

DOI:10.19651/j.cnki.cmt.2107613

基于改进 A^* 算法的数字微流控系统液滴路径规划研究*罗智杰^{1,2,3} 黄子涛¹ 彭翠玲¹ 潘仲宇¹ 刘双印^{1,2,3} 曹亮^{1,2,3} 尹航^{1,2,3}

(1. 仲恺农业工程学院 信息科学与技术学院 广州 510225; 2. 仲恺农业工程学院 广东省高校智慧农业工程技术研究中心 广州 510225; 3. 仲恺农业工程学院 广州市农产品质量安全溯源信息技术重点实验室 广州 510225)

摘要: 基于介电润湿(EWOD)效应的数字微流控系统(DMF)能实现微升级别的多个液滴移动、分裂、合成等操作。为了降低 EWOD 器件异质液滴之间的交叉污染,减少化学合成和生化检验在 EWOD 器件中的完成时间,保证器件的可靠性,通过 MATLAB 平台对 DMF 系统环境进行空间建模,在基本 A^* 算法的基础上,将拐点作为估计函数数值的影响因子,融入液滴碰撞策略,提出了针对 EWOD 器件流体特征的改进 A^* 算法。通过对化学合成实验的仿真模拟,该算法表现出了较好的液滴寻址优化特性。对比基本 A^* 算法,在相同路径长度下(64 个驱动电极),该算法能够有效减少冗余的拐点(减少 10 个)和液滴到达目标电极时间(减少约 23 s)。此外,改进的算法在复杂条件下(存在未知和已知故障)的多液滴合成实验也表现出较好的适应性(只需要 24 个时间戳即实现合成)。实验结果证明提出的液滴寻址算法对 EWOD 器件中多液滴的路径规划和调度优化具有较好的应用性和可靠性,可有效减少液滴应用在 EWOD 器件中的完成时间。

关键词: 数字微流控;介电润湿;改进 A^* 算法;路径规划;避碰策略**中图分类号:** TP3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120.3**Research on droplet path planning of digital microfluidic system based on improved A^* algorithm**Luo Zhijie^{1,2,3} Huang Zitao¹ Peng Cuiling¹ Pan Zhongyu¹ Liu Shuangyin^{1,2,3} Cao Liang^{1,2,3} Yin Hang^{1,2,3}

(1. College of Information Science and Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Smart Agriculture Engineering Research Center of Guangdong Higher Education Institutes, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. Guangzhou Key Laboratory of Agricultural Products Quality & Safety Traceability Information Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: The digital microfluidic system (DMF) based on dielectric wetting (EWOD) effect can realize the movement, splitting, synthesis and other operations of multiple droplets at micro rise level. To reduce the cross contamination between heterogeneous droplets of EWOD devices, the completion time of chemical synthesis and biochemical testing in EWOD devices, and ensure the reliability of devices, makes a spatial modeling of DMF system environment through MATLAB platform. Based on the basic A^* algorithm, the inflection point is taken as the influence factor of the estimated function value and integrated into the droplet collision strategy, an improved A^* algorithm for the fluid characteristics of EWOD devices is proposed. Through the simulation of chemical synthesis experiment, the algorithm shows good droplet addressing optimization characteristics. Compared with the basic A^* algorithm, under the same path length (64 electrodes), this algorithm can effectively reduce the redundant inflection points (reduce 10) and the time for droplets to reach the target electrode (reduce about 23 s). In addition, the improved algorithm also shows good adaptability (only needs 24 time stamps) in the experiments of multi-droplets synthesis under complex conditions (there are unknown and known faults). The experimental results show that the proposed droplet addressing algorithm has good applicability and reliability for multi droplet path planning and scheduling optimization in EWOD devices, and can effectively reduce the completion time of droplet applications in EWOD devices.

Keywords: digital microfluidics; electrowetting on dielectric; improved A^* algorithm; path planning; collision avoidance strategy**0 引言**

数字微流控(DMF)系统主要应用于化学和生物等领

域,其能够完成药剂成分检测分析和化学合成反应等实验操作,因此有片上实验室(lab-on-a-chip, LoC)之称^[1]。现阶段,DMF系统可以由多种不同驱动机理实现,如表面声

收稿日期:2021-08-17

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61871475)、广东省自然科学基金面上项目(2021A1515011605)、广州市创新平台建设计划实验室建设专项(201905010006)、广州市科学研究计划一般项目(201904010233,201903010043)资助

波、介电润湿、介电泳、磁力等^[2-4]。其中基于介电润湿(EWOD)的 DMF 系统在这些技术中脱颖而出,吸引了国内外很多微流控研究团队对其进行研究。基于 EWOD 的 DMF 系统具有芯片结构简单,器件制作成本较低,加工和匹配的驱动控制电路相对简单等特殊优势^[5-8]。

