doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2023.06.009

基于自适应 VFH 算法的移动机器人避障规划 $^{\odot}$

徐天余②* 孙晓冬** 谢建良* 孟祥冬③** 何启江***

(*电子科技大学电子科学与工程学院 成都 611731) (**中国电子科技集团公司第五十八研究所 无锡 214063) (***东南大学微电子学院 南京 210096)

摘 要 向量场直方图(VFH)方法具有对传感器误差不敏感以及响应速率快等特点而 广泛应用于移动机器人的运动避障问题。该方法将各方向的障碍物信息量化为强度值, 并以设定的阈值判断可行性。而不同的阈值会造成机器人避障效果的差异,对不同任务 环境的适应性较差。本文针对传统 VFH 方法的阈值敏感性问题进行改进,提出一种自适 应阈值调整策略,通过构建阈值评价函数,结合环境信息对候选方向范围内每组阈值进行 代价分析,实时地选取适于当前运动的阈值,使机器人能够自主完成避障。为验证算法的 有效性和可靠性,设计模拟障碍物的场景并进行对比实验。结果表明,采用改进自适应阈 值策略的 VFH 算法,能够改善传统算法对阈值敏感的问题,能保证机器人可以在狭窄通 道中以较短的无碰撞路径到达目标位置。

关键词 路径规划; 自主避障; 向量场直方图(VFH); 自适应阈值

0 引言

人工智能和控制技术等领域的飞速发展,使得 具备自主规划能力的移动机器人广泛应用于众多领 域。移动机器人的自主导航主要包括定位、路径规 划和避障等任务。机器人路径规划可以根据对环境 信息的掌握程度划分为环境信息完全已知的全局路 径规划和环境信息部分未知(或完全未知)的局部 路径规划^[1]。全局路径规划可以求得全局最优路 径,但存在计算量较大和实时性能不佳等问题,且环 境中的未知信息会对全局路径产生极大影响,甚至 会导致机器人与障碍物发生碰撞或无法到达目标点 等情况;局部路径规划通过传感器实时感知障碍物 信息,可以实现机器人动态避障,但由于缺少全局信 息,易于陷入局部极值点,最终偏离目标方向^[2]。

为提高机器人自主避障能力,国内外研究者做

了大量研究,提出了一些经典的机器人避障方法,如 栅格法^[3]、可视图法、虚拟势场法(virtual force field, VFF)^[3]等。其中向量场直方图法(vector field histogram,VFH)是一种广泛应用的局部避障规划算法。

VFH 算法由文献[4]于 1991 年提出,算法针对 虚拟势场法的力场急剧变化引起稳定性不佳和数据 震荡等问题进行改进。VFH 算法不仅保留了 VFF 算法计算速率快的优点,并且应用两级数据减少技 术在平衡计算量的同时保留了许多细节信息,使得 机器人能够在狭窄空间内平滑转弯且不发生震荡。 然而该算法最初并未考虑移动机器人自身的尺寸和 运动学特性,机器人会出现无法执行已规划路径的 情况。针对这个问题,1998 年文献[5]提出了 VFH +算法,该算法通过隐性的构造空间将机器人的尺 寸和运动学特性纳入考虑,将直方图二值化并应用 代价函数更细致地评估候选方向。为进一步突破

① 中国博士后科学基金面上项目(2022M712976),国家自然科学青年基金(62103388)和江苏省双创博士项目(JSSCBS20211448)资助。

② 男,1997年生,硕士生;研究方向:嵌入式系统设计; E-mail: xtycozart@163.com。

③ 通信作者, E-mail: xdmeng09@163.com。 (收稿日期:2022-06-08)

VFH 算法自身局限,文献[6]于 2000 年结合启发式 搜索 A*算法提出了 VFH*算法,该算法能够预测 机器人选择某个方向后可能产生的后果,使机器人 在运动过程中更趋于目标方向。

