

基于关节构形空间的混联采摘机械臂避障路径规划

阳涵疆, 李立君*, 高自成

(中南林业科技大学机电工程学院, 长沙 410000)

摘要: 针对混联采摘机器人在非结构性环境中进行避障采摘作业的要求, 该文提出了一种基于关节构形空间的混联采摘机械臂避障路径规划算法。根据机械臂和障碍物的几何特征, 对机械臂及障碍物模型进行合理简化, 通过分析末端执行器目标点和串联机械臂结构参数选取合适的并联机械臂动平台目标点, 然后采用遍历法构建串联机械臂关节构形空间, 并利用快速扩展随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 算法搜寻串联机械臂无撞路径, 再通过同样的方法获得并联机械臂关节空间障碍物映射模型和无撞路径, 最后综合串、并联机械臂的无撞路径, 获得混联机械臂整体的避障路径。仿真和试验结果表明, 文中所提出的算法搜索的避障路径能够驱动采摘机械臂避开工作空间内的障碍物, 引导末端执行器到达目标点。

关键词: 机器人; 机械臂; 算法; 避障; 混联; 路径规划; 关节构形空间

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.008

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-04-0055-08

阳涵疆, 李立君, 高自成. 基于关节构形空间的混联采摘机械臂避障路径规划[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 55—62. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.008 http://www.tcsae.org

Yang Hanjiang, Li Lijun, Gao Zicheng. Obstacle avoidance path planning of hybrid harvesting manipulator based on joint configuration space[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 55—62. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.008 http://www.tcsae.org

0 引言

果实采摘机器人通常在非结构性的复杂自然环境下作业, 分布在成熟果实周围的树枝, 不成熟果实和其他杂物就成为阻碍采摘机械臂运动的障碍物, 给机器人自动采摘作业造成很大的困难。因此, 为使得采摘机器人能够顺利完成果实采摘作业任务, 机械臂避障路径规划成为果实采摘机器人的关键技术问题之一^[1-3]。

多自由度机械臂避障路径规划是在给定障碍物以及机械臂起始、目标位姿的条件下, 搜寻一组连续的关节角度值序列, 该角度序列能够驱动机械臂安全、无碰撞地从起始位姿运动到目标位姿^[4]。多自由度机械臂避障路径规划通常采用关节构形空间法^[5-8], 该方法以机械臂的关节值为坐标建立关节构形空间, 再将障碍物映射到关节构形空间以构建关节构形障碍, 关节构形障碍的补集即为无撞空间, 然后利用搜索算法在无撞空间中寻找连接机械臂初始位形和目标位形的无撞路径, 能够有效避免人工势场法^[9]所存在的局部最小点和复杂障碍物环境下产生振荡的问题。

目前, 国内外学者对机械臂避障路径规划问题开展

了大量研究, 取得了一系列成果^[10-17]。蔡健荣等^[18]利用概率地图法 (probabilistic roadmap method, PRM) 对多自由度机械臂进行避障路径规划, 该方法无需求取障碍物在机械臂关节构形空间中的精确映射模型, 只要通过采样获得部分机械臂关节构形空间无撞点, 通过连接无撞点而获得机械臂避障路径, 但受限于探索步数、搜索时间等因素, 无法穷尽所有可能的路径; 姚立健等^[19]对一种茄子收获机械臂进行了避障路径规划, 算法将障碍物映射到收获机械臂关节构形空间中, 在关节构形空间中利用 A* 算法搜寻避障路径, 但该方法为简化路径规划模型将空间障碍物投影到平面中, 无法充分发挥高自由度采摘机械臂在避障方面的优势; 尹建军等^[20]将高自由度机械臂避障路径规划问题转化为多个平面 2 转动关节机械臂避障问题, 但算法需要对高自由度机械臂整体进行逆运动学分析, 并在每个无障碍的平面内搜寻关节角度, 算法前期理论分析复杂, 通用性不强。综上所述可以看出, 构形空间法虽然在采摘机械臂避障路径规划问题上得到了一定的应用, 但尚未提出一种通用的高自由度混联机械臂避障路径规划算法。

本文针对 6 自由度混联采摘机械臂的构形特点, 对混联采摘机械臂及障碍物模型进行合理简化; 根据末端执行器目标点和串联机械臂结构参数选取并联机械臂动平台目标点; 采用遍历法构建障碍物在串联机械臂关节构形空间中的映射模型, 并利用快速扩展随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 算法搜索串联机械臂无撞路径; 然后通过同样的方法获得并联机械臂关节空间障碍物映射模型和无撞路径; 综合串、并联机械臂的无撞路径获得混联机械臂整体的避障路径; 最后通过

收稿日期: 2016-06-08 修订日期: 2017-01-22

基金项目: 国家林业公益性项目 (201104090); 湖南省高校科技创新团队支持计划 (2014207); 湖南省研究生科研创新项目 (CX2016B326); 中南林业科技大学研究生科技创新基金项目 (CX2016B12)。

作者简介: 阳涵疆, 男, 湖南益阳人, 主要从事机器人运动控制研究。长沙中南林业科技大学机电工程学院, 410000。Email: yanghanjiang@hotmail.com
*通信作者: 李立君, 女, 湖南宁乡人, 教授, 博士, 主要从事现代林业装备研究。长沙中南林业科技大学机电工程学院, 410000。

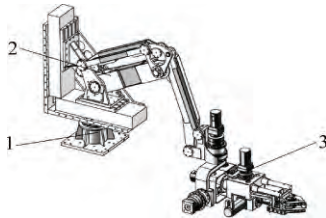
Email: junlili1122@163.com

仿真和试验验证所提出算法的可行性和有效性。

1 路径规划碰撞模型

1.1 混联机械臂运动学模型

图 1 为 2P4R6 自由度混联采摘机器人机械臂三维模型, 该机械臂是在码垛并联机械臂的动平台上串接一个 3 自由度串联机械臂而构成的, 主要包括腰部、手臂和腕部^[21]3 大模块。机械臂能够实现以下 6 种关节运动: 腰部旋转运动, 手臂水平滑块和竖直滑块的平移运动以及腕部的 3 个旋转运动。