目前,国内外针对基于 EWOD 的 DMF 系统的研究非常活跃,在多个研究方向也取得了突破性的进展,如芯片结构优化、降低驱动电压、液滴定位等领域^[9-10]。但是在液滴寻址和路径规划领域的研究仍然较为空白,杨敬松等^[11-12]曾在早年提出了基于数字微流控生物芯片的液滴调度算法。该研究通过应用架构调度遗传算法在一定程度上优化了数字微流控生物芯片中液滴的寻址调度问题。近年王鹤^[13]提出基于多目标的异质液滴寻址优化启发式算法,在液滴寻址时间以及污染电极数量等多方面都表现出了较明显的优势。而在国外,有团队提出基于蚁群算法和引脚约束的数字微流控系统多液滴路径寻址算法^[14-15],这些研究主要实现了多液滴在 EWOD 器件上的布局与初始路径较优解。

对于一般情境的寻址来说,只需要对目标的路径和时间进行调度和优化即可。但是对于 EWOD 器件的液滴寻址研究而言,除了要考虑电极利用率,液滴到达目标电极的时间,还要避免不同样本和试剂间的混合与污染。因此如何在兼顾 EWOD 器件的实验稳定与安全的同时,实现多液滴路径规划与调度优化在 DMF 系统领域具有较强的应用意义。

针对长时间使用的 EWOD 器件普遍存在电极故障(由于高电压驱动以及表面存在颗粒),导致液滴“卡在”故障电极节点,无法按照预定路线到达目标电极。本文对 A* 算法做出适应性的改进,融入 3 种液滴碰撞策略,将拐点作为估计函数值的影响因子,可有效消除路径中冗余的拐点,降低多液滴情况下触发避碰策略的几率,从而减少液滴到达目标电极的运动时间。仿真实验结果证明,本文提出的基于改进 A* 的数字微流控系统液滴路径规划算法,可有效提高微液滴运输效率和 EWOD 器件的稳定性。

1 基于介电润湿的数字微流控系统原理

数字微流控芯片通常采用“三明治”结构^[16],液滴被填充注射到上下极板之间,如图 1 所示。上极板主要由透明玻璃、接地电极和疏水层组成,下极板包括疏水层、介质层、控制电极、衬底^[17]。疏水层是液滴接触和移动的界面,介质层能够阻止电解现象的发生。硅油可以作为填充物用于降低液滴移动时的阻尼,但硅油的引入在生化实验中可能会对实验结果造成影响,因此,上下极板间的填充物质需要根据 DMF 系统的应用环境而定。

在图 1 中,斜线的控制电极表示该电极被激活,当液滴的相邻电极被激活时,液滴的接触角将会迅速降低(一般从

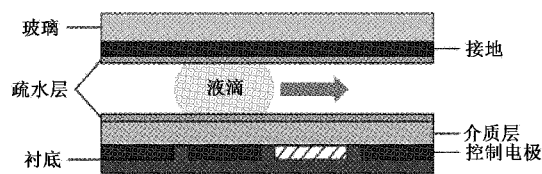


图 1 典型的 EWOD 结构

110 以上降到 60 以下)^[18],使得液滴因为形变而产生压强差,并向激活电极的方向移动。基于这个原理,极板之间的液滴可以从当前电极位置移动到周围相邻的电极上。控制系统根据时序给相应的电极节点施加大于驱动阈值的电压,即可驱动微液滴沿着相应的路径运动,完成液滴在 EWOD 器件中的多种操作(如移动、合成)。

然而,实际上 EWOD 器件在长时间使用过程中无法避免出现电极故障。电极故障的类型有多种,如电极短路、疏水层退化等。在很多情况下液滴无法通过故障的电极节点,严重时液滴可能会卡在故障的电极节点上无法转移,影响整个 EWOD 器件的运行。

2 问题描述和空间模型建立

合理的空间建模能够简化问题,找到合适的液滴路径解决方案。针对基于 EWOD 的 DMF 系统布局特点(二维电极阵列布局,器件大多采用正方形驱动电极),本文选用了栅格法^[19]来创建 EWOD 器件中液滴的活动空间,规格为 33×33 。其中,每个栅格的边长为 1 个单位,如图 2 所示。

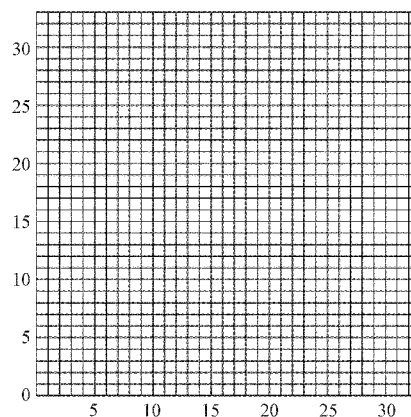


图 2 栅格模型

各个栅格节点的中心点坐标由该节点所在位置的行和列决定:

$$\begin{cases} Node_x = Node_{column} - 0.5 \\ Node_y = Size - Node_{row} + 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $Node_{column}$ 为栅格节点所在位置的列; $Node_{row}$ 为栅格节点所在位置的行; $Size$ 为栅格模型的大小,在本文中该尺寸为 33 个单位; $Node_x$ 为该节点的中心点在直角坐标系中的 X 轴坐标; $Node_y$ 为该节点的中心点在直

角坐标系中的 Y 轴坐标。在整个 EWOD 器件中,每个液滴的行进方向为北、东、南、西 4 个方向,且每次只能移动 1 个单位的步长距离。不同的应用场景选择合适的距离计算公式能够得到更加优化且合理的结果,主要有如下 3 种。