目前 VFH 算法系列仍有以下几点局限:(1) VFH 算法对阈值等参数敏感性较大;(2) VFH 算法 作为局部避障规划算法,容易陷入局部极值点;(3) VFH 算法较为依赖距离传感器,易受环境因素的制 约^[7]。针对上述问题,国内外许多研究者对 VFH 系 列算法的阈值敏感性、直方图构建、转弯策略等问题 进一步提出了改进算法。国外方面,文献[8]提出 了一种共享控制方法,将来自 VFH + 避障导航模块 的命令与操作员通过操纵台提供的遥操作命令相结 合,易于集成自治系统和加强应对动态环境的能力。 文献[9]提出了结合 TDT(time dependent tree)方法 的改进 VFH*算法,通过创建前瞻树的方法提高动 态环境下的避障能力。国内方面,文献[10]提出了 结合离线规划双向 A * 算法和在线避障 VFH 算法 的规划方法,不影响全局路径最优性的同时能有效 避开突发威胁。文献[11] 充分考量了机器人运动 学模型和转弯策略,保证移动状态点的可执行性。

在 VFH 原算法中,阈值设定和谷底宽度等参数 并没有量化定义。因此,本文针对 VFH 算法的阈值 等参数敏感性问题,提出一种改进型避障算法,采用 自适应阈值策略^[12]和新的谷底计算方式,运用阈值 代价函数,对候选方向进一步评估,选取最适用于机 器人当前环境的阈值并获得目标航向。之后对改进 算法在仿真障碍物环境中进行验证并分析对比规划 结果。实验表明,采用该方法能够有效改善阈值等 参数对 VFH 算法避障效果的差异化影响,使机器人 能以较短的平滑路径避开障碍物并到达目标,同时 兼顾实时性,提高对动态环境的适应性。

1 避障算法设计

1.1 VFH 算法原理

VFH 算法的基本原理是建立以移动机器人为 中心的极坐标系,将所有栅格的障碍物对机器人运 动方向的影响通过直方图量化为各个角度上的极线 障碍物强度值(polar obstacle density, POD),在障碍 - 644 -- 物强度值低于某个确定阈值的角度范围内确定机器 人移动的候选方向^[13],VFH 算法流程如图 1 所示。



算法的核心机理是 2 个阶段的数据缩减作 用^[14],具体实现步骤如下。

(1)以机器人的中心位置为坐标原点,将地图转换为各单元格,保留激光雷达前方一定角度范围扫描区域(记为 Block)的数据,按每1°一个区间(可根据雷达分辨率调整)将区域划分为扇区,按逆时针方向进行编号,第 k 个扇区用 Z_k 表示。

(2)计算各扇区中单元格(*i*, *j*)的障碍物强度 值 *m_{i,j}*及其总和 *H_k*,并以此构建向量场直方图,障 碍物强度值的计算公式为

$$m_{i,j} = c_{i,j}^2 (a - bd_{i,j}) \tag{1}$$

$$H_k = \sum_{i,j} m_{i,j} \tag{2}$$

式中, $c_{i,j}$ 称为单元格 (i, j) 的信度值(certainty value, CV),表示该单元格内存在障碍物的概率; $d_{i,j}$ 表示该单元格 (i, j) 到机器人中心点的距离; $a \downarrow b$ 为常数,且满足如下关系 $a - bd_{max} = 0; d_{max}$ 表示单元格距离机器人中心点的最远距离,该关系式令机器人的运动空间内各顶点的 m 值为 0,即机器人在即将离开运动空间时不受该区域障碍物的影响^[15]。

在实际环境中运用时,工作空间的范围需比实际边 界更远,以免机器人与实际边界发生碰撞。

(3)设定阈值对应的障碍物强度值为 $M_{\rm th}$,将每 个扇区的 H_k 与阈值进行对比,合并满足 $H_k < M_{\rm th}$ 的 相邻扇区(即为候选谷)。当存在超过 $S_{\rm max}$ 个扇区 连续相邻(一般设置 $S_{\rm max}$ = 18)时,定义为"宽谷",反 之则定义为"窄谷"^[16]。VFH 算法将栅格地图中障 碍物分布情况量化计算为直方图数值的原理模型, 如图 2 所示。



