doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.11.023

基于改进算法融合与切换的采摘机械臂路径动态规划

李　娜[1,2]　高　笑[1]　杨　磊[1,2]　姜海勇[1,2]　张立杰[1,2]　陈广毅[1]
(1.河北农业大学机电工程学院,保定 071001;2.河北省智慧农业装备技术创新中心,保定 071001)

摘要:针对苹果采摘任务中因自然环境复杂造成的机械臂路径规划时间长、效率低、成功率低等问题,提出一种改进的融合切换路径动态规划算法。该算法以 RRT 算法为基础,引入动态阈值的目标偏置采样策略与人工势场法,通过引力场与斥力场改变新节点的生成位置,增加采样的目的性并提高收敛速度;在斥力势场系数中引入相对距离,通过与目标点之间的距离来克服目标不可达的问题;为增强算法的鲁棒性,设定阈值划分区域空间,根据当前节点所在位置动态切换至 FGA-RRT(Failure-guided adaptive sampling region RRT algorithm)算法搜索,解决狭窄通道的问题,提高规划成功率;基于贪心算法对所得路径树进行优化处理,去除冗余节点,进一步缩短路径长度并优化路径平滑度,保证采摘机械臂运动的平稳性。分别对 RRT 算法、RRT* 算法、GB-RRT 算法、普通融合算法和改进的融合切换算法,在简单障碍、狭窄通道、复杂障碍以及简单三维空间等不同环境中进行仿真分析,结果表明:改进的融合切换算法在不同环境中都具有良好的适应性,规划效率高,迭代次数少,路径质量高。基于林间苹果园生长环境,搭建 6 自由度机械臂仿真实验室环境,进行避障采摘路径规划试验,改进的融合切换算法采摘效率比 RRT 算法提升 74.74%,路径长度减少 32.03%,采摘成功率提高 8 个百分点。试验结果表明本文算法在多变的苹果采摘场景中有更强的搜索能力。

关键词:采摘机械臂;路径规划;改进 RRT 算法;改进人工势场法;算法融合与切换
中图分类号:S225.93　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)11-0221-10　　**OSID**:

Dynamic Path Planning for Picking Robot Arm Based on Improved Algorithm Fusion and Switching

LI Na[1,2]　GAO Xiao[1]　YANG Lei[1,2]　JIANG Haiyong[1,2]　ZHANG Lijie[1,2]　CHEN Guangyi[1]
(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding* 071001, *China*
2. *Hebei Province Smart Agriculture Equipment Technology Innovation Center, Baoding* 071001, *China*)

Abstract: Aiming at the issues such as prolonged path planning time, low efficiency and poor success rate of the picking manipulator in the apple picking task as a consequence of the complex natural picking environment, an improved fusion and switching path dynamic planning algorithm was proposed. The algorithm introduced a dynamic threshold goal bias sampling strategy and artificial potential field to alter the generation position of new nodes, increasing the purposiveness of sampling and improving convergence speed. A relative distance was incorporated into the repulsive potential field coefficient to overcome the problem of unreachable targets by considering the distance to the goal. To enhance the algorithm's robustness, a threshold was set to partition the spatial region, dynamically switching to the failure-guided adaptive sampling region RRT algorithm (FGA-RRT) based on the current node expansion state to address narrow passage issues and increase planning success rates. The greedy algorithm was utilized to optimize the resulting path tree, removing redundant nodes, further shortening the path length, and optimizing path smoothness to ensure the stable movement of the picking robot arm. Simulation experiments were conducted for the RRT algorithm, RRT* algorithm, GB-RRT algorithm, common fusion algorithm and the improved fusion and switching algorithm respectively in simple obstacles, narrow channels, complex obstacles and simple three-dimensional spaces. The results showed that the improved

收稿日期:2024-05-01　修回日期:2024-08-13
基金项目:河北省重点研发计划项目(21321902D)
作者简介:李娜(1981—),女,副教授,博士,主要从事机器人智能化与控制研究,E-mail:res_lina@126.com
通信作者:张立杰(1969—),男,教授,博士,主要从事机器人技术与自主系统研究,E-mail:ljzhang@ysu.edu.cn

fusion and switching algorithm had good adaptability in different environments, with high planning efficiency, few iterations and high path quality. Based on the established 6 - DOF robot arm motion planning simulation environment and laboratory environment, obstacle avoidance picking tests were conducted. The improved hybrid switching algorithm's picking efficiency was increased by 74.74%, path length was decreased by 32.03%, and picking success rate was improved by 8 percentage points compared with that of the RRT algorithm. The experimental results demonstrated that the proposed algorithm had stronger search capabilities in apple-picking scenarios, providing a reference for improving the operational efficiency of picking robot arms.

Key words: picking robot arm; path planning; improved RRT algorithm; improved artificial potential field method; algorithm fusion and switching

0 引言

路径规划算法研究是苹果智能采摘作业中的关键环节[1],路径规划算法分为全局路径规划和局部路径规划。全局路径规划以给定环境中的已知信息为基础,找到一条从起始点至目标点且能够避开所有障碍物的路径,常见的方法有 A* 算法、Dijkstra 算法和 RRT 算法[2-4]。局部路径规划方法有人工势场法、遗传算法等[5-7]。RRT 算法[8-11]因其原理简单、搜索快速的特点得到广泛应用,但随机性强。在自然环境中,由于苹果与枝干生长的随机性,使得采摘环境变得更加复杂、多变,会导致算法规划效率变低、有限时间内规划成功率变差。

针对上述问题,诸多学者进行了规划算法的改进。KUFFNER 等[12]提出 RRT - Connect 算法,双向拓展加快搜索的效率。王坤等[13]在此基础上添加拓展点作为第 3 节点生成额外 2 棵拓展树,再次提高算法的运行速度。KARAMAN 等[14]引入优化策略提出 RRT* 算法,通过区域内节点重连的方式改善整体的路径质量,但在高维采摘环境中,算法计算难度大。在采摘机械臂的应用方面,姚立健等[15]将规划的三维空间问题转降为二维空间,降低了求解的难度。CAO 等[16]引入目标引力概念改进 RRT 算法,采用遗传算法(GA)对步长进行优化,加快了规划速度。张勤等[17]提出 CTB - RRT* 算法,引入柯西目标引力降低采样的盲目性,提高了局部搜索速度。马冀桐等[18]对环境进行分类,提出基于构型空间先验知识引导点的 RRT - Connect 算法,并与 IGRRT - Connect 算法并行规划,提高了运行效率,但因并行执行的策略,无法根据当前环境选用合适的算法规划,增加了内存占用量。随着技术的提升与完善,深度学习和强化学习的方法[19-20]也被应用进来。

目前更多学者针对单一算法进行改进,但面对林间多变、复杂环境时,适应性较差。采用算法融合的方法,原理简单、改进效果显著、针对性强。HUANG[21]分别在 RRT 与 RRT* 算法中融合了人工势场法,改变节点的生成规律,提高了收敛速度,但未解决人工势场法陷入振荡与目标不可达等问题[22-23]。

针对传统 RRT 算法在多变环境中存在的节点拓展目的性差、收敛慢及路径曲折等问题,提出一种改进 RRT 算法、改进人工势场法相融合,与失败导向的变采样区域 RRT(FGA - RRT)动态切换的算法。对目标偏置采样方法添加动态阈值,并引入人工势场法改变节点生长位置,减小路径搜索的随机性,提高算法在不同环境中的搜索效率;基于与目标点的距离调节斥力系数的大小,克服目标不可达问题;设定阈值划分工作空间,实时检测节点位置,动态切换 FGA - RRT 算法来处理狭窄通道的问题,增强算法对不同环境的适应性;最后对所得路径中的节点进行贪心处理,优化路径的长度与平滑度,以保证机械臂运动平稳性。