1) 曼哈顿距离

曼哈顿距离是两点横坐标之差的绝对值与纵坐标之差的绝对值的和,用公式表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = \text{abs}(Node1_x - Node2_x) \\ \Delta y = \text{abs}(Node1_y - Node2_y) \\ d = D \times (\Delta x + \Delta y) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Node1_x$ 和 $Node1_y$ 分别表示点 $Node 1$ 的横坐标和纵坐标, $Node2_x$ 和 $Node2_y$ 同理, D 为单位长度。

2) 对角线距离

对角线距离可视将曼哈顿距离中所有相邻的等腰直角边用斜边代替,并计算最终所有直边及斜边之和,用公式表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = \text{abs}(Node1_x - Node2_x) \\ \Delta y = \text{abs}(Node1_y - Node2_y) \\ Num_{diagonal} = \min(\Delta x, \Delta y) \\ Num_{straight} = \Delta x + \Delta y \\ d = D' \times Num_{diagonal} + D \times (Num_{straight} - 2 \times Num_{diagonal}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $Num_{diagonal}$ 为斜边数量; $Num_{straight}$ 为直边数量; D 为单位长度, $D' = \sqrt{2}D$ 。

3) 欧几里得距离

欧几里得距离是两点之间的直线距离,用公式表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = Node1_x - Node2_x \\ \Delta y = Node1_y - Node2_y \\ d = D \times \text{sqrt}((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2) \end{cases} \quad (4)$$

图 3 所示为从点 A 到点 B 的 3 种距离计算公式的表示方法,其中,实线表示曼哈顿距离,虚线表示对角线距离,点线表示欧几里得距离。从图 3 中可以看出,曼哈顿距离适合 4 方向(北、东、南、西)的移动,对角线距离适合 8 方向(西北、北、东北、东、东南、南、西南、西)的移动,欧几里得距离适合任意角度的移动。因此,本文根据基于 EWOD 的 DMF 系统中液滴运动的特点(由于液滴在器件表面的覆盖

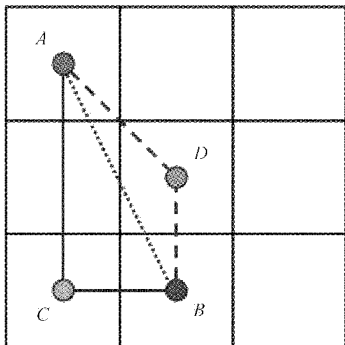


图 3 3 种距离公式的图示

面直径一般为驱动电极的 1.2~2 倍左右,较适合 4 方向连续移动),选择曼哈顿距离公式作为本算法的距离计算公式。

在基于 EWOD 的 DMF 系统中,液滴路径规划(也称为寻址)就是在满足安全性和应用需求的基础上,为多个并行运动的液滴在 EWOD 芯片的二维电极阵列中找到可以从源电极运动到目标电极的较优路径。对于一般情境的寻址来说,只需要对目标的路径和时间进行优化即可。但是对于 EWOD 器件的液滴寻址研究而言,除了要考虑电极利用率,液滴到达目标电极的时间,还要避免不同样本和试剂间的混合与污染。此外,在液滴路径规划中还要考虑到 EWOD 器件驱动电极故障问题,如何合理避开已知故障的驱动电极,如何在检测出未知故障的电极节点后,根据当前 EWOD 器各液滴的状态重新寻找较优的液滴路径都是寻址算法要关注的重要因素。

对于 EWOD 器件多液滴寻址和调度来说,要想获取安全有效的液滴路径,并行运动的液滴之间必须有足够的空间以避免液滴的融合和污染。因此基于 EWOD 器件的特点,需要设置多个液滴调度时的避碰策略,避免液滴在进入反应区前就发生碰触。此外在 EWOD 器件中,各个液滴必须满足一些流体约束条件^[20]。流体约束条件又分为静态流体约束和动态流体约束,分别如式(5)和(6)所示。

$$\begin{cases} |Row_1^t - Row_2^t| \geq 2 \\ \text{或} |Column_1^t - Column_2^t| \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} |Row_1^{t+1} - Row_2^t| \geq 2 \\ \text{或} |Column_1^{t+1} - Column_2^t| \geq 2 \\ \text{或} |Row_2^{t+1} - Row_1^t| \geq 2 \\ \text{或} |Column_2^{t+1} - Column_1^t| \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, Row_1^t 和 $Column_1^t$ 分别为实验液滴 1 在时间 t 时所在位置的行和列; Row_2^t 和 $Column_2^t$ 分别为实验液滴 2 在时间 t 时所在位置的行和列。

根据不同实验的差异性,本文将多个实验液滴之间的避碰策略分为如下 3 种。

策略 1: 如果 t_2 时实验液滴 1 即将前往的位置和 t_1 时实验液滴 2 的位置满足动态流体约束条件,且 t_2 时实验液滴 2 即将前往的位置和 t_1 时实验液滴 1 的位置也满足动态流体约束条件,但在 t_2 时两个实验液滴即将前往的位置不满足静态流体约束条件,则让实验液滴 1 在 t_2 时继续按计划路线前进,实验液滴 2 在 t_2 时原地等待,如图 4 所示。