图 3 为机器人通过障碍物时的可通行扇区示意 图。机器人面向由 2 个障碍物相夹所形成的通道, 移动机器人通过障碍物时存在可通行扇区,记为 $[Z_1, Z_2]; R$ 即为障碍物强度阈值 M_{th} 对应的阈值距 离 $d_{th}; d_{z1}, d_{z2}$ 分别表示障碍物与扇区 $[Z_1, Z_2]$ 的接 触点到机器人中心点的最小距离。最优前进方向在 图中阴影扇区内,需要通过代价函数进行评估后确 定。



图 3 面向障碍物时的可通行扇区

在步骤(3)得到的宽谷中,取中间扇区作为机器人移动的候选方向。对多个候选方向构建代价函数进行筛选,选择代价最小的候选方向作为下一次前进方向,代价函数^[17]为

$$g(c) = \mu_1 \Delta(c, k_t) + \mu_2 \Delta(c, k_c) + \mu_3 \Delta(c, k_{c-1})$$
(3)

式中,第1项表示候选方向 c 与目标方向 k_i 间的绝 对角度差,第2项为候选方向与当前运动方向 k_c 的 角度差,第3项为候选方向与上一次运动方向 k_{c-1} 的角度差, μ_1 , μ_2 , μ_3 均为常数且满足 $\mu_1 > \mu_2 + \mu_3$ 。

1.2 VFH 算法的缺陷

从1.1小节中可以看出,对于 VFH 算法,可通 行扇区直方图是引导机器人选择最优规划方向的基 准,其根据阈值 *M*_{th} 的大小差异生成的直方图形状 也大不相同,因此合适的阈值策略对 VFH 算法至关 重要。

以算法某一时刻构建的扇区直方图为例,设置 不同阈值 *M*_{th} 对应直方图中的扇区宽度和数量会不 一致。假设机器人的目标方向为第 90 号扇区对应 角度,如图 4 所示。



当距离阈值 $d_{th} = 3$ 时对应的 M_{th} 为 3700;而当 $d_{th} = 1$ 时 M_{th} 则为 1800。将图 5 对比可得,当 $M_{th} =$ 3700时的可通行扇区数量和宽度明显多于 $M_{th} =$ 1800时。当 $M_{th} = 3700$ 时,直方图中的宽谷扇区包 括 24~172 号扇区、239~261 号扇区和 265~300 号 扇区,90 号扇区周围均为可通行候选方向,机器人 在下一时刻将选择 100 号扇区对应角度向前移动。 而实际上 77~91 号扇区的障碍物强度值已开始增 大,表示此方向上较远处存在障碍物,若此时机器人 继续沿前一时刻方向运动,机器人会有与障碍物发

生碰撞的风险;反之当 M_{th} = 1800 时,直方图中的宽 谷扇区则比较狭窄且稀少,虽然90号扇区的障碍物 强度值小于阈值,但存在稍远障碍物的77~91号扇 区已经被确定为不可通行扇区.90号扇区周围并没 有形成宽谷,机器人在下一时刻将转变方向,选择 42 号扇区作为避开障碍物的运动方向。

以图 5 为例, VFH 算法设置不同大小的阈值会 使生成的直方图中可通行扇区数量和分布情况存在 较大差异,对机器人的避障规划功能产生下面2种 不同的影响。





(1)设置较大阈值 M_{th}

较大阈值会使可通行扇区增多,机器人前进有 更多候选方向,虽然有利于机器人迅速找到更接近 目标的方向,但会使其对障碍物不敏感,若运动速度 较快则极有可能发生碰撞。

以原算法仿真^[18]为例,地图模型为50×50维 的二值地图,起点为(1,1),终点为(50,50)。算法 的各参数设置如下:阈值 M_{th} 设为 200;障碍物强度 值 H_k 记录为 Δ density; 代价函数式(3)的各项权 重设为 $\mu_1 = 6$, $\mu_2 = 2$, $\mu_3 = 2$ 。图6为选取某一时 刻机器人的仿真避障结果路径图,中间带框路径为 — 646 —

