

基于A*与动态窗口法的物料传输平台路径规划研究

唐炜, 谭啸, 孙宇, 严家鹏, 严光锐

(江苏科技大学机械工程学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 传统的物料传输设备存在工作方式单一、传输路径柔性调整困难等问题, 智能化物料传输系统已逐渐成为物流传输领域的研究热点之一。面向模块化物料传输平台, 提出了一种基于A*与动态窗口法的路径规划算法, 以期通过柔性调整物料传输路径提高传输过程中的避障能力。在全局路径规划中通过改进A*权值函数, 融合Bezier曲线与矩阵干涉理论, 实现了传输路径的平滑与静态避障; 通过引入动态窗口法并提取全局路径关键点作为过渡点对传输目标进行局部路径指引, 在避免路径陷入局部最优的同时, 实现了传输目标的动态避障。研究结果表明, 基于A*与动态窗口法的路径规划算法使全局路径总长度、总转角分别降低了4.6%、42.3%, 同时在局部规划中能有效地避开动态障碍物, 验证了该路径规划算法的合理性。

关键词: 路径规划; A*算法; 动态窗口法; Bezier曲线; 物料传输

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202304

Research on path planning of material transmission platform based on A* and dynamic window method

TANG Wei, TAN Xiao, SUN Yu, YAN Jiapeng, YAN Guangrui

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China

Abstract: Due to the problems of traditional material transfer equipment such as single working mode and inflexible adjustment of transfer path, intelligent material transfer system has gradually become a research hotspot in the field of logistics transmission. A path planning algorithm based on A* and dynamic window method was proposed for the modular material transmission platform, in order to improve its obstacle avoidance ability during the transfer process by flexibly adjusting the material transfer path. In the global path planning, the smoothness and static obstacle avoidance of the transmission path were realized by improving the A* weight function and integrating the Bezier curve and matrix interference theory. And by introducing the dynamic window method and extracting the global path key points as transition points for local path guidance of the transmission target, dynamic obstacle avoidance was realized when the path falling into local optimization was avoided. The research results showed that the path planning algorithm based on A* and dynamic window method could reduce the total global path length by 4.6% and the total path turning angle by 42.3%, while the dynamic obstacles could be effectively avoided in the local planning, which verified the rationality of the path planning algorithm.

Key words: path planning, A* algorithm, dynamic window method, Bezier curve, material transmission

收稿日期: 2022-07-04; 修回日期: 2022-08-20

通信作者: 唐炜, tangweisc@163.com

基金项目: 江苏省重点研发计划重点项目 (No.BE2016009); 江苏科技大学专项实验设备研究项目 (No.210813102001)

Foundation Items: Jiangsu Key R&D Plan Foundation of China (No. BE2016009), The Special Experimental Equipment Research Project of Jiangsu University of Science and Technology (No. 210813102001)

0 引言

近年来,现代物流业快速发展,对物流传输设备的智能化程度提出了更高的要求^[1-2]。传统物料传输设备大多工作方式单一、传输路径柔性调整困难,尤其是机械结构突发故障,往往会导致设备停工,甚至整个系统运行瘫痪。目前,智能化物料传输系统因其可在不改变布局形式和机械结构的前提下,实现传输形式的动态调整和传输路径的柔性变更,成为物流传输领域的研究热点^[3-4]。如何高效、柔性地规划物料传输路径,是智能化物料传输系统需要突破的关键技术难点,这对于确保物料传输过程的平稳性有重要意义。

Ma J W等人^[5]基于Bezier曲线提出了一种平滑路径规划算法,该算法可在较复杂的环境下规划出一条无碰撞的最优曲线路径,但由于算法较为复杂,其规划运行效率较低。李硕等人^[6]提出了一种多全向轮协同分拣平台,通过A*算法和人工势场法实现物体路径规划,并引入虚拟子目标点使目标跳出极值点,在单障碍物或简单环境下可实现货物路径规划,但当障碍物较多或环境复杂时,势场分析较困难且易产生震荡现象,甚至无法确定路径。辛峻峰等人^[7]针对遗传算法在无人艇路径规划时易陷入最优和收敛速度慢等缺点,提出了一种自适应调整参数的改进遗传算法——LCPGA算法,通过迭代线性更新控制参数,最终获得最优控制参数,能较好地避免陷入局部最优,该算法虽然提高了路径规划精度及收敛速度,但在实时性要求较高的传输领域仍有待进一步完善。王洪斌等人^[8]提出了一种改进A*算法和动态窗口法(dynamic window approach, DWA)的混合算法,该方法虽实现了机器人的路径规划,但忽视了机器人外形尺寸在路径规划中的影响,导致规划的路径在实际应用中难以实现。劳彩莲等人^[9]在融合动态窗口法的基础上,将超声波传感器应用于机器人局部避障,能实现较好的路径规划,但由于采用一对一的运输方式,不仅降低了传输效率,而且算法的复杂程度也会随着传输物体的增多呈几何增长。

对此,本文面向基于视觉的模块化物料传输平台,从全局路径和局部路径进行分析,分别采用改进A*算法和动态窗口法对传输物体进行路径规划,并引入矩阵干涉理论对传输路径进行安全检测,既解决了局部路径规划的最优解问题,同时提高了规

划路径的安全性及规划算法的运行效率。最后通过仿真及实验验证了基于A*与动态窗口法的组合路径规划算法在模块化物料传输平台工作中实现静态、动态避障的有效性,为该平台下一步的工程化应用打下了良好基础。

