

室内喷涂机器人运动学建模及误差分析

邢辉¹, 宋科^{2†}, 郭洛浦¹

(1. 西安工业大学, 陕西 西安 710000; 2. 西安航空学院, 陕西 西安 710000)

摘要:为解决喷涂机器人建筑过程喷涂层厚度不一等喷涂质量问题,将影响喷涂质量的主要因素进行分析,以提高机器人定位精度。用MDH法建立运动学模型,确保模型准确,再分析造成精度问题的几何误差,尤其是理论上两轴线应处于平行,实际上存在不平衡度的y轴方向误差角,并在此基础上建立误差模型,通过控制变量法计算各个几何误差对末端位置误差的影响,分析各个误差和机器人精度之间的关系。结果表明连杆长度等常量误差对末端位置影响较小,关节扭角和连杆转角误差对喷涂机器人的末端位置误差影响较大,且Y轴方向误差偏转角对末端误差影响是跳变式的;最后针对这些几何误差提出对应解决方法,所使用的误差分析方法与得到的分析数据为后续研究机器人误差补偿原理与方法提供理论分析基础。

关键词:运动误差;室内喷涂机器人;控制变量法

中图分类号:TP242

文献标识码:A

Kinematic Modeling and Error Analysis of Indoor Spraying Robots

XING Hui¹, SONG Ke^{2†}, GUO Luopu¹

(1. Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

2. Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: In order to solve the problem of spraying quality in the process of spraying robot construction, the main factors affecting spraying quality were analyzed to improve the positioning accuracy of the robot. MDH method (Modified Denavit-Hartenberg) was used to establish a kinematic model, confirm the accuracy of the model, and then analyze the geometric error causing the accuracy problem, especially the theory that the two axes should be parallel, but in fact there is an unbalance Y-axis direction error angle, and establish an error model on this basis. The influence of each geometric error on the end position error is calculated by the control variable method, and the relationship between each error and the robot precision is analyzed. The results show that the constant errors such as the length of the connecting rod have little effect on the end position, the joint torsion angle and the connecting rod angle error have a greater effect on the end position error of the spraying robot, and the deviation angle of the Y-axis direction error has a hopping effect on the end error. Finally, the corresponding solution to these geometric errors is proposed. The error analysis method used and the obtained analysis data provide the theoretical analysis basis for the follow-up research on the principle and method of robot error compensation.

Key words: motion error; indoor spraying robot; control variable method

收稿日期:2024-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62103322);西安航空学院高等教育教学改革及新工科研究与实践资助项目(23XGK123699)

作者简介:邢辉(1998—),女,河南南阳人,硕士,研究方向:自动控制。

†通信联系人, E-mail: sk19780516@sina.com

2020 年 07 月 03 日,住房和城乡建设部提出构建先进的智能建造及建筑工业化标准体系^[1-2],且国内的建筑喷涂作业大多依靠人工,既无法保证喷涂质量,又会因涂料中有害物质对工人身体有害。在这种背景下,室内喷涂机器人与室内建筑施工喷涂需求高度契合^[3-5]。

由于机器人所处的施工环境比较复杂,造成喷涂层厚薄不一的因素很多,因此本文从运动学求解进行分析,主要探讨喷枪距离与实际位置不符这一因素^[6-7],并逐步分析影响机器人绝对定位精度不高的几何误差量。而机器人误差分析方法通常从机器人结构方面进行研究:对于由绳索牵引驱动的柔性结构机器人误差研究主要采用绳长关节空间与驱动空间之间的映射关系,采用常曲率模型假说进行建模^[8]。对于刚性结构一般采用 DH 模型进行误差建模,这种方法的缺点是处理树形或闭环结构机器人容易造成歧义,而采用 MDH 的连杆近端建模消除了上述缺点,且 Hayati 和 Judd 在 MDH 基础上提出了增加平衡关节的偏转角度,减少因微小不平衡度产生的参数突变,进而提高定位精度^[9-10]。

因此本文采用 Hayati 提出的修正 DH 进行误差建模,对在加工过程中产生的连杆参数误差、关节扭角误差等进行分析,通过控制变量法测试各个误差对于末端位置精度的影响,再针对性地提出建议,以便提高机器人绝对定位精度^[11-14]。