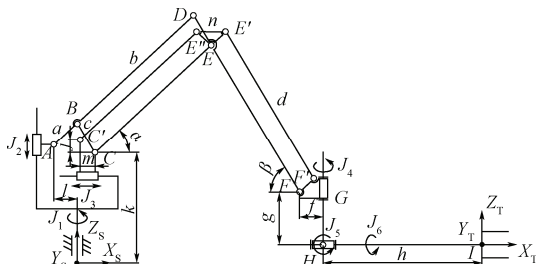


1.腰部 2.手臂 3.腕部
1.Waist part 2.Arm part 3.Wrist part

图 1 混联采摘机器人机械臂三维模型

Fig.1 3D model of hybrid harvesting robot manipulator

机械臂结构形式如图 2 所示, 从图中可知, 由于腕部串联机械臂末端旋转关节仅驱动末端执行器绕其自身轴线旋转, 不影响末端执行器位置, 因此, 本文算法主要通过控制关节 1 (J_1) 至关节 5 (J_5) 的运动来进行避障路径规划。



注: A, B, C, C', D, E, E', F, F', G, H, I 为机械臂连杆铰接点; J_1, J_2, \dots, J_6 分别为机械臂关节 1, 关节 2, ..., 关节 6; a 为 A、B 之间的距离, mm, 其余小写字母同理; α 为连杆 l_{CE} 相对参考位形的旋转角度, ($^\circ$), 其中, l_{CE} 为 C、E 之间的连杆, 其余带大写字母下标的符号同理; β 为连杆 l_{EF} 相对参考位形的旋转角度, ($^\circ$); X_s, Y_s, Z_s 为基础坐标系; X_t, Y_t, Z_t 为末端工具坐标系。

Note: A, B, C, C', D, E, E', F, F', G, H and I are link connection of manipulator; J_1, J_2, \dots, J_6 represents 1st joint, 2nd joint, ..., 6th joint of manipulator respectively; a represents distance between A and B, mm, other lowercase letter in same way; α represents the rotation angle of the rod l_{CE} respect to initial configuration, ($^\circ$), where l_{CE} represents the rod between C and E, other characters with capital letter subscript in same way; β represents the rotation angle of the rod l_{EF} respect to initial configuration, ($^\circ$); X_s, Y_s , and Z_s are basic coordinate axis; X_t, Y_t , and Z_t are end-effector coordinate axis.

图 2 机械臂结构简图

Fig.2 Structure of manipulator

1.2 障碍物模型

由于实际采摘环境中的障碍物通常不是规则的几何体, 难以用精确的模型来描述, 因此本文利用轴对齐包围盒 (axis-aligned bounding box, AABB) 来近似建模。这种建模方法虽然在一定程度上扩大了障碍域, 但是大大简化了障碍域的描述和机械臂与障碍物干涉检测的计算量, 有效地提高了路径规划的效率, 同时也使得所规

划的路径具有更高的安全性。

障碍物可以采用长方体包围描述为 $R(O_s, O_e)$, $O_s(x_s, y_s, z_s)$ 为长方体的某顶点, $O_e(x_e, y_e, z_e)$ 为 O_s 的对角顶点, 其中 x_s, y_s, z_s 分别为障碍物在基础坐标系 x, y, z 轴方向的最小坐标, x_e, y_e, z_e 分别为障碍物在基础坐标系 x, y, z 轴方向的最大坐标。

2 基于关节构形空间的混联机械臂避障路径规划

混联采摘机械臂是在并联机械臂的动平台上扩展串联机械臂得到的, 利用关节构形空间法直接对高自由度混联机械臂进行避障路径规划, 所构建的关节构形空间维度高, 几何意义不明显, 且高维空间中搜索无撞路径计算量大。因此, 将高自由度混联机械臂避障路径规划问题, 拆分成串联和并联机械臂避障路径规划子问题, 降低关节构形空间的维度, 减少路径规划整体耗时。

前面提到本文只研究串联机械臂的 2 个自由度, 而并联机械臂具有 3 个自由度, 所以并联机械臂具有比串联机械臂维度更高的关节构形空间, 这就使得并联机械臂路径规划耗时更长。因此, 为提高算法整体效率, 先对串联机械臂进行路径规划, 找到合适的动平台目标点后, 再对并联机械臂进行避障路径规划。

2.1 关节构形空间理论基础

对于 n 自由度机械臂, $E(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 为该机械臂一组主动关节值 (由电机直接驱动的关节), 其中, ξ_i 为机械臂第 i 个主动关节的转动角度或位移量, ($^\circ$) 或 mm, 若 P 表示机械臂上的一点, 则该点与障碍物的相对位置关系可以表示为

$$\Gamma(P(E)) = \begin{cases} 1 & \text{点 } P \text{ 位于障碍物内部} \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\Gamma(P(E))$ 为机械臂在关节值 E 所驱动的位姿下, 该机械臂上点 P 与障碍物的相对位置关系; $P(E)$ 为机械臂在 E 所驱动的位姿下, 该机械臂上点 P 在基础坐标系中的位置坐标, mm。

若将机械臂各杆件按照步长 d_{link} , mm, 均匀离散成 m 个点, m 个离散点构成点集 P_{link} , 则关节值 E 驱动的机械臂整体与障碍物的相对位置关系可以表示为

$$\Gamma(E) = \sum_{i=1}^m \Gamma(P_i(E)) \quad (2)$$

式中 $\Gamma(E)$ 为关节值 E 所驱动的机械臂与障碍物的相对位置关系。

由式 (1)、式 (2) 可知当且仅当 $\Gamma(E)=0$ 时机械臂与障碍物不发生干涉。

以 n 自由度机械臂各关节值为坐标建立关节构形空间 Ω , 若机械臂关节值 E 的集合用 H 表示, 则关节构形空间 Ω 中的任意一点都唯一一对应着集合 H 中的某一元素, 反之亦正确, 即关节构形空间 Ω 与集合 H 为双射的。

因此由关节值 E 驱动的机械臂与障碍物的相对位置关系在关节构形空间中的映射可以通过下式表示

$$\Omega(E) = \begin{cases} 1 & \Gamma(E) = 1 \\ 0 & \Gamma(E) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\Omega(E)$ 为关节构形空间 Ω 中以机械臂关节值 E 中元素为坐标的点的值, 记录了当机械臂处于 E 对应的位姿时与障碍物的相对位置关系, 机械臂与障碍物发生干涉则 $\Omega(E)$ 等于 1, 否则 $\Omega(E)$ 为 0。

