

基于时序逻辑的复杂环境下无人机运动规划算法

谢国汕¹, 殷志宏², 杨 一², 李润青¹, 李超勇¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 102401)

摘 要: 本文主要考虑基于时序逻辑的无人机运动规划问题。一般地, 解决该问题的算法包括两个阶段: 上层综合阶段生成一条可行的离散规划; 低级综合阶段结合离散任务规划设计无人机的控制输入。但是当第一阶段失败时, 即线性时序逻辑(LTL)任务在当前环境中无法实现时, 我们希望系统能够进行一定的调整。本文提出了一种任务重规划算法, 在深入理解模型检查原理的基础上, 利用初始任务自动机生成一个松弛乘积自动机, 进而获取有效的离散任务规划; 同时设计一个自动机的权重函数, 确保该规划在最小程度上违背初始任务所提出的约束。本文提出的重规划算法解决了时序逻辑在复杂环境中无法实现的难题, 扩大了时序逻辑在无人机运动规划中的应用范围, 同时增加了系统的鲁棒性。

关键词: 无人机; 运动规划; 时序逻辑; 重规划; 松弛乘积自动机

中图分类号: V 219

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.06.010

Temporal Logic Based Algorithm for UAV Motion Planning in Complex Environment

XIE Guoshan¹, YIN Zhihong², YANG Yi², LI Jianqing¹, LI Chaoyong¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

2. UAV Technology Institute of CASIC, Beijing 102401, China)

Abstract: This paper mainly focuses on the problem of unmanned aerial vehicle (UAV) motion planning with the given linear temporal logic (LTL) specification. Generally, the algorithm to solve this problem includes two stages: the high-level synthesis phase generates a feasible discrete planning, and the lower-level synthesis stage combines discrete mission planning to design the control inputs of the UAV. However, when the first stage fails, i.e. the LTL specification is infeasible in the current environment, it is desired that the system can make certain adjustments. Therefore, a reconfiguration algorithm is proposed in this paper. Based on deep understanding of the principle of model checking, the initial task automaton is used to generate a relaxed product automaton to obtain effective discrete planning. At the same time, a weighting function of the automaton is designed to ensure that the planning violates the constraints proposed by the initial task to a minimum. The proposed reconfiguration algorithm solves the problem that the LTL specification cannot be realized in complex environments, expands the application range of temporal logic in unmanned aerial vehicle (UAV) motion planning, and increases the robustness of the system.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); motion planning; temporal logic; reconfiguration; relaxed product automaton

0 引言

一直以来, 无人机运动规划问题都关注于生成

一条到达某个目的地的避障轨迹^[1-3], 涌现出许多经典的算法, 例如快速探索随机树(RRT)算法^[4]、基于

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(91748128, 11802268); 浙江省自然科学基金(LR20F030003); 中国博士后科学基金(2019M652087)

作者简介: 谢国汕(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为时序逻辑在无人机方面的应用。

通信作者: 李润青(1989—), 男, 博士后, 主要研究方向为多智能体系统的运动规划、航天器动力学与控制。

人工势场的改进算法^[5]等。然而这些算法都存在一个缺点,那就是只能完成简单的点到点的单目标路径规划,而无法完成诸如无人机按照顺序访问目标区域、按照时间顺序做出某些动作之类的复杂任务。对于这些复杂的运动规划问题,基于时序逻辑的运动规划算法是一种有效的解决方案。该算法的一个重点是使用时序逻辑语言来描述复杂的任务,其中线性时序逻辑(LTL)^[6-7]是最常用的一种语言。值得注意的是,随着无人机的快速发展,人们急需一种高阶描述语言对多功能无人机的复杂任务进行规范化表述,而其中LTL和计算树逻辑语言(CTL)^[8]受到了广泛的关注和研究。因此,引入时序逻辑语言以解决无人机复杂运动规划的算法不仅在理论上具有意义,而且也具有很大的实践价值。