1 平台构成与栅格模型

1.1 平台构成

本物料传输平台主要由上位工控机、工业相机及下位传输模块3个部分组成。其中,上位工控机采用图形化用户界面进行传输速度、预期路径、网络通信等参数的设置。工业相机安装在平台正上方,用于完成物料传输过程中的状态监测及位置与姿态参数的反馈。下位传输模块由若干内置下位微控制单元(microcontroller unit, MCU)的正六边形模块体构成,总体布局呈蜂窝状,如图1所示。每个模块体均安有3个相同规格的全向轮模组(在圆周方向上间隔120°均匀分布),每个全向轮均由对应的直流电机进行独立驱动,任意相邻的3个全向轮中心连线为全等的等边三角形。整个平台控制系统基于控制器局域网(controller area network, CAN)总线进行组网通信。

本平台在物料传输过程中,对相关全向轮系的转速/转向进行协同控制,可在不改变平台机械结构和控制系统设计的前提下,柔性地在线调整物料的实际传输路径,从而实现物料的静态、动态避障及灵活分拣。

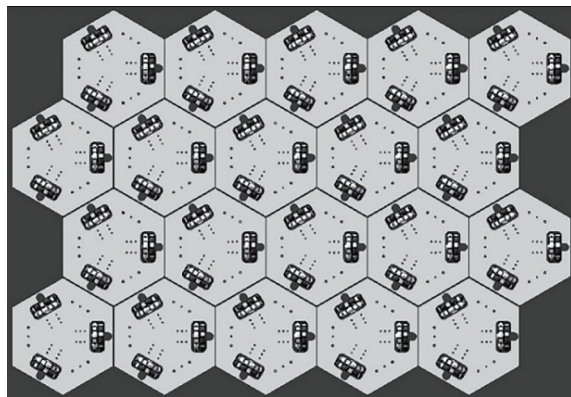


图1 下位传输模块的布局形式

1.2 栅格模型建立

在进行传输路径规划前,需对该平台进行栅格化处理。传统矩形栅格一般采用四叉树或八叉树模型,如图2所示。根据平台结构特点,本文将图3

所示的蜂巢栅格作为环境栅格模型^[10]，并将六搜索模型作为路径规划最小单元。

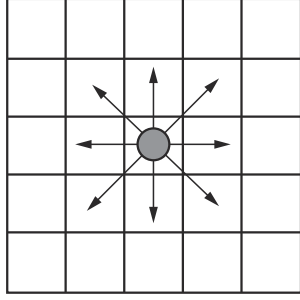


图2 传统栅格模型

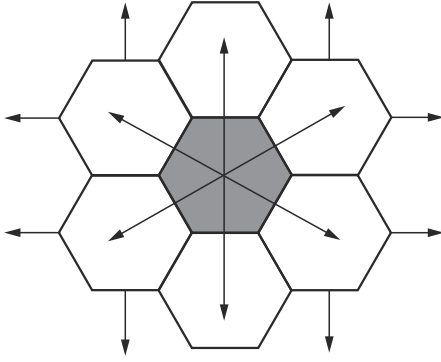


图3 蜂巢栅格模型

与传统矩形栅格相比，蜂巢栅格的搜索方向更少，能有效降低栅格的计算数量与路径规划时长。同时，蜂巢栅格模型与传输平台的模块体外形结构相似，可使仿真结果与实验数据更为吻合。

2 物料传输路径规划算法

2.1 全局路径分析与算法优化

(1) 改进A*算法的全局路径规划

传统A*算法^[11]是静态路网中求解最短路径最有效的直接搜索方法，也是最典型的启发式全局路径搜索方法。为了减少生成路径的冗余点，提高物料的传输效率，本文采用如式(1)所示的估算函数^[12]改进传统A*算法：

$$\begin{cases} f(n) = \alpha g(n) + \beta h(n) \\ \alpha = \frac{N}{N+2n} e^{-\frac{2n}{N}} \\ \beta = 1 - \alpha \end{cases} \quad (1)$$

其中， $g(n)$ 是从起始点到节点 n 的实际路径代价， $h(n)$ 是从节点 n 到目标点最短路径的估算代价， α 、 β 分别为 $g(n)$ 、 $h(n)$ 的权重， N 为总路径节点数。路径创建初始阶段，传输物体离起点近， α 值相对较

大， $g(n)$ 起主导作用；随着传输物体向目标点靠近， $h(n)$ 占比逐步增大；其间，两者始终维持动态平衡。权重 α 和 β 的变化曲线如图4所示。

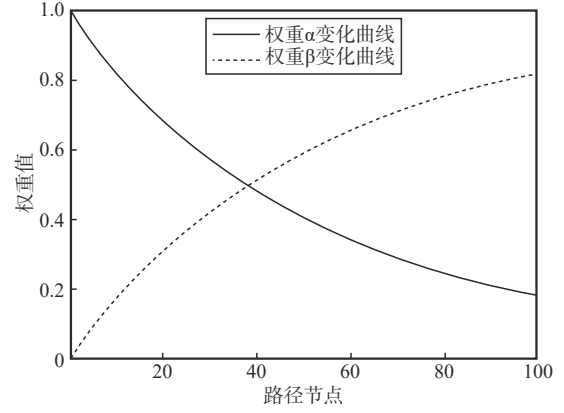


图4 权重变化曲线

(2) Bezier曲线融合与矩阵干涉检测

传统A*算法生成的路径大多由折线构成，物料传输时，路径拐点处的速度和加速度可能会产生突变，不仅会降低物体传输效率，也会增加传输方向的不确定性。为了提高A*算法规划路径的平滑性，本文引入Bezier曲线^[13]对路径进行优化。同时考虑到在A*算法仿真过程中，将传输目标视为质点进行路径创建，忽略了物体的实际尺寸，可能导致规划的路径在实际应用中无法实现，为此，本文通过工业相机获取物体的外形尺寸及实时位姿信息，结合矩阵干涉检测，对物料传输路径进行规划，直至得出合适路径。