那么集合 $H_{\text{part}}(E_1, E_2, \dots, E_d)$ 可表示机械臂一组连续变化的位姿序列, 同时该集合表示关节构形空间 Ω 中的一组离散点, 若连接该组离散点可获得一条路径, 其中, d 为路径控制点个数。当且仅当满足下式时, 机械臂在由关节值集合 H_{part} 驱动时与障碍物不发生碰撞。

$$\Psi = \Omega(H_{\text{part}}) = \sum_{j=1}^d \Omega(E_j) = 0 \quad (4)$$

式中 Ψ 为机械臂由关节值集合 H_{part} 驱动时, 机械臂与障碍物的相对位置关系。

因此对机械臂进行避障路径规划, 即在关节构形空间 Ω 中搜寻一个关节值的集合 H_{part} , 使这个集合连接机械臂初始位形关节值 E_s 和目标位形关节值 E_g , 且满足如式 (4) 所示的路径无撞条件。

2.2 串联机械臂的避障路径规划

2.2.1 初选并联机械臂动平台目标点

给定末端执行器的目标点 $P_{\text{ge}}(P_{\text{gex}}, P_{\text{gey}}, P_{\text{gez}})$, 根据目标点坐标和串联机械臂结构参数, 确定空间中一点作为并联机械臂动平台目标点 $P_{\text{gp}}(P_{\text{gpx}}, P_{\text{gpy}}, P_{\text{gpz}})$ 。动平台目标点 P_{gp} 位置坐标公式为

$$\begin{cases} P_{\text{gpx}} = P_{\text{gex}} - h \cdot \cos(\theta_5 \cdot \text{rand}_5) \cdot \cos(\theta_4 \cdot \text{rand}_4) \\ P_{\text{gpy}} = P_{\text{gey}} - h \cdot \cos(\theta_5 \cdot \text{rand}_5) \cdot \sin(\theta_4 \cdot \text{rand}_4) \\ P_{\text{gpz}} = P_{\text{gez}} + h \cdot \sin(\theta_5 \cdot \text{rand}_5) + g \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_{gpx} 、 P_{gpy} 和 P_{gpz} 分别为 P_{gp} 在基础坐标系 x 、 y 和 z 轴方向的坐标值, mm; P_{gex} 、 P_{gey} 和 P_{gez} 分别为 P_{ge} 在基础坐标系 x 、 y 和 z 轴方向的坐标值, mm; θ_4 、 θ_5 分别为关节 4 和关节 5 的旋转角度, ($^\circ$); rand_4 、 rand_5 为范围在 0~1 的随机数。

由于选取的动平台目标点 P_{ge} 可能位于障碍物内或并联机械臂工作空间外, 出现串联、并联机械臂无法搜寻到无撞路径的情况, 因此动平台目标点 P_{ge} 可能需要多次重选。用 i_{select} 表示目标点 P_{ge} 选取次数, 设置选点迭代阈值 d_{select} , 当选取次数 i_{select} 大于阈值 d_{select} 时, 认为算法无法对当前给定环境下的机械臂进行避障路径规划。

当动平台目标点坐标值满足下式时动平台目标点 P_{gp} 位于障碍物内。

$$\begin{cases} x_s \leq P_{\text{gpx}} \leq x_e \\ y_s \leq P_{\text{gpy}} \leq y_e \\ z_s \leq P_{\text{gpz}} \leq z_e \end{cases} \quad (6)$$

式中 x_s 、 y_s 、 z_s 分别为障碍物在 x 、 y 、 z 轴方向的最小坐标; x_e 、 y_e 、 z_e 分别为障碍物在 x 、 y 、 z 轴方向的最大坐标。

本文研究对象中的并联机械臂工作空间为以腰部为中心轴的空间环体, 环体截面为矩形^[22]。因此可以通过下式确定动平台目标点位于并联机械臂工作空间内。

$$\begin{cases} d_{\text{mint}} \leq (P_{\text{gpx}}^2 + P_{\text{gpy}}^2) \leq d_{\text{maxt}} \\ W_{\text{minz}} \leq P_{\text{gpz}} \leq W_{\text{maxz}} \end{cases} \quad (7)$$

式中 d_{mint} 、 d_{maxt} 分别为并联机械臂工作空间环体截面与腰部中心轴的最小距离和最大距离, mm; W_{minz} 、 W_{maxz} 分别为并联机械臂工作空间在 z 轴的最小和最大坐标值, mm。

若通过式 (6)、(7) 判定目标点 P_{gp} 位于障碍物内部或者并联机械臂工作空间外, 应重新选择动平台目标点。

2.2.2 遍历法建立串联机械臂关节构形空间

为避免求解混联采摘机械臂复杂的碰撞条件解析式^[18-20], 本文采用遍历的方法建立障碍物在关节构形空间中的映射模型。

由图 2 中机械臂构形特点可知, 动平台目标点 P_{gp} 与末端执行器目标点 P_{ge} 唯一确定了串联机械臂目标位形关节值 E_{gs} 。在进行并联机械臂路径规划时, 串联机械臂看作并联机械臂动平台上的固定部件, 因此动平台目标点 P_{gp} 与并联机械臂基座点确定了串联机械臂进行避障路径规划时的初始位形关节值 E_{ss} 。为确定串联机械臂能够无撞的从起始位形到达目标位形, 将障碍物模型映射到串联机械臂关节构形空间。机械臂关节构形空间障碍物模型构建步骤如下

1) 对机械臂的关节构形空间 Ω 以步长 ζ_{link} , mm 或($^\circ$), 进行离散, 获得表示空间 Ω 的离散化矩阵 Φ ;

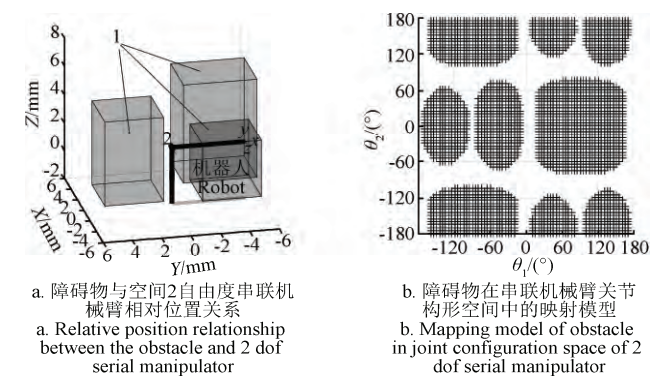
2) 将简化后的机械臂各连杆按照步长 d_{link} 取点, P_{link} 为所取点的集合;

