基于位置代价 A* 算法的机械臂避障路径规划*

张许有12,刘有余12

(1.高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室 安徽 芜湖 241000; 2.安徽工程大学 机械工程学院 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为了解决高维或复杂环境下 A^* 算法路径规划寻路效率低、计算量大的问题 提出了位置代价 A^* 算法,并将其应用于机械臂避障路径规划。首先在 A^* 算法估价函数中加入节点位置代价,增加估价函数对节点位置优劣的判断; 其次研究机械臂连杆的避障检测方法; 在此基础上 将位置代价 A^* 算法用于机械臂的避障路径规划。仿真试验表明,位置代价 A^* 算法能完成机械臂避障路径规划,且在 4 种不同场景下,其完成任务的时间与 A^* 算法相比,分别缩短了 A^* 46. 4% A^* 47. 0% A^* 52. 1% ,与双向时效 A^* 算法相比,分别缩短了 A^* 15. 1%, A^* 15. 5%, A^* 69. 1%,与双向时效 A^* 53. 48. 6%, A^* 69. 3%。提出的算法能提高上述算法规划效率并减小计算量。

关键词: 位置代价; A* 算法; 机械臂; 避障规划

中图分类号: TP241.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-2354(2021) 02-0108-06

DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2021.02.016

Path planning of obstacle avoidance for manipulators based on position cost A^* algorithm

ZHANG Xu-you^{1,2}, LIU You-yu^{1,2}

(1.Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-end Equipment ,
Ministry of Education , Wuhu 241000;

School of Mechanical Engineering , Anhui Polytechnic University , Wuhu 241000)

Abstract: In this article , in order to solve the problems of low path-finding efficiency and large amount of calculation of A^* algorithm path planning under the high-dimensional or complex conditions , the position cost A^* algorithm is worked out and applied to the path planning of obstacle avoidance for manipulators. Firstly , the node position cost is added into the evaluation function of the A^* algorithm , so as to improve the evaluation function's judgment on the node position. Secondly , the connecting rod is adopted for the detection of obstacle avoidance. Then , the position cost A^* algorithm is applied to the path planning of obstacle avoidance for manipulators. The simulation results show that with the help of the position cost A^* algorithm , the path planning of obstacle avoidance for manipulators is completed; in four different scenarios , the time of completing this task is 43. 2% , 46. 4% , 47. 0% and 49. 1% shorter than that of the A^* algorithm; it is 14. 1% ,15. 1% ,15. 5% and 16. 9% shorter than that of the dual-direction time efficiency A^* algorithm; it is 16. 6% , 17. 8% , 18. 6% and 19. 3% shorter than that of the jump-point search. The position cost A^* algorithm improves the efficiency in planning and reduces the calculation amount of other algorithms.

Key words: position cost; A* algorithm; manipulator; planning of obstacle avoidance

避障路径规划是机械臂完成既定任务的关键环节 之一。避障路径规划是指在给定的障碍、起始点和目 标点下 按某种标准 ,寻找一条从初始点到目标点的不碰撞路径^[1]。规划算法是路径规划的核心。近年来 ,

^{*} 收稿日期: 2020-01-13; 修订日期: 2020-08-08 (C) 1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 基金项目: 安徽高校协同创新项目(GXXT-2019-048)

针对机械臂路径规划 学者们提出了许多算法 如 RRT (Rapidly Exploring Random Tree) [2]、Sarsa 强化学 习^[3]、人工势场法^[4]、A* 算法^[5]、C 空间法^[6]等 ,其中 A* 算法具有能求出两点之间最优路径的特点 ,受到了 广泛的关注。