矩阵干涉检测原理如图5所示，其中 L_1 、 $K(x,y)$ 分别为改进前的传输路径和该路径上的节点模块中心。

矩阵干涉检测的主要流程如下。

步骤1 设置最小安全间距，确定安全阈值 D ；通过视觉反馈获取传输目标的外形尺寸与位姿参数。

步骤2 计算障碍物中心 $P_1(x_0, y_0)$ 到路径节点 $K(x,y)$ 的距离 d ，如式(2)所示：

$$\begin{cases} d = |x_0 - x| \times \cos \alpha \\ \alpha = \arctan \frac{|y_0 - y|}{|x_0 - x|} \end{cases} \quad (2)$$

其中， α 为节点模块中心到障碍物中心 P_1 的连线与水平线的夹角。

步骤3 按以下规则进行干涉判断。

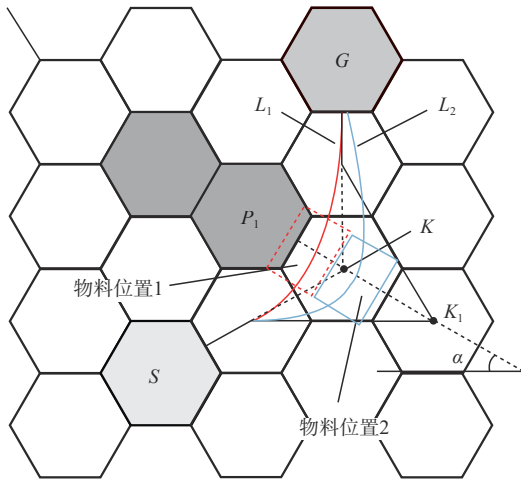


图5 矩阵干涉检测原理

① 若 $d > D$ ，传输物体不会干涉。

② 若 $d \leq D$ ，传输物体在物料位置1处进入故障危险区（图5所示虚线框区域），该情况下，以初始路径关键节点 K 为中心，安全阈值 D 为半径遍历周围待选模块并储存在序列 M 中，然后连接故障中心点 P_1 和节点 K 并做延长线，在延长线附近通过欧氏距离遍历序列 M ，将适合的模块中心作为节点 K_1 ，计算 K_1 到 P_1 的距离。当距离大于安全阈值 D 时，将初始路径节点 K 替换为 K_1 ，对新的路径节点重新进行 Bezier 拟合，得出改进的路径 L_2 ，此时，故障区域的物料位置由物料位置1调整至物料位置2。

步骤4 循环步骤1~步骤3，直至传输目标到达终点位置，干涉检测停止。

2.2 局部路径分析与算法优化

动态窗口法是一种常用的局部路径规划算法^[14-15]，它将笛卡尔坐标下的移动目标位置信息 (x, y) 转换为速度坐标信息 (v, ω) 。由于存在多个货物同时传输的情况，为了实现传输目标在复杂环境中的动态避障，本文以传输目标为参考对象，根据当前目标的状态及运动学模型模拟下一时刻的运动轨迹，同时设置动态窗口评价函数 $d_dist(v, \omega)$ ，并进行评估，得出最优运动轨迹，从而实现传输目标在局部路径上的无碰撞运动。

(1) 运动学模型

平台将正六边形模块体作为物料传输的驱动单元，模块上均匀排布的3个全向轮与待传输物体接触，通过对全向轮组的转速、转向进行协同控制，实现被传物料沿任意方向的传输。

因物料在传输过程中所接触的驱动轮系是动态

变化的，为了更好地控制传输对象的运动状态及其传输路径，需首先建立3轮驱动下的运动学模型。3轮系运动学模型解算如图6所示。

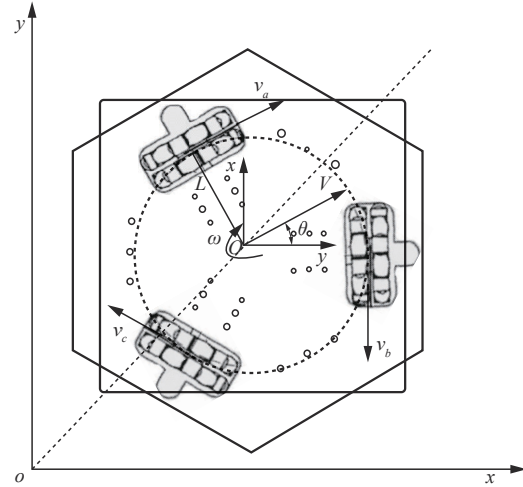


图6 3轮系运动学模型解算

其中， v 、 ω 分别为待传物体在速度空间内的传输线速度和自转角速度， L 为模块中心到全向轮中心的水平距离， α 为单个模块相邻全向轮之间的夹角 ($\alpha=60^\circ$)， v_a 、 v_b 、 v_c 为3个全向轮触物点的线速度， v_x 、 v_y 为待传输物体在 xoy 坐标系中沿 x 轴和 y 轴方向的速度分量。3轮系运动学模型如式 (3) 所示^[16]：

$$\begin{cases} v_a = v_y \sin(\alpha/2) + v_x \cos(\alpha/2) + L\omega \\ v_b = -v_y + L\omega \\ v_c = v_y \sin(\alpha/2) - v_x \cos(\alpha/2) + L\omega \end{cases} \quad (3)$$

(2) 评价函数

根据所选用全向轮系驱动电机的结构参数及物料传输的相关技术指标，对待传物料的速度空间进行约束^[17-18]，可以生成动态窗口下的多个可行轨迹。在此采用如式 (4) 所示的评价函数筛选出最优轨迹，从而实现局部路径规划。评价函数表达式为：

$$G(v, \omega) = \delta[\alpha \times \text{heading}(v, \omega) + \beta \times \text{dist}(v, \omega) + \lambda \times \text{velocity}(v, \omega)] \quad (4)$$