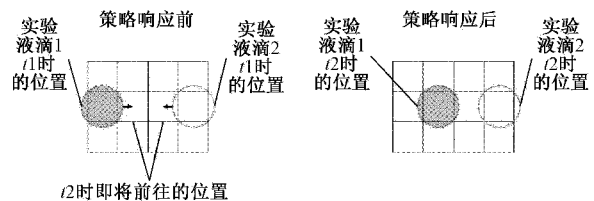


图 4 实验液滴避碰策略 1

策略 2:如果 t_2 时实验液滴 1 即将前往的位置和 t_1 时实验液滴 2 的位置满足动态流体约束条件,但 t_2 时实验液滴 2 即将前往的位置和 t_1 时实验液滴 1 的位置不满足动态流体约束条件,则让实验液滴 1 在 t_2 时继续按计划路线前进,实验液滴 2 在 t_2 时原地等待,如图 5 所示。

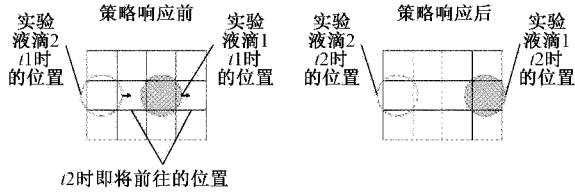


图 5 实验液滴避碰策略 2

策略 3:如果 t_2 时实验液滴 1 即将前往的位置和 t_1 时实验液滴 2 的位置不满足动态流体约束条件,且 t_2 时实验液滴 2 即将前往的位置和 t_1 时实验液滴 1 的位置也不满足动态流体约束条件,则实验液滴 1 在 t_2 时原地等待,并将实验液滴 1 周围的 9 个栅格作为临时障碍物,让实验液滴 2 重新规划路线,并按新的路线前进。其中,斜线栅格表示临时障碍物,灰色栅格表示合成反应区,如图 6 所示。

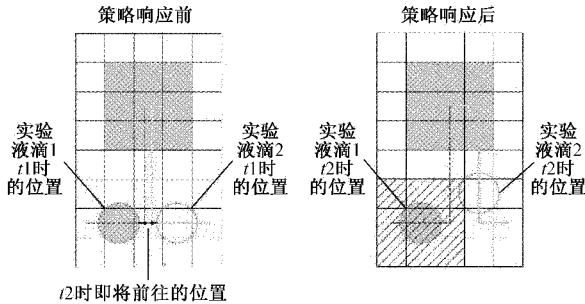


图 6 实验液滴避碰策略 3

3 基于改进 A* 算法的液滴路径规划

3.1 基本 A* 算法

A* 算法是一种建立在 Dijkstra 算法和最佳优先搜索 (best-first-search, BFS) 算法基础上的路径搜索算法^[21],其函数表现形式为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (7)$$

其中, $f(n)$ 为估价函数值, $g(n)$ 为从起始节点到节点 n 的代价, $h(n)$ 为从节点 n 到目标节点的估计代价。

A* 算法主要靠两个表来维护,分别是 open 表和 close 表。open 表存放的是已生成但未考察的节点;close 表存放的是已考察的节点。对已经存在于 close 表中的节点, A* 算法不做任何处理。对已经存在于 open 表中的节点,如果节点的代价更小,则更新节点的信息,否则不做任何操作。

以 6×6 规模大小的栅格图为例,基本 A* 算法从起始节点(2,2)到目标节点(5,5)的搜索过程如图 7 所示。其中,每个栅格的右上角标号表示当前节点被加入到 open 列表的次序;左下角标号表示从起始节点到当前节点的曼哈

顿距离,该值作为从起始节点到当前节点的代价 $g(n)$; 右下角标号表示从当前节点到目标节点的曼哈顿距离,该值作为从当前节点到目标节点的估计代价 $h(n)$; 左上角标号表示 $g(n)$ 与 $h(n)$ 的和,该值作为当前节点的估价函数值 $f(n)$; 中间的箭头指向当前节点的父节点;灰色栅格表示两个栅格之间存在已知的电极短路故障。

列	1	2	3	4	5	6
行						
1		8 ↓ 1	8 ↓ 2	8 ↓ 3	8 ↓ 4	
2	8 → 1	●	6 ← 1	6 ← 2	6 ← 3	8 ← 4
3	8 → 2	6 ↑ 1	6 ← 2	6 ← 3	6 ← 4	8 ← 5
4	8 → 3	6 ↑ 2	6 ← 3	6 ← 4	6 ← 5	
5		8 → 5	6 ↑ 4	6 ← 5	6 ← 1	8 ← 1
6			8 ↑ 5	8 ↑ 6		

图 7 基本 A* 算法搜索过程

3.2 应用于 EWOD 器件多液滴寻址的改进 A* 算法

在基于 EWOD 的 DMF 系统液滴应用中,多个液滴行进时都应该避免出现触碰。当两个液滴距离足够近时,就会触发上述的避碰策略。现阶段的 EWOD 器件尺寸普遍不高(一般在 20×20 以下),在多液滴同时运行的情况下,由于流体特性,过多的拐点会使这种避碰策略复杂化,从而大幅度降低液滴到达目标电极的时间。因此,本文在基本 A* 算法的基础上,将拐点作为估计函数值的影响因子,融合 3 种液滴避碰策略,提出了针对 EWOD 器件流体特性的改进 A* 算法。该算法可以有效消除冗余的拐点,降低触发避碰策略的几率,保证器件应用的可靠性和效率。