基于时序逻辑的运动规划算法主要借鉴了模型检测的概念,也就是检验一个离散系统是否满足某些时序逻辑形式的属性。FAINEKOS等将时序逻辑语言引入到任务描述里面,提出了一种该算法的基本框架^[9-11],其中主要包括3个步骤:首先,将连续的工作环境进行区域划分,以获得连续工作空间的离散模型;然后,利用模型检测的原理,综合工作空间的离散模型和时序逻辑公式对应的Büchi自动机^[12]以获得离散任务规划;最后,根据无人机的运动约束设计一个连续控制器,驱使无人机在现实工作环境中实现离散任务规划。这种算法框架被广泛应用于很多复杂的场景,TUMOVÁ等^[13]针对复杂广阔的环境,研究了一种基于滚动时序的控制方法,该方法将整个运动过程分为许多个小的时间窗口来处理,以降低计算的复杂度。KRESS-GAZIT等^[14]针对具有传感器功能的机器人,研究了一种具备实时信息反馈的算法框架,提高了系统的鲁棒性。殷翔等^[15]将时序逻辑引入到多机器人仓库自动化系统中。STEPHEN等^[16]将机器人运动模型抽象为具有连续状态和动作空间的马尔可夫决策过程(MDP),同时结合深层神经网络,生成一条满足时序逻辑任务的连续轨迹。李润青等^[17]将时序逻辑引入到地球观测卫星的任务调度中。

在上述算法框架中,算法能够成功运行的一个前提是LTL任务在当前环境中是可以实现的。然而,正如FAINEKOS等^[18]所提出的,在现实环境中总是会存在LTL任务无法在当前环境中实现的情况,其中包括LTL任务存在逻辑上的矛盾、无人机

的运动约束等,在这种情况下整个算法将会失败。针对这种情况,我们希望系统可以将任务失败的原因反馈给用户,并基于初始的LTL任务提供一个可行的替代方案。为了解决这个问题,FAINEKOS等基于松弛自动机提出了一种近似算法,该算法首先基于初始Büchi自动机构建一个松弛任务自动机,然后利用该自动机构建相应的松弛乘积自动机,以此获取一个可行的离散任务规划。该算法的主要缺点是构建松弛任务自动机的过程比较复杂,且生成的离散任务规划并不是唯一的。RAMAN等^[19]研究了一个用于机器人任务规划的LTLMoP工具包的扩展框架,该框架将控制器的生成过程包含在自动推理层中,以解决类似问题。但是该框架仅指出了时序任务中无法实现的部分,而没有给出进一步的解决措施。解决该问题的关键是从数学的角度解释任务无法实现的根本原因,并且在重规划算法中,需要将原子命题集之间的距离用数学公式来描述,作为衡量离散规划偏离初始任务的标准。

本文借鉴了文献[18]中的思路,通过构建松弛乘积自动机的方法来获得在最小程度上违反初始时序任务的可行离散规划。算法首先基于初始Büchi自动机构建一个松弛乘积自动机;然后通过该自动机生成一个可行的离散规划;最后根据获取的离散规划对初始Büchi自动机进行修改,以此获得松弛任务自动机。此外,本文还构造了一个新的权重函数,该函数可以帮助我们找到一条在最小程度上违反初始时序任务的离散规划。与文献[18]的算法相比较,本文重规划算法直接利用初始Büchi自动机来构建松弛乘积自动机,降低了构建松弛乘积自动机的复杂度,同时通过构造新的权重函数,算法给出了最优解,解决了生成的离散规划不唯一的问题。为了避免破坏LTL任务中的安全性保障,一般将LTL任务分为“硬任务”和“软任务”,其“硬任务”主要是无人机运动中的安全保障任务。本文提出的重规划算法主要是针对“软任务”进行一定程度上的修改,在确保任务安全性的前提下获取最优解,增加了时序逻辑在无人机运动规划中的适应性。

1 问题描述和预备知识

1.1 问题描述

本文的主要目的是研究一个基于时序逻辑的

无人机运动重规划算法,其解决的主要问题是驱使无人机在给定的工作环境中实现由 LTL 公式描述的时序任务,并且当该时序任务无法在当前环境中实现时,对初始任务进行最小程度的修改以获取一个可行的离散任务规划。考虑一个无人机在二维环境中执行任务,无人机的动力学 p 满足如下公式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $p = [x \ y]^T \in P \subseteq R^2$ 为无人机在 X - Y 坐标系中的坐标; θ 为当前航向角; v 、 ω 分别为无人机的当前运动速度和角速度。