其中， $\text{heading}(v, \omega)$ 是物料航向角评价函数，用于评价待传物料当前状态与期望状态的航向角偏差。 $\text{dist}(v, \omega)$ 为障碍物距离评价函数，表示待传物料当前位置与最近障碍物之间的距离，距离越大则评价函数越大。 $\text{velocity}(v, \omega)$ 是速度评价函数，用于评价当前运动轨迹下物料传输速度的大小。 α 、 β 、 λ 为权重系数， δ 为归一化参数。

(3) 改进动态窗口法

传统动态窗口法采用单目标点作为衡量方向角评价函数 $\text{heading}(v, \omega)$ 的指标，缺少局部指引，易造成路径规划陷入局部最优。其次，只有在距障碍物很近时才会触发判断函数，无法保证物料传输过程中对避障安全性和实时性的要求。对此，本文引入视觉图像处理技术应对障碍物不可视的情况，并提出了如下改进措施。

① 设立动态避障阈值

为了兼容全局路径规划的优点，引用全局路径中的矩阵干涉检查安全阈值 D 作为避障参数，设动态避障范围 $D_d = 2D$ ，当目标与障碍物间距小于 D_d 时才会触发判断函数，即开启局部动态避障。同时，在传统动态窗口评价函数的基础上，引入动态障碍物评价函数 $d_dist(v, \omega)$ 表示传输目标与最近动态障碍物的距离，以提高平台传输物体间动态避障的灵活性^[19]。所采用的评价函数如式(5)所示：

$$G(v, \omega) = \delta[\alpha \times \text{heading}(v, \omega) + \beta \times \text{dist}(v, \omega) + \lambda \times \text{velocity}(v, \omega) + \gamma \times d_dist(v, \omega)] \quad (5)$$

其中， γ 为 $d_dist(v, \omega)$ 的权重系数。

② 按给定步长选取全局路径中的关键路径节点作为过渡目标点，并对传输物体进行局部引导，以避免路径陷入局部最优。具体过程如下。

步骤1 首先获取改进A*算法规划拟合后的 path 数组，将其保存在 path2 中，用于过渡目标点取样，同时将动态障碍物的位姿与尺寸信息存储在 $DWobstacle$ 数组中。

步骤2 将过渡目标点的步长定为 K ，遍历 path2 中的路径节点以获取合适节点。步长 K 选取应满足式(6)：

$$K = \frac{\text{dist}_d}{\text{dist}_r} \times \text{num} \quad (6)$$

其中， dist_d 为当前节点到最近动态障碍物的距离， num 为以 dist_d 为半径范围内的节点数， dist_r 为动态障碍物区域的最小外接圆半径。

步骤3 采用迭代的方式，将步骤2中获取的过渡目标点作为当前物料传输的引导点，即方向角评价函数 $\text{heading}(v, \omega)$ 衡量的指标，进行传输物料局部路径的规划。

步骤4 循环步骤2~步骤3，直至传输目标脱离动态避障范围，关闭局部动态避障。

2.3 组合算法路径规划

通过前述的改进全局路径规划算法，能快速规

划出一条安全度高、路径拐点少且满足实际需求的最优全局路径，但仅采用全局算法无法解决物料传输平台工作时多目标传输情形下的动态避障问题，易造成目标物之间相互干涉，导致传输失败。改进的局部动态窗口法虽能较好地应对动态避障问题，但易陷入局部最优。

针对上述不足，本文将改进的A*算法和动态窗口法进行融合^[20-21]，将全局规划得到的关键路径点作为局部路径规划中的过渡目标点，在引导物体脱离局部最优解的同时，仍具有全局规划的优势。基于A*与动态窗口的组合路径规划算法主要流程如图7所示。