1 算法原理

1.1 改进融合切换算法组成

本文提出的改进融合切换算法主要由改进 RRT 算法与改进人工势场法的融合算法和基于失败导向的变采样区域 RRT 算法(FGA - RRT)两部分组成,如图 1 所示。其中,使用设定动态概率阈值的方式进行目标偏置采样对 RRT 算法进行改进,使用调节斥力场参数的方式对人工势场法进行改进,使用动态切换失败导向的变采样区域方法来对 RRT 算法进行改进,最后对所得路径使用二分法进行优化处理。

1.2 基于动态概率阈值的目标约束采样

本文引入目标偏置采样的 RRT 算法[24]。设定目标偏置概率 P_{target}(取值范围为 0 ~ 1),在每次拓展节点时,于 0 ~ 1 之间均匀随机产生一个新概率 P。当 $P > P_{\text{target}}$ 时,仍在工作空间内随机选取采样点;反之,直接选取目标点 q_{goal} 作为本次采样点。最终随机采样点为

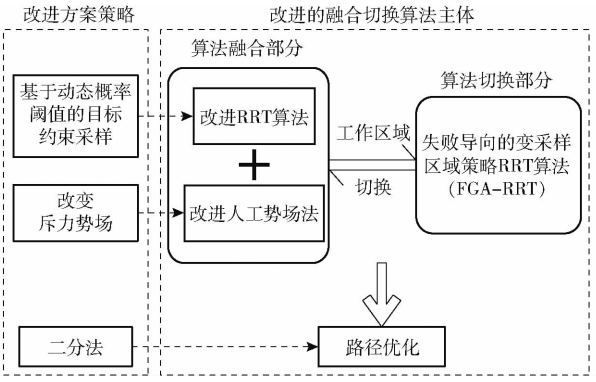


图 1　改进的融合切换算法组成示意图

Fig. 1　Diagram of improved fusion switching algorithm composition

$$q_{\text{random}}=\begin{cases}\text{Sample}(i) & (P>P_{\text{target}})\\ q_{\text{goal}} & (0\leqslant P\leqslant P_{\text{target}})\end{cases} \tag{1}$$

式中　Sample(i)——随机采样函数

为使随机树在障碍物密集和稀疏环境都保持良好的探索能力，本文对目标偏置概率的取值进行优化，提出一种基于动态概率阈值的目标偏置采样方法。目标偏置概率阈值会根据每次环境中障碍物面积在工作空间总面积中的占比情况动态变化，具体表达式为

$$P_{\text{dt}}=1-\frac{V_{\text{obs}}}{V_{\text{total}}} \tag{2}$$

式中　P_{dt}——动态目标偏置概率阈值

V_{obs}——障碍物的总面积（二维）或体积（三维）

V_{total}——工作空间的总面积（二维）或体积（三维）

1.3　融合改进人工势场法的节点拓展机制

为加快改进 RRT 算法的收敛速度，同时确保规划路径有效性，本文引入人工势场法[25]对节点的生成机制加以调整，并对人工势场法进行优化，改进斥力势场解决目标不可达的问题。改进 RRT 算法融合人工势场法后新节点的拓展原理图如图 2 所示。

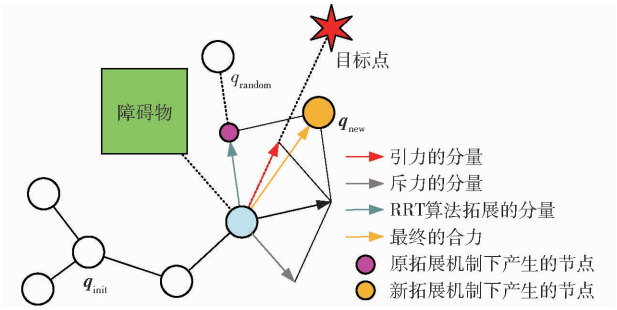


图 2　新节点拓展原理图

Fig. 2　Schematic of new node expansion

算法融合后，新节点的生成受 3 个函数的影响，分别为：目标引力函数 R_{at}、障碍斥力函数 R_{re} 和改进 RRT 函数 R_{dt}，算法确定新节点位置的函数用 $F(n)$ 表示，即

$$F(n)=R_{\text{at}}(n)+R_{\text{re}}(n)+R_{\text{dt}}(n) \tag{3}$$

其中，目标引力函数 $R_{\text{at}}(n)$ 计算式为

$$R_{\text{at}}(n)=k\frac{\boldsymbol{q}_{\text{goal}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}}{|\boldsymbol{q}_{\text{goal}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}|} \tag{4}$$

式中　k——引力增益系数

$\boldsymbol{q}_{\text{goal}}$——目标点位置向量

$\boldsymbol{q}_{\text{near}}$——最近邻节点位置向量

$\boldsymbol{q}_{\text{goal}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}$——目标点与最近邻节点的位移向量

$|\boldsymbol{q}_{\text{goal}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}|$——两点之间的欧氏距离，即两点之间的直线距离

障碍斥力函数 $R_{\text{re}}(n)$ 计算式为

$$R_{\text{re}}(n)=\begin{cases}0 & (\rho(\boldsymbol{q}_{\text{near}},\boldsymbol{q}_{\text{obs}})>\rho_0)\\ k_{\text{rep}}\left(\dfrac{1}{\rho(\boldsymbol{q}_{\text{near}},\boldsymbol{q}_{\text{obs}})}-\dfrac{1}{\rho_0}\right)\dfrac{1}{\rho^2(\boldsymbol{q}_{\text{near}},\boldsymbol{q}_{\text{obs}})}\dfrac{\partial(\boldsymbol{q}_{\text{near}}-\boldsymbol{q}_{\text{obs}})}{\partial\boldsymbol{q}_{\text{near}}} & (\rho(\boldsymbol{q}_{\text{near}},\boldsymbol{q}_{\text{obs}})\leqslant\rho_0)\end{cases} \tag{5}$$

式中　k_{rep}——斥力增益系数

$\rho(\boldsymbol{q}_{\text{near}},\boldsymbol{q}_{\text{obs}})$——障碍物与最近临节点的最短距离

ρ_0——斥力势场范围

$\boldsymbol{q}_{\text{obs}}$——障碍物的位置向量

改进 RRT 函数 $R_{\text{dt}}(n)$ 计算式为

$$R_{\text{dt}}(n)=\frac{\boldsymbol{q}_{\text{random}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}}{|\boldsymbol{q}_{\text{random}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}|} \tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{q}_{\text{random}}$——随机采样点位置

$\boldsymbol{q}_{\text{random}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}$——随机采样点与最近邻节点的位移向量

$|\boldsymbol{q}_{\text{random}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}|$——两点之间的欧氏距离

引入人工势场法相融合虽加快了算法的收敛速度，但也带来了目标不可达的问题。即当目标点与障碍物的距离过近时，势场产生的斥力作用远大于引力作用，致使节点始终无法到达目标位置。为解决该问题，本文提出改进的斥力函数，通过判断当前节点与目标点之间的欧氏距离，调整斥力的系数。改进的斥力系数 k_{r} 的表达式为

$$k_{\text{r}}=k_{\text{r0}}(1-\text{e}^{-\beta|\boldsymbol{q}_{\text{goal}}-\boldsymbol{q}_{\text{near}}|}) \tag{7}$$

式中　k_{r0}——初始斥力增益系数

β——调节因子

改进后的障碍斥力函数 $R_{\text{rep}}(n)$ 为

$$R_{\mathrm{rep}}(n)=\begin{cases}0 & (\rho(\boldsymbol{q}_{\mathrm{near}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{obs}})>\rho_0)\\ k_{\mathrm{r}}\left(\dfrac{1}{\rho(\boldsymbol{q}_{\mathrm{near}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{obs}})}-\dfrac{1}{\rho_0}\right)\dfrac{1}{\rho^2(\boldsymbol{q}_{\mathrm{near}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{obs}})}\dfrac{\partial(\boldsymbol{q}_{\mathrm{near}}-\boldsymbol{q}_{\mathrm{obs}})}{\partial\boldsymbol{q}_{\mathrm{near}}} & (\rho(\boldsymbol{q}_{\mathrm{near}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{obs}})\leqslant\rho_0)\end{cases} \tag{8}$$

