

工业机器人路径规划算法研究及其自动化应用

杨 征

海口经济学院 海南 海口 570100

摘 要：随着科技的飞速发展，工业机器人在制造业中扮演了越来越重要的角色。路径规划算法作为工业机器人实现高效自动化生产的关键技术之一，其研究与应用具有重要意义。本文将对工业机器人路径规划算法进行深入研究，并探讨其在自动化生产中的应用。

关键词：工业机器人；路径规划算法；自动化应用

引言

在现代制造业中，工业机器人已经广泛应用于搬运、焊接、组装等任务。然而，如何规划机器人从起点到终点的最佳路径，以实现最短时间、最少能耗和避免障碍物，是一个非常重要的优化问题。通过科学的数学建模方法结合路径规划算法，可以大幅度提高工业机器人的工作效率，优化生产过程。

1 工业机器人路径规划分类

工业机器人路径规划技术可细分为全局路径规划与局部路径规划两大类，两者各具特色，适用于不同的应用场景。全局路径规划，顾名思义，是在已知或部分已知的环境信息基础上，通过综合运用图论、优化算法等手段，在全局范围内搜索并确定一条到达目标点的最优或次优路径。此方法特别适用于环境较为静态、障碍物位置固定的场景，能够确保机器人在行进过程中避开所有已知障碍，实现高效、安全的导航^[1]。相比之下，局部路径规划则更加注重即时性与灵活性。它主要依据机器人当前的实时状态（包括位置、朝向、速度等），结合传感器获取的局部环境信息，进行快速分析与决策，从而动态调整机器人的移动方向和速度。这种方法特别适用于动态变化或未知环境，能够迅速适应环境变化，确保机器人按照预期的轨迹行进。

2 工业机器人常见的路径规划算法研究

2.1 Dijkstra算法

2.1.1 算法原理

Dijkstra算法是一种用于解决单源最短路径问题的经典算法。它的核心思想是从起始节点开始，采用贪心算法的策略，逐步向外扩展，每次选择距离起始节点最近且未确定最短路径的节点进行处理，直到扩展到终点为止。在处理每个节点时，算法会更新其到起始节点的最短距离，并记录下最短路径上的前驱节点。最终，通过回溯前驱节点，可以得到从起始节点到目标节点的最短

路径。

2.1.2 算法特点

一是适用于静态环境：Dijkstra算法在静态环境中的表现尤为出色，即环境中的障碍物和地形不会发生变化。它能够确保找到最短路径，而不会受到动态变化的影响。二是时间复杂度较高：Dijkstra算法的时间复杂度通常表示为 $O(|V|^2)$ ，其中 $|V|$ 表示图中节点的数量。在节点数量庞大的场景中，算法的计算量会非常大，因此不适用于实时性要求较高的场合。

2.1.3 算法步骤

Dijkstra算法的具体步骤如下：（1）初始化：将所有节点的距离初始化为无穷大，将起始节点的距离初始化为0。创建一个优先队列（通常使用最小堆实现），用于存储待处理的节点。（2）选择最短路径节点：从优先队列中取出距离最小的节点（即当前找到的最短路径的终点）。（3）更新相邻节点：遍历该节点的所有邻接节点，对于每个邻接节点，计算通过当前节点到达该邻接节点的总距离（当前节点的最短距离+邻接节点与当前节点之间的距离）。如果计算出的总距离小于之前记录的该邻接节点的最短距离，则更新该邻接节点的最短距离，并将其加入或更新在优先队列中的位置。（4）重复步骤：重复步骤2和步骤3，直到优先队列为空或已经找到了目标节点的最短路径。

2.1.4 算法优化

为了应对Dijkstra算法时间复杂度较高的问题，可以采用以下优化策略：一是使用斐波那契堆：将优先队列的实现从最小堆改为斐波那契堆可以降低选择未处理节点中距离最短的节点的时间复杂度。二是使用邻接表存储图：使用邻接表而不是邻接矩阵来存储图可以降低更新相邻节点最短路径长度的时间复杂度。三是剪枝优化：在某些情况下，可以通过剪枝优化来减少不必要的计算。例如，当已经确定某个节点的最短路径长度大于