但 A* 算法存在搜索盲目、计算量大的缺点。 汪首 坤等[7]等从算法搜索步长角度考虑,先设置大步长求 取中间点 再设置小步长进行路径搜索 该方法虽减小 了算法的计算量,但在选取大步长时,若其选取较大, 中间点与起始点、目标点间的场景可能仍复杂 使得算 法搜索依旧盲目,若其选取较小,中间点数目较多,易 使所得路径偏离最优路径; 文献 [8-9] 从算法寻路方 式角度考虑,分别提出了逆向搜索 A* 算法和双向时效 A* 算法, 虽提高了算法的执行效率, 但每次迭代的路 径选取未考虑障碍的位置 ,当障碍数目较多时 ,搜索易 陷入障碍密集区域; Guruji 等[10] 从全局信息角度考 虑 实时计算当前节点与障碍的距离 仅在两者距离小 于设定的阈值时 进行节点选取 从而避免了搜索的盲 目性 但该方法使搜索仅在离障碍很近时转向 导致障 碍附近的路径平滑度低.规划结果不是最优: Sturtevant 等[11] 从优化角度考虑 对算法搜索过程中节点的选取 进行优化 进而增加节点的搜索效率 但优化需增加算 法的参数数目和结构复杂度 使算法的空间与时间复 杂度增大; 文献 [12-13]将 A* 算法与其他算法融合, 提出了跳点搜索 A* 算法,该方法虽大大降低算法的无 效计算,但跳点的选取需判断邻节点是否为障碍区域, 随着维数的增加 邻节点数呈指数增加 跳点选取时需 进行大量计算。

由此可见 ,当前的算法改良策略难以出色地解决 其存在的搜索效率低、计算量大的不足 濡对改良策略 进一步探究。文中从 A^* 算法估价函数入手 通过引入 节点位置信息 ,力图探索一种高效且计算量小的 A* 算 法。以此为基础 将改良后的方法用于机械臂路径规 划,并通过仿真验证方法的有效性和可行性。

1 引入位置代价的 A^* 算法

用A^C算法进行避障路径规划时。存在导函数率nic Publishing House All rights reserved. http://www.cnkj.net 低、计算量大的缺点,造成其缺点的原因为: A* 算法每 次执行时 需对 OPEN LIST 中的所有节点进行逐一比

较 以求出估计函数最小的节点 但某些不是最终路径 的节点 其对应的估价函数值不大于最终路径节点的 函数值 这样导致算法在无效节点上浪费了大量计算。

为了克服上述问题 文中在 A* 算法的估价函数中引 入节点位置信息 将算法在节点 x 处的估计函数改写为:

$$f(x) = g(x) + h(x) + p(x)$$
 (1)

式中: g(x) —— 起始点到 x 的实际代价;

h(x) ——x 到目标点 G 的估计代价 $h(x) = \|G - x\|$;

p(x) ——x 的位置代价。

由式(1) 可知,文中改良算法的关键是对 p(x) 的 设计。p(x) 的设计需考虑两方面因素: 一是 x 相对起 始点与目标点连线的偏移 $\omega(x)$ 二是 x 与起始点及目 标点的距离 d(x)。

(1) 偏移 ω(x)。

如图 1 所示 1 对于 1 维状态空间中两节点 1 和 x_2 , 当 $\alpha < \beta$ 时 x_1 的偏移优于 x_2 , 满足 $\omega(x_1) < \infty$ $\omega(x_2)$ 用 Sx 与 SG 夹角的余弦描述 $\omega(x)$:

$$\omega(x) = a - \cos \langle Sx | SG \rangle \tag{2}$$

式中: a----常数 a > 1;

$$\cos < Sx \ SG > = \begin{cases} \frac{(x - S) \cdot (G - S)}{\|x - S\| \|G - S\|} & (x \neq S) \\ 1 & (x = S) \end{cases}$$

Sx 与 SG 的夹角越大 $\omega(x)$ 越大 惩罚力度越大; 反之 $\omega(x)$ 越小 惩罚力度越小。

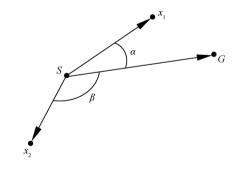


图 1 节点相对起始点与目标点连线的偏移

(2) 距离 d(x)。

如图 2 ,对 N 维状态空间中两个偏移相等的节点 , 当 $||x_1G|| + ||Sx_1|| < ||x_2G|| + ||Sx_2||$ 时 x_1 的距 离优于x, 有 $d(x_1) < d(x_2)$ 用 $\|xG\|$ 和 $\|Sx\|$ 描述 d(x):

式中: b—— 常数 b > 1 用以提高 $\|G - x\|$ 部分的影响, 使节点越靠近G,其距离相对较小。

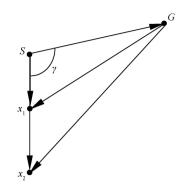


图 2 节点与起始点及目标点的距离

综合以上讨论,可得:

$$p(x) =$$

$$\begin{cases} (b \| G - x \| + \| S - x \|) \left(a - \frac{(x - S) \cdot (G - S)}{\| x - S \| \| G - S \|} \right) & (x \neq S) \\ b \| G - x \| (a - 1) & (x = S) \end{cases}$$