避障路径,分散栅格则为障碍物。



在路径仿真图中,选取某一时刻机器人的离散 位置坐标为(35,36),最优目标方向角度约为43°。 由于选取的阈值过大,生成的直方图中会有大段宽 而连续的宽谷区间,机器人的前进方向会更偏向于 维持不变,从而容易忽略前方较远处的障碍物。而 在下一时刻位置坐标(36,37)处,机器人虽已发现 前方障碍物(前进扇区内参数 Δ density 急剧增 大),但在较高速情况下难以及时做出避障动作,最 终发生碰撞。

(2)设置较小阈值 M_{th}

较小阈值使可通行扇区更少,使机器人对障碍 物更敏感,能提前发现前方的障碍物,及时调整运动 轨迹。然而,这种情况下狭窄且分散的可通行扇区 会使机器人易将一些实际可行通道当作不可行通道 排除,导致其丧失通过相对狭窄的通道的能力。

综上所述,VFH 算法中阈值设定值的不同会对 机器人的避障规划产生不同的影响。在实际应用 中,阈值通常根据经验人为设置,对于障碍物少的较 空旷环境可以设置一个较大的阈值,而在障碍物密 集环境中则需要一个较小的阈值,但这种方式面对 机器人所处环境或运动状态的变化则不再适用。

1.3 候选谷宽度及可通行方向分析

VFH 的原始算法没有将机器人尺寸参数和运 动特性计入考虑,对谷区宽度也没有精确量化定义。 因此本文针对这2点问题进行研究,对机器人物理 参数、谷区宽度提出一种新的量化处理方式,以分析

其可通行性。

由1.1节中图3可以得出可通行扇区内障碍物 到机器人中心的最小距离和扇区跨越角度,公式如 下:

$$d_{\min} = \min(d_{z1}, d_{z2})$$
 (4)

$$\theta = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \times (d_{z1} - d_{z2}) \tag{5}$$

式中, α 为角度分辨率(本文中取值为1°), d_{z1} 、 d_{z2} 分别是障碍物与扇区 $[Z_1, Z_2]$ 的 2 个交点到机器 人中心点的最小距离。由式(4)、(5)可以得出机器 人在扇区 $[Z_1, Z_2]$ 中的可通行距离 $d \approx d_{min}$, 将这 个距离与机器人底盘的宽度 W_b (需略大于实际值) 比较即可判断机器人是否在该扇区内可通行。

若 $W_{\rm b} \leq d \leq 2W_{\rm b}$,则机器人在 $[Z_1, Z_2]$ 中的可通行方向 θ_t 可通过式(6)求解。

$$\theta_{\iota} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \times \frac{(Z_1 + Z_2) rad}{2}$$
(6)

若 $d > 2W_{b}$,则机器人在 $[Z_1, Z_2]$ 中可以求得 2 个可通行方向,计算公式为

$$\theta_{\iota_1} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \times Z_1(\text{rad}) - \arcsin\left(\frac{W_{\text{b}}}{d_{z_1}}\right)$$
(7)

$$\theta_{_{l2}} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \times Z_2(\text{rad}) + \arcsin\left(\frac{W_{_{b}}}{d_{_{s2}}}\right)$$
(8)

在通过上述方式求解可通行方向的步骤中,会 面临一类极端情况,如图7所示。



图 7 可通行方向局限情况

从图中可看出,可通行距离 *d* < *W*_b, 但障碍物 *A*、*B*间的通道宽度 *D* > *W*_b。在这种情况下,算法会 认为前方窄道不可通行,无法找到可通行方向,可能 会使机器人进入下方障碍物夹角的死区中。实际上 机器人所在位置只需向上移动即可找到一条可以通 过该窄谷的路径。

1.4 阈值选取策略分析

针对 1.2 节提出的 VFH 算法阈值敏感性问题, 本文考虑机器人的物理参数、运动特性和目标环境, 提出了自适应阈值调整策略。

为使机器人在运动过程中能合理选用阈值,需 要确定阈值的调整范围,其受机器人的物理参数、运 动特性影响。

1.4.1 物理参数

 1.3节说明了机器人底盘宽度对算法的影响, 此外还要考虑传感器的性能。机器人搭载的激光雷 达具有一定的扫描范围,可设为(L_{min}, L_{max}),则阈 值必须在这个对应区间内调整。