1 正运动学建模

1.1 机器人参数

首先对机器人整体进行运动学模型建立,使用 Kleinfinger 提出的修正 DH 法进行建模^[12]。本文提到的喷涂机器人采用全新结构,工作方式与传统的六轴喷涂机有很大不同,带有移动底盘和提升机构的设计更契合室内喷涂的需求。因而在建模时,底盘的陀螺仪位姿也要包含在整体建模内,作为基坐标系即图 1 的坐标系 1,提升机构沿 Z 轴移动,因此理论上不存在角度偏移即图 1 的坐标系 2,其余关节按照先定 Z 轴后等 X 轴原则建立各个关节的坐标系,机器人整体坐标系示意图如图 1 所示。

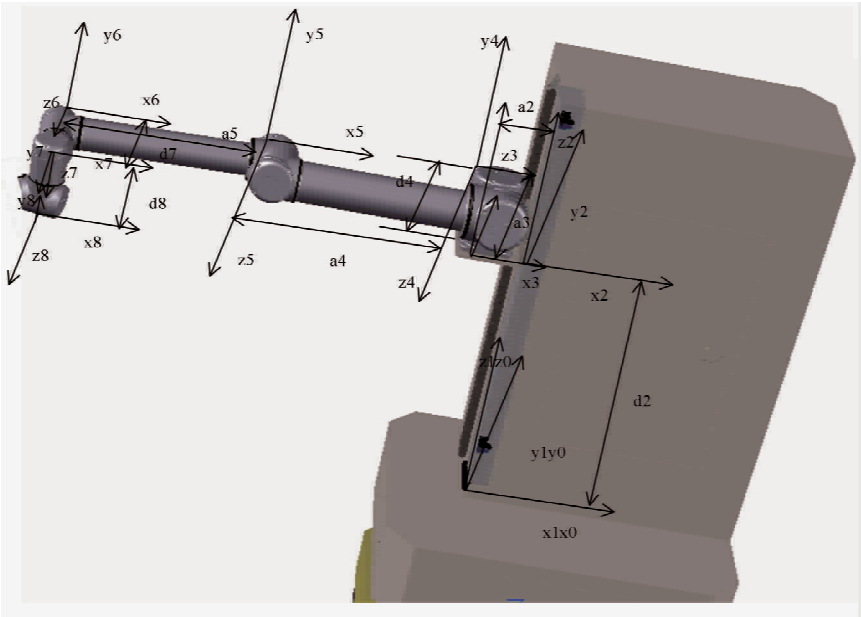


图 1 机器人各连杆坐标系示意图

DH 参数如表 1 所示:

表 1 DH 参数表

<i>i</i>	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
1	θ_1	0	0	0
2	0	d_2	0	0
3	θ_3	0	a_2	0
4	θ_4	d_4	a_3	90
5	θ_5	0	a_4	0
6	θ_6	0	a_5	0
7	θ_7	d_7	0	90
8	θ_8	d_8	0	-90

1.2 机器人运动学正解

按照表 1 中机器人的各个连杆参数,可以求解出各个关节的坐标变换矩阵,变换矩阵如下:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{pmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_2 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$${}^3_4\mathbf{T} = \begin{pmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$${}^4_5\mathbf{T} = \begin{pmatrix} C\theta_5 & -S\theta_5 & 0 & a_4 \\ S\theta_5 & C\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$${}^5_6\mathbf{T} = \begin{pmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & a_5 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$${}^6_7\mathbf{T} = \begin{pmatrix} C\theta_7 & -S\theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_7 \\ S\theta_7 & C\theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$${}^7_8\mathbf{T} = \begin{pmatrix} C\theta_8 & -S\theta_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_8 \\ -S\theta_8 & -C\theta_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

因此,机械臂末端相对于底盘的位姿变换阵为式(1)~式(8)按顺序相乘,即:

$${}^0_8\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T} {}^4_5\mathbf{T} {}^5_6\mathbf{T} {}^6_7\mathbf{T} {}^7_8\mathbf{T}$$