由式(7)可得,通过考虑当前节点与目标节点间距离的关系,动态调整改进后的斥力增益系数,使得节点能够继续向目标点拓展,从而解决目标不可达的问题。

1.4 分区域的算法切换策略

在传统的人工势场法中,目标不可达问题并不是唯一导致算法不收敛的因素。当障碍物之间的距离较近时,虽存在明显的路径,但斥力场之间的叠加使得节点无法在其内部拓展,即狭窄通道问题。针对上述情况,本文提出一种动态切换算法,通过斥力场范围设定距离阈值(本文通过试验设定的距离阈值 $L_1=1.5p_0$,其中 p_0 为斥力范围),判断易产生狭窄通道的障碍物对及工作空间区域,当前节点搜索至该区域范围内时,由改进的融合算法切换至另一算法进行拓展,在离开此区域后,再切回至改进的融合算法。

为了提高切换后的 RRT 算法在狭窄通道中的搜索效率,本文提出以失败为导向的变采样区域策略。在节点拓展中缩小采样点的采样区域,并设定一个初始固定区域值,避免过多无用节点的产生;随后在碰撞检测时,若能顺利通过,则设定下次的采样区域初始为原固定区域值;反之,则将下次的采样区域缩小。初始固定区域的选取原则为,以当前节点为中心,2 个步长为边长的正方形(二维)或正方体(三维),以二维平面为例,表达式为

$$\boldsymbol{q}_{\mathrm{rand}}=(x_{\mathrm{new}}+mS,y_{\mathrm{new}}+mS) \tag{9}$$

式中 $\boldsymbol{q}_{\mathrm{rand}}$——切换算法中随机采样点位置

$(x_{\mathrm{new}},y_{\mathrm{new}})$——当前新节点坐标

m——[-1,1]之间的随机数

S——步长

缩小原则为采样区域边长取原边长的 1/2,变化函数为

$$S=\begin{cases}S & (n+1)\\ S/2 & (\text{其他})\end{cases} \tag{10}$$

式中 n——拓展树中的节点个数

改进后的切换算法原理如图 3 所示。

1.5 路径优化方法

基于采样点的路径规划算法,最终所得路径是节点间的连续线段,节点越多整体路径越曲折,越影响机械臂运行的稳定性[26]。针对这一问题,本文采用贪心算法的策略对冗余节点进行去除,主要的过程为:首先,计算步长 S 与起始点到目标点距离 D 的比值,记为比例因子 μ。

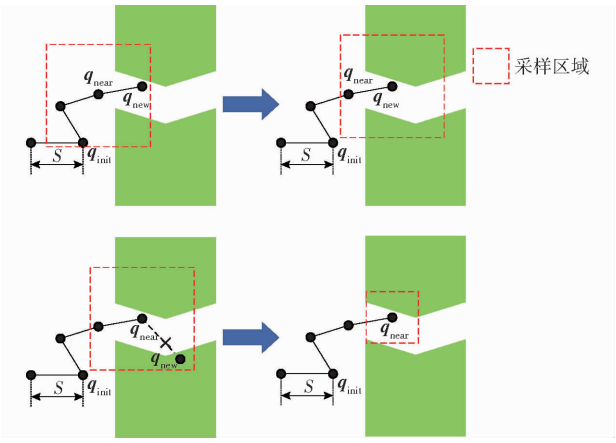


图 3 失败导向的变采样区域 RRT 算法原理图

Fig. 3 Principle diagram of failure-guided adaptive sampling region RRT algorithm

$$\mu=\begin{cases}\mu_{\max} & (\mu\geqslant\mu_{\max})\\ S/D & (\mu_{\min}<\mu<\mu_{\max})\\ \mu_{\min} & (\mu\leqslant\mu_{\min})\end{cases} \tag{11}$$

其次,限制比例因子 μ 的最大值与最小值,本文中 $\mu_{\max}=0.5$,$\mu_{\min}=0.2$。然后,根据比例因子 μ 来确定当前节点需尝试连接的较远节点,原则式为

$$d=\lceil\mu N\rceil \tag{12}$$

式中 N——节点总数 d——相加数

$\lceil\ \rceil$——向上取整操作符

例如当前节点编号为 n',则与其尝试连接的节点编号为 $n'+d$,当这一数值超过节点总数时,取目标点为尝试连接节点。使用二分法对当前节点与尝试连接节点进行碰撞检测,若检测通过,将尝试节点添加至新路径中,反之则取 2 点的中间点(向上取整)作为新的尝试节点进行碰撞检测,直至有新节点添加至新路径中。在将目标点也添加到新路径中后,贪心算法结束并输出一条优化后的新路径。

设步长 S 为 30,起始点与目标点的距离 D 为 100,由公式(11)可得最终比例因子 μ 为 0.3,图 3 中未优化的路径用黑色表示,共 7 个节点,由公式(12)计算可得 d 为 3,即每隔 2 个节点进行一次贪心优化,优化处理后的路径用深红色表示,共 4 个节点,如图 4 所示。在此次优化过程中,节点 2、4、5 被当作冗余节点进行了修剪处理。

综上所述,针对自然采摘环境中,规划算法易出现的采样盲目、搜索效率低、算法不收敛等问题,本文融合改进 RRT 算法与改进人工势场法,同时将融

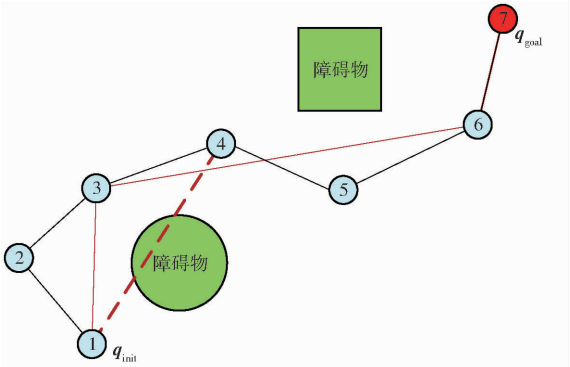


图 4　贪心算法路径冗余节点处理原理图

Fig. 4　Principle diagram of greedy algorithm for redundant node handling in path planning

合算法与 FGA－RRT 算法进行动态切换，提出改进的融合切换算法，算法流程图如图 5 所示。

首先读取已知的环境数据，包括起始点、目标点、障碍物的位置信息等；其次计算各障碍物之间的距离，找到产生狭窄通道的障碍物对，采用动态概率阈值的目标偏置采样策略选取当前节点的随机采样点；然后确定当前节点与产生狭窄通道障碍物对的距离，判定当前节点是否处于狭窄通道区域，若不处于则采用人工势场法融合的节点拓展机制确定新节点拓展的位置，反之则切换至 FGA－RRT 算法处理狭窄通道问题，逃离该区域后切换回改进的融合算法，当 2 种算法产生的新节点有一个到达目标点时，算法结束并输出路径；最后基于贪心算法，对路径进行处理优化。