在 A* 算法的搜索过程中,估计函数值 $f(n)$ 起到了关键作用,各个节点的估计函数值 $f(n)$ 的大小决定了该节点是否被选择。为了消除冗余拐点,需要将拐点作为影响因子引入算法的函数表达式中,进而影响估计函数值 $f(n)$,使整个算法拥有能够对拐点进行评价的能力。而在本文提出的改进 A* 算法中,将这个影响因子作为额外的代价 $e(n)$,且 $e(n)$ 是一个确定的数值,所以与原来的 $g(n)$ 一起组成新的代价值 $g'(n)$ 。改进 A* 算法的函数表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} f(n) = g'(n) + h(n) \\ g'(n) = g(n) + e(n) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $e(n)$ 的值由节点是否为拐点以及拐点的类型而

定,具体如式(9)所示。

$$e(n) = \begin{cases} 0, & \text{下一个节点与前两个节点在同一直线上;} \\ 1, & \text{下一个节点与目标节点处于同一行或同一列;} \\ 2, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

以 6×6 规模大小的栅格图为例,改进 A* 算法从起始节点(2,2)到目标节点(5,5)的搜索过程如图 8 所示。其中,每个栅格的右上角标号表示当前节点被加入到 open 列表的次序;左下角标号表示从起始节点到当前节点的曼哈顿距离与额外代价值的和,该计算值作为从起始节点到当前节点的代价 $g'(n)$; 右下角标号表示从当前节点到目标节点的曼哈顿距离,该值作为从当前节点到目标节点的估计代价 $h(n)$; 左上角标号表示 $g'(n)$ 与 $h(n)$ 的和,该值作为当前节点的估价函数值 $f(n)$; 中间的箭头指向当前节点的父节点;灰色栅格表示两个栅格之间存在已知的电极短路故障。

列 行	1	2	3	4	5	6
1		8 ↓ 1	10 ↓ 4	10 ↓ 5	9 ↓ 5	
2	8 ⇒ 1	●	6 ← 1	6 ← 2	6 ← 3	8 ← 4
3	10 ⇒ 4	6 ↑ 1	8 ← 4	8 ↑ 5	7 ↑ 5	11 ⇒ 8
4	10 ⇒ 5	6 ↑ 2	8 ← 5	11 ⇒ 9	7 ↑ 6	11 ⇒ 9
5					● ↑ 1	
6						

图 8 改进 A* 算法搜索过程

图 9 是基于改进 A* 的液滴寻址算法流程,该算法完整的搜索过程如下。

步骤 1:将起始节点(2,2)放入 open 表中。

步骤 2:从 open 表中移除起始节点(2,2),将其放入 close 表中,并将该节点设置当前节点,按上下左右的顺序依次访问相邻的节点,计算这些相邻节点的代价,按照估价函数值 $f(n)$ 从小到大的顺序将这些相邻节点放入 open 表中合适的位置,同时将当前节点作为这些相邻节点的父节点。此时,open 表中的内容为(3,2)(2,3)(1,2)(2,1)。

步骤 3:将 open 表中估价函数值 $f(n)$ 最小的(即 open 表中的第 1 个)节点(3,2)移除,将其放入 close 表中,并将该节点设置为当前节点,按上下左右的顺序依次访问相邻的节点。由于当前节点(3,2)上方的相邻节点(2,2)已经在

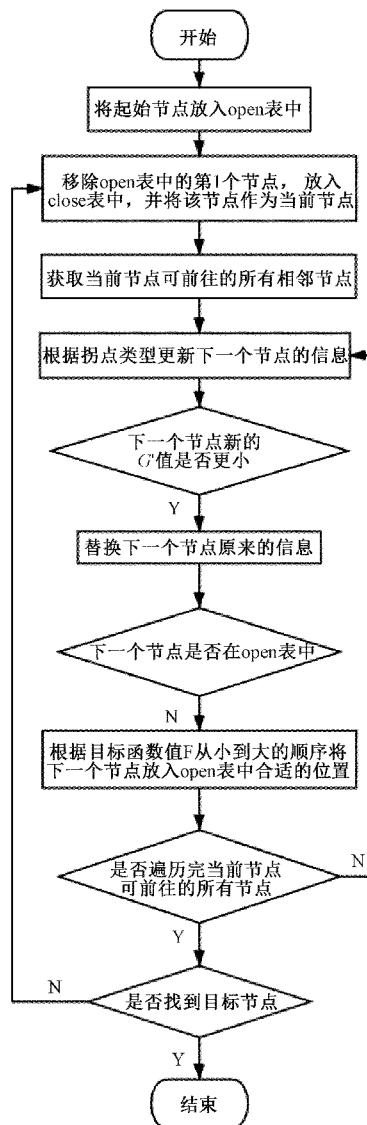


图 9 基于改进 A* 的液滴寻址算法流程

close 表中,因此(2,2)这个节点不被考虑。计算这些相邻节点的代价,按照估价函数值 $f(n)$ 从小到大的顺序将这些相邻节点放入 open 表中合适的位置,同时将当前节点作为这些相邻节点的父节点。此时,open 表中的内容为(2,3)(4,2)(1,2)(2,1)(3,3)(3,1)。