1.4.2 运动特性

实际运动过程中,机器人从发现障碍物到减速 避障需要一定制动距离。设机器人运动线速度为 v,减速时最大加速度为 a,则其从减速到停止的制 动距离 S_b 为

$$S_{\rm b} = \frac{v^2}{2a} \tag{9}$$

通常 $S_{\rm b} > L_{\rm min}$, 由此可以得到

 $H[\lambda(S_{b} + R_{s})] < M_{th} < H(L_{max})$ (10) 式中, R_{s} 是移动机器人的安全半径, λ 为安全系数 且是大于1的常数, H(x) 为距离-障碍物强度值函 数。

自适应阈值调整算法的结构如算法1所示。

算法1 自适应阈值调整算法				
输入:Threshold range (M_{thmin} , M_{thmax}); target _ pos (x_{t} ,				
(y_{t}) ; current _ pos (x_{e}, y_{e}) ; density H_{t} ; direction k ;				
cost function $h(M_{\rm th}, k_{\rm d})$.				
输出: Vector histogram(Sector-density); target direction.				
Progress : set Initial $M_{\rm th}$				
1. if $H_t > M_{\text{thmax}}$				
2. $M_{\rm th} = M_{\rm thmin}$				
3. end if				
4. if $M_{\text{thmin}} < H_{\iota} < M_{\text{thmax}}$				
5. $M_{\rm th} = H_t$				

6. end if

7. If
$$\Pi_t < M_{\text{thmin}}$$

$$M_{\rm th} = M_{\rm thm}$$

10. return M_{th}

Progress: calculate target direction k_i

1. repeat

2. direction _ num \leftarrow seek all _ direction threshold $(M_{\rm th})$

3. if direction $_$ num > 0

- 4. then $k_d \leftarrow$ appropriate _ direction (direction _ num)
- 5. $\operatorname{cost} \leftarrow h(M_{\operatorname{th}}, k_{\operatorname{d}})$
- 6. $(M_{\rm th}, k_{\rm d}, \text{cost}) \leftarrow Set$
- 7. end if

8. $M_{\rm th} = M_{\rm th} + \text{delta} (M_{\rm th})$

- 9. until $M_{\rm th} > M_{\rm thmax}$
- 10. if Set. Step > 1
- 11. $i \leftarrow$ minimum cost number in Set
- 12. $k_i \leftarrow Set[i], k_d$
- 13. end if
- 14. return k_i
- 15. send k_i to controller

(1)设置阈值的初始值:根据式(10)的对应关 系确定符合条件的阈值最大值和最小值,分别设置 为 *M*_{thmax} 和 *M*_{thmin}。

设移动机器人当前坐标为 (x_e, y_e) , 目标点坐标为 (x_i, y_i) , 此时则有:

$$H_t = \sum c_t^2 (a - bd_t) \tag{11}$$

式中, *H*_{*i*} 表示当前点到目标点之间的总障碍物强度 值, *c*_{*i*} 表示目标点栅格的信度值; *d*_{*i*} 表示目标点与 机器人当前点间的距离。

(2)对(M_{thmin} , M_{th})区间内的阈值按一确定步 长 ΔM_{th} 进行遍历,若某个阈值下存在可行的候选方 向,则使用代价函数式(3)求解代价最小的方向,记 为 k_d ,之后将此方向向量及对应的 M_{th} 代入式(12) 计算代价值,新的代价函数如下:

 $h(M_{\rm th}, k_d) = \omega H(M_{\rm th} - M_{\rm thmin}) + \Delta(k_d - k_t)$ (12)

式中, $\omega(M_{th} - M_{thmin})$ 为阈值代价项, ω 为阈值权重 系数。根据 1.2 节的分析,阈值过大的情况下机器 人会对障碍物不敏感,容易与障碍物发生碰撞,所以 在代价增大的情况下机器人会选择更小阈值得出更 小代价的运动方向前进。 ω 取值与机器人当前的运 动状态相关,运动速度越快则 ω 的值越大,阈值代 价项也会随之增大,此时机器人的运动方向选择相 比于向目标点前进,会更侧重于避开障碍物的安全 性。 $\Delta(k_{d} - k_{t})$ 为方向代价项,取决于机器人当前可行方向 k_{d} 与目标方向 k_{t} 的向量差,该代价项越小表示可行方向越接近目标方向。