本文中无人机的时序任务用 LTL 公式 φ 来描述,该公式建立在原子命题的有限集合上,而这些原子命题标记了工作环境中感兴趣的区域或者这些区域所提供的服务。假设 $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ 是一组感兴趣的区域,则定义一个映射关系 $h_c: P \rightarrow \Pi$,该映射将工作环境 P 中的坐标映射到命题集 Π 中。

一般地,本文研究的主要问题可以描述如下:考虑一个无人机在二维环境上执行复杂的任务,假设该无人机的运动由式(1)描述,其初始位置为 $p(0)$,则本文要解决的问题是如何构造一种混合控制器,驱使无人机在工作环境中实现任务。此外,如果该任务无法在当前环境中实现,则在最小程度上放宽时序任务对系统的约束,以此来构建一个有效的混合控制器。

为了更好地描述上述问题,本文用一个简单的例子来说明。假设一个无人机在具有 5 个感兴趣区域的正方形工作空间中执行任务,如图 1 所示,其中的区域分别标识为 π_1 (蓝色)、 π_2 (青色)、 π_3 (黄色)、 π_4 (绿色) 和 π_5 (红色)。这些区域的连通图和提供的服务如图 2 所示。无人机的初始位置位于 π_1 的某处,它分别需要完成以下两个任务:1) 访问区域 π_4 和 π_5 ,然后一直停留在区域 π_5 ,与此同时,无人机在移动过程中需要获取服务 a_2 ;2) 访问区域 π_4 和 π_5 ,然后停留在区域 π_5 ,与此同时,无人机在运动期间要避免经过提供服务 a_1 的区域。

1.2 线性时序逻辑

在逻辑学里面,术语时序逻辑(Temporal Logic)被用来描述为表现和推理关于时间限定的命题的

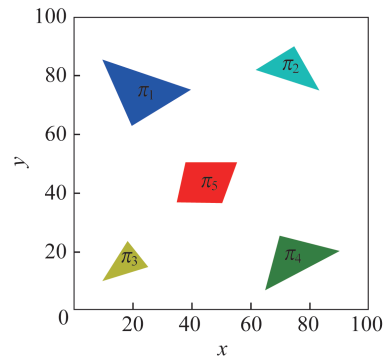


图 1 包含 5 个区域的工作空间

Fig.1 Workspace with five regions

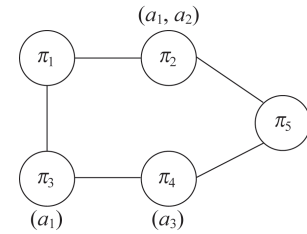


图 2 区域连通图

Fig.2 Connected regions graph

规则和符号化的任何系统,它有时候也被称为时态逻辑。给定一个原子命题集 Σ ,一个线性时序逻辑表达式符合如下语法^[20]:

对于 $\forall \phi \in \Sigma$, ϕ 都是一个 LTL 表达式;假如 ϕ_1 和 ϕ_2 都是 LTL 表达式,那么 $\neg \phi_1$ 、 $\phi_1 \wedge \phi_2$ 、 $\phi_1 \vee \phi_2$ 、 $\bigcirc \phi_1$ 、 $\phi_1 \cup \phi_2$ 、 $\Diamond \phi_1$ 和 $\Box \phi_1$ 都是 LTL 表达式,其中, $\neg$ (非)、 $\wedge$ (与)、 $\vee$ (或) 都是标准的布尔逻辑运算符, $\bigcirc$ (接下来)、 $\cup$ (直到)、 $\Diamond$ (最终) 和 $\Box$ (永远) 为时序逻辑运算符。

对于上述时序逻辑运算符, $\bigcirc \phi_1$ 表示 ϕ_1 在下一步为真; $\phi_1 \cup \phi_2$ 表示直到 ϕ_2 为真, ϕ_1 一直保持为真; $\Diamond \phi_1$ 表示在将来的某一时刻, ϕ_1 一定为真; $\Box \phi_1$ 表示在任意时刻, ϕ_1 都保持为真。对于前面所述的例子,其中的两个任务可以分别表述为两个 LTL 公式:

$$\phi_1 = \Box \Diamond \pi_5 \wedge \Diamond \pi_4 \wedge \Diamond a_2 \quad (2)$$

$$\phi_2 = \Box \Diamond \pi_5 \wedge \Diamond \pi_4 \wedge \Box \neg a_1 \quad (3)$$