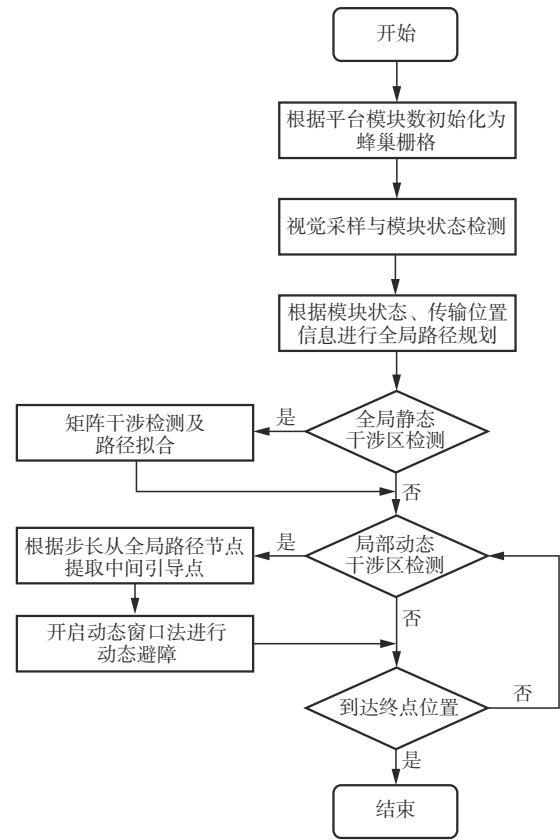


图7 基于A*与动态窗口的组合路径规划算法主要流程

3 相关算法的仿真分析

3.1 改进A*算法的全局路径规划仿真

(1) 传统栅格与改进栅格的路径仿真

首先分别对基于传统矩形栅格和改进蜂巢栅格的A*算法进行路径规划仿真，并比较规划的总路径长度和总路径转角。仿真结果如图8所示，仿真数据见表1。

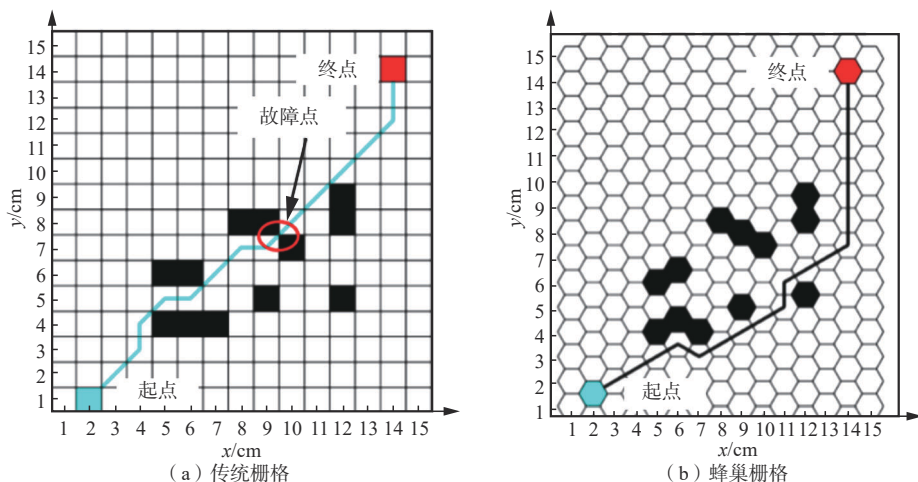


图8 基于传统矩形栅格和蜂巢栅格的A*算法仿真结果

表1 不同栅格下的A*算法规划仿真结果

类别	总路径长度/cm	总路径转角和
传统栅格	19.142	360°
蜂巢栅格	19.849	390°

经分析,传统矩形栅格在仿真时会如图8(a)所示的“拟成功”路径,但该路径在实际传输时却难以实现,原因在于传统栅格规划将目标作为质点进行路径仿真,而本平台在进行物料传输时,运动目标的尺寸属性是重要影响因素,在遇到图8(a)所示的故障点时,实际目标无法成功穿越障碍物。而通过图8(b)和表1可知,采用蜂巢栅格的A*算法虽在总路径长度、总路径转角和上有所增加,但能较好地避免错误路径的出现,其原因在于,蜂巢栅格的布局形式及其搜索模式可避免相邻栅格间出现图8(a)中的故障点情况。

(2) 改进A*算法与Bezier曲线拟合仿真

为了提高全局规划效率,本文在A*算法估计函数中引入了加权系数,并通过Bezier曲线对A*算法规划路径进行拟合。为了验证融合Bezier曲线后的平滑效果,对改进A*算法进行仿真分析,并将总路径长度、总路径转角和、总路径长度缩减率和总路径转角缩减率作为评价指标。仿真结果如图9所示,仿真数据见表2。

由图9(a)、图9(b)和表2可知,融合权值A*算法和高阶Bezier曲线的方法可以明显减小路径规划的长度及转角和,其中总路径长度缩减率为25.8%,转角和缩减率为53.8%,但缺点是在多段转角拟合时可能导致规划路径与障碍物之间的距离较近,甚至重合,而本文中障碍物附近属于无驱动

表2 不同改进算法下的路径规划仿真结果

算法	总路径长度/cm	总转角和	总路径缩减率	总转角缩减率
传统A*算法	19.849	390°	—	—
权值A*算法	17.320	330°	12.7%	15.3%
权值A*算法+高阶Bezier曲线	14.723	180°	25.8%	53.8%
权值A*算法+3阶Bezier曲线	16.196	210°	18.4%	46.2%
融入矩阵干涉检测	18.928	225°	4.6%	42.3%

区域,故不符合实际需求。图9(c)为引入3阶Bezier曲线进行多段拟合后的仿真效果,可较好地避免干涉区的出现。考虑到物料尺寸边界对实际传输过程的影响,在此一并将矩阵干涉检测融入路径规划,仿真结果如图9(d)所示,较传统A*算法而言,总路径长度缩减率为4.6%,总路径转角缩减率为42.3%。这表明融入矩阵干涉检测后的改进A*算法不仅能降低总路径转角,提高物料传输的平稳性,而且能降低总路径长度,提高传输效率。

3.2 改进动态窗口法的局部路径仿真

对传统动态窗口法和改进后的动态窗口法进行仿真比较,结果如图10和图11所示。其中,虚线为传统动态窗口路径,实线为改进后的动态窗口路径。

图10为静态避障曲线,即平台出现故障模块时的传输路径。图11为动态避障曲线,即多目标传输中,将其他传输目标视为动态障碍物的避障路径。从图10可知,传统动态窗口法为单目标点规划,判断单一,易陷入局部最优。改进后的动态窗口法,通过预设步长将路径数组中的关键节点作为过渡目标点的方法,避免局部最优解,能较好地完