${}^0_8\mathbf{T}$ 代表机器人末端连杆坐标系相对于机器人基坐标系的位姿,该矩阵是机器人正运动学的解。

令

$${}^0_8\mathbf{T} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)中:

$$\begin{aligned} n_x &= C_8 \times (S_{123} \times S_7 + C_{123} \times C_{456} \times C_7) - \\ &\quad C_{123} \times S_{456} \times S_8 \\ o_x &= -S_8 \times (S_{123} \times S_7 + C_{123} \times C_{456} \times C_7) - \\ &\quad C_{123} \times S_{456} \times C_8 \\ a_x &= S_{123} \times C_7 - C_{123} \times C_{456} \times S_7 \\ p_x &= a_2 \times C_{12} + a_3 \times C_{123} + d_4 \times S_{123} + d_7 \times \\ &\quad C_{123} \times S_{456} + a_5 \times C_{123} \times C_{45} + a_4 \times C_{123} \times \\ &\quad C_4 + d_8 \times S_{123} \times C_7 - d_8 \times C_{123} \times C_{456} \times \end{aligned}$$

S_7

$$n_y = -C_8 \times (C_{123} \times S_7 - C_{456} \times S_{123} \times C_7) - \\ S_{123} \times S_{456} \times S_8$$

$$o_y = S_8 \times (C_{123} \times S_7 - C_{456} \times S_{123} \times C_7) - \\ S_{123} \times S_{456} \times C_8$$

$$a_y = -C_{123} \times C_7 - C_{456} \times S_{123} \times S_7$$

$$p_y = a_2 \times S_{12} - d_4 \times C_{123} + a_3 \times S_{123} + d_7 \times \\ S_{456} \times S_{123} + a_5 \times S_{123} \times C_{45} - d_8 \times C_{123} \times \\ C_7 + a_4 \times S_{123} \times C_4 - d_8 \times S_{123} \times C_{456} \times$$

S_7

$$n_z = C_{456} \times S_8 + S_{456} \times C_7 \times C_8$$

$$o_z = C_{456} \times C_8 - S_{456} \times C_7 \times S_8$$

$$a_z = -S_{456} \times S_7$$

$$p_z = d_2 + a_5 \times S_{45} + a_4 \times S_4 - d_7 \times C_{456} - \\ d_8 \times S_{456} \times S_7$$

其中, $C_{ik} = \cos(\theta_i + \theta_k)$; $S_{ik} = \sin(\theta_i + \theta_k)$; $C_i = \cos \theta_i$; $S_i = \sin \theta_i$ 。

为验证式(9)的准确唯一性,代入一组关节角求解出的矩阵与 MATLAB 中正运动函数 fkine 求解结果比较,见图 2、图 3。

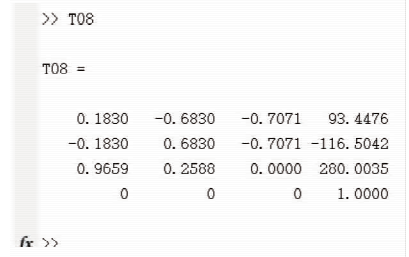


图 2 正运动学求解结果

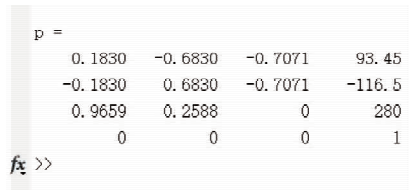


图 3 fkine 函数求解结果

经对比,正运动学公式准确,机器人运动学模型与实际位姿相符。

2 误差建模

2.1 误差分析

影响机器人绝对定位误差的因素有很多,考虑到室内喷涂机器人是在温差不大且电磁干扰因素较少的情况下工作,本文着重就机械装配原因而造成的几何参数误差进行分析和误差模型建立^[15]。由于相邻两连杆之间加工制造产生的长度误差、装

配造成的长度损耗,以及角度偏移都会造成机器人的理论误差与实际误差造成很大差异^[16],因此几何参数误差可分别由 $\delta\beta_i$, $\delta\theta_i$, $\delta\alpha_i$, δa_i , δd_i 表示。