3) 对于矩阵 Φ 中的任意元素 E , 利用式 (2) 遍历机器人离散点集合 P_{link} , 检测矩阵 Φ 中的任意元素对应位形的机械臂与障碍物的干涉关系;

4) 上一步骤中检测到有干涉的机械臂位形所对应的元素 E 组成碰撞元素集合 H_{obs} , 补集 $H_{\text{free}} = H - H_{\text{obs}}$;

5) 以集合 H_{obs} 中的元素为坐标, 在机械臂关节构形空间中绘制离散点, 离散点云就构成了障碍物在关节构形空间中的模型。

图 3 为障碍物与空间 2 自由度串联机械臂相对位置关系以及利用遍历法所构建的关节构形空间障碍物模型。



1.障碍物 2.空间 2R 机械臂

1.Obstacle 2.Spatial 2R manipulator

注: θ_1 和 θ_2 分别为平面 2R 机械臂关节 1 和关节 2 角度值。

Note: θ_1 , θ_2 represents rotation angle of first and second joint of planar 2R manipulator.

图 3 障碍物与 2 自由度串联机械臂相对位置关系及障碍物在关节构形空间中的映射模型

Fig.3 Relative position relationship between obstacle and 2 dof serial manipulator and corresponding model of obstacle in joint configuration space

2.2.3 搜索串联机械臂避障路径

建立障碍物在串联机械臂关节构形空间中的映射模型后,通过边界序列法判断串联机械臂关节值 E_{gs} 与关节构形障碍物模型 H_{obss} 的相对位置关系,当目标位形关节值 E_{gs} 位于空间障碍物模型 H_{obss} 内部时,无法继续避障路径规划,因此重新选定动平台目标点 P_{gp} ,否则利用 RRT 算法在关节构形空间中尝试搜索一条连接串联机械臂初始位形关节值 E_{ss} 和目标位形关节值 E_{gs} 的无撞路径 H_{ser} ,其中 H_{ser} 为 d_{ser} 行 3 列的矩阵, H_{ser} 的第 1 列和第 2 列分别表示关节 4 和关节 5 的旋转角度,第 3 列为关节 6 的角度值,设置为 0, d_{ser} 为路径 H_{ser} 中控制点个数。RRT 算法主要步骤^[23-29]包括

1) 令 T_k 为一个有 k 个节点的随机树,以机械臂初始位形所对应的关节值 E_s 作为随机树的起始点;

2) 在机械臂关节构形空间中随机选择一点 E_{rand} ,且满足 $E_{rand} \in H_{free}$;

3) 找到随机树 T_k 中距离 E_{rand} 最近的节点 E_{near} ;

4) 在点 E_{near} 与点 E_{rand} 的连线上求取 E_{new} ,使得 $E_{new} \in H_{free}$ 和 $D(E_{near}, E_{new}) = d_{valve}$,其中 $D(E_{near}, E_{new})$ 为点 E_{near} 和点 E_{new} 之间的距离, $d_{valve} > 0$ 为 RRT 算法距离阈值;

5) 若对于点 E_{near} 与点 E_{rand} 可求得 E_{new} ,且 $L_{new} \in H_{free}$,其中 L_{new} 为点 E_{near} 与点 E_{new} 之间的连线,则将 E_{new} 加入到随机树 T_k 中,新的随机树可以表示为 T_{k+1} ,其中 $T_{k+1} = (T_k; E_{new})$,否则重新选取 E_{rand} ;

6) 当 $D(T(k+1), E_{goal}) < d_{end}$ 时,将 E_{goal} 作为 E_{new} 加入到随机树中,完成路径搜索,其中 $T(k+1)$ 为随机树中第 $k+1$ 个节点, d_{end} 为算法终止距离阈值,否则重复上述步骤。

由于 RRT 算法通过狭窄通道的能力较差,为避免算法陷入无用循环,提高算法整体效率,将算法迭代次数用 i_{tt} 记录,定义迭代次数阈值 t_{tt} ,当满足 $i_{tt} \geq t_{tt}$ 时,认为 RRT 算法无法为当前场景找到一条避障路径,则重新选取动平台目标点 P_{gp} 。

2.3 并联机械臂避障路径规划

2.3.1 确定并联机械臂目标位形关节值

要确定并联机械臂的目标位形所对应的关节值 E_{gp} ,就需要先求解并联机械臂主动关节值与动平台坐标值之间的映射关系。由于并联机械臂的复杂构形,直接求解该映射关系比较困难,因此引入图2中连杆 l_{CE} 和连杆 l_{EF} 的旋转角度作为中间变量。先求取动平台坐标值与中间变量之间的映射关系和中间变量与主动关节值之间的映射关系,然后综合获得并联机械臂的目标位形关节值 E_{gp} 。

分析图2中的机械臂结构可得到并联机械臂动平台目标点 P_{gp} 的坐标值与中间变量之间的映射关系式

$$\begin{cases} P_{gpx} = \begin{pmatrix} -l + a \cdot \cos \alpha + c \cdot \cos \beta + \\ b \cdot \cos \alpha + d \cdot \cos \beta + f \end{pmatrix} \cdot \cos \theta_1 \\ P_{gpy} = \begin{pmatrix} -l + a \cdot \cos \alpha + c \cdot \cos \beta + \\ b \cdot \cos \alpha + d \cdot \cos \beta + f \end{pmatrix} \cdot \sin \theta_1 \\ P_{gpz} = k + b \cdot \sin \alpha - d \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (9)$$

式中 P_{gpx} 、 P_{gpy} 和 P_{gpz} 分别为点 P_{gp} 在基础坐标系 x 、 y 、 z 轴方向的坐标值, mm; θ_1 、 α 、 β 分别为腰部关节、连杆 l_{CE} 和连杆 l_{EF} 的旋转角度, ($^\circ$)。

中间变量 α 、 β 与主动关节之间的映射关系^[21]为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{c+x}{a-z} - \arccos \frac{(c+x)^2 + (a-z)^2 + a^2 - c^2}{2a \cdot \sqrt{(c+x)^2 + (a-z)^2}} \\ \beta = \arccos \frac{(c+x)^2 + (a-z)^2 + c^2 - a^2}{2c \cdot \sqrt{(c+x)^2 + (a-z)^2}} - \arctan \frac{a-z}{c+x} \end{cases} \quad (10)$$