为了使用离散逻辑来解决连续状态的任务规划问题,我们首先需要对状态转移系统和自动机进行初步了解。所以得出如下两个定义。

定义 1 一个有限状态转移系统(TS)可以用如下一个元组表示:

$$T=(S, \Pi, \sigma, s_{\text{init}}, L) \quad (4)$$

式中: $S=\{s_0, s_1, \dots, s_n\}$ 为一个包含有限状态的集合; Π 为一组有限原子命题; $\sigma \subseteq S \times S$ 为状态之间的转移关系; $s_{\text{init}} \in S$ 为系统的初始状态; $L: S \rightarrow 2^{\Pi}$ 为一个标签函数, 它标识了每个状态所满足的原子命题。

一般地, 系统 T 的路径可以表示为状态的无穷序列 $p=s_{\text{init}}s_1s_2\dots$, 与之相对应的原子命题序列为 $\text{trace}(p)=L(s_{\text{init}})L(s_1)L(s_2)\dots$ 。我们将系统 T 的所有原子命题序列所组成的集合称为系统 T 的语言 $L(T)$, 也就是 $L(T)=\{\text{trace}(p_1), \text{trace}(p_2), \dots\}$ 。

对于一个基于原子命题集 Σ 的 LTL 公式 ϕ , 我们可以通过相对应的 Büchi 自动机^[21]来获取满足公式 ϕ 的命题序列。

定义 2 一个 Büchi 自动机是一个包含 5 个元素的元组

$$B=\{Q, \Sigma, \delta, q_0, F\} \quad (5)$$

式中: Q 为有限状态集; Σ 代表所有输入命题的组合构成的集; $\delta \subseteq Q \times 2^{\Sigma} \times Q$ 为状态之间的转移关系; $q_0 \in Q$ 为初始状态集; $F \subseteq Q$ 为可接受状态集。

给定一个基于原子命题集 Σ 的输入序列 $\text{trace}_p=w(0)w(1)w(2)\dots$, Büchi 自动机 B 可以生成一条包含无限个状态的序列 $\rho=q_0q_1q_2\dots$, 其中 $\forall i \geq 0$, 都有 $(q_i, w(i), q_{i+1}) \in \delta$, 我们将该状态序列称为 Büchi 自动机 B 的一条路径。如果 $\exists q_f \in F, q_f$ 在路径 ρ 中循环出现, 则将该路径称为 B 的可接受路径, 而相应的输入序列 $\text{trace}(\rho)$ 是能够被 Büchi 自动机接受的。类似地, 我们将所有 Büchi 自动机 B 的可接受命题序列的集合称为 Büchi 自动机 B 的语言, 记为 $L(B)$ 。

2 基于时序逻辑的运动规划

基于时序逻辑的运动规划算法包括 3 个步骤, 一般地可以将这 3 个步骤分为两个阶段: 1) 上层综合阶段主要是结合工作环境的约束和 LTL 任务的约束, 获取一条可行的离散规划; 2) 底层综合阶段主要是考虑无人机的动力学约束, 设计一个控制器来驱使无人机按照离散规划完成任务。本文专注于第 1 阶段的算法研究, 并且重点关注在当前环境中无法实现的 LTL 任务的处理, 而底层无人机的运动控制器可以根据文献[21]的研究成果来设计。

2.1 无人机运动模型

为了能够利用时序逻辑来处理连续系统, 首先需要对二维环境 P 进行区域划分, 文献[22-23]对平面区域划分进行了深入的研究。本文主要采用了文献[20]里面的三角形区域划分法。该方法的主要优点是便于后续设计符合三角区域特点的连续控制器, 而且文献[21]提供了一个高效的针对复杂多边形环境进行三角形分解的算法。