2.2 误差模型建立

由于实际的变换矩阵 T_r 与理论变换矩阵 T_i 也存在偏差,两相邻连杆之间的坐标系正确表达式为:

$$\begin{aligned} {}^{i-1}T &= R_X(\alpha_{i-1}) T_X(a_{i-1}) R_Z(\theta_i) R_Z(d_i) R_y(\beta_i) \\ &= \begin{bmatrix} C\theta_i C\beta_i & -S\theta_i & C\theta_i S\beta_i & a_{i-1} \\ S\theta_i C\alpha_{i-1} C\beta_i + S\alpha_{i-1} S\beta_i & C\theta_i C\alpha_{i-1} & S\theta_i C\alpha_{i-1} S\beta_i - S\alpha_{i-1} C\beta_i & -d_i S\alpha_{i-1} \\ S\theta_i S\alpha_{i-1} C\beta_i - C\alpha_{i-1} S\beta_i & C\theta_i S\alpha_{i-1} & S\theta_i S\alpha_{i-1} S\beta_i + C\alpha_{i-1} C\beta_i & d_i C\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{11}$$

所以几何误差量要增加一个 y 轴方向的偏角 $\delta\beta_i$,考虑到几何误差偏差量通常较小,因此通过对式(11)求全微分来近似代替误差矩阵:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial \theta_i} \delta \theta_i + \sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial d_i} \delta d_i + \\ &\sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial \alpha_{i-1}} \delta \alpha_{i-1} + \sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial a_{i-1}} \delta a_{i-1} + \\ &\sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial \beta_i} \delta \beta_i \end{aligned} \tag{12}$$

且由于第一、二、三轴线平行,四、五、六轴线平行,因此需要考虑绕 y 轴的误差 β_i ,只有 β_1 、 β_2 、 β_4 、 β_5 ,因此式(12)可简化为下式,即本机器人的位置误差模型为:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial \theta_i} \delta \theta_i + \sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial d_i} \delta d_i +$$

$$\Delta T = T_r - T_i \tag{10}$$

又因为本文所研究的喷涂机器人提升关节和机械臂第一轴线就理论而言是平行的,但由于装配误差,提升机构与机器人基座坐标可能存在 y 轴方向的差异,因此使用 β_i 来表示 y 轴 方向偏差角, Hayati 的修正 DH 模型可以用以修正相邻连杆运动学模型存在的误差^[13-14],公式如下。

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial \alpha_{i-1}} \delta \alpha_{i-1} + \sum_{i=1}^8 \frac{\partial T}{\partial a_{i-1}} \delta a_{i-1} + \\ &\sum_{i=1}^2 \frac{\partial T}{\partial \beta_i} \delta \beta_i + \frac{\partial T}{\partial \beta_4} \delta \beta_4 + \frac{\partial T}{\partial \beta_5} \delta \beta_5 \end{aligned} \tag{13}$$

3 误差求解

3.1 计算各个参数误差

取任意五组关节角度,分别预设 $\delta\beta_i$ 、 $\delta\theta_i$ 、 $\delta\alpha_i$ 、 δa_i 、 δd_i 这些几何参数误差值;采用控制变量法分别代入正运动学式(9),求出每个误差对应的实际位置坐标 p_r 和关节角对应的理论位置,代入式(10)最后求解出末端位姿误差 ΔT ,计算结果如表 2 所示。

表 2 几何误差计算表

组数	关节角/(°)	理论 位置 p_i /mm	$\delta\theta_i = 0.001\text{mm}$ p_r / mm	$\delta d_i = 0.01\text{mm}$ p_r /mm	$\delta\alpha_{i-1} = 0.001^\circ$ p_r /mm	$\delta a_{i-1} = 0.01\text{mm}$ p_r /mm	$\delta\beta_i = 0.001^\circ$ p_r /mm
1	0,0,60,45, -45,0,0,0	102,	101.8056,	101.9299,	101.9605,	101.9373,	102.1783,
		67.19,	67.3472,	67.2021,	66.7328,	67.1723,	67.2344,
		223.8	223.8038	223.7637	223.8476	223.7566	223.5767
2	0,0,30, 45,-45, 0,0,0	124.1,	124.0288,	124.0721,	124.0996	124.0623,	124.3365,
		15.41,	15.6238,	15.4338,	14.9492,	15.3993,	15.4612,
		223.8	223.8038	223.7637	223.6922	223.7566	223.5324
3	0,0,30, 45,45,0,0,0	138.1,	138.2077,	138.2663,	138.3624,	138.2651,	138.5695,
		23.61,	23.8478,	23.6288,	23.1153,	23.5993,	23.1797,
		240.2	240.2125	240.1537	240.1765	240.1566	239.9689
4	0,0,30, -45,45,0, 0,0	124.1,	124.0983,	124.0721,	124.03,	124.0623,	124.1642,
		15.41,	15.6641,	15.4338,	15.2427,	15.3993,	15.4813,
		143.4	143.4765	143.4363	143.3654	143.4434	143.1712
5	0,0,-45,30, 45,0,0,0	76.74,	76.955,	76.7528,	76.7906,	76.7152,	77.0519,
		-117.6,	-117.4583,	-117.586,	-118.1322,	-117.6009,	-117.5825,
		224.2	224.2129	224.148	223.7251	224.1504	224.0248