式中 x 为图2中与点 C 固连的水平滑块的位移量, mm; z 为与点 A 固连的竖直滑块的位移量, mm。

根据并联机械臂动平台目标点坐标值 P_{gp} ,联立式(9)和(10)则可以求解并联机械臂目标关节值 E_{gp} 。

2.3.2 并联机械臂关节构形空间和避障路径规划

由于并联机械臂关节构形空间以并联机械臂主动关节值为坐标,因此在并联机械臂关节构形空间障碍物模型的求解过程中将串联机械臂各关节固定。采用前面描述的机械臂关节构形空间构建方法建立障碍物在并联机械臂关节构形空间中的模型。

通过边界序列法判断并联机械臂目标位形关节值 E_{gp} 与并联机械臂关节构形空间障碍物模型 H_{obsp} 的相对位置关系,当目标位形关节值 E_{gp} 位于障碍物模型 H_{obsp} 内部时,无法继续避障路径规划,重新选定动平台目标点 P_{gp} ,否则将 RRT 算法扩展至三维空间,利用该算法在并联机械臂关节构形空间中搜索连接初始位形关节值 E_{sp} 和目标位形关节值 E_{gp} 的无撞路径 H_{par} ,其中 H_{par} 为 d_{par} 行 3 列的矩阵, H_{par} 的第 1 列至第 3 列分别表示关节 1 至关节 3 的旋转角度或位移量, d_{par} 为路径 H_{par} 中控制点个数。

2.4 混联机械臂避障路径规划

综合并联机械臂无撞路径关节值集合 H_{par} 和串联机械臂无撞路径关节值集合 H_{ser} ,并根据式(11)可以获得混联机械臂整体的无撞路径关节值集合 H_{hyb} 。

$$H_{hyb} = \begin{bmatrix} H_{par} & 0 \\ H_{parl} & H_{serl} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 $H_{parl} = [H_{parlf}, H_{parls}, H_{parlt}]$,其中 H_{parlf} 、 H_{parls} 、 H_{parlt} 分别为以 $H_{par}(\text{end}, 1)$ 、 $H_{par}(\text{end}, 2)$ 、 $H_{par}(\text{end}, 3)$ 为元素的 d_{ser} 维列向量, $H_{par}(\text{end}, i)$ 为矩阵 H_{par} 第 i 列最后 1 行元素; $H_{serl} = H_{ser} + H_{sera}$,其中 $H_{sera} = [H_{parlf}, 0, 0]$ 。

通过关节值集合 H_{hyb} 驱动混联机械臂各关节,可使混联机械臂避开障碍物,引导末端执行器到达目标点位置,完成避障路径规划。

整理前面的分析可以得到如图4所示的基于关节构形空间的混联采摘机械臂避障路径规划流程图。

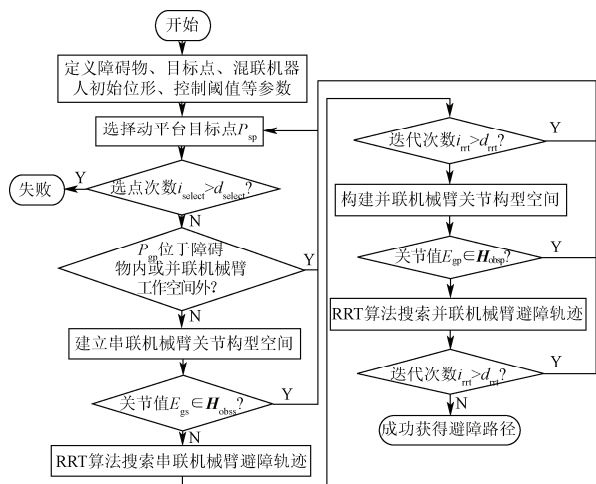


图 4 基于关节构形空间的混联机械臂避障路径规划流程图
Fig.4 Flow chart of obstacle avoidance path planning based on joint configuration space

4 避障路径规划仿真与试验

为了验证文中所提出算法的可行性和有效性，以 6 自由度混联采摘机械臂作为研究对象开展仿真试验。表 1 为机械臂结构参数，障碍物参数如表 2 所示，表 3 为算法阈值以及参数设定值，机械臂起始位形关节值为 $(90, 150, 50, 0, 0, 0)$ ，目标点坐标为 $(925, -1\ 602, 525)$ 。

利用 MATLAB 2016a 搭建了混联机械臂仿真系统^[21,30-31]，仿真试验平台是主频为 3.6 GHz，内存为 16 GB 的计算机。图 5 为混联机械臂仿真试验的主要过程。从图 5 中可知，算法先后对串联机械臂和并联机械臂构建关节构形空间并搜索无撞路径，然后综合获得混联机械臂整体的避障路径。

表 1 机械臂结构参数
Table 1 Structure parameters of manipulator

连杆 Rod	长度 Length/ mm	杆间距 Distance between rod axis	距离 Distance/ mm	关节变量 Joint variable	关节变量范围 Range of joint variable/ ($^{\circ}$ ·mm $^{-1}$)
a	120	f	205	θ_1	$0\sim360$
b	600	g	250	x	$0\sim200$
c	130	k	425	z	$0\sim100$
d	650	l	85	θ_4	$-180\sim180$
h	650	j	164.5	θ_5	$-180\sim180$
n	190	m	95	θ_6	$0\sim360$

注：x, z 分别为图 2 中关节 2 (J_2) 和关节 3 (J_3) 的位移； θ_1 为关节角度 1 (J_1) 的， θ_4 , θ_5 和 θ_6 同理；其余符号具体含义见图 2。
Note: x, z represent displacement of second and third joint respectively in Fig.2; θ_1 represents rotation angle of first joint (J_1) in Fig.2, θ_4 , θ_5 and θ_6 are in same way; meaning of other symbols in Table 1 are given in Fig.2.