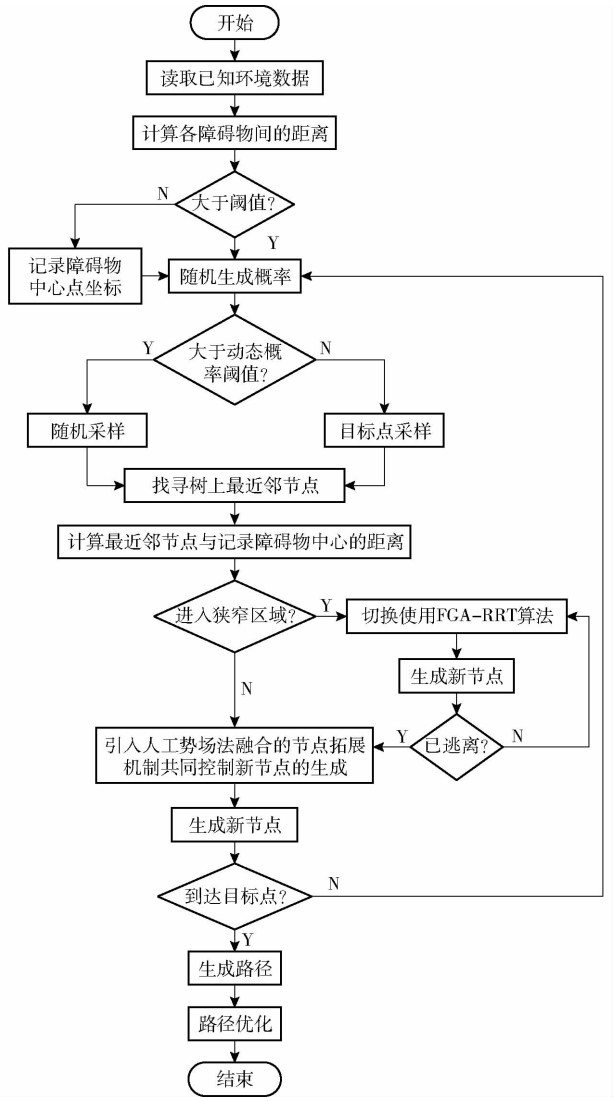


图 5　改进的融合切换算法流程图

Fig. 5　Flowchart of improved fusion switching algorithm

2　算法仿真试验与分析

为了验证本文改进融合切换算法的性能，将传统 RRT 算法、RRT* 算法、GB－RRT 算法、普通融合算法[21]和本文改进的融合切换算法在不同环境下进行仿真对比试验，如图 6 所示。环境 1 为障碍物较少且存在一处狭窄通道的环境，用于检验算法在简单环境下的搜索能力与环境适应能力；环境 2 为不可避免的狭窄通道且面积占比较大的环境，用于检验算法在狭窄通道下的搜索能力；环境 3 为多障碍离散的环境，用于检验算法在复杂环境下的搜索能力。

3 种仿真环境的地图尺寸相同，均为 1 000 mm × 1 000 mm，起始点位置均为(0，0)，目标点位置均为(999 mm，999 mm)，所有算法搜索步长为 20 mm，最大节点数为 10^5，确保所有算法不会因迭代次数不足导致规划失败。为克服随机性，在 3 种环境中每种算法分别独立运行 100 次，数据结果取平均值。

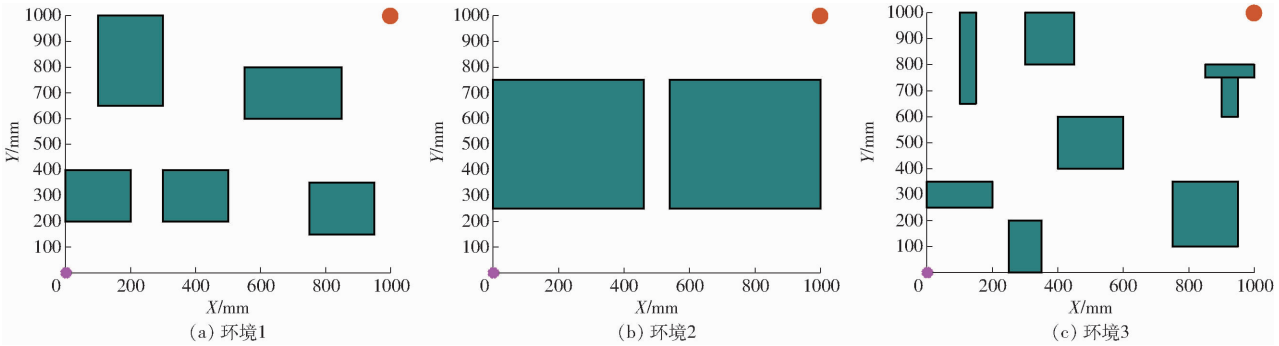


图 6　仿真地图环境

Fig. 6　Simulated map environment

仿真试验配置环境为 NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop 的 GPU，AMD Ryzen 7 5800H 的 CPU，内存 16 GB，64 位 Windows 10 系统。仿真结果如图 7 ~ 9 所示。