将上述结果进行绘制,得到图 4。

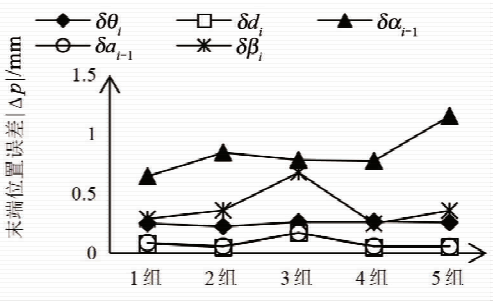


图 4 不同参数误差对末端位置误差影响

通过对比各个参数误差对末端位姿的影响,连杆长度 δa_i 和连杆偏距 δd_i 两个数据对末端位置误

差的影响比偏转角度小,且偏转角度 $\delta\beta_i$, $\delta\theta_i$, $\delta\alpha_i$ 中 $\delta\theta_i$ 不易引起末端位姿激变, $\delta\beta_i$ 和 $\delta\alpha_i$ 产生误差时对末端工具的影响最为明显, $\delta\beta_i$ 对末端误差的影响是跳变式的。

3.2 单个参数对末端误差影响

从上文分析得知不同误差对末端位置误差的影响不同,因此,下文分别将各个参数误差对末端位置的影响进行计算,分析不同误差与末端位置误差的关系。

3.2.1 不同连杆长度对末端位置影响

分别对 δa_i 中每一个连杆长度误差设定误差值,采用控制变量法计算各个连杆长度对末端位置误差的影响,计算结果如表 3 所示。

表 3 单个连杆长度对末端位置影响

设定误差量/mm	δa_0 Δp / mm	δa_1 Δp / mm	δa_2 Δp / mm	δa_3 Δp / mm	δa_4 Δp / mm	δa_5 Δp / mm	δa_6 Δp / mm	δa_7 Δp / mm
0.001	1	1	1	0.999	1	0.999	0.999	0.999
0.004	1	1	1	0.999	1	0.999	0.999	0.999
0.007	1	1	1	0.999	1	0.999	0.999	0.999
0.010	1	1	1	0.999	1	0.999	0.999	0.999
0.013	1	1	1	0.999	1	0.999	0.999	0.999

根据表 3 数据绘制折线图如图 5 所示:

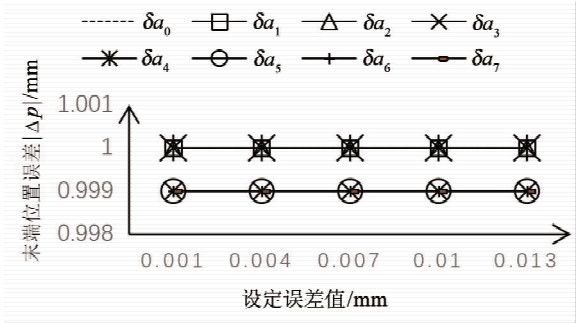


图 5 不同连杆长度对末端位置影响

结合表 3,图 5 对结果进行分析可以得知, δa_i 中各个连杆误差对末端误差的影响基本相同,而且各个连杆误差值的大小对于机械臂末端位置误差的影响不变。

3.2.2 不同偏置距离对末端位置影响

分别对 δd_i 中每一个偏置距离误差设定误差值,采用控制变量法计算各个偏置距离对末端位置误差的影响,计算结果如表 4 所示。

根据表 4 数据绘制折线图,如图 6 所示:

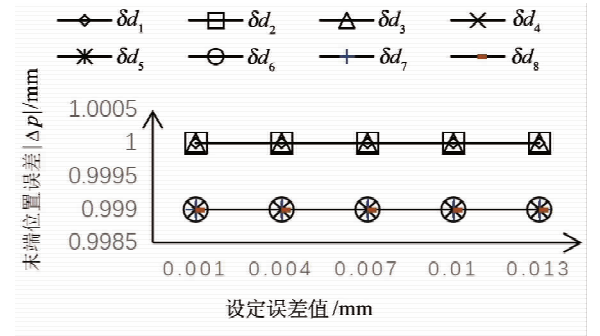


图 6 不同偏置距离对末端影响

结合表 4,图 6 对结果进行分析可以得知, δd_i 中各个偏置距离对末端误差的影响基本相同,而且各个偏置距离值的大小对于机械臂末端位置误差的影响基本不变。

3.2.3 关节转角对末端位置影响

分别对 $\delta\theta_i$ 中每一个转角设定角度,采用控制变量法计算各个角度对末端位置误差的影响,计算结果如表 5 所示。

表 4 各个偏置距离对末端影响

设定误差 量/mm	δd_1	δd_2	δd_3	δd_4	δd_5	δd_6	δd_7	δd_8
	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$
0.001	1	1	1	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
0.004	1	1	1	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
0.007	1	1	1	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
0.010	1	1	1	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
0.013	1	1	1	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999

表 5 单个关节转角对末端位置影响

设定误差 量/(°)	$\delta \theta_1$	$\delta \theta_2$	$\delta \theta_3$	$\delta \theta_4$	$\delta \theta_5$	$\delta \theta_6$	$\delta \theta_7$	$\delta \theta_8$
	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$
0.001	0.14935	0.14935	0.13967	0.11039	0.05818	0.0126	0.0115	0
0.004	0.5974	0.5974	0.55868	0.44156	0.23272	0.0504	0.046	0
0.007	1.04545	1.04545	0.97769	0.77273	0.40726	0.0882	0.0805	0
0.010	1.4935	1.4935	1.3967	1.1039	0.5818	0.126	0.115	0
0.013	1.94155	1.94155	1.81571	1.43507	0.75634	0.1638	0.1495	0

根据表 5 数据绘制折线图如图 7 所示：

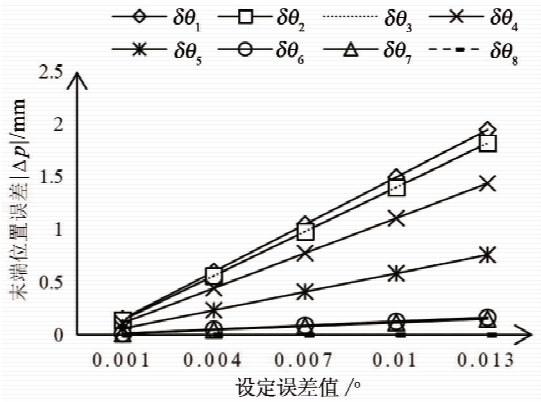


图 7 不同关节角对末端误差影响

结合表 5,图 7 对结果进行分析可以得知, $\delta \theta_8$ 误差不影响末端位置; $\delta \theta_6$, $\delta \theta_7$ 对于末端位置的影响是一样的; $\delta \theta_2$, $\delta \theta_3$ 对末端误差有同样的误差影响率,在所有关节角中对末端位置影响最大的误差角是 $\delta \theta_1$ 。结论:关节角误差对于末端误差影响是正相关的;且误差值可以传递,经由一系列传递后,末端误差值会产生较大变化。