改良后的 A* 算法的估价函数为:

$$f(x) =$$

$$\begin{cases}
g(x) + \|G - x\| + (b\|G - x\| + \|S - x\|) \\
\left(a - \frac{(x - S) \cdot (G - S)}{\|x - S\| \|G - S\|}\right) \\
\|G - x\| + b\|G - x\| (a - 1)
\end{cases} (x \neq S)$$
(5)

位置代价 A* 算法机械臂路径规划

2.1 连杆避障检测方法

在机械臂运动空间中,障碍和机械臂往往具有不 规则形状 欲使机械臂在初末位姿之间寻找到一条不 碰撞的路径 需对障碍和机械臂分别简化。

(1) 机械臂简化。

用圆柱包络体对机械臂各连杆进行简化,第 i(i = $1.2 \cdots N$) 个连杆两端关节中心连线的方程为:

$$\frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} = \frac{y - y_{j-1}}{y_j - y_{j-1}} = \frac{z - z_{j-1}}{z_j - z_{j-1}} = k$$
 (6)

式(6) 中 $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ 和 (x_i, y_i, z_i) 是关节矢量 坐标,由机械臂正运动学[14] 求出,且 $|k| \leq 1$,为 常数。

(2) 障碍简化。

为了便简化启的空间体与原障碍更贴容礼用椭球nic Publishing p(layse, All rights reserved. http://www.cnki.net 包络体简化障碍 考虑到机械臂各连杆半径 椭球方程 描述为:

$$\frac{\left(x - x_{0_{x}}\right)^{2}}{\left(a_{z} + r_{z}\right)^{2}} + \frac{\left(y - y_{0_{x}}\right)^{2}}{\left(b_{z} + r_{z}\right)^{2}} + \frac{\left(z - z_{0_{x}}\right)^{2}}{\left(c_{z} + r_{z}\right)^{2}} = 1 \tag{7}$$

式中: (x_0, y_0, z_0, z_0) —— 第 $\tau(\tau = 1, 2, \dots, n)$ 个障碍对应椭 球的中心:

 a_{τ} b_{τ} ρ_{τ} — 第 τ 个障碍对应椭球的 3 个轴长;

 r_i ——第i 个连杆的半径。

上述简化一方面将障碍从不规则体转变为规则 体 提高了避障检测的效率 另一方面扩大了障碍区 域 提高了路径规划的安全性。

综合以上讨论,避障检测问题转变为判断式(6) 和式(7) 是否有公共解。将式(6) 代入式(7) 得:

$$\frac{\left[k(x_{j}-x_{j-1}) + x_{j-1} - x_{0_{\tau}}\right]^{2}}{\left(a_{\tau}+r_{j}\right)^{2}} + \frac{\left[k(y_{j}-y_{j-1}) + y_{j-1} - y_{0_{\tau}}\right]^{2}}{\left(b_{\tau}+r_{j}\right)^{2}} +$$

$$\frac{\left[k(z_{j}-z_{j-1})+z_{j-1}-z_{0\pi}\right]^{2}}{\left(c_{-}+r_{i}\right)^{2}}-1=0 \qquad (\mid k \mid \leq 1)$$
 (8)

通过判断式(8)的解是否在[-1,1]上可判断是否 碰撞 ((() 等于式(() 左边 (() 的对称轴为:

$$k^{*} = [(b_{\tau} + r_{j})^{2} (c_{\tau} + r_{j})^{2} (x_{j} - x_{j-1}) (x_{0 \pi} - x_{j-1}) + (a_{\tau} + r_{j})^{2} (c_{\tau} + r_{j})^{2} (y_{j} - y_{j-1}) (y_{0 \pi} - y_{j-1}) + (a_{\tau} + r_{j})^{2} (b_{\tau} + r_{j})^{2} (z_{j} - z_{j-1}) (z_{0 \pi} - z_{j-1})] / [(b_{\tau} + r_{j})^{2} (c_{\tau} + r_{j})^{2} (x_{j} - x_{j-1}) + (a_{\tau} + r_{j})^{2} (c_{\tau} + r_{j})^{2} (y_{j} - y_{j-1}) + (a_{\tau} + r_{j})^{2} (b_{\tau} + r_{j})^{2} (z_{i} - z_{i-1})]$$

$$(9)$$

通过 f(k) 的零点情况可判断碰撞情况,如表 1 所示。

表 1 连杆避障检测分析

数值情况	 是否碰撞
$f(-1)f(1) \leq 0$	是
$f(-1) f(1) > 0$, $\mid k^* \mid > 1$	否
$f(-1)f(1) > 0$, $ k^* \le 1$, $f(k^*) \le 0$	是
$f(-1)f(1) > 0$, $ k^* \leq 1$, $f(k^*) > 0$	否