表 2 障碍物位形参数
Table 2 Position and size parameters of obstacle

组 Group	障碍物起始点坐标 Start point coordinate of obstacle/mm	障碍物终止点坐标 End point coordinate of obstacle/mm
1	(-500, 500, 0)	(-900, 700, 500)
2	(500, -500, -100)	(1 100, -1 200, 600)
3	(-500, -600, 700)	(-800, -900, 1 000)

表 3 算法主要控制参数
Table 3 Main parameters of algorithm

名称 Name	数值 Value	名称 Name	数值 Value
关节构形空间离散步长 Discrete steps of joint configuration space/(mm· $^{\circ}$) $^{-1}$	5	RRT 算法选点距离阈值 Threshold of RRT algorithm point selection step/mm	30
连杆取点步长 Discrete steps of rod/mm	20	RRT 算法终止距离阈值 Threshold of RRT algorithm last step distance/mm	50
RRT 算法迭代次数阈值 Threshold of RRT algorithm iteration times	1 000	动平台目标点选取次数阈值 Threshold of moving platform Selection times	10

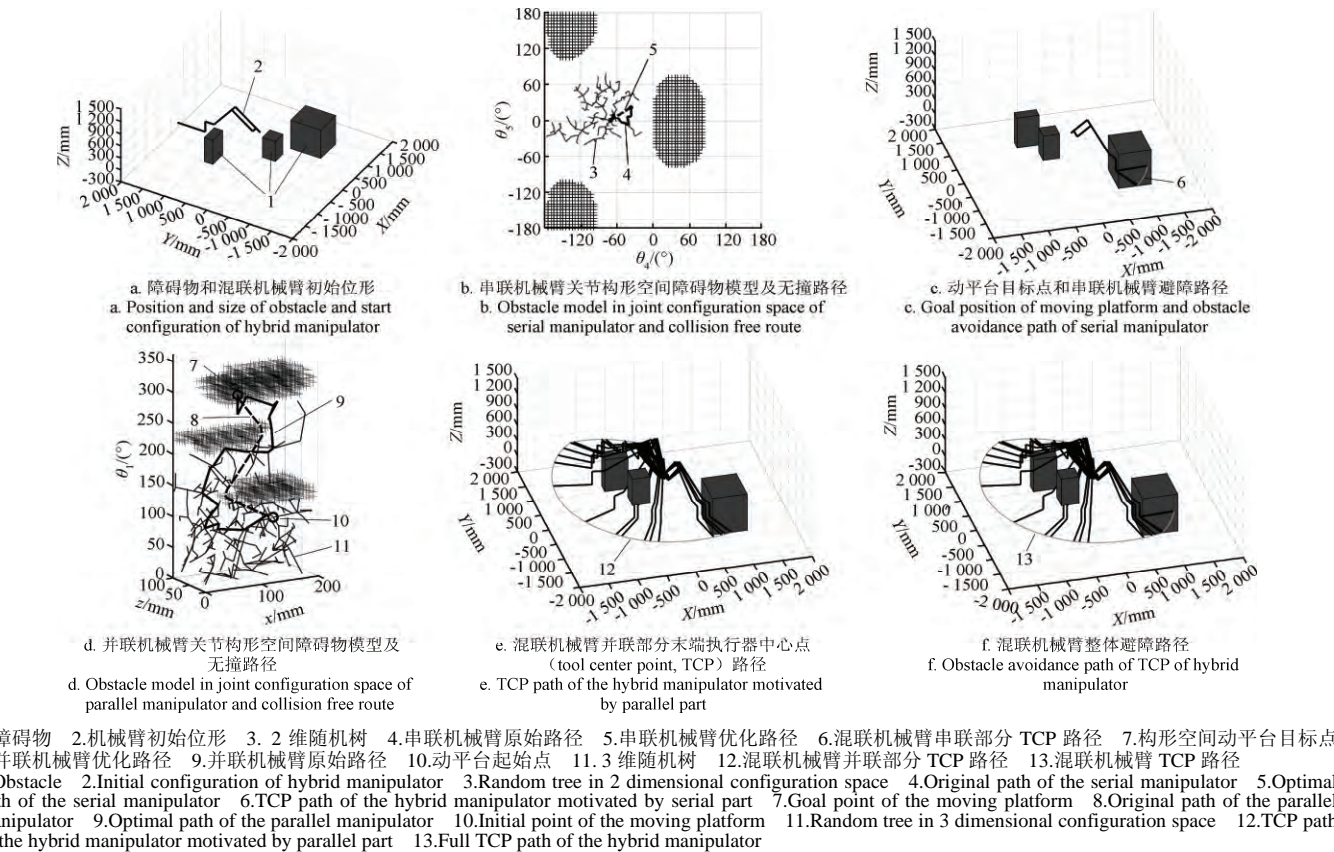
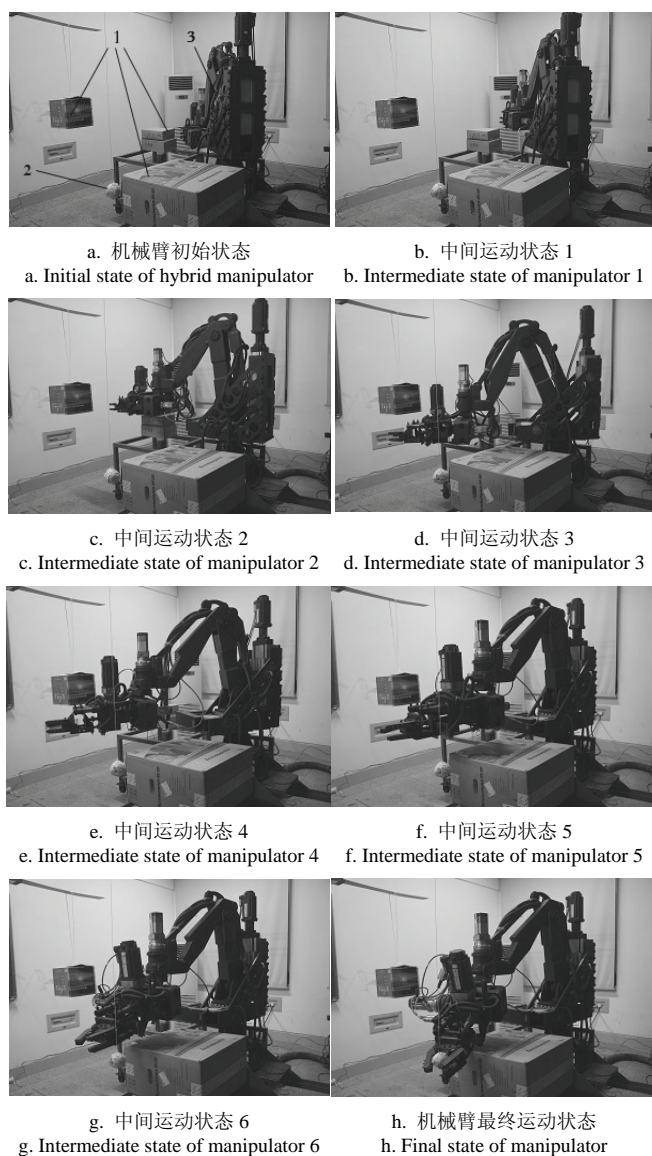