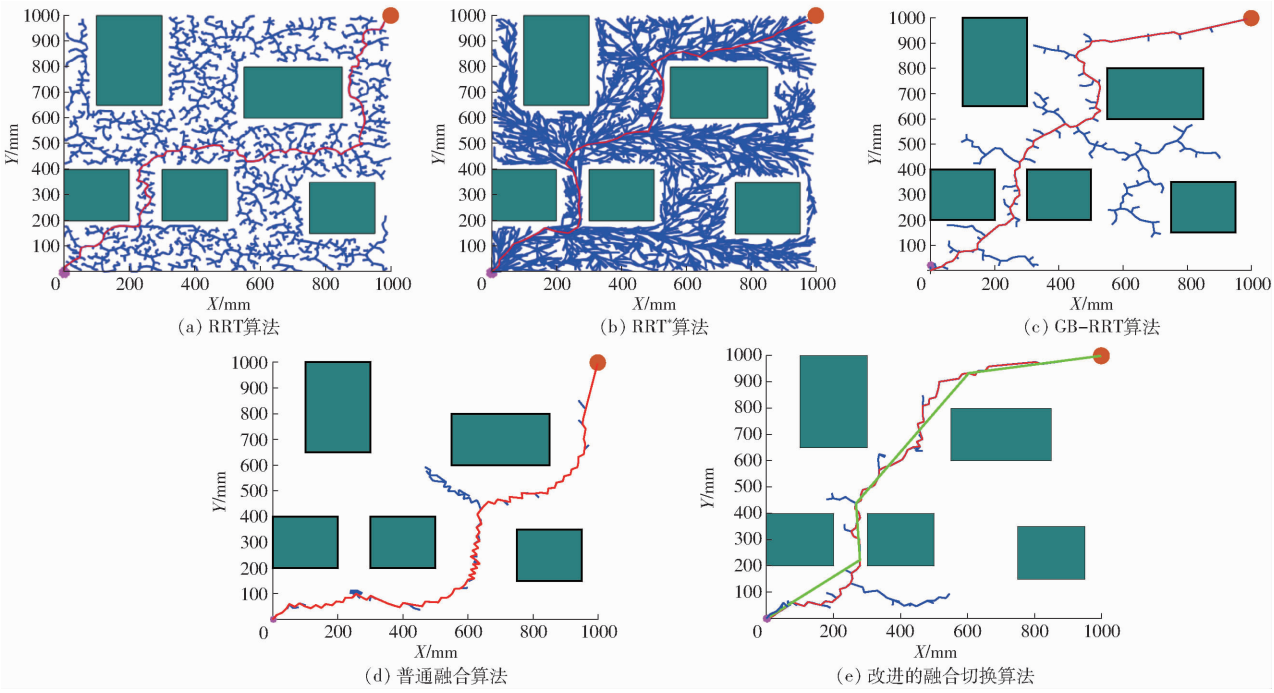


图 7 环境 1 中各算法规划的路径

Fig. 7 Paths planned by various algorithms in environment 1

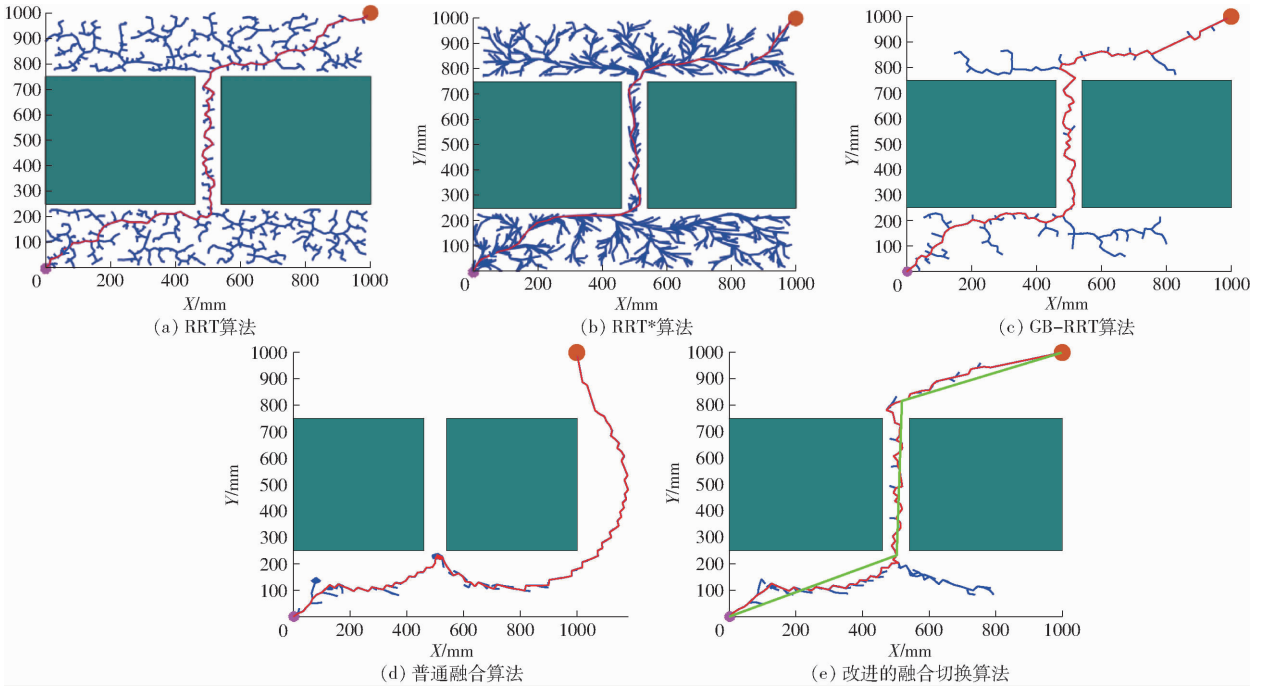


图 8 环境 2 中各算法规划的路径

Fig. 8 Paths planned by various algorithms in environment 2

2.1 仿真试验结果分析

由图 7 ~ 9 可知，本文算法在所有环境中均能完成路径规划。在简单障碍物环境中，对比普通的融合算法在路径规划的选择性上更多，能够处理狭窄通道的问题，空间利用率高。在狭窄通道环境中，普通融合算法规划失败，但改进的融合切换算法能够解决该问题，且对比其他算法无用节点更少，路径更平滑。在离散的复杂障碍物环境中，本文算法对不同工作区域的处理效果也优于其他算法，得到安全、平滑路径的同时，提高了收敛速度，降低了无用节点的产生。各算法的平均路径长度、运行时间与迭代次数如表 1 所示。

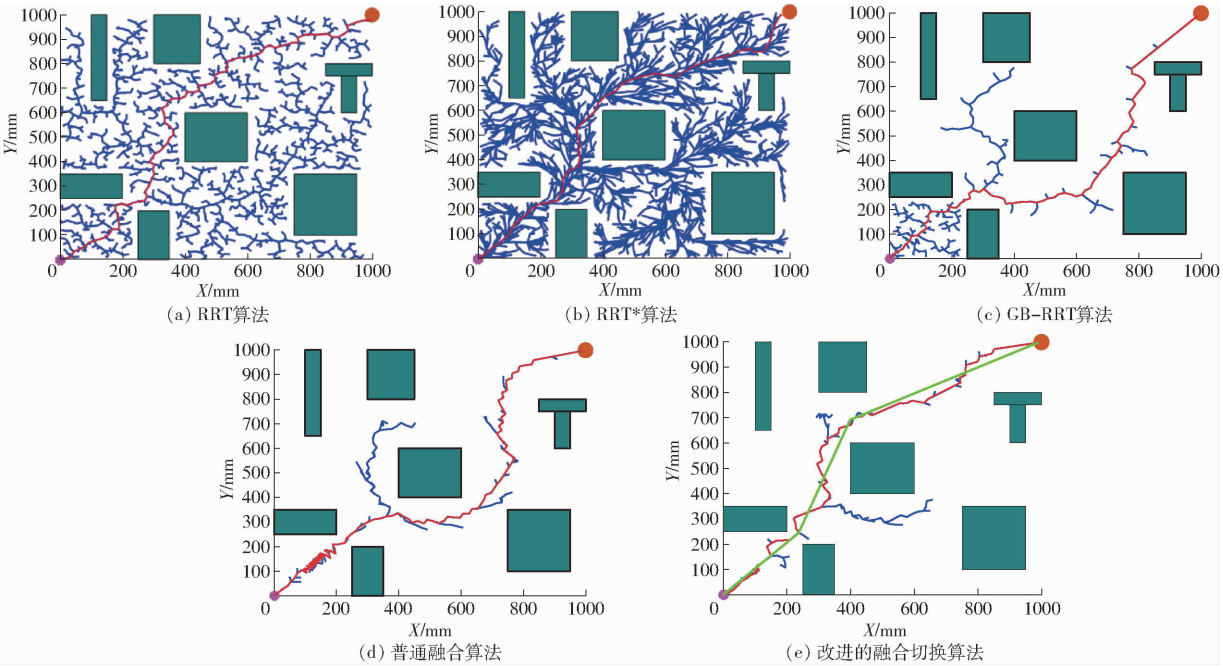


图 9　环境 3 中各算法规划的路径

Fig. 9　Paths planned by various algorithms in environment 3

表 1　各算法在不同环境下的试验数据统计

Tab. 1　Statistical analysis of experimental data for various algorithms in different environments

环境	算法	路径长度/mm	运行时间/s	迭代次数
环境 1（简单障碍物）	RRT	1 927.5	5.14	2 268.3
	RRT*	1 665.5	9.26	3 864.6
	GB－RRT	1 835.2	1.62	551.4
	普通融合算法	2 044.9	0.96	232.9
	改进的融合切换算法	1 683.9	0.71	225.2
环境 2（狭窄通道）	RRT	2 007.7	5.46	1 668.8
	RRT*	1 795.8	8.98	2 364.6
	GB－RRT	1 920.2	2.03	507.1
	普通融合算法	2 520.3	2.64	531.2
	改进的融合切换算法	1 820.1	1.68	438.7
环境 3（复杂障碍物）	RRT	1 912.4	6.94	2 782.5
	RRT*	1 636.2	11.56	4 663.4
	GB－RRT	1 740.1	2.85	1 207.3
	普通融合算法	2 260.7	1.06	324.5
	改进的融合切换算法	1 591.9	0.87	258.8

由表 1 可得，在平均路径长度上，改进的融合切换算法与专注改进路径长度的 RRT* 算法结果接近，但规划时间与迭代次数得到大幅提升。在不同的环境中本文算法所得路径长度均小于其他算法，在环境 1 中对比 RRT 算法、GB－RRT 算法、普通融合算法路径长度分别缩短 12.63%、8.24%、17.65%，在环境 2 中分别缩短 9.35%、5.21%、27.76%，在环境 3 中分别缩短 16.76%、8.52%、29.59%，进一步说明路径优化策略的有效性。综合上述仿真试验可知，本文提出的改进融合切换算法有效地提升了 RRT 算法的收敛速度、路径质量和稳定性。

2.2　三维仿真试验与结果分析

为验证算法的全面性，设置一组简单三维障碍物环境进行空间试验验证。由于算法在二维环境中表现出的可行性与良好环境适应性，三维环境缩小了地图尺寸，并采用简单碰撞检测方式来加快试验进程。仿真地图尺寸为 10 mm × 10 mm，起始点为(0,0,0)，目标点为(10 mm,10 mm,10 mm)，步长为 2 mm，最大节点数为 10^5，相应的其他参数也通过试验进行调整。试验结果如图 10 所示，各算法的数据如表 2 所示，可得本文算法在三维空间下同样保持良好的性能表现。