2.2 算法流程

由于关节空间路径规划与笛卡尔空间相比,具有 如下优势: 不需要考虑机械臂逆运动学解[15] 的存在性 和多解性: 关节空间路径规划可规避奇异点[16] ,故可 在关节空间进行规划。算法流程如下:

- (1) 对于起始节点 q_s ,设置 $g(q_s) = 0$, $f(q_s) =$
- - (2) 将 q s 加入 OPEN LIST 列表;
 - (3) 判断 OPEN LIST 列表是否为空, 若不为空执

行步骤(4),否则路径搜索失败,跳转至步骤(9);

- (4) 求取 OPEN LIST 列表中 f(x) 最小节点 q 将其从 OPEN LIST 列表中删除 加入 CLOSE LIST 列表;
- (5) 对于目标节点 q_c ,判断 q 是否等于 q_c ,若不等于执行步骤(6),否则路径搜索成功,跳转至步骤(9);
- (6) 遍历 q 的每一相邻节点 ,用表 1 选出不碰撞路径点 q_{next} ,若选不出 q_{next} ,路径搜索失败 ,跳转至步骤 (9) ,否则执行步骤 (7) ;
- (7) 判断 q_{next} 是否在 OPEN LIST 列表中 .若在 ,计 算 $g(q_{\text{next}}) = g(q) + \| q_{\text{next}} q \| f(q_{\text{next}})$.并将 q_{next} 加入 OPEN LIST 列表 ,设置 q 为 q_{next} 的父节点 .否则执行步骤(8);
- (8) 判断 $g(q_{\text{next}}) > g(q) + \| \mathbf{q}_{\text{next}} \mathbf{q} \|$ 是否成立,若不成立,不进行任何操作,跳转至步骤(3),否则,计算 $g(q_{\text{next}}) = g(q) + \| \mathbf{q}_{\text{next}} \mathbf{q} \|$, $f(q_{\text{next}})$,并设置 $q \to q_{\text{next}}$ 的父节点,跳转至步骤(3);
 - (9) 算法结束。

3 仿真验证

在 MATLAB R2016b 下 对 PUMA560 机械臂进行

仿真 D-H 参数[17] 如表 2 所示。

表 2 机械臂 D-H 参数

Ī	连杆	关节角/(°)	连杆偏距/m	连杆长度/m	连杆转角/(°)
	1	[-160 ,160]	0	0	90
	2	[-45 225]	0	0. 431 8	0
	3	[-225 45]	0. 150 1	0.0203	-90
	4	[-110 ,170]	0. 431 8	0	90
	5	[-100,100]	0	0	-90
_	6	[-266 266]	0	0	0

参数设置如下: $q_s = [0^{\circ} A5^{\circ} A5^{\circ} 0^{\circ} A5^{\circ} 0^{\circ}]$, $q_c = [-10^{\circ}, -40^{\circ}, -40^{\circ}, -80^{\circ}, 90^{\circ}]$, $\rho_c = [-10^{\circ}, -40^{\circ}, -40^{\circ}, -80^{\circ}, 90^{\circ}]$, $\rho_c = 4$, $\rho_c = 2$ 。 为了说明位置代价 $\rho_c = 4$, $\rho_c = 2$ 。 为了说明位置代价 $\rho_c = 4$, $\rho_c = 2$ 。 为了说明位置代价 $\rho_c = 4$, $\rho_$