(3)将各计算所得的代价值及对应的阈值 M_{th} 和方向 k_a 参数统计并存入集合中,选取集合内代价 值最小一组的运动方向为最优前进方向;若第(2) 步中满足条件候选方向的阈值数为0,则表示此时 机器人周围不存在可通行方向,应当立即停止前进。

综上所述,这个自适应阈值调整策略的核心原 理即对阈值区间进行遍历,使用附加的代价函数对 每个阈值对应的候选方向集合更加细致地评估其可 行性,提高规划方向与路径的可靠性。

2 实验结果及分析

为了验证本文算法的有效性和可靠性,在模拟 的障碍物环境中进行实验。移动机器人的物理参数 与 VFH 算法的各项关键参数设置如表 1。

表1 物理参数和算法参数设置

参数符号	数值	表征说明			
N	360 °	雷达扫描角度			
a	1 °	角分辨率			
L	0.04~6m 雷达扫描范围				
$W_{\rm a}/W_{\rm b}$	0.4 m/0.3 m 机器人长/宽				
$R_{ m s}$	0.28 m	机器人安全半径		0.28 m 机器人安全半径	
$S_{ m b}$	0.06 125 m	机器人制动距离			
n	300	扇区数量			
cv	(0,16)	信度值范围, ±2 增减			
a, b, d_{\max}	30, 2, 15	算法常数项			
$R(M_{\rm th})$	(1400, 3600)	阈值范围			
$\Delta M_{ m th}$	100	阈值遍历步长			
ω	(5e-4,1e-2)	阈值权重系数			

在模拟的 12 m×9 m 障碍物环境中,机器人运 动起点设置为(0,0),目标点为(12,4),起点与目 标点之间存在多个障碍物,且被一段跨度较长的隔 墙阻挡。采用自适应阈值策略时,为使移动机器人 规划路径尽可能平滑,平衡了障碍物及目标点对机 器人的作用。图 8、10、11 分别是采用自适应阈值调 整策略、设置阈值为最小值、较大值情况下的机器人

— 648 —

避障路径结果仿真。

对比分析避障路径结果,图9为采用自适应阈 值策略时,运动过程中的阈值和前进方向随时间变 化曲线。从图8可以看出,机器人整体路径比较平 滑,机器人移动的目标方向角度为18.44°,在开始 移动时机器人即处于目标方向上,此时阈值最大;第 8s左右障碍物h和f进入感知范围后,阈值略微减 小,而阈值代价项增大,使前进方向小幅向避开障碍 物方向上偏移;第17s阈值迅速减小至1600后缓慢 增加,以迅速绕过阻挡目标点的隔墙;在通过存在障 碍物b与隔墙后,此时机器人前进方向偏离目标航 向较远,且附近障碍物较少,阈值迅速提升,使机器 人迅速找到目标方向,从上方绕过障碍物d、e后成 功到达目标点。



图 10 是算法阈值设为最小值 1400 的避障结果,此时对应的阈值距离为 0.78 m。从图中可以明显 看出,机器人在阈值最小的情况下并未成功到达目标 点,而是最终在障碍物 b、f 和隔墙包围形成的狭窄通

道中停止前进。该通道最窄通行距离约为0.94 m, 大于机器人的尺寸,实际机器人是可以通过的,但由 于通行距离小于两倍阈值距离,故机器人运动至此 位置时算法判断机器人周围不存在可行通道,最终 停止运动。



图11是算法阈值分别设为中间值2500和最大





值 3600 的避障结果,对应阈值距离分别为 0.60 m 和 0.28 m。由于算法阈值较大且为固定值,机器人 在转角处转向非常突然,致使规划的路径很不平滑, 尤其是在通过隔墙与障碍物 d、e 时,机器人与障碍 物距离过近存在碰撞风险,且选择从下方绕行通过 更增加了路径长度和偏离目标点的可能性。