步骤 4~8:类似的重复步骤 3 的操作。

步骤 9:发现目标节点,算法结束。

4 实验与讨论

4.1 单液滴的路径规划

针对本文提出的基于改进 A* 的数字微流控系统液滴路径规划算法,在相同的实验应用要求(相同的起始电极和目的电极)和环境条件(存在相同的电极故障节点)下,分别用基本 A* 算法和所提出的改进 A* 算法对 EWOD 器件上的单个液滴进行路径规划,从而分析对比两种算法的差异。

两者的仿真实验结果如图 10 所示。图中的虚线为液滴的运动路径,黑色粗实线为已知的故障驱动电极。

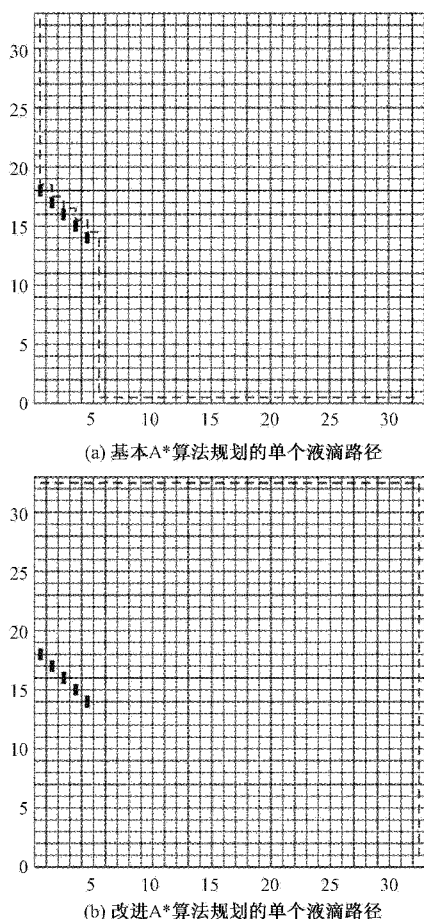


图 10 存在已知故障电极情况下,基本 A* 算法和改进 A* 算法的路径规划仿真实验

从实验结果可以看出,由于存在已知的故障驱动电极,为了避免液滴“卡住”在这些电极上,基于 A* 算法规划的液滴路径比较曲折,其中包含过多的冗余拐点,而基于改进 A* 算法给出的液滴路径中无冗余的拐点出现,表现得更加平滑,在现实的 EWOD 器件液滴应用实验中,这样的路径有利于液滴的长距离连续运动。表 1 所示为两种算法之间的对比结果,可以看出本文提出的改进 A* 算法在 DMF 系统液滴路径规划上的耗费时间远低于基本 A* 算法(降低了约 23 s)。而且拐点数只有 1,有利于复杂环境的液滴输运应用。

表 1 两种算法结果的比较

算法	路径长度	拐点数	耗费时间/s
基本 A* 算法	64.0	11	24.471
改进 A* 算法	64.0	1	0.295

4.2 多液滴路径规划与调度

在实际的 EWOD 器件液滴连续输运应用过程中,除了存在已知的故障电极节点外,还可能会存在未知的故障电

极节点。只有液滴经过这些未知的故障电极节点时,由于液滴无法通过这些故障节点,这些未知的故障节点才能被控制系统所捕获。在下一次路径规划时,这些未知节点将被标记为已知的故障电极节点纳入液滴新的路径规划中。

因此本文结合已知条件和未知条件对 EWOD 器件中多液滴路径规划和调度建立仿真实验,如图 11 所示,圆点代表本次实验液滴(共 2 个,1 个实心,1 个空心),虚线表示实验启动时系统给实验液滴规划的初始路径,实线表示实验液滴当前阶段实际的行走路线,黑色粗实线表示两个节点之间存在已知电极短路故障(液滴无法通过这两个节点电极),星型符号区域表示两个节点之间存在未知电极短路故障。 3×3 的正方形阴影表示两个实验液滴的合成反应区(目的区)。图 11(a)所示为两个实验液滴的初始位置。当时时间戳 $T=16$ 时,两个实验液滴所处位置如图 11(b)所示,系统根据避碰策略,为避免液滴在下一个时间戳发生碰撞(非合成反应区),系统触发了策略 3。在时间戳 $T=17$ 时,左侧的实验液滴保持原地等待,右侧的实验液滴重新规划路线并按新路线向前移动,如图 11(c)所示。其中图中的点划线表示系统根据当前 EWOD 器件液滴状态重新规划的路线。在下一个时刻,系统判断到两个实验液滴所处位置条件触发了避碰策略 2,于是,左侧的实验液滴在时间戳 $T=18$ 时依旧停留在原地,右侧的实验液滴继续前行,如图 11(d)所示。