表 3 位置代价 A^* 算法、 A^* 算法、双向时效 A^* 算法和跳点搜索 A^* 算法的遍历节点数、所耗时间

障碍数目	维数	环境情况	算法	OPEN LIST 节点数	CLOSE LIST 节点数	所用时间/s
	高维 无障		位置代价 A*	2 748	306	0. 538
0		丁 [连7目	双向时效 A*	3 243	361	0. 626
0		兀 陴時	 跳点搜索 A [*]	3 423	381	0. 645
			A*	4 387	486	0. 948
	高维 简单		位置代价 A*	6 476	1 358	9. 840
1		佐 苗	双向时效 A*	7 571	1 612	11. 584
1		间里	 跳点搜索 A [*]	7 800	1 672	11. 971
			A*	9 788	2 347	18. 351
	高维 较复杂		位置代价 A*	9 416	2 273	17. 961
2		+÷ <i>5</i> − 1	双向时效 A*	10 678	2 737	21. 259
2		 跳点搜索 A [*]	11 234	2 856	22. 079	
		A*	12 220	3 993	33. 872	
			位置代价 A*	11 936	3 398	28. 048
(C)19			ırnal 元 [月月次)ni c Pi	ublishing3House. Al	l rights 1014rved.	http://33.vy4y.cnki.
3	高维	复杂	 跳点搜索 A [*]	14 053	4 030	34. 735

 A^*

16 647

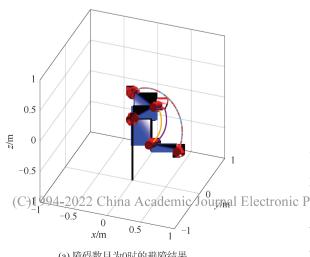
5 519

55.102

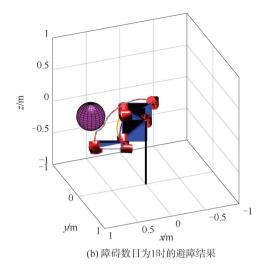
表 4 算法的遍历节点数、所耗时间对比

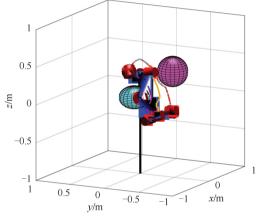
	 算法 -				
障碍数			11月11日 日月11日 日日11日 日日11日		
		OPEN LIST	CLOSE LIST	时间消耗	
	位置代价 A*	-37.4%	-37.0%	-43. 2%	
0	双向时效 A*	-26.1%	-25.7%	-34.0%	
	跳点搜索 A*	-22.0%	-21.6%	-31.0%	
	位置代价 A*	-33.8%	-42.1%	-46. 7%	
1	双向时效 A*	-22.7%	-31.3%	-36.9%	
	跳点搜索 A*	-20.3%	-28.7%	-34.8%	
	位置代价 A*	-23.0%	-43.1%	-47.0%	
2	双向时效 A*	-12.6%	-31.5%	-37. 2%	
	跳点搜索 A*	-8.1%	-28.5%	-34. 8%	
	位置代价 A*	-28.3%	-38.4%	-49.1%	
3		-17.6%	-29.1%	-38.8%	
	跳点搜索 A*	-15.6%	-27.0%	-37.0%	

由表 4 可知 在障碍数目为 0 1 2 3 时: 位置代价 A* 算法与 A* 算法相比 ,路径规划所耗时间分别缩短 了 43.2% A6.7% A7.0% A9.1% ,且规划所用 CLOSE LIST 和 OPEN LIST 节点数分别减小了 37.0%, 42.1%, 43.1%, 38.4%和37.4%, 33.8%, 23.0%, 28.3%; 与双向时效 A* 算法相比 ,分别缩短了 14.1% , 15.1%, 15.5%, 16.9%, 且规划所用 CLOSE LIST 和 OPEN LIST 节点数分别减小了 15.2%, 15.8%, 17.0%,13.2%和15.3%,14.5%,11.8%,13.0%;与跳 点搜索 A* 算法相比,分别缩短了 16.6%,17.8%, 18.6%, 19.3%, 且规划所用 CLOSE LIST 和 OPEN LIST 节点数分别减小了 19.7%, 18.8%, 20.4%, 15.7%和19.7%,17.0%,16.2%,15.0%。



(a) 障碍数目为0时的避障结果





(c)障碍数目为2时的避障结果

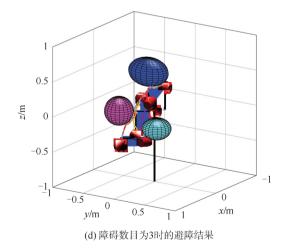


图 3 提出算法的机械臂避障运动规划结果

由此可见文中提出的位置代价 A* 算法能在高维 或复杂环境下,显著降低 A* 算法计算量、提高 A* 算 法运行效率 其与双向时效 A^* 和跳点搜索 A^* 算法相 2022 China Academic Journal Electronic P此計算量更低,执行效率更稅ye由图明可知收位置代net 价 A* 算法能使机械臂在运动中避开障碍 并到达预定 位姿。

