝色、绿色、红色箭头分别为实体的  $z, y, x$  轴,  $z$  轴为平

面法向量, 小紫球在嘴巴中心位置。将小紫球以照片坐标系为基坐标系, 沿  $z$  轴平移 50cm 后得到大紫球。2 个紫球以照片为父坐标系并随之移动。

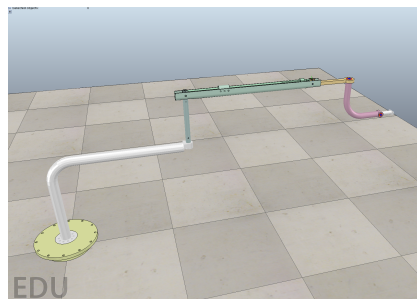


图 25 导入 Vrep 建模  
Fig. 25 Import Vrep modeling

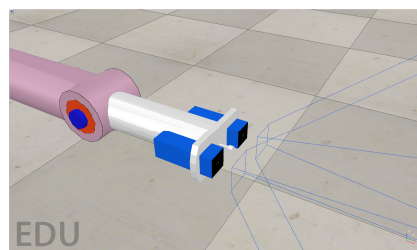


图 26 双目摄像头  
Fig. 26 Binocular camera

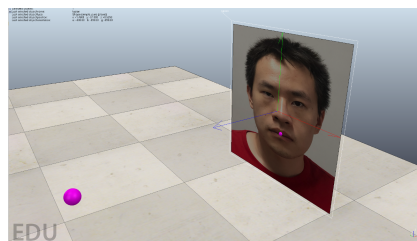


图 27 照片  
Fig. 27 Photos

C++程序中包含调用摄像头图像、双目视觉计算、正运动学、逆运动学、控制关节角度等代码, 由于篇幅问题不做展示。测试向上仰视  $35^\circ$  位姿下手术灯机械臂对正效果。

图 28 为对正前的截图, 机械臂初始角度为  $(60, -120, 0, 0, 60, 0)$ , 大紫球、小紫球在世界坐标系下三维坐标分为:  $(989.48, -117, 727.35)$ ,  $(1422.5, -117, 477.36)$ 。在 Vrep 中得到照片的欧拉角为  $(0, -60, -90)$  转换为照片法向量为  $(-0.866, 0, 0.25)$ 。对正后如图 29 所示, 图 29 中绿色、红色、蓝色小



球是通过双目视觉在三维空间中识别出人眼、人脸的标记。通过人脸检测得到坐标左摄像头下像素坐标:左眼(438, 353)、右眼(603, 351)、嘴巴(523, 498);右摄像头下像素坐标:左眼(400, 353)、右眼(565, 350)、嘴巴(484, 498)。通过双目视觉计算出3个面部特征相当于坐标系7的相对坐标:左眼(497.306 3, 92.842 1, -51.157 9)、右眼(497.306 3, 94.421 1, 41.052 6)、嘴巴(484.554 8, 1.230 8, 2.153 8)。嘴巴在世界坐标系下坐标为(1 419.16, -117.318, 476.586), 计算得到人脸法向量为(-0.838 03, -0.039 89, 0.544 17)。

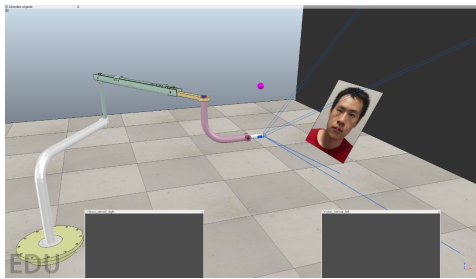


图 28 对正前  
Fig. 28 Justification



图 29 对正后  
Fig. 29 Alignment

将对正后数据与初始值做对比,嘴巴测得误差为  $x$  轴-3.34 mm,  $y$  轴-0.318 mm,  $z$  轴-0.774 mm;人脸法向量偏移  $3.768^\circ$ 。

## 6 结论

本文分析了传统口腔手术灯的缺点,提出了一种自动化口腔手术灯的设计方案,通过将双目视觉与机器人运动学相结合的方式,在仿真环境中实现了口腔手术灯的自动定位、跟踪、对正。在逆运

动力学计算中引入了几何分析法,通过 Matlab 带入数值进行了验证。对手术灯机械臂进行了轨迹规划,分析了轨迹的运行效果。设计了双目视觉计算方法,在 Vrep 仿真软件中验证了可行性。