在时间戳 $T=22$ 时,左侧的实验液滴来到了图 11(e)中的位置,由于当前节点位置和下一时间戳欲前往的节点位置之间存在未知电极短路故障,系统无法驱动液滴前进,导致左侧实验液滴在时间戳 $T=23$ 时,仍处于时间戳 $T=22$ 时的位置。此时,系统检测到液滴非正常停留,判断出液滴遇到未知的电极故障,因此为左侧的实验液滴重新规划路线和调度,并将该处故障标记为已知电极短路故障(星型符号区域变成黑色粗实线),如图 11(f)所示。在时间戳 $T=24$ 时,左侧的实验液滴沿着新路线前进,如图 11(g)所示。最终,两个实验液滴在时间戳 $T=30$ 时运动到合成反应区的中心点位置进行混合,如图 11(h)所示。

从本次多液滴合成的仿真实验过程可以看出,在实验启动时,系统为了避开已知的电极故障节点,规划了两条在运行过程中无已知故障电极的液滴初始路径。但在液滴运动过程中,触发了相应的碰撞策略和检测到未知的电极故障节点,系统重新规划了液滴新的寻址路径和调度的策略。实验结果证明,本文提出的液滴寻址算法在不影响实验液滴到达目标电极的运动时间基础上,能够有效消除路径中冗余的拐点,降低寻址路径上所使用的电极数量。同时也证明了研究改进的液滴寻址算法在复杂情况下(存在已知和未知电极故障)的 EWOD 器件上的适应性和可靠性。此外,随着 EWOD 器件尺寸的增大和运行时长的增加,本文算法对多液滴寻址和调度的优化程度也越来越明显。