当前已知的最短路径长度时，可以提前终止对该节点的处理。

2.2 A*算法

2.2.1 算法原理

A算法结合了Dijkstra算法的广度优先搜索和启发式搜索的优点，通过在搜索过程中使用启发式函数来评估节点的潜在价值，从而引导搜索方向，加快搜索速度。A算法使用两个关键的值来评估节点：

g值：从起点到当前节点的实际代价（或距离）。

h值：从当前节点到目标节点的启发式估计代价（或距离）。

A算法的总评估函数 $f(n)$ 定义为 $f(n) = g(n) + h(n)$ 。在搜索过程中，A算法始终选择 f 值最小的节点进行扩展，直到找到目标节点或搜索完所有节点。

2.2.2 启发式函数

启发式函数 $h(n)$ 的选择对A*算法的性能至关重要。一个好的启发式函数应该能够准确地估计从当前节点到目标节点的代价，同时计算简单、高效。常见的启发式函数包括：欧几里得距离：适用于二维或三维空间中的路径规划问题。曼哈顿距离：适用于网格地图中的路径规划问题，其中移动只能沿着网格线进行。对角线距离：适用于允许对角线移动的网格地图中的路径规划问题。

2.2.3 算法步骤

A*算法的具体步骤如下：

（1）初始化：创建一个开放列表（Open List），用于存储待评估的节点，按 f 值从小到大排序。创建一个关闭列表（Close List），用于存储已经评估过的节点，避免重复计算。将起点加入开放列表，并设置其 g 值和 h 值。

（2）循环执行以下步骤，直到找到目标节点或开放列表为空：从开放列表中选择 f 值最小的节点作为当前节点。如果当前节点是目标节点，则搜索成功，结束算法。将当前节点从开放列表移动到关闭列表。生成当前节点的所有邻居节点。对于每个邻居节点：如果邻居节点在关闭列表中，则跳过。计算从起点到邻居节点的实际代价 g' 。计算从邻居节点到目标节点的启发式估计代价 h' 。如果邻居节点不在开放列表中，或者虽然在开放列表中但 $g'+h' <$ 当前记录的 g 值+ h 值，则更新邻居节点的 g 值和 h 值，并将其加入或更新在开放列表中的位置^[2]。（3）路径重构：如果找到目标节点，则通过回溯父节点来重构从起点到目标节点的最短路径。

2.2.4 算法优化

为了提高A*算法的效率，可以采用以下优化策略：

一是使用优先队列：开放列表可以使用优先队列（如最小堆）来实现，以便高效地选择 f 值最小的节点。二是避免重复访问：通过检查邻居节点是否已经在关闭列表中，可以避免重复访问已经评估过的节点。三是剪枝：在将邻居节点加入开放列表之前，可以检查是否存在一个已经在开放列表中且具有更小 g 值的节点，如果存在，则可以剪枝，避免不必要的计算。四是启发式函数优化：选择合适的启发式函数可以显著提高算法的性能。例如，对于网格地图，使用对角线距离通常比使用曼哈顿距离更有效。

2.3 RRT算法

2.3.1 算法原理

RRT算法的核心思想是在状态空间（或构型空间）中随机生成样本点，并通过构建树形结构来探索可行的路径。树从起始点开始生长，每次迭代时，算法会随机生成一个样本点，然后在树中找到距离该样本点最近的节点，并尝试从该节点向样本点方向扩展一定距离，生成一个新的节点。如果新节点不与障碍物发生碰撞，则将其加入到树中。随着迭代的进行，树会逐渐扩展，直到包含目标点或进入目标区域，此时便可以在树中找到一条从起始点到目标点的路径。

2.3.2 算法步骤

RRT算法的具体步骤如下：

（1）初始化：设定起始点 q_start 和目标点 q_goal 。创建一个树 T ，将起始点 q_start 作为树的根节点。（2）随机采样：在状态空间中随机生成一个样本点 q_rand 。（3）寻找最近节点：在树 T 中找到距离样本点 q_rand 最近的节点 $q_nearest$ 。（4）扩展新节点：从节点 $q_nearest$ 向样本点 q_rand 方向扩展一定距离（步长 Δq ），生成一个新的节点 q_new 。检查新节点 q_new 是否与障碍物发生碰撞。如果不碰撞，则将其加入到树 T 中，并将其父节点设置为 $q_nearest$ 。（5）检查目标：检查新节点 q_new 是否足够接近目标点 q_goal （通常设置一个阈值来判断）。如果是，则算法结束，返回从起始点 q_start 到目标点 q_goal 的路径。（6）迭代：重复步骤2到步骤5，直到达到预设的迭代次数或满足其他停止条件。