3　机械臂采摘试验与分析

3.1　采摘试验环境与搭建过程

基于苹果采摘任务环境，进行采摘机械臂的避障试验，验证改进融合切换算法的可行性与性能。搭建苹果采摘机器人样机作为试验平台，如图 11 所示。采摘臂为 6 自由度机械臂，末端负载 7 kg，工作半径为 819 mm，重复定位精度为 ±0.02 mm。在机器人操作系统(Robot operating system，ROS)中建立工作空间，配置相应的环境及启动文件，将本文所用到的算法导入开源运动库(Open motion planning library，OMPL)中，通过 Moveit 运动学求解器，对机械臂进行碰撞检测，实现机械臂的避障路径规划。

在实验室中根据采摘环境在RVIZ中建立对应

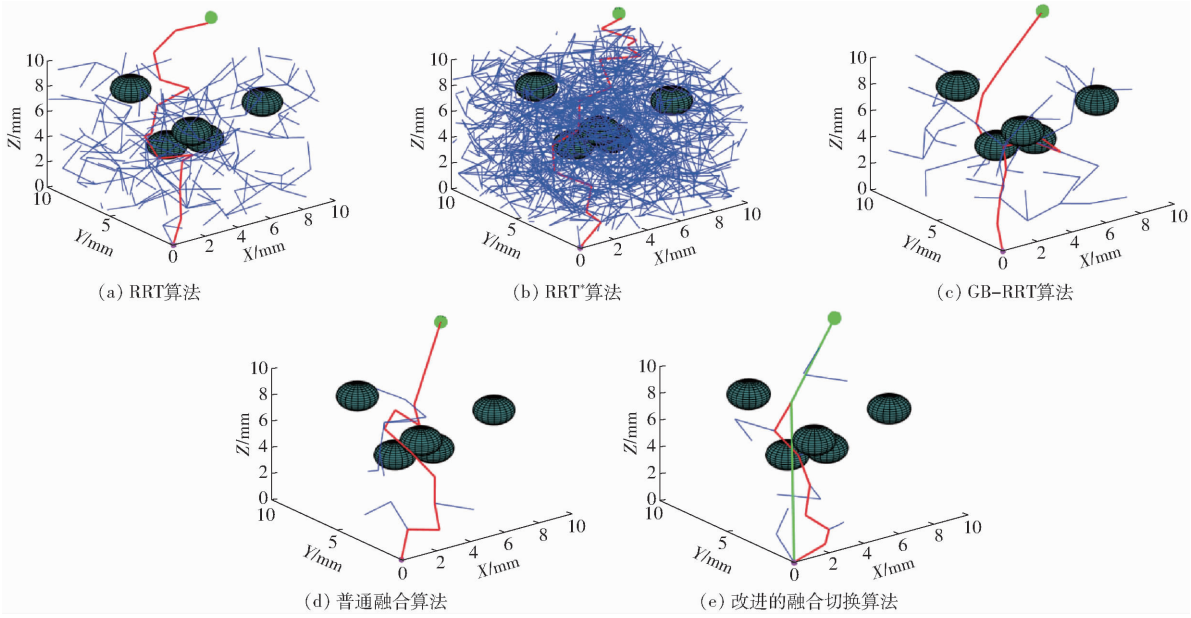


图 10 三维空间下算法规划的路径

Fig. 10 Path planning algorithms in three-dimensional space

表 2 各算法在三维环境下的试验数据统计

Tab. 2 Statistical analysis of experimental data for various algorithms in three-dimensional environment

算法	路径长度/mm	运行时间/s	迭代次数
RRT	28.6	1.56	1494.0
RRT*	20.5	2.11	2397.7
GB-RRT	26.7	0.72	50.6
普通融合算法	22.5	0.31	45.4
改进的融合切换算法	16.7	0.25	35.7

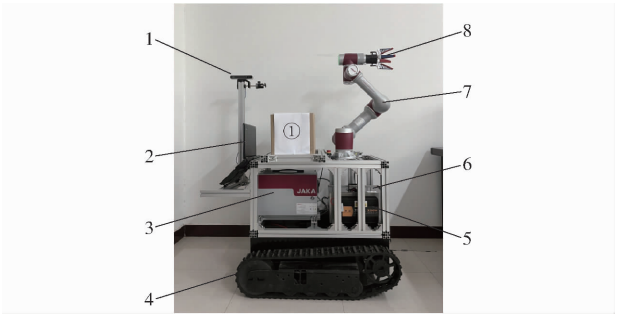


图 11 苹果采摘机器人样机

Fig. 11 Apple picking robot prototype

1. ZED 双目相机 2. 上位机 3. 控制柜 4. 履带式移动底盘 5. 逆变器 6. 电源 7. 机械臂 8. 柔性手爪

的仿真环境,如图 12 所示,仿真环境如图 13 所示。简化在仿真环境中的障碍物模型,去除树叶的影响,设定机械臂初始姿态(-230°,30°,-80°,175°,85°,0°)。在该环境中分别对 5 种算法进行路径规划试验。

3.2 试验结果分析

采摘机械臂在不同算法下的规划过程及所得路径如图 14 所示。图中紫色模型代表机械臂的初始姿态,橙色模型代表机械臂的目标姿态,蓝色曲线表

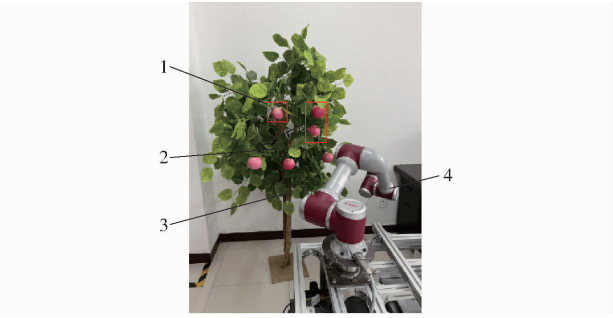


图 12 实验室苹果树采摘环境

Fig. 12 Laboratory apple tree picking environment

1. 目标果实 2. 枝干及其他苹果障碍物 3. 苹果树模型 4. 机械臂

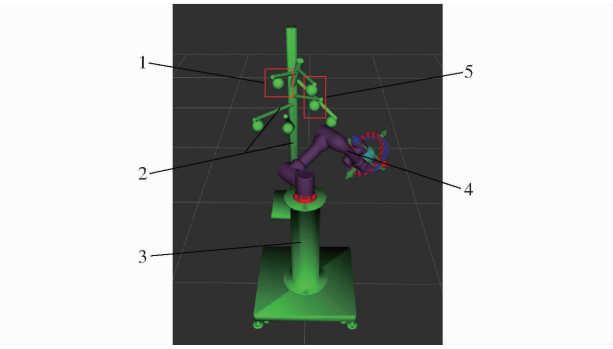


图 13 仿真苹果树采摘环境

Fig. 13 Simulated apple tree picking environment

1. 目标果实 2. 枝干障碍物 3. 支座 4. 机械臂 5. 苹果障碍物

示末端运动的轨迹。对应算法下机械臂的运动过程如图 15 所示。图中白色模型表示机械臂的一系列运动过程。对应算法下机械臂运行时各关节角度的变化曲线如图 16 所示。在仿真采摘环境中,为验证算法在机械臂路径规划上的性能,同样对每种算法