3.2.4 杆件扭角对末端位置影响

分别对 $\delta \alpha_i$ 中每一个转角设定角度,采用控制变量法计算各个角度对末端位置误差的影响,计算结果如表 6 所示。

表 6 各个杆件扭角对末端位置影响

设定误差 量/(°)	$\delta \alpha_0$	$\delta \alpha_1$	$\delta \alpha_2$	$\delta \alpha_3$	$\delta \alpha_4$	$\delta \alpha_5$	$\delta \alpha_6$	$\delta \alpha_7$
	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$
0.001	0.30327	0.30327	0.14133	0.08473	0.03330	0.01706	0.01706	0.0115
0.004	1.2131	1.2131	0.565314	0.33892	0.13321	0.06824	0.06824	0.046
0.007	2.12292	2.12292	0.9893	0.59310	0.23312	0.11941	0.11941	0.0805
0.010	3.032741	3.032741	1.41329	0.84729	0.33303	0.17059	0.17059	0.115
0.013	3.94256	3.94256	1.83727	1.10147	0.43294	0.22177	0.22177	0.1495

根据表 6 数据绘制折线图,如图 8 所示。

结合表 6,图 8 对结果进行分析可以得知,每一个连杆转角都会对末端位置误差有影响;其中 $\delta \alpha_0$, $\delta \alpha_1$ 对末端位置误差影响最大; $\delta \alpha_7$ 对于末端位置的影响最小;且从 $\delta \alpha_0$ 到 $\delta \alpha_7$ 对末端误差影响率是逐渐递减的。结论:连杆角误差对于末端误差影响是正相关的;且误差值可以传递,经由一系列传递后,末端误差值会产生较大变化。

3.2.5 y 轴方向转角对末端位置影响

分别对 $\delta \beta_i$ 中每一个转角设定角度,采用控制

变量法计算各个角度对末端位置误差的影响,计算结果如表 7 所示。

根据表 7 数据绘制折线图,如图 9 所示。

结合表 7,图 9 对结果进行分析可以得知,每一个 y 轴转角都会对末端位置误差有影响;其中 $\delta \beta_1$ 对末端位置误差影响最大; $\delta \beta_5$ 对于末端位置的影响最小;且从 $\delta \beta_1$ 到 $\delta \beta_5$ 对末端误差影响率是逐渐递减的。结论:连杆角误差对于末端误差影响是正相关的;且误差值可以传递,经由一系列传递后,末端误差值会产生较大变化。

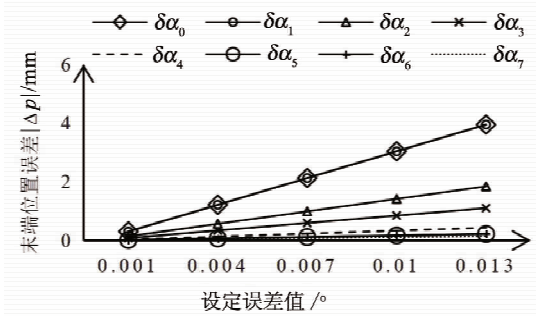


图 8 各个杆件扭角对末端位置影响

表 7 y 轴方向偏转角对末端误差影响

设定误差 量/°	$\delta\beta_1$	$\delta\beta_2$	$\delta\beta_4$	$\delta\beta_5$
	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$	$ \Delta p /\text{mm}$
0.001	0.29519	0.12302	0.1065	0.05795
0.004	1.18074	0.49207	0.4256	0.23181
0.007	2.0663	0.86111	0.74547	0.40567
0.010	2.9519	1.23016	1.0645	0.57952
0.013	3.83741	1.59921	1.38445	0.75338

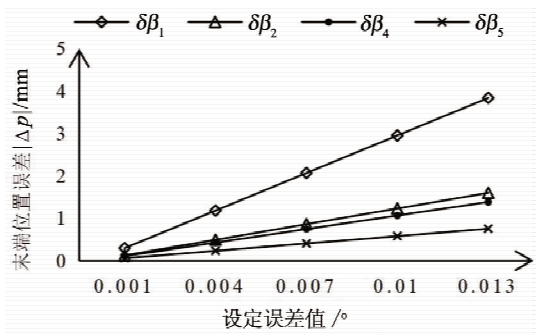


图 9 不同 y 轴偏转角对末端位置误差影响

3.3 数据分析及建议

通过上文的分析,整体上杆件扭角误差对末端位姿影响最大,y 轴方向偏转角误差整体对末端影响次之,关节转角误差对末端影响最小,其中在关节角 1,2 处的杆件扭角,关节转角和 y 轴方向偏转角在同类误差中对末端位置影响最大。