图 5 混联机械臂避障路径规划仿真过程
Fig.5 Obstacle avoidance path planning simulation of hybrid manipulator

利用混联采摘机械臂实体样机所搭建的路径规划试验平台进行避障路径规划试验。在前面的仿真过程中, 将机械臂各杆件简化成了没有体积的线段, 而实际情况中, 需要考虑机械臂各杆件的厚度、粗细。为简化理论分析过程, 将障碍物在实际尺寸基础上增加机械臂最粗杆件的半径作为障碍物碰撞检测尺寸。为避免引入过多的试验影响因素, 直接向机械臂控制软件给定末端执行器目标位置和障碍物相关参数, 然后利用本文算法模块对机械臂进行避障路径规划, 再由控制软件驱动机械臂各关节运动, 使机械臂末端执行器到达目标点位置, 完成避障路径规划。图 6 为机械臂在试验室环境下的避障试验运动过程。从图中可以看出, 机械臂避开了位于其工作空间内的障碍物, 成功引导末端执行器到达了目标点位置。仿真和试验结果表明, 利用文中所提出的算法进行混联机器人避障路径规划是可行的, 有效的。



1.障碍物 2.目标 3.混联机械臂
1.Obstacle 2.Goal object 3.Hybrid manipulator

图 6 混联机械臂避障路径规划试验

Fig.6 Obstacle avoidance experiment of hybrid manipulator

5 讨论

文中快速扩展随机树搜索算法是通过不断选取随机点加入到随机树来进行路径搜索的, 因此在以周关节值为坐标的关节构形空间中进行路径搜索时, RRT 算法无法越过关节构形空间的边界, 搜索到空间的另一端。如图 5d 所示, RRT 算法无法搜索到一条越过关节构形空间底部边界且连接并联机械臂初始位形 E_{sp} 和目标位形 E_{gp} 的路径, 这就在腰部关节的零位形成了一堵“墙”, 而实际工作过程中, 并联机械臂能够从初始位形 E_{sp} 越过腰部关节的零位到达目标位形 E_{gp} 。此不足导致在机械臂路径规划过程中限制了机械臂周关节的转动方向, 不利于机械臂的避障路径规划。

在建立并联机械臂关节构形空间障碍物模型的过程中, 将串联机械臂各关节固定, 并使其始终保持在初始零位, 串联机械臂无法实时避障, 对并联机械臂的避障路径规划造成了一定的限制。因此为提高混联机械臂整机避障能力, 就要使串联机械臂拥有全局避障路径规划的能力, 即并联机械臂在避障路径规划时串联机械臂也能够实时地进行避障, 项目组后续拟针对混联机械臂全局实时避障问题开展相关研究工作。

6 结论

1) 本文提出了一种基于关节构形空间的混联采摘机械臂避障路径规划算法, 算法将混联机械臂避障路径规划问题转化成对并联和串联机械臂分别进行避障路径规划的子问题, 降低了关节构形空间障碍物映射模型的复杂度, 避免了建立混联机械臂高维关节构形空间。

2) 本文基于遍历法构建障碍物在关节构形空间中的映射模型, 并利用快速扩展随机树算法在关节构形空间中进行避障路径搜索, 无需分析复杂构形的混联机械臂各杆件与障碍物发生碰撞的解析表达式以及混联机械臂整体逆运动学方程, 提高了算法通用性。

3) 利用本文所提出的算法对混联采摘机械臂进行避障路径规划仿真和试验, 结果表明通过此算法构建的路径能使混联机械臂有效地避开障碍物, 引导机械臂末端执行器到达目标点, 验证了算法的可行性和有效性。

[参考文献]

- [1] Li Peilin, Lee Sang-heon, Hsu Hung-yao. Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems[J]. Procedia Engineering, 2011, 23(5): 351—366.
- [2] 宋健, 张铁中, 徐丽明, 等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 158—162.
Song Jian, Zhang Tiezhong, Xu Liming. Progress and prospects of the fruit and vegetable picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhang Libin, Yang Qinghua, Bao Guanjun, et al. Overview of research on agricultural robots in China[J]. International

- Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2008, 1(1): 12–21.
- [4] 黄献龙, 梁斌, 吴宏鑫. 机器人避碰规划综述[J]. 航天控制, 2002, 20(1): 34–40.
Huang Xianlong, Liang Bin, Wu Hongxin. A survey on robotics collision avoidance planning[J]. Aerospace Control, 2002, 20(1): 34–40. (in Chinese with English abstract)
- [5] Lavelle S M. Planning Algorithm[M]. UK: Cambridge University Press, 2006: 127–180.
- [6] Lozano-Perez T. Spatial planning: A configuration space approach[J]. IEEE Transaction on Computers, 1983, C-32(2): 108–120.
- [7] Newman W S, Branicky M S. Real-time configuration space transforms for obstacle avoidance[J]. International Journal of Robotics Research, 1991; 10(6): 650–667.
- [8] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90–98.
- [9] 姬伟, 程凤仪, 赵德安, 等. 基于改进人工势场的苹果采摘机器人机械手避障方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 253–259.
Ji Wei, Cheng Fengyi, Zhao De'an, et al. Obstacle avoidance method of apple harvesting robot manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 253–259. (in Chinese with English abstract)
- [10] Van Henten E J, Hemming J, Van Tuijl B A J, et al. Collision-free motion planning for a cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(2): 135–144.
- [11] 祁若龙, 周维佳, 王铁军, 等. 一种基于遗传算法的空间机械臂避障轨迹规划方法[J]. 机器人, 2014, 36(3): 263–270.
Qi Ruolong, Zhou Weijia, Wang Tiejun, et al. An obstacle avoidance trajectory planning scheme for space manipulators based on genetic algorithm[J]. Robot, 2014, 36(3): 263–270. (in Chinese with English abstract)
- [12] 戈志勇, 陈树人, 王新忠. 神经网络在果蔬收获机器人机械臂避障路径中的应用[J]. 农机化研究, 2007(2): 172–174.
Ge Zhiyong, Chen Shuren, Wang Xinzhong. Neural network used for avoidance obstacle of fruit and vegetables harvest robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(2): 172–174. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
Jia Qingxuan, Chen Gang, Sun Hanxu, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 109–115. (in Chinese with English abstract)
- [14] 谢碧云, 赵京, 刘宇. 基于快速扩展随机树的 7R 机械臂避障达点运动规划[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 63–69.
Xie Biyun, Zhao Jing, Liu Yu. Motion planning of reaching point movements for 7R robotic manipulators in obstacle environment based on rapidly-exploring random tree algorithm[J]. Journal of Mechanism Engineering, 2012, 48(3): 63–69. (in Chinese with English abstract)
- [15] Gómez-Bravo F. Collision free trajectory planning for hybrid manipulators[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 836–851.
- [16] Zhao D A, Lü J D, Ji W. Smoothing obstacle avoidance path planning based on C-space for harvesting robot[C]// Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, Xi'an: IEEE, 2013: 26–28.
- [17] Zhao D A, Lü J D, Ji W, Zhang Y, Chen Y. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112–122.
- [18] 蔡健荣, 赵杰文, Thomas R, 等. 水果收获机器人避障路径规划[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 102–105, 135.
Cai Jianrong, Zhao Jiewen, Thomas R, et al. Path planning of fruits harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 102–105, 135. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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 with English abstract)
- [20] 尹建军, 武传宇, Yang S X, 等. 番茄采摘机器人机械臂避障路径规划[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 171–175.
Yin Jianjun, Wu Chuanyu, Yang S X, et al. Obstacle-avoidance path planning of robot arm for tomato-picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 171–175. (in Chinese with English abstract)
- [21] 阳涵疆, 李立君, 高自成. 基于旋量理论的混联采摘机器人正运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 53–59.
Yang Hanjiang, Li Lijun, Gao Zicheng. Forward kinematics analysis and experiment of hybrid harvesting robot based on screw theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(9): 53–59. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李成伟, 负超. 码垛机器人机构设计与运动学分析[J]. 机械设计与制造, 2009, 6(6): 181–183.
Li Chengwei, Yun Chao. Stacking robot kinematics design and research institutions[J]. Machinery Design and Manufacture, 2009, 6(6): 181–183. (in Chinese with English abstract)
- [23] Lavelle S M. Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning[R]. Iowa City: Computer Science Department of Iowa State University, 1998.
- [24] Lavelle S M. Randomized kinodynamic planning[C]// Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, Piscataway: IEEE 1999: 473–479
- [25] Kuffner J J, LaValle S M. RRT-Connect: An efficient approach to single-query path planning[C]//The International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000: 1–7.

- [26] Jordan M, Perez A. Optimal Bidirectional Rapidly-Exploring Random Trees[R]. Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory Technical Report, 2013, 021: 1–14.
- [27] Klemm S, Oberlander J, Hermann A, et al. RRT*-Connect: Faster, asymptotically optimal motion planning[C]//IEEE Conference on Robotics and Biomimetics. Zhuhai: IEEE, 2015: 1670–1677.
- [28] Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846–894.
- [29] 康亮, 赵春霞, 郭剑辉. 未知环境下改进的基于 RRT 算法的移动机器人路径规划[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(3): 337–343.
- Kang Liang, Zhao Chunxia, Guo Jianhui. Improved path planning based on rapidly-exploring random tree for mobile robot in unknown environment[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 22(3): 337–343. (in Chinese with English abstract)
- [30] Corke P. Robotics, Vision and Control[M]. USA: Springer, 2011: 137–158.
- [31] Craig J J. Introduction to Robotics Mechanics and Control[M]. USA: Person, 2005: 16-68.

Obstacle avoidance path planning of hybrid harvesting manipulator based on joint configuration space

Yang Hanjiang, Li Lijun^{*}, Gao Zicheng

(School of Mechanical and Electrical Engineer, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming to realize the obstacle avoidance of fruit harvesting robot manipulator in unstructured environments, a kind of obstacle avoidance path planning algorithm of hybrid harvesting manipulator based on joint configuration space was proposed in this study. The structure of the 2P4R hybrid camellia oleifera fruit harvesting robot manipulator composed of a palletizing manipulator and a spherical wrist serial manipulator was simplified, and the link connecting the palletizing manipulator and serial manipulator was named as moving platform. The manipulator could accomplish six kinds of movements, including waist rotation, translational motions of vertical slider and horizontal slider, as well as three kinds of rotational motions of the wrist part. In this study, only five joint motions were taken into consideration. It means that the last link was considered as a fixed part of its previous link when a collision-free path planning operation was conducted. This is because that the motion of the last link was not related to the position of the end effector which could only affect its posture. Firstly, a goal point for the moving platform of the manipulator in Cartesian space was selected with the proposed algorithm. The goal point should be located in the workspace of the parallel manipulator, rather than inside the obstacles. The initial and goal configurations of the serial manipulator were determined by the moving platform of the goal point, the goal position of the end effector and the initial posture of the serial manipulator. Secondly, the obstacle mapping model in serial manipulator joint configuration space was built by using traversal method. Then, an attempt was made to search for a collision-free route from the initial point to the goal point in this space with each point uniquely corresponding to a configuration of the serial manipulator by using rapid-exploring random tree (RRT) algorithm. Thirdly, if the algorithm failed to find such a route in the previous step, the selection of goal point and collision-free route searching operation would be repeated. Otherwise, the joint configuration space of the parallel manipulator would be established. Fourthly, the unique posture of the parallel manipulator was determined based on the mapping relationship between driving joint value and the position coordinates of the moving platform. The obstacle model was built in the joint configuration space of the parallel manipulator. Subsequently, the goal point of the moving platform would be selected again, if the point in parallel manipulator configuration space corresponding to the goal configuration was located in the mapping model of obstacle. Otherwise, a collision-free route from the start point to the goal point in the configuration space corresponding to the initial posture and goal configuration of the parallel manipulator respectively should be searched by using RRT algorithm. The obstacle avoidance path of the hybrid manipulator was obtained from the synthesized results of the collision-free paths of the serial manipulator and parallel manipulator. In order to verify the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm, the path planning simulation of a hybrid manipulator in Matlab was carried out. The proposed algorithm was also applied in the obstacle avoidance path planning experiment on the camellia oleifera fruit harvesting manipulator. According to the simulation and experiment results, the path planned by the proposed algorithm could successfully drive the end effector from its initial position to the goal position without any collision. That is to say, these results can validate the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: robots; manipulators; algorithms; obstacle avoidance; hybrid; path planning; joint configuration space