采用不同阈值策略下仿真避障结果的路径点和 规划时间如表2所示,其中,路径点的数量即与路径 长度成正比关系。

指标	自适应	最小阈值	中间阈值	最大阈值
路径点	83	—	99	95
路径长度/m	16.1	—	17.64	16.98
规划时间/s	47.71	27.08	50.48	48.30

表 2 各阈值策略规划指标对比表

注:"一"表示未抵达目标点

上述对比结果表明,采用本文提出的自适应阈 值调整策略可使算法根据周边环境的不同调整至适 合当前情况的阈值。在此策略下机器人能够较为灵 活且安全地避开障碍物,同时兼顾其对目标点的导 向性以及通过狭窄通道的能力,在一定程度上避免 了机器人时常作偏离目标点运动或进入死区徘徊的 情况,能够以短且平滑的路径最终抵达目标点。而 对比规划时间,采用自适应阈值策略与固定阈值的 差距并不大,以单个路径点的平均时间考虑甚至自 适应阈值的时间略长,这是由于算法加了一层对代 价的计算遍历过程而难以避免的。

3 结论

针对 VFH 算法存在的阈值敏感性问题,本文对 传统算法进行改进,分析了算法阈值和移动机器人 自身参数、目标环境对机器人避障能力的影响,提出 了一种自适应阈值调整策略。在距离前方障碍物较 远时,较大阈值可以使机器人更早地发现远处的可 行通道或障碍物,侧重于目标方向的可通行性,尽可 能缩短路径长度;当遇到近距离障碍物时,较小阈值 使机器人能够感知近处的障碍物信息,提高其对周 围障碍物的敏感性,避免与障碍物发生碰撞。自适 应阈值调整策略根据不同因素调节阈值大小,使机器人能够较为灵活地避开障碍物,同时兼顾其对目标方向的导向性以及通过窄道的能力。

通过在多障碍物的负载模拟地图环境下的对比 实验,对自适应阈值调整策略与设置3种固定阈值 的避障路径结果进行分析比较。结果表明,在不同 环境中使用自适应阈值选取策略,机器人能够有效 解决改善VFH 算法的阈值敏感性问题,最终能以较 短的无碰撞平滑路径顺利到达目标点。

在进一步研究中,由于本文自适应阈值调整策略的机理是对合适区间内的阈值按一定步长逐个遍历,多一层代价评估会增加算法的响应和决策时间,在机器人运动速率极快或激光雷达更新数据较慢的情况下不利于算法的实时性能,因此在实际情况中可以适当增大遍历步长以改善算法的实时性。另外,在VFH算法中机器人可选择的前进方向可以是四周360°范围内的任一方向,这会增加机器人路径的不确定性,最终形成的轨迹可能极不平滑。因此可以设定一个模糊区域,若当前求得的前进方向与上一时刻的前进方向差距较小则不更新方向,或通过全局规划方式进一步限制机器人可选的运动方向。

参考文献

- [1] CHEN W Q, WANG N, LIU X F, et al. VFH based local path planning for mobile robot [C] // 2019 2nd China Symposium on Cognitive Computing and Hybrid Intelligence(CCHI). Xi'an: IEEE, 2019: 18-23.
- [2] ZHANG Y F, WANG G. An improved RGB-D VFH + obstacle avoidance algorithm with sensor blindness assumptions [C] // 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). Shanghai: IEEE, 2017: 408-414.
- [3] DONG X X, WANG M S, KANG C, et al. Improved auto-regulation VFH algorithm for obstacle avoidance of unmanned vehicles [C] // 2021 China Automation Congress (CAC). Beijing: IEEE, 2021: 6467-6472.
- [4] BORENSTEIN J, KOREN Y. The vector field histogram fast obstacle avoidance for mobile robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 278-288.
- [5] UIRICH I, BORENSTEIN J. VFH +: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots [C] // 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven: IEEE, 1998: 1572-1577.
- [6] UIRICH I, BORENSTEIN J. VFH *: local obstacle

avoidance with look-ahead verification [C] // 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000, 3: 2505-2511.