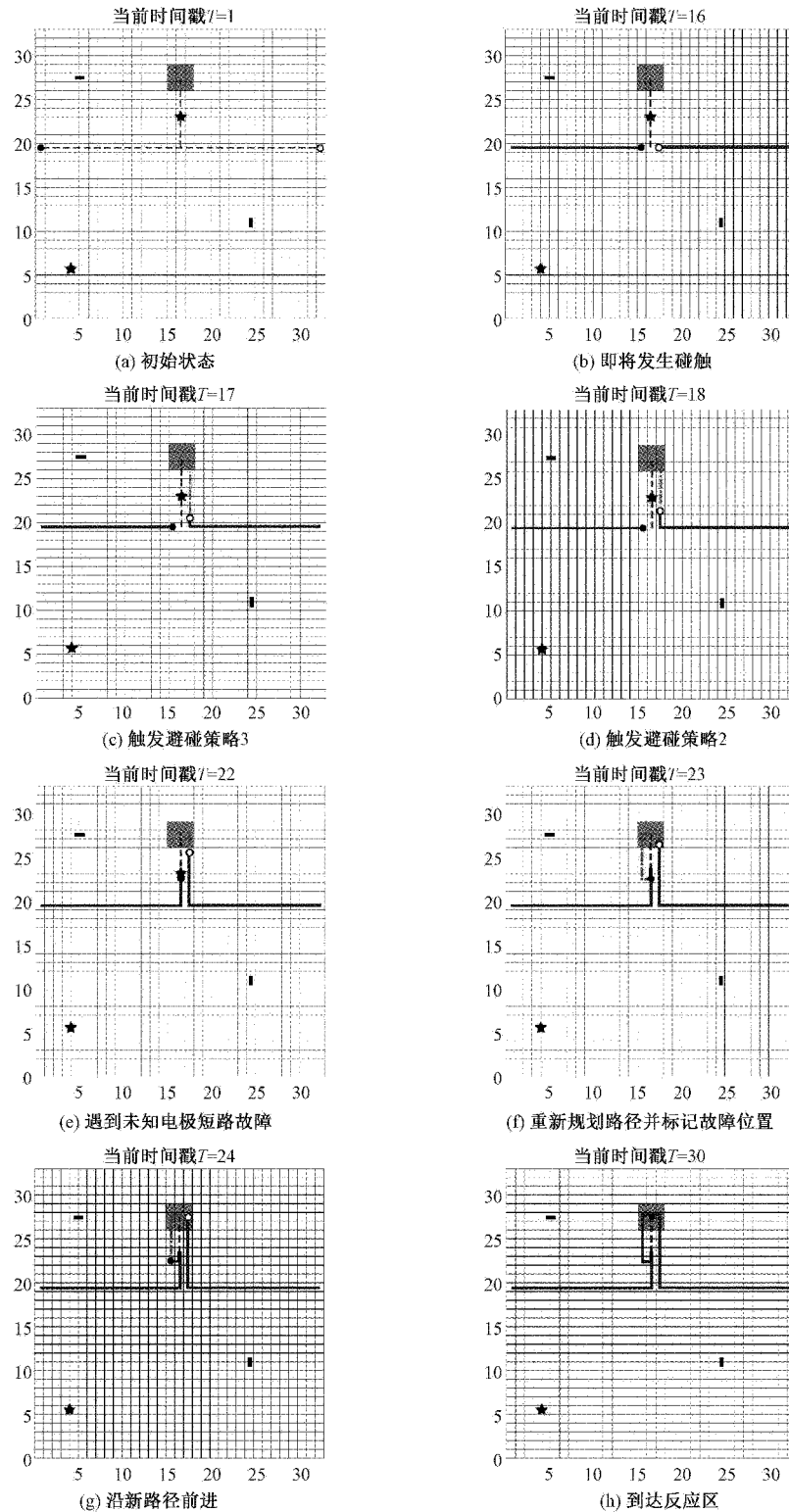


图 11 存在已知和未知电极故障情况下,EWOD 器件多液滴合成的仿真实验

5 结 论

针对 EWOD 器件尺寸与复杂度的增加以及驱动电极故障难以避免的现状,为了提高基于 EWOD 的 DMF 系统

各类液滴应用实验的可靠性和效率,本文在基本 A^* 算法的基础上,根据数字微流控系统液滴之间的流体约束条件,融合了 3 种避障策略到寻址算法中,并将拐点作为影响因子引入到估计函数中,提出了基于改进 A^* 的数字微

流控系统液滴路径规划算法。通过对比实验可以看出,在复杂条件下基于改进 A* 算法的液滴寻址性能远高于基本 A* 算法,且规划出的路径中不存在冗余拐点,能够降低触发液滴碰撞策略的几率,从而减少液滴到达目标电极的运动时间,降低寻址路径上所使用的电极数量,有利于提高 EWOD 器件电极的可靠性和寿命。进一步,多液滴合成的仿真实验结果证明,本文所研究的液滴路径规划算法在存在已知和未知故障电极的情况下也能够取得较好的运行效果,具备良好的稳定性。该算法目前只适用于正方形驱动电极的 EWOD 器件,未来可以针对多边形驱动电极进行算法的研究改进。

参考文献

- [1] MANZ A, SIMONE G, O'CONNOR J S, et al. Microfluidics and lab-on-a-chip[M]. America: Royal Society of Chemistry, 2020.
- [2] 贾延凯. 基于新型 3D 电极的介电泳微粒分离微流控芯片研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [3] 申峰, 李易, 刘赵森, 等. 基于微流控技术的微液滴融合研究进展[J]. 分析化学, 2015, 43(12):1942-1954.
- [4] 吴子牧. 光检测数字微流控芯片的高集成驱动电路设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3):112-115.
- [5] XUAN X, KANG Y, SUN J. Microfluidics, nanofluidics, and lab-on-a-chip in Asia 2019 [J]. ELECTROPHORESIS, 2020, 41:10-11.
- [6] 牛嘉琦, 王伟强. 一种基于数字微流控技术的 PCR 微芯片[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2):69-72, 99.
- [7] NG A H C, MISAN L, KIHWAN C, et al. Digital microfluidic platform for the detection of rubella infection and immunity: A proof of concept [J]. Clinical Chemistry, 2015(2):420-429.
- [8] 林柏全, 秦锋, 贾振宇, 等. 基于面板工艺的数字化微流控芯片[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3):159-166.
- [9] GUAN Y, LI B, ZHU M, et al. Deformation, speed, and stability of droplet motion in closed electrowetting-based digital microfluidics [J]. Physics of Fluids, 2019, 31(6):55-60.
- [10] MUN N, JAGATH N, SEUNG Y, et al. Droplet velocity in an electrowetting on dielectric digital microfluidic device[J]. Micromachines, 2016, 7(4): 71-78.
- [11] 杨敬松, 左春桢, 徐春风, 等. 数字微流控生物芯片的架构级综合算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5):1083-1088.
- [12] 杨敬松, 姚振静, 宋燕星, 等. 数字微流控生物芯片布局的拟人遗传组合算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(31):16-20.
- [13] 王鹤. 应用于数字微流控生物芯片的异质液滴寻址算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(9):264-268.
- [14] CHEN Z, TENG H Y, WANG C J, et al. Droplet routing in high-level synthesis of configurable digital microfluidic biochips based on microelectrode dot array architecture [J]. BioChip Journal, 2011, 5(4): 343-352.
- [15] LU G R, BHATTACHARYA B B, HO T Y, et al. Flexible droplet routing in active matrix-based digital microfluidic biochips[J]. ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems, 2018, 23(3): 46-51.
- [16] 李志刚, 吴晓松, 汪磊, 等. 用于血液病毒核酸检测的微流控 PCR 温度控制技术[J]. 电子测量技术, 2020, 43(13):152-156.
- [17] 张素丽, 李一言, 杨文娟, 等. 基于蓝牙控制的便携式数字微流控系统的研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(12):43-48.
- [18] 高贞. 基于 EWOD 的数字微流控器件研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2015.
- [19] 许川佩, 祝佳, 黄喜军. 引脚受限数字微流控芯片的多液滴并行测试研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8):255-263.
- [20] 许川佩, 刘浩, 万春霆, 等. 基于混沌粒子群算法的数字微流控生物芯片污染故障清除[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(6):46-52.
- [21] 王猛, 邢关生. 基于改进蚁群算法的机器人路径规划[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24):52-56.

作者简介

罗智杰, 博士, 讲师, 主要研究方向为电润湿器件、数字微流控系统。

E-mail:jackeylzj@163.com

尹航(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能、装备故障诊断。

E-mail:yinhangzkj@163.com