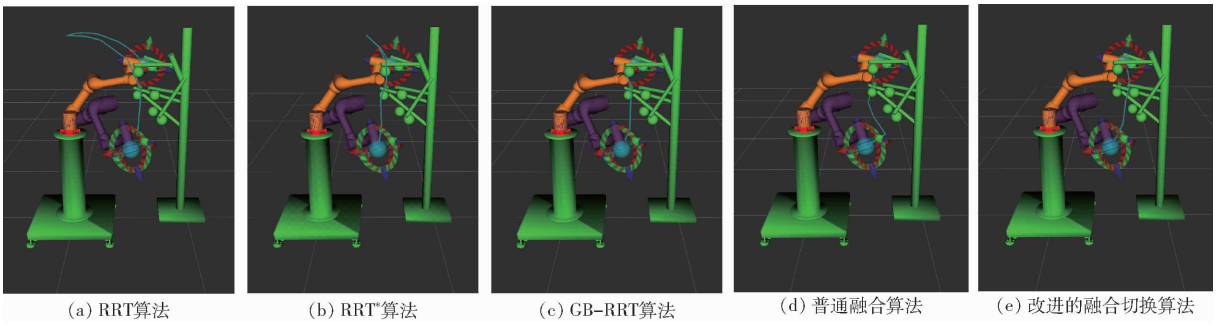


图 14　算法仿真路径轨迹

Fig. 14　Simulated path trajectories for each algorithm

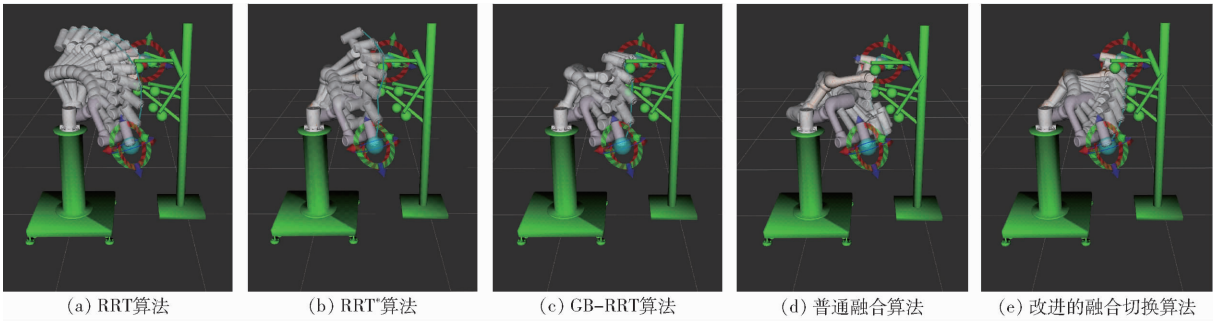


图 15　算法仿真路径规划结果

Fig. 15　Simulation path planning results of each algorithm

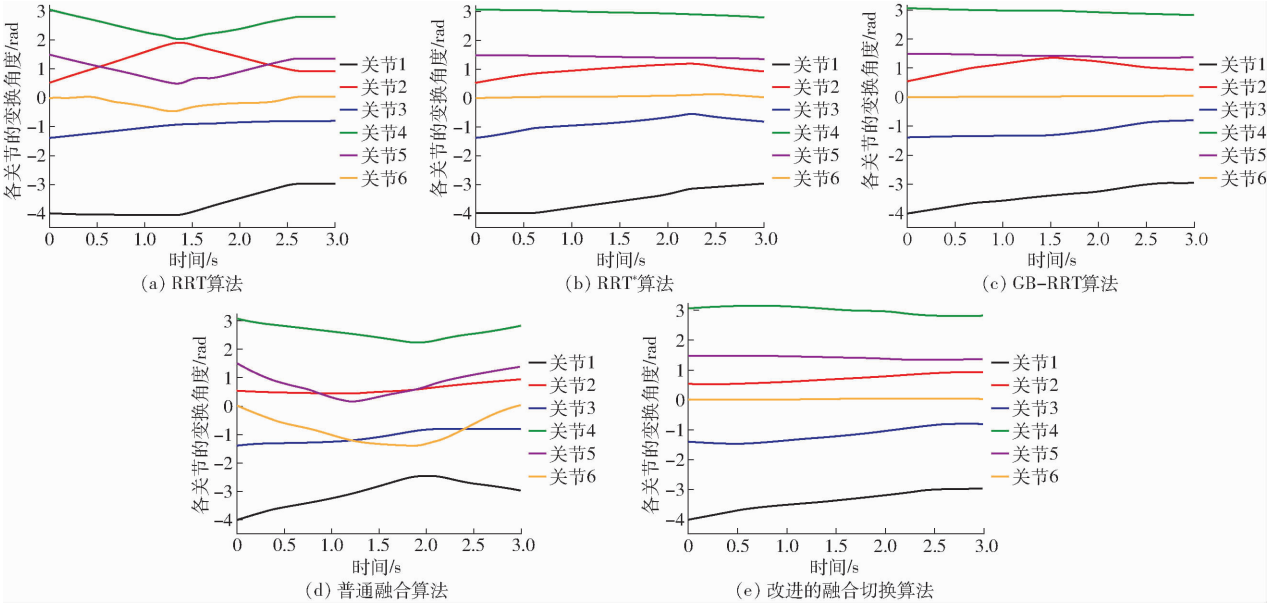


图 16　机械臂各关节的角度变化曲线

Fig. 16　Angle variation curves of each joint of manipulator

进行 100 次独立试验，性能数据取平均值，得到结果如表 3 所示。

由图 14～16 可得，改进的融合切换算法所规划的路径能够避开障碍，完成采摘任务，且路径更加平滑，各关节运动角度不会出现尖点，关节角变化较小，采摘机械臂运动更加稳定、柔顺。由表 3 可得，改进的融合切换算法路径长度是最短的，仅为 872.5 mm，运行时间是最少的，仅为 0.72 s，路径规划成功率为 98%。对比 RRT 算法，运行时间减少 74.74%，路径成本降低 32.03%，规划成功率提高 8 个百分点。

为验证本文算法在采摘样机系统中运行的可行性，对所规划出的机械臂路径取样，将各关节的变化导入至苹果采摘机器人样机中，得到实验室环境下机械臂的避障运动过程，如图 17 所示。结果表明在实际环境中机械臂能够按照仿真规划出的路径进行运动，从初始位姿出发躲避障碍物到达目标点。

表 3 采摘试验各算法性能

Tab. 3 Performance statistics of each algorithm in picking test

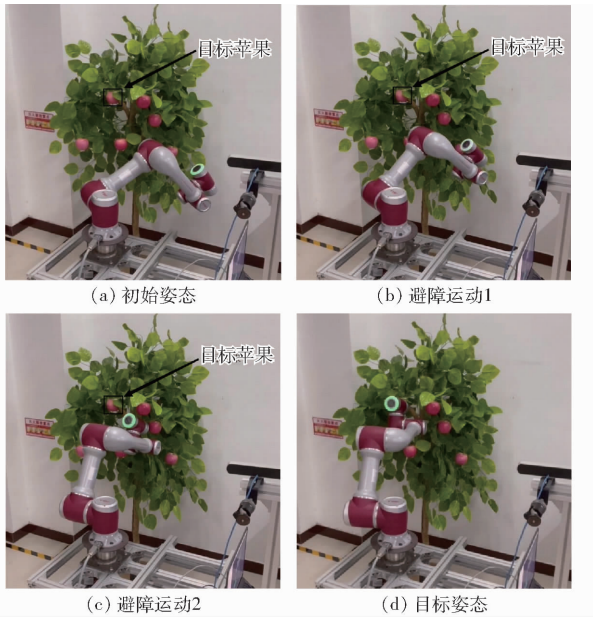
算法	路径长度/mm	运行时间/s	成功率/%
RRT	1 283.6	2.85	90
RRT*	894.1	3.67	89
GB－RRT	953.1	1.31	95
普通融合算法	1 164.3	1.78	87
改进的融合切换算法	872.5	0.72	98

4 结论

(1)提出了改进的融合切换算法。通过采用动态概率阈值的目标偏置采样,融合改进人工势场法的节点拓展机制,加快收敛速度;调节斥力势场并划分工作区域进行算法动态切换,增加算法的鲁棒性;基于贪心算法对路径优化处理,以保证机械臂平稳运行。

(2)算法仿真试验结果表明:相比于 RRT 算法、RRT* 算法、GB－RRT 算法和普通融合算法,改进的融合切换算法提高规划效率的同时兼顾路径优化,使路径更加平滑,符合机械臂运动需求。

(3)以 6 自由度机械臂苹果采摘为例,试验结果表明,改进的融合切换算法能规划出平滑路径,保证机械臂运动的柔顺性,路径规划成功率达到 98%。相比于 RRT 算法,运行时间减少 74.74%,路径成本降低 32.03%,规划成功率提高 8 个百分点,验证了本文算法在机械臂路径规划中的性能。



(a) 初始姿态 (b) 避障运动1 (c) 避障运动2 (d) 目标姿态

图 17 实验室采摘机械臂避障运动

Fig. 17 Obstacle avoidance movement of laboratory picking robot arm

参 考 文 献

[1] 刘成良,贡亮,苑进,等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报,2022,53(7):1－22,55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1－22, 55. (in Chinese)

[2] FRIDENFALK M. The design and implementation of a generic A* algorithm for search in multidimensional space[C]//Games Media Entertainment. IEEE,2015.