关节 1、2 即陀螺仪与提升机构两处的误差,为降低两处角度误差,因此在材料选用上要选用较高精度的陀螺仪、编码器和减速机来减小偏转角度的误差;提升机构拖链部分采用不易变形且损耗较低的材料。由于 y 轴方向的偏转角 $\delta\beta_1$ 是装配过程导致理论与实际存在的误差,因此在装配方面,装配时采用同一基准提高装配精度,且加工方面,对机械加工选用精度较高的机床,用以提高尺寸和形状精度;最后,整机装配后,进行整体测量,计算出实际偏差角度,并且补偿各个偏转角度,用以提高

机器人绝对定位精度。

4 结 论

为提高室内喷涂机器人绝对定位精度,对机器人整体进行运动学建模,并分析影响喷涂质量的因素。着重分析机械误差对于机器人定位误差的影响,将几何误差进行误差建模,通过控制变量法计算,得出偏转角度对机器人末端误差影响较大的结论。且针对不同角度造成误差进行针对性建议,为提高室内喷涂机器人绝对定位精度提供了新思路。最后,本文开展的误差分析方法与得到的分析数据为后续研究机器人误差补偿原理与方法提供理论分析基础。

参考文献

[1] 张顺善,尹华辉,张吉松. 建筑机器人研究综述[C]//中国图
学学会建筑信息模型(BIM)专业委员会. 第九届全国 BIM 学
术会议论文集. 大连交通大学土木工程学院,2023,8:268—
275.

[2] 陈舢,李星,邱志强,等. 建筑施工机器人研究进展[J]. 建筑
科学与工程学报,2022,39(4): 58—70.

[3] 袁子祺,苏伟斌,梅晓君,等. 智能喷涂机器人的研究与应用
[J]. 建筑机械化,2023,44(12):38—41.

[4] 刘国虬. 室内智能喷涂机器人喷涂技术研究[J]. 建筑机械
化,2023,44(11):15—18.

[5] 乔新义,付宇晨. 喷涂机器人智能技术应用现状及前景[J].
现代涂料与涂装,2023,26(10): 35—38.

[6] 张子超,王琢,吴金莹,等. 木制家具喷涂机器人研究综述
[J]. 林业机械与木工设备,2023,51(8):4—11.

[7] 李运荣,覃雄斌,李青. 浅谈影响机器人喷涂质量的因素[J].
时代汽车,2023,(15):126—128.

[8] 朱靖,齐飞,余世刚,等. 绳驱动柔性机器人运动学建模及主
从控制研究 [J]. 机电工程,2023, 40 (2): 266—274.

[9] HAYATI S A. Robot arm geometric link parameter estima-
tion[C]//The 22nd IEEE Conference on Decision and Con-
trol. IEEE,1983:1477—1483.

[10] TUDD R, KNASINSKI A. A technique to calibrate industri-
al robots with experimental verification [C]//Proceedings.
1987 IEEE International Conference on Robotics and Auto-
mation. IEEE, 1987,4:351—357.

[11] 陈琳,乜聘广,蒙成琦,等. 融合坐标系误差模型的工业机
器人运动学标定[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023,(12):
178—182.

[12] 崔正杰,刘厚才,康辉民,等. 基于模型的工业机器人误差参
数标定技术研究进展[J]. 科技导报,2022,40(13):36—49.

[13] 高文斌,杜涛,罗瑞卿. 一种利用位置误差模型的机器人位姿
标定方法[J]. 机械科学与技术,2023,42(11):1852—1859.

[14] KHALIL W, KLEINFINGER J[J]. A new geometric nota-
tion for open and closed-loop robots[C]//IEEE Internation-
al Conference on Robotics & Automation. IEEE,1986:1174
—1179.

[15] LAO D B, QUAN Y B, WANG F, et al. Error modeling and
parameter calibration method for industrial robots based on
6-DOF position and orientation[J]. Applied Sciences, 2023,
13 (19):10880—10901.

[16] SAN H J, DING L, ZHANG H B, et al. Error analysis of a
new five-degree-of-freedom hybrid robot [J]. Actuators,
2023, 12(8):301—324.