2.3.3 算法优化

为了提高RRT算法的性能，可以采用多种优化策略：在RRT算法的基础上引入代价函数，每次迭代时重新选择父节点以优化路径。随着迭代次数的增加，RRT**算法能够找到渐近最优的路径。在随机采样过程中引入一个概率值，使得采样点更有可能朝向目标点方向生成，从而加速搜索过程^[3]。对找到的路径进行后处理，去除路径中

的冗余点,使路径更加平滑和高效。

3 工业机器人路径规划算法的应用

3.1 汽车行业

在汽车制造业,工业机器人的身影无处不在,从焊接、冲压到涂装,它们已成为生产线上不可或缺的一部分。路径规划算法在这里的应用,不仅提升了生产效率,更保证了产品质量的稳定性。以焊接为例,汽车车身由众多复杂曲面构成,焊缝形状各异且分布广泛。传统的手动焊接难以保证焊接质量和一致性,而工业机器人则能通过路径规划算法,精确计算焊接路径,确保焊枪以最佳姿态和速度沿焊缝移动。算法会综合考虑焊缝的几何特征、材料厚度以及焊接工艺要求,生成一条既高效又保证质量的焊接路径。同时,算法还能根据生产现场的实际布局,自动避开其他设备或工件,避免碰撞,确保焊接过程的安全性和连续性。此外,在冲压和涂装环节,路径规划算法同样发挥着关键作用。冲压过程中,机器人需准确地将板材定位到模具中,并通过精确的路径控制完成冲压动作,确保零件尺寸和形状的一致性。而在涂装环节,机器人需根据车身形状和涂装要求,规划出均匀覆盖且避免喷涂过量的路径,既保证了涂装质量,又节省了涂料成本。

3.2 电子行业

电子产品组装和测试对精度和效率的要求极高,工业机器人的应用为这一行业带来了革命性的变革。路径规划算法在这里的应用,使得机器人能够应对复杂多变的组装和测试需求。在电路板组装过程中,元器件的尺寸小、数量多且布局紧密,对机器人的定位精度和路径规划能力提出了严峻挑战。路径规划算法能够综合考虑元器件的位置、大小、方向以及组装顺序,生成一条既高效又准确的组装路径。机器人根据这条路径,能够迅速而准确地将元器件放置到指定位置,确保组装精度和效率。同时,算法还能根据生产线的实际情况,动态调整机器人的移动速度和路径,以适应不同批次产品的生产需求。在测试环节,路径规划算法同样发挥着重要作用。例如,在集成电路测试中,机器人需要根据测试点的位置和测试顺序进行路径规划,确保测试探针能够准

确接触测试点并获取可靠的测试数据。通过算法的优化,机器人能够以最短的路径和最快的速度完成测试任务,提高测试效率和准确性。

3.3 物流行业

随着电商和智能制造的快速发展,物流行业对自动化和智能化的需求日益迫切。工业机器人和路径规划算法的应用为物流行业带来了前所未有的效率提升。在自动化仓库中,机器人负责货物的搬运和存储任务。路径规划算法能够根据货物的存储位置、订单需求和仓库布局等信息,生成一条最优的搬运路径。机器人根据这条路径,能够迅速而准确地找到货物并将其搬运到指定位置^[4]。算法还会考虑仓库中的障碍物和其他机器人的位置,避免碰撞和拥堵,确保搬运过程的顺畅和安全。在智能分拣环节,路径规划算法同样发挥着关键作用。机器人需要根据货物的类型、目的地和分拣要求等信息进行路径规划,确保货物被准确分拣到相应的区域或运输工具上。通过算法的优化,机器人能够以最快的速度完成分拣任务,提高分拣效率和准确性。

结语

工业机器人路径规划算法是实现高效自动化生产的关键技术之一。通过对不同路径规划算法的研究与应用,可以大幅度提高工业机器人的工作效率和生产质量。未来,随着技术的不断进步和发展,工业机器人路径规划算法的研究与应用将越来越广泛,为制造业的智能化转型提供有力支持。

参考文献

- [1]韩小康.工业机器人路径规划算法研究及仿真[D].北京交通大学,2020.
- [2]姜新波,王孟微,杨春梅,等.基于A*和APF算法的果园喷雾机器人路径规划[J].传感器与微系统,2024,43(12):145-149.
- [3]王雨.基于改进RRT算法的工业机器人路径规划研究[D].山东大学,2023.
- [4]余奇.工业机器人的安全避障与路径规划研究[D].上海应用技术大学,2021.