4 结论

- (1) 位置代价 A^* 算法可使机械臂在运动中避开 所有障碍 ,并到达既定构型。
- (2) 在相同条件下,位置代价 A* 算法与 A* 算法相比 路径规划所耗时间、遍历节点数显著减少,所提算法能解决 A* 算法执行效率低、计算量大的问题,同时其与两种改良方法相比 搜索效率更优、计算量更小。
- (3) 位置代价 A^* 算法拓宽了现有 A^* 算法的应用范围 ,为高维或复杂环境下的机器人路径规划提供了理论基础。

参考文献

- [1] 贾庆轩,陈钢,孙汉旭,等.基于A^{*}算法的空间机械臂 避障路径规划[J].机械工程学报,2010,46(13):109-115.
- [2] Cao X , Zou X J , Jia C Y. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator [J]. Computers and Electronics in Agriculture , 2019 , 156: 105-118.
- [3] 徐帷, 卢山. 基于 Sarsa(λ) 强化学习的空间机械臂路径规划研究[J]. 宇航学报, 2019, 40(4): 435-443.
- [4] Liu S, Zhang Q, Zhou D. Obstacle avoidance path planning of space manipulator based on improved artificial potential field method [J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2014, 95(1): 31-39.
- [5] Wang S K , Zhu L. Motion planning method for obstacle avoidance of 6-dof manipulator based on improved A* algorithm [J]. Journal of Donghua University (Eng. Ed) , 2015 , 32(1): 79-85.
- [6] Lozano-Perez T. Spatial planning: a configuration space approach [J]. IEEE Transaction on Computers , 1983 , C-32 (2): 108-120.
- [7] 汪首坤,邸智,王军政,等.基于 A^{*} 改进算法的机械臂 避障路径规划[J].北京理工大学学报,2011,31(11): 1302-1306.

- [8] 李得伟,韩宝明,韩宇.一种逆向改进型 A* 路径搜索算法[J]. 系统仿真学报,2007,19(22):5175-5177.
- [9] 高民东,张雅妮,朱凌云.应用于机器人路径规划的双向时效 A^* 算法 [J]. 计算机应用研究,2019,36(3): 792-795.
- [10] Guruji D K , Agarwal H , Parsediya D K. Time-efficient A* algorithm for robot path planning [J]. Procedia Technology , 2016 , 23: 144-149.
- [11] Sturtevant N R , Felner A , Barrer M , et al. Memory-based heuristics for explicit state spaces [C] // International Joint Conference on Artifificial Intelligence , USA: International Joint Conferences on Artifificial Intelligence , 2009: 609 – 614.
- [12] 赵晓,王铮,黄程侃,等.基于改进 A* 算法的移动机器 人路径规划[J]. 机器人,2018,40(6): 903-910.
- [13] Harabor D , Grastien A. The JPS pathfifinding system [C] // 5th Annual Symposium on Combinatorial Search. Menlo Park , USA: AAAI , 2012: 207-208.
- [14] Yang C F , Zhang S T , Jin J , et al. Forward kinematics analysis of parallel manipulator using modified global Newton-Raphson method [J]. Journal of Central South University , 2010 , 17(6): 1264-1270.
- [15] Nazari A A , Hasani A , Beedel M. Screw theory-based mobility analysis and projection-based kinematic modeling of a 3-CRRR parallel manipulator [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering , 2018 , 40(7): 1-15.
- [16] 连广宇,孙增圻.非冗余机械臂奇异路径跟踪算法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(4):495-498.
- [17] Wardhana A S , Ashari M , Suryoatmojo H. Designing and modeling a novel dual parabolic concentrator with three degree of freedom (DOF) robotic arm [J]. Solar Energy , 2019 (194): 436-499.

作者简介: 张许有(1995—) 男,硕士研究生,主要研究方向: 机器人感知与控制。E-mail: 1958976710@qq.com 刘有余(通信作者)(1976—) 男 教授 硕士生导师,博士,主要研究方向: 现代集成制造系统。E-mail: liuyoyu1@163.com