定义一个映射 $\Gamma: P \rightarrow D$ 将 P 中的每个位置映射到有限集 $D=\{d_1, d_2, \dots, d_{N_D}\}$ 中, 则 $\Gamma^{-1}(d)$ 包含所有位于标记为 d 的单元格内的位置, 而 $D=\bigcup_{i=1}^{N_D} d_i$ 被称为工作空间 P 的一个区域划分。针对该区域划分, 无人机的运动模型可以定义为一个有限状态转移系统:

$$M=(D, d_0, \rightarrow_D, h_D, AP, L) \quad (6)$$

式中: D 为有限状态集合; d_0 为无人机初始位置所对应的单元格; $\rightarrow_D \subseteq D \times D$ 是状态转移关系; 对于工作环境 P 来说, 当且仅当单元格 d_i 和 d_j 相邻时, 才有 $(d_i, d_j) \in \rightarrow_D$ 且 $(d_j, d_i) \in \rightarrow_D$; h_D 为一个观察映射关系, 定义为 $h_D(d)=h_C(\Gamma^{-1}(d))$ 。类似地, 将系统 M 的路径定义为 $\tau=d_0d_1d_2\dots$, 其中 $\forall i \geq 0$, $(d_i, d_{i+1}) \in \rightarrow_D$ 。

利用三角分解的方法, 工作环境 P 可以划分成如图 3 所示。

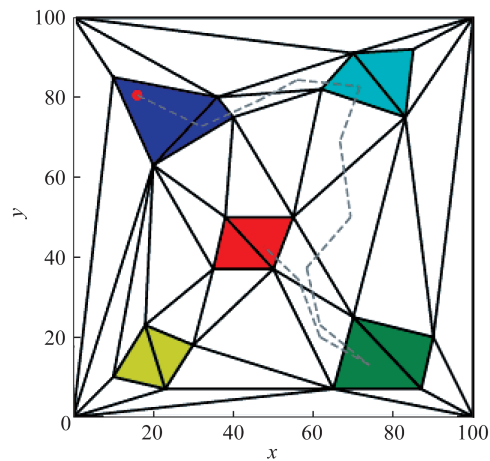


图 3 工作空间的三角分解

Fig.3 Triangular decomposition of the workspace

2.2 离散任务规划

给定一个无人机的离散模型 M 和需要完成的

任务表达式 ϕ , 我们可以用模型检测的方法来生成一条离散规划。模型检测是一个计算机领域的术语, 它是一种用来检测一个有限状态系统是否满足给定的属性的方法, 其中需要检验的属性一般用逻辑语言进行描述, 而有限状态系统对应本文的无人机模型 M 。实现模型检测算法的第一步是要把离散模型 M 和 LTL 表达式 ϕ 对应的 Büchi 自动机结合起来, 为此需要构建一个乘积自动机。

定义 3 对于离散模型 $M = (D, d_0, \rightarrow_D, h_D, AP, L)$, LTL 表达式 ϕ 对应的 Büchi 自动机 $B = \{Q, \Sigma, \delta, Q_0, F\}$, 那么乘积自动机 $P_t = M \times B$ 可以表示为一个元组

$$(Q_p, \sigma_p, Q_{p,0}, F_p, AP_p, L_p, w_p) \quad (7)$$

式中: $Q_p = D \times Q$ 为有限状态集; $\sigma_p \subseteq Q_p \times Q_p$ 代表状态转移关系, 当且仅当 $(d, d') \in \rightarrow_D$ 且 $\exists l \subseteq L(d)$, 使得 $(q, l, q') \in \sigma$ 时, $((d, q), (d', q')) \in \sigma_p$; $Q_{p,0} = (d_0, q_0)$ 为初始状态集; $F_p = D \times F$ 为可接受状态集; AP_p 为原子命题集; $L_p: Q_p \rightarrow 2^{AP_p}$ 为一个标签函数, 它标识了每个状态所满足的原子命题集; $w_p: \sigma_p \rightarrow R$ 为一个取值非负的权重函数, 本文采用区域划分后各单元中心之间的距离来衡量。

在自动机理论中, 在离散系统 M 中寻找满足某个 LTL 公式 ϕ (或者说满足 ϕ 对应的 Büchi 自动机 B) 的状态序列, 其实就是在系统 M 的语言 $L(M)$ 中寻找属于 Büchi 自动机 B 语言 $L(B)$ 的子集, 也就是 $L(M) \cap L(B)$, 如图 4 所示。而这可以通过两个自动机的笛卡尔乘积来构建, 因此, $L(P) = L(M) \cap L(B)$ 。