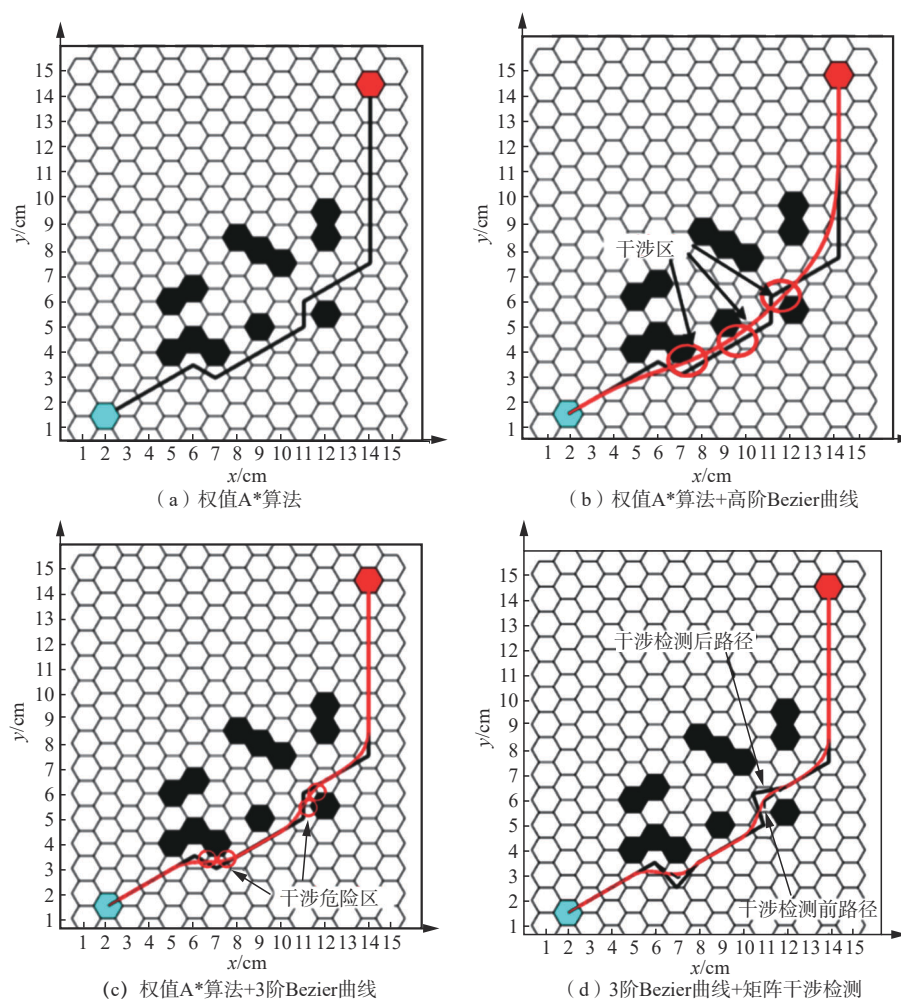


图9 改进A*算法的全局路径仿真

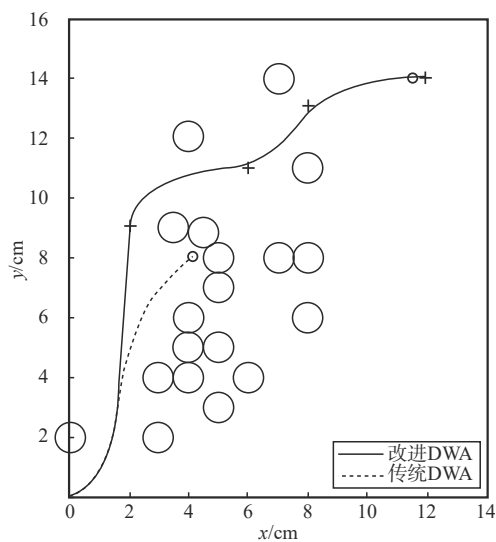


图10 静态障碍物避障路径曲线

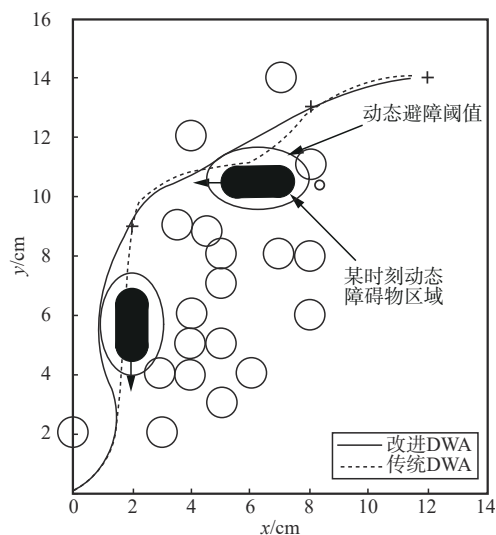


图11 动态障碍物避障路径曲线

成局部路径规划。在图11中,虚线曲线为未考虑动态障碍物距离时的规划路径,实线为引入动态障

碍评价函数 $d_dist(v,w)$ 后的规划路径。可以看出,在未考虑动态障碍物时,规划的路径会经过动态障

碍物活动区域,造成目标传输物与其他传输物体间的干涉碰撞,而引入动态障碍物距离后的路径规划,算法会根据障碍物阈值有效避开动态障碍物区域,实现货物安全传输。

3.3 组合路径算法仿真

为了进一步验证组合路径规划算法的合理性,在传输路径上设置一个在A、B两点之间进行不间断往复运动的动态障碍物,将前述基于A*与动态窗口法的路径规划算法(即全局与局部组合算法)与如图9(d)所示的全局改进算法(3阶Bezier曲线+矩阵干涉检测)进行仿真比较,结果如图12所示。其中,黑色虚线为未融合局部动态避障算法的路径,黑色实线为组合算法的路径,灰色实线为对组合算法路径节点拟合后的最终传输轨迹。