## 参考文献:

- [1] 卢文娟, 刘思胜, 周恒艳, 等. 牙科口腔灯标准研析[J]. 中国医疗器械信息, 2017, 23(5): 77-79.  
Lu Wenjuan, Liu Sisheng, Zhou Hengyan, et al. Research on Standard of Dentistry-operating Light[J]. China Medical Device Information, 2017, 23(5): 77-79.
- [2] 武雪梅, 刘奇. 基于立体视觉的手术导航光学定位系统[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(35): 6584-6587.  
Wu Xuemei, Liu Qi. Optical Localizer of Surgical Navigation System Based on Binocular Stereo Vision[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2011, 15(35): 6584-6587.
- [3] 章炜. 机器视觉技术发展及其工业应用[J]. 红外, 2006, 27(2): 11-17.  
Zhang Wei. Development of Machine Vision and Its Industrial Applications[J]. Infrared, 2006, 27(2): 11-17.
- [4] 卢望, 叶宏武. 人体跟踪的智能照明系统设计[J]. 宁波工程学院学报, 2007, 6(2): 13-17.  
Lu Wang, Ye Hongwu. Design of Intelligent Lighting System for Human Body Tracking[J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2007, 6(2): 13-17.
- [5] 时凯飞, 李瑞峰. 7 自由度仿人手臂运动学研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(7): 806-808.  
Shi Kaifei, Li Ruifeng. Kinematics of Service Robot Bionics Arm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(7): 806-808.
- [6] 潘峰, 武威, 杨轶璐, 等. 视觉定位脑外科手术机器人系统的坐标映射[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(5): 413-416.  
Pan Feng, Wu Wei, Yang Yielu, et al. Coordinate Mapping for Visual Positioning Brain Surgery Robot System[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(5): 413-416.
- [7] Dalal N, Triggs B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection[C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. San Diego, CA, USA: IEEE, 2005.
- [8] 李胜旺, 陈凯悦. 一种基于双目视觉原理的距离测量系统的设计[J]. 信息通信, 2017, 30(8): 61-63.  
Li Shengwang, Chen Kairui. Design of a Distance

- Measuring System Based on the Principle of Binocular Vision[J]. *Information & Communications*, 2017, 30(8): 61-63.
- [9] 潘磊, 钱炜, 张志艳, 等. 四自由度机械臂运动学分析及 Matlab 仿真[J]. *机械科学与技术*, 2013, 32(3): 421-425.  
Pan Lei, Qian Wei, Zhang Zhiyan, et al. Simulating Kinematics of 4-DOF Manipulator[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2013, 32(3): 421-425.
- [10] 陈鹏, 刘璐, 余飞, 等. 一种仿人机械臂的运动学逆解的几何求解方法[J]. *机器人*, 2012, 34(2): 211-216.  
Chen Peng, Li Lu, Yu Fei. A Geometrical Method for Inverse Kinematics of a Kind of Humanoid Manipulator[J]. *Robot*, 2012, 34(2): 211-216.
- [11] 崔泽, 韩增军. 基于自运动的仿人七自由度机械臂逆解算法[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2012, 18(6): 589-595.  
Cui Ze, Han Zengjun. Inverse Kinematics Algorithm of 7-DOF Manipulator Based on Self-Motion[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2012, 18(6): 589-595.
- [12] Fu Z T, Yang W Y, Yang Z. Solution of Inverse Kinematics for 6R Robot Manipulators with Offset Wrist Based on Geometric Algebra[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics (S1942-4302)*, 2013, 5(3): 310081-310087.
- [13] De L A. Nonholonomic Behavior in Redundant Robots Under Kinematic Control[M]. Britain: AD Luca, 2013.
- [14] Xiao Y Q, Du Z J, Dong W. Smooth and Near Time-optimal Trajectory Planning of Industrial Robots for Online Applications[J]. *Emerald (S0143-991X)*, 2013, 39(2): 169-177..
- [15] 刘子贵. 基于关节空间工业机器人轨迹规划的研究与仿真[J]. *机械工程与自动化*, 2017, 3(3): 59-61.  
Liu Zigui. Research and Simulation of Trajectory Planning of Industrial Robot Based on Joint Space[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2017, 3(3): 59-61.