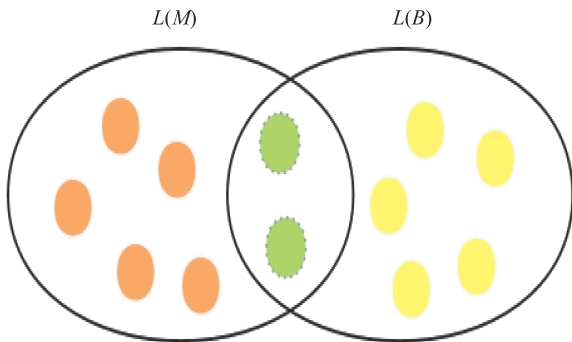


图 4 两个自动机系统的语言交集

Fig.4 Language intersection of two automata system

一般地, 我们通过构建一个加权有向图 $G = (V, E, w_p)$ 对乘积自动机 P 做进一步处理, 其中, $V = Q_p$ 代表有向图的节点; $E = Q_p \times Q_p$ 代表有向图的边, 对应于 P 中的状态转换关系。然后, 利用 Dijkstra 算法^[22], 可以获取一条从初始状态到可接受状态的最短路径。对于这样一条路径 $r_p = (d_0, q_0)(d_1, q_1) \dots$, 如果 $\exists (d_i, q_i) \in F_p$, 使得 (d_i, q_i) 在 F_p 中循环出现, 则称 r_p 为乘积自动机 P_t 的可接受路径。将可接受路径 r_p 映射到离散系统 M 中, 则可以获得相应的离散路径 $r_{p|M} = d_0 d_1 \dots$ 。一般地, 可接受路径可以写成前缀部分和后缀部分的组合形式 $r_p = r_{pre}(r_{suf})^\omega$, 其中 $r_{pre} = (d_0, q_0) \dots (d_s, q_s)$ 是有向图里的一条有限路径, $r_{suf} = (d_{k+1}, q_{k+1}) \dots (d_s, q_s)$ 是有向图里的一个环, 并且 $(d_{k+1}, q_{k+1}) \in F_p$ 。也就是说, r_{pre} 是一条从初始状态到某一个可接受状态的路径, 而 r_{suf} 是一个从某个可接受状态回到它本身的环形路径。另外, 如果有向图中没有从初始状态到任意一个可接受状态的路径, 那么该乘积自动机就不存在可接受路径, 也就是说该时序任务无法在当前环境中实现。

对于式 (2) 的时序任务, 采用上述算法获取的离散任务如图 3 所示, 无人机需要经过的区域依次为 π_1, π_2, π_4 和 π_5 。式 (3) 对应的 Büchi 自动机如图 5 所示, 该自动机包含了 3 个状态, 其中, s_0 是初始状态, s_2 是可接受状态。

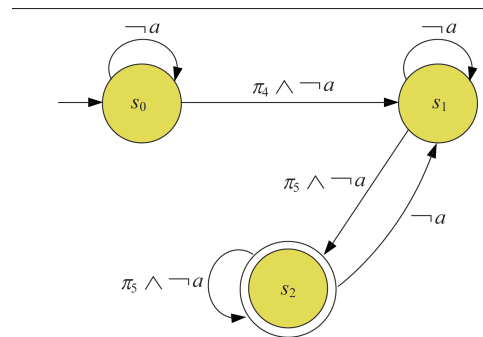


图 5 时序逻辑任务 3 的 Büchi 自动机

Fig.5 Büchi automaton of the LTL specification 3

结合无人机的离散系统 M , 最终的乘积自动机如图 6 所示。其中, 红色圆圈的状态代表初始状态, 蓝色圆圈的状态代表可接受状态, 从中可以看出, 该自动机不存在可接受路径。同时, 根据图 2 的区域连通图, 无人机在到达区域 π_5 之前必须经过区域 π_2 或者 π_3 , 而这些区域均提供服务 a_1 , 这与所给的任