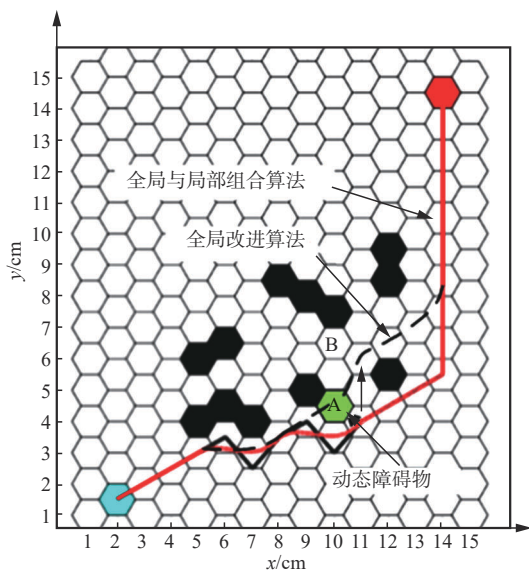


图12 全局改进算法与组合算法比较

经分析可知,全局改进算法无法实现动态障碍物避障,因此在物料传输过程存在与动态障碍物发生干涉的风险。而全局与局部组合算法引入了动态窗口法,并将全局规划后的路径关键点作为局部规划的过渡目标点,故除具有兼顾全局算法的优势外,还能较好地处理动态避障的问题。

4 实验结果分析

4.1 实验样机描述

为了验证组合路径规划算法的实际传输效果,本文搭建了如图13所示的实验样机,其中包括工业相机、各单元模块体(含全向轮模组)及下位STM32控制板、上位工控机等。上位机、各下位

机以节点的形式基于CAN总线进行组网通信。



图13 模块化传输平台实验样机

其中样机所涉硬件选型主要包括:根据平台总体尺寸等要求,确定各轮系布局结构参数及单个模块体尺寸(边长162 mm);根据预期的待传物料重量及传输速度,确定了全向轮规格(直径78 mm)及驱动用电机型号(带霍尔编码器反馈的直流减速电机MG513P20);根据平台工作区域和工业相机安装高度,完成相机选型(海康MV-CE060-10UM)并标定相机的内、外参数和畸变系数。

4.2 组合路径算法实验

图14描述了平台样机进行避障实验的过程。初始状态下,设定传输目标的始末位置和传输过程中的物料运动参数,并在平台放置两个动态障碍物。其中,传输物料尺寸 $W \times H = 25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,障碍物1、2的尺寸 $W \times H$ 分别为 $20 \text{ cm} \times 13 \text{ cm}$ 、 $21.5 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ 。工业相机以7帧/秒的采样速度对处于传输过程中的物料进行路径采样,同时设置两个动态障碍物进行横向的小范围往复运动(如图14中 $E \leftrightarrow F$ 和 $G \leftrightarrow H$),以期验证组合路径规划算法的有效性。

图15描述了该实验中的物料传输实际路径与

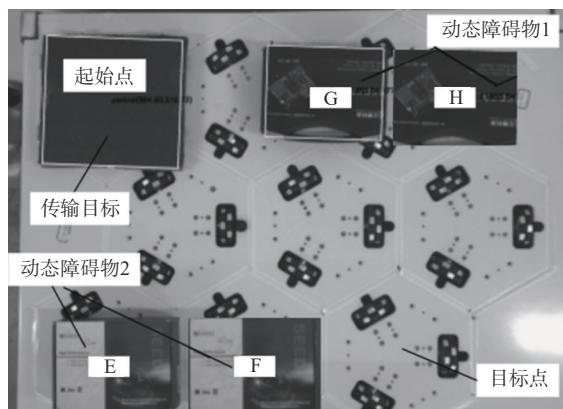


图14 传输平台上的避障实验

期望路径，其中圆点为动态障碍物处于边界位置时的几何中心，O和O'分别表示物料传输的实际路径拐点与期望路径拐点。为了便于观察，在图15中添加了被传物料的轮廓边界和动态障碍物的运动范围。

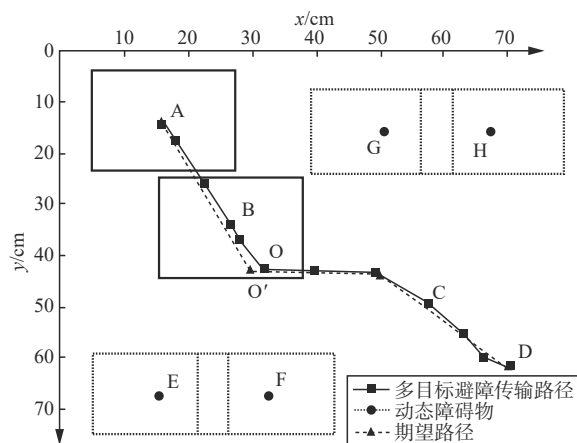


图15 避障传输示意图

实验开始时，物体由初始点A向目标点D进行传输，同时两个动态障碍物分别在E↔F与G↔H之间进行往复运动。分析图15可知，物料实际传输路径与期望路径基本吻合，最大误差发生在转角O(31.85,42.40)与O'(30,43)处，横向距离偏差约为1.85 cm（对应的相对误差约为3.36%），这是由转角处物料传输方向发生变化导致的。在图14的避障实验中，有两处干涉临界点（即待传物料距离动态障碍物的最小间距），此时的物料中心为图15中B(26.96,33.57)、C(57.36,49.16)两点，障碍物中心为G(51.18,16.32)、F(33.28,67.08)两点，计算得出对应的最短距离分别为2.75 cm、2.15 cm，这表明物料在传输过程中不会出现与动态障碍物发生碰撞的现象，物料能够顺利地到达目标点附近，满足工程化应用要求，验证了前述组合路径规划算法的有效性。

5 结束语

针对模块化物料传输平台，本文将基于蜂巢栅格的权值A*算法与矩阵干涉理论融合，进行全局环境的路径规划，以提高传输目标的静态避障能力。为了避免传输过程中目标物体因方向角变化过快而引起路径偏离，选用3阶Bezier曲线对路径进行平滑处理。为了提高目标传输过程中的动态避障能力，在动态窗口法中引入动态窗口评价函数，并