[3] 马新国,马希青. 融合改进 RRT 和 Dijkstra 算法的机器人动态路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(2):5－9.
MA Xinguo, MA Xiqing. Robot path planning based on improve RRT and Dijkstra approach[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(2): 5－9. (in Chinese)

[4] 顾丹宁,方灶军,张延军. 采用改进 RRT 方法进行双臂机器人路径规划[J]. 机械设计与研究,2022,38(4):49－55,60.
GU Danning, FANG Zaojun, ZHANG Yanjun. Path planning method of dual-arm robot based on improved RRT[J]. Machine Design and Research, 2022, 38(4): 49－55,60. (in Chinese)

[5] VITURINO C C B, JUNIOR U D M P, ANDRE G S C, et al. Adaptive artificial potential fields with orientation control applied to robotic manipulators[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2):9924－9929.

[6] ZHANG W, LU H, MA M, et al. The manipulator path planning of bolt disassembly based on improved genetic algorithm and A* algorithm[C]//2019 6th International Conference on Systems and Informatics,2019.

[7] 劳彩莲,李鹏,冯宇. 基于改进 A* 与 DWA 算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2021,52(1):14－22.
LAO Cailian, LI Peng, FENG Yu. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1):14－22. (in Chinese)

[8] LI Z, MA H, ZHANG X,et al. Path planning of the dual-arm robot based on VT－RRT algorithm[C]//2019 Chinese Control Conference, 2019.

[9] 王凡,冯楠,胡小鹏. 一种基于 RRT－ConCon 改进的路径规划算法[J]. 大连理工大学学报,2014,54(6):637－643.
WANG Fan, FENG Nan, HU Xiaopeng. An improved path planning algorithm based on RRT－ConCon[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(6): 637－643. (in Chinese)

[10] JANJOS F, REICHART R, NIERMEYER P. Smooth path-generation around obstacles using quartic splines and RRTs[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 9108－9113.

[11] 李扬,张蕾,李鹏飞,等. 基于改进 RRT 结合 B 样条的机械臂运动规划方法[J]. 计算机集成制造系统,2023,29(1):254－263.
LI Yang, ZHANG Lei, LI Pengfei, et al. Motion planning method of manipulator based on improved RRT combined with B-spline[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(1): 254－263. (in Chinese)

(下转第 272 页)

QU Zhongdang, WU Wei, HE Rizheng, et al. Soft threshold filter based on S transform and its application to data processing of deep seismic reflection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3157 - 3168. (in Chinese)
[28] 陈雨. 高地隙喷雾机独立式立轴空气悬架设计方法与特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
CHEN Yu. Research on design methods and characteristics of independent strut type air suspension system for high clearance sprayer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[29] WANG D, ZHU L, YUE J, et al. Application of variational mode decomposition based on particle swarm optimization in pipeline leak detection[J]. Engineering Research Express, 2020, 2(4): 045036.
[30] 陈强,黄声享,王韦. 小波去噪效果评价的另一指标[J]. 测绘地理信息, 2008(5): 13 - 14.
CHEN Qiang, HUANG Shengxiang, WANG Wei. An evaluation indicator of wavelet denoising[J]. Journal of Geomatics, 2008(5): 13 - 14. (in Chinese)
[31] 吕立蕾. 多光谱激光雷达小波去噪效果评价体系[J]. 海洋测绘, 2016, 36(4): 72 - 75.
LÜ Lilei. Evaluation system of wavelet de-noising effect for multispectral LiDAR[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(4): 72 - 75. (in Chinese)

(上接第 230 页)

[12] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT - Connecl: an efficient approach to single-query path planning[C]// Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
[13] 王坤,黄勃,曾国辉,等. 基于改进 RRT - Connect 的快速路径规划算法[J]. 武汉大学学报(理学版),2019,65(3):283 - 289.
WANG Kun, HUANG Bo, ZENG Guohui, et al. Faster path planning based on improved RRT - Connect algorithm[J]. Journal of Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2019, 65(3): 283 - 289. (in Chinese)
[14] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846 - 894.
[15] 姚立健,丁为民,陈玉仑,等. 茄子收获机器人机械臂避障路径规划[J]. 农业机械学报,2008,39(11):94 - 98.
YAO Lijian, DING Weimin, CHEN Yulun, et al. Obstacle avoidance path planning of eggplant harvesting robot manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(11):94 - 98. (in Chinese)
[16] CAO X, ZOU X, JIA C, et al. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 105 - 118.
[17] 张勤,乐晓亮,李彬,等. 基于 CTB - RRT* 的果蔬采摘机械臂运动路径规划[J]. 农业机械学报,2021,52(10):129 - 136.
ZHANG Qin, YUE Xiaoliang, LI Bin, et al. Motion planning of picking manipulator based on CTB - RRT* algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):129 - 136. (in Chinese)
[18] 马冀桐,王毅,何宇,等. 基于构型空间先验知识引导点的柑橘采摘机械臂运动规划[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 100 - 108.
MA Jitong, WANG Yi, HE Yu, et al. Motion planning of citrus harvesting manipulator based on informed guidance point of configuration space[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 100 - 108. (in Chinese)
[19] 熊春源,熊俊涛,杨振刚,等. 基于深度强化学习的柑橘采摘机械臂路径规划方法[J]. 华南农业大学学报,2023,44(3): 473 - 483.
XIONG Chunyuan, XIONG Juntao, YANG Zhen'gang, et al. Path planning method for citrus picking manipulator based on deep reinforcement learning[J]. Joumal of South China Agricultural University, 2023,44(3): 473 - 483. (in Chinese)
[20] SADHU A K, KONAR A, BHATTACHARJEE T, et al. Synergism of firefly algorithm and Q-learning for robot arm path planning[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 43: 50 - 68.
[21] HUANG S. Path planning based on mixed algorithm of RRT and artificial potential field method[C]// 2021 4th International Conference on Intelligent Robotics and Control Engineering, 2021: 149 - 155.
[22] HU Y, KE W, CHANG L, et al. Research on multi-objective path planning of a robot based on artificial potential field method[J]. International Journal of Wireless and Mobile Computing, 2018, 15(4): 335 - 341.
[23] 胡广锐,孔微雨,齐闯,等. 果园环境下移动采摘机器人导航路径优化[J]. 农业工程学报, 2021,37(9): 175 - 184.
HU Guangrui, KONG Weiyu, QI Chuang, et al. Optimization of the navigation path for a mobile harvesting robot in orchard environment[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 175 - 184. (in Chinese)
[24] 陈秋莲,蒋环宇,郑以君. 机器人路径规划的快速扩展随机树算法综述[J]. 计算机工程与应用,2019,55(16):10 - 17.
CHEN Qiulian, JIANG Huanyu, ZHENG Yijun. Summary of rapidly-exploring random tree algorithm in robot path planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(16): 10 - 17. (in Chinese)
[25] AN H, HU J, LOU P. Obstacle avoidance path planning based on improved APF and RRT[C]// 2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering, 2021: 1028 - 1032.
[26] 吕太之,周武,赵春霞. 采用粒子群优化和 B 样条曲线的改进可视图路径规划算法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018,39(1):103 - 108.
LÜ Taizhi, ZHOU Wu, ZHAO Chunxia. Improved visibility graph method using particle swarm optimization and B-Spline curve for path planning[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2018, 39(1): 103 - 108. (in Chinese)