务相违背。因此,式(3)描述的任务在当前工作环境中是不能够实现的。

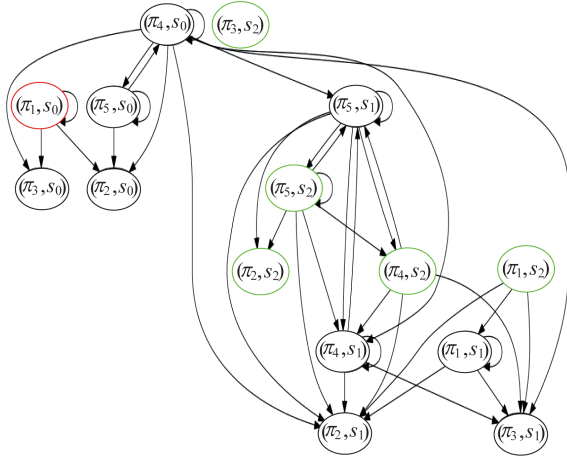


图 6 时序逻辑任务 3 的乘积自动机

Fig.6 Product automaton of the LTL specification 3

3 任务重规划算法

在基于时序逻辑的运动规划算法中,整个系统能够正常运行的一个重要前提条件是 LTL 任务在所给的工作环境中是可以实现的,也就是上层综合阶段能够生成一条可行的离散规划。而对于无法实现的 LTL 任务,系统将终止于乘积自动机的构建而无法生成最终轨迹。针对这种情况,本文基于文献[19]中松弛自动机的描述,利用离散系统 M 和初始 LTL 任务对应的 Büchi 自动机 B 构建一个松弛乘积自动机,由该自动机生成一条在最大程度上满足初始 LTL 任务的离散规划,而借助该离散规划,对初始 Büchi 自动机进行修改以获取松弛任务自动机。

定义 4 对于离散模型 M 和 Büchi 自动机 B ,松弛乘积自动机 P_r 可以表示为一个元组:

$$(Q_r, \sigma_r, Q_{r,0}, F_r, AP_r, L_r, w_r) \quad (8)$$

式中: $Q_r = D \times Q$ 为一个有限状态集; $\sigma_r \subseteq Q_r \times Q_r$ 为状态转移关系,当且仅当 $(d, d') \in \rightarrow_D$ 且 $\exists l' \subseteq 2^{AP_r}$, 使得 $(q, l', q') \in \sigma$ 时, $((d, q), (d', q')) \in \sigma_r$; $Q_{r,0} = (d_0, q_0)$ 为初始状态集; $F_r = D \times F$ 为可接受状态集; $AP_r = AP_B$ 为原子命题集; $L_r: Q_r \rightarrow 2^{AP_r}$ 是一个标签函数,它标识了每个状态所满足的原子命题集; $w_r: \sigma_r \rightarrow R$ 是一个取值非负的权重函数,具体定义见下文。

注意到,松弛乘积自动机 P_r 与一般乘积自动机 P_l 的主要区别在于状态转换关系和权重函数的定义

上,在一般乘积自动机 P_l 里,转换关系 σ_P 的约束条件是“ $\exists l \subseteq L(d)$ 使得 $(q, l, q') \in \sigma$ ”,而在松弛乘积自动机里面,转换关系 σ_r 的约束条件变为了“ $\exists l' \subseteq 2^{AP_r}$ 使得 $(q, l', q') \in \sigma$ ”。如前文所述,当初始 LTL 任务无法在当前环境中实现时,系统 M 的语言和 Büchi 自动机的语言是不存在交集的,对于离散系统 M 中可接受路径的某些状态转换 (d, d') 和 Büchi 自动机里可接受路径的某些状态转换 (q, l, q') ,原子命题集合 $L(d)$ 和 l 的关系不满足一般乘积自动机里转换关系的定义(即包含关系),它们之间可能是交集关系或者完全不相交。

令 $\chi(l', L(d)) = l' - L(d)$, 则 $\chi(l', L(d))$ 代表要使转移关系 $((d, q), (d', q'))$ 在 P_r 中成立,命题集 l' 必须去除的命题。对于命题集 l_i 和 l_j ,我们将其距离定义为两者差的一阶范式:

$$\text{Dist}(l_i, l_j) = \|\chi(l_i, l_j)\| = \|l_i - l_j\| \quad (9)$$

则松弛乘积自动机 P_r 的权重函数 w_r 可以定义为

$$w_r(((d, q), (d', q')))) = w(d, d') + \alpha \text{Dist}(\lambda(q, q'), L(d)) \quad (10)$$