提取全局路径关键点作为过渡点，对传输目标进行局部路径指引，以避免路径陷入局部最优。最后在实验样机上初步验证了组合路径规划算法在工程化应用中的有效性。

本文目前仅对物料尺寸在一定范围内（限3轮接触）的单目标传输时路径规划可能碰到的静/动态避障问题进行了探讨，未来将针对更大尺寸目标、不规则目标、多目标传输及其动态避障路径规划算法展开深入研究，以进一步提高组合路径规划算法的合理性与适用性。

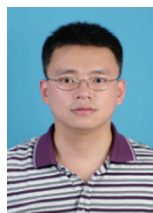
参考文献：

- [1] FU Y G, ZHU J M. Operation mechanisms for intelligent logistics system: a blockchain perspective[J]. IEEE Access, 2019, 7: 144202-144213.
- [2] 李静恒. 智能轨道物流传输控制系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [3] LI J H. Research on control system of track vehicle system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [4] KEEK J S, LOH S L, CHONG S H. Design and control system setup of an E-pattern omnivheeled cellular conveyor[J]. Machines, 2021, 9(2): 43.
- [5] URIARTE C, ASPHANDIAR A, THAMER H, et al. Control strategies for small-scaled conveyor modules enabling highly flexible material flow systems[J]. Procedia CIRP, 2019, 79: 433-438.
- [6] MA J W, LIU Y, ZANG S F, et al. Robot path planning based on genetic algorithm fused with continuous Bezier optimization[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2020.
- [7] 李顾, 汪伟. 多全向轮协同分拣平台的路径规划[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 698-709.
- [8] LI Q, WANG W. Path designing of multi-omnidirectional wheel collaborative sorting platform[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 698-709.
- [9] 辛峻峰, 张永波, 伯佳更, 等. 基于数据驱动的遗传算法的无人艇路径规划研究[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 171-180.
- [10] XIN J F, ZHANG Y B, BO J G, et al. Study on path planning of unmanned surface vessel based on data-driven genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(2): 171-180.
- [11] 王洪斌, 尹鹏衡, 郑维, 等. 基于改进的A*算法与动态窗口法的移动机器人路径规划[J]. 机器人, 2020, 42(3): 346-353.
- [12] WANG H B, YIN P H, ZHENG W, et al. Mobile robot path planning based on improved A* algorithm and dynamic window method[J]. Robot, 2020, 42(3): 346-353.
- [13] 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.
- [14] LAO C L, LI P, FENG Y. 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.
- [15] 顾文斌, 陈泽宇, 吴亚伟, 等. 融合栅格地图模型的改进AGV路径规划算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(9): 1-6.
- [16] GU W B, CHEN Z Y, WU Y W, et al. Research on improved AGV path planning algorithm based on grid map model[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(9): 1-6.

- [11] FU B, CHEN L, ZHOU Y T, et al. An improved A* algorithm for the industrial robot path planning with high success rate and short length[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 106: 26-37.
- [12] JIANG H J, SUN Y, WANG X W, et al. Research on path planning of mobile disinfection robot based on improved A* algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1871(1).
- [13] 曹如月, 张振乾, 李世超, 等. 基于改进A*算法和Bezier曲线的多机协同全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(S1): 548-554.
CAO R Y, ZHANG Z Q, LI S C, et al. Multi-machine cooperation global path planning based on A-star algorithm and Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(S1): 548-554.
- [14] LI X Y, LIU F, LIU J, et al. Obstacle avoidance for mobile robot based on improved dynamic window approach[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2017, 25: 666-676.
- [15] MOON J Y, CHAE H W, SONG J B. Planning of safe and efficient local path based on path prediction using a RGB-D sensor[J]. Journal of Korea Robotics Society, 2018, 13(2): 121-128.
- [16] 简傲, 闵华松, 黄文晖. 三轮全向移动机器人里程计在线校正方法研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(3): 1-9.
JIAN A, MIN H S, HUANG W H. Research on online calibration method of odometer for three-wheeled omnidirectional mobile robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(3): 1-9.
- [17] FOX D, BURGDARD W, THRUN S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1997, 4(1): 23-33.
- [18] 詹京吴, 黄宜庆. 融合安全A*算法与动态窗口法的机器人路径规划[J]. 计算机工程, 2022, 48(9): 105-112.
ZHAN J W, HUANG Y Q. Path planning of robot combing safety A* algorithm and dynamic window approach[J]. Computer Engineering, 2022, 48(9): 105-112.
- [19] 邹文, 韩丙辰, 李鹏飞, 等. 融合改进A*算法和优化动态窗口法的路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 已录用.
ZOU W, HAN B C, LI P F, et al. Path planning based on the integration of improved A* algorithm and optimized dynamic window approach[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, accepted.
- [20] 迟旭, 李花, 费继友. 基于改进A*算法与动态窗口法融合的机器人随机避障方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 132-140.
CHI X, LI H, FEI J Y. Research on robot random obstacle avoidance method based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 132-140.
- [21] HENKEL C, BUBECK A, XU W L. Energy efficient dynamic window approach for local path planning in mobile service robotics[J].

IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(15): 32-37.

[作者简介]



唐炜 (1973-), 男, 江苏科技大学机械工程学院副教授, 主要研究方向为机电控制及自动化、机器人控制。



谭啸 (1995-), 男, 江苏科技大学机械工程学院硕士生, 主要研究方向为路径规划算法、嵌入式系统设计。



孙宇 (1998-), 男, 江苏科技大学机械工程学院硕士生, 主要研究方向为移动机器人路径规划。



严家鹏 (1996-), 男, 江苏科技大学机械工程学院硕士生, 主要研究方向为智能测控技术。



严光锐 (1999-), 男, 江苏科技大学机械工程学院硕士生, 主要研究方向为机器人应用技术。