- [7] SAHIN G, BALCILAR M, USLU E, et al. Obstacle avoidance with vector field histogram algorithm for search and rescue robots [C] //2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Trabzon: IEEE, 2014:766-769.
- [8] PAPPAS P, CHIOU M, EPSIMOS G T, et al. VFH + based shared control for remotely operated mobile robots
 [C] //2020 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). Abu Dhabi: IEEE, 2020: 366-373.
- [9] BABINEC A, DUCHON F, DEKAN M, et al. VFH * TDT (VFH * with time dependent tree): a new laser range finder based obstacle avoidance method designed for environment with non-static obstacles [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(8); 1098-1115.
- [10] 张亚兰,赵成萍,严华.基于改进双向 A*和向量场直 方图算法的无人机航路规划[J].科学技术与工程, 2019,19(4):179-184.
- [11] 屈盼让,薛建儒,朱耀国,等. 面向无人车运动规划问 题的 VFH 算法[J]. 计算机仿真,2018,35(12):245-251.
- [12] WU C F, WANG Y L, MA L, et al. VFH + based local path planning for unmanned surface vehicles [C] // 2021 IEEE International Conference on Recent Advances in

Systems Science and Engineering (RASSE). Shanghai: IEEE, 2021: 1-6.

- [13] 徐玉华,张崇巍,徐海琴. 基于激光测距仪的移动机器 人避障新方法[J]. 机器人,2010,32(2):179-183.
- [14] BOUJELBEN M, AYEDI D, REKIK C, et al. Fuzzy logic controller for mobile robot navigation to avoid dynamic and static obstacles [C] // 2017 14th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Marrakech: IEEE, 2017: 293-298.
- [15] QU P, XUE J, MA L, et al. A constrained VFH algorithm for motion planning of autonomous vehicles [C] // 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Seoul: IEEE, 2015: 700-705.
- [16] 刘杰,闫清东,唐正华. 基于激光雷达的移动机器人避 障规划仿真研究[J]. 计算机工程,2015,41(4): 306-310.
- [17] SARY I P, NUGRAHA Y P, MEGAYANTI M, et al. Design of obstacle avoidance system on hexacopter using vector field histogram-plus [C] // 2018 IEEE 8th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET). Bandung: IEEE, 2018: 18-23.
- [18] ZHANG Z, ZHANG Y P, GUO C B, et al. Path planning for fixed-wing UAVs based on expert knowledge and improved VFH in cluttered environments [C] // 2022 IEEE 17th International Conference on Control and Automation (ICCA). Naples: IEEE, 2022: 255-260.

Obstacle avoidance planning for mobile robots based on adaptive VFH algorithm

XV Tianyu*, SUN Xiaodong**, XIE Jianliang*, MENG Xiangdong**, HE Qijiang***

(*School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science

and Technology of China, Chengdu 611731)

(** The 58th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214063)

(**** School of Microelectronics, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract

Vector field histogram (VFH) is widely used in obstacle avoidance for mobile robots due to its insensitivity to sensor errors and fast response features. This method quantifies the obstacle information (of each direction) into intensity values and judges the feasibility by the threshold. However, different thresholds will bring robots about different obstacle avoidance effects and poor adaptability to various task environments. To address VFH's threshold sensitivity issue, an adaptive threshold adjustment strategy is proposed. The threshold function comprehensively evaluates the pass-ability of each group of thresholds within the range of candidate directions combined with environmental information. It contributes to selecting the suitable threshold and completing autonomous obstacle avoidance for robot motion. To evaluate the algorithm's effectiveness and reliability, a simulated obstacle environment is designed, and comparative experiments are conducted. Experimental results show that the VFH algorithm improves the threshold sensitivity of the traditional algorithm with the proposed adaptive threshold strategy, and meanwhile the robot could acquire a short collision free path in a narrow channel to reach the target position.

Key words: path planning, autonomous obstacle avoidance, vector field histogram (VFH), adaptive threshold