式中: $((d, q), (d', q')) \in \sigma_r$, $w(d, d')$ 为从单元格 d 移动到单元格 d' 的代价, $\lambda(q, q') = \{l \subseteq 2^{AP_r} | (q, l, q') \in \sigma\}$ 。 $\text{Dist}(\lambda(q, q'), L(d))$ 计算了松弛乘积自动机里从状态 (d, q) 到 (d', q') 的命题序列和从单元格 d 移动到单元格 d' 的命题序列之间的距离,也就是该状态转移关系违背初始任务的程度。当该值等于 0 时,说明初始任务没有被违背;而值越大说明该状态转移关系越偏离初始任务。 $\alpha \geq 0$ 是一个设计参数,它可以调节偏离程度在权重函数中的比重,体现了用户偏向于尽量获取一个可行离散计划还是使最终的离散计划尽可能接近初始任务。 α 的值越大,得到的离散规划越接近初始任务。

任务重规划算法的伪代码在算法 1 中给出。该算法由两部分组成:第 1 部分是从第 1 行到第 15 行,它的主要内容是建立松弛乘积自动机;第 2 部分是从第 16 行到末尾,它的主要内容是利用 Dijkstra 算法寻找出可接受的路径,然后利用改路径对初始 Büchi 自动机进行修改,以获取松弛任务自动机 B' 。

算法 1 任务重规划算法

输入:离散系统 M , LTL 任务相应的 Büchi 自动机 B , 设计参数 α

输出:离散任务规划 r_p , 松弛任务自动机 B'

- 1) $Q_r := \emptyset, \sigma_r := \emptyset, Q_{r,0} := \emptyset, F_r := \emptyset, B'_r := B$
- 2) foreach $d \in D$ do
- 3) foreach $q \in Q$ do
- 4) if $(d, q) \notin Q_r$ then
- 5) 将 (d, q) 添加到 Q_r
- 6) if $q \in Q_0$ then
- 7) 将 (d, q) 添加到 $Q_{r,0}$
- 8.) if $q \in F$ then
- 9) 将 (d, q) 添加到 F_r
- 10) for 所有满足 $(d, d') \in \rightarrow_D$ 的 d' do
- 11) $\Phi = \{q' \mid \exists l \subseteq 2^{AP_r}, (q, l', q') \in \sigma\}$
- 12) foreach $q' \in \Phi$ do
- 13) 将转换关系 $((d, q), (d', q'))$ 添加到 σ_r
- 14) 根据式(6)计算权重 $w_r((d, q), (d', q'))$
- 15) 构建松弛乘积自动机 P_r
- 16) 利用 Dijkstra 算法从 P_r 中求出离散任务规划 r_P
- 17) foreach $((d, q), (d', q')) \in r_P$ do
- 18) if $(q, L(d), q') \notin \sigma$ then
- 19) 将转换关系 $(q, L(d), q')$ 添加到 B'

给定一个工作环境 P 和 LTL 任务表达式 ϕ , 如果 LTL 任务在当前环境中是可以实现的, 则一般的路径规划算法可以快速地提供一条最优离散规划。而如果任务在当前环境中是无法实现的, 则必须放松 LTL 任务的约束, 构建一个在一定程度上偏离初始 LTL 任务的松弛乘积自动机, 然后利用该自动机获取一条可行的离散规划。基于时序逻辑的任务重规划算法总结于算法 2 中。值得注意的是, 尽管最终的可接受路径是通过松弛乘积自动机获取的, 但离散系统 M 是没有改变的, 因此最终的离散规划仍然是可以实现的。

算法 2 基于时序逻辑的任务重规划算法

输入: 工作空间 P , LTL 任务表达式 ϕ , 设计参数 α

输出: 离散路径 r_{PM} , 松弛任务自动机 B'

- 1) 对 P 进行区域划分, 得到离散系统 M
- 2) 获取 ϕ 相应的 Büchi 自动机, 构建乘积自动机 P_i
- 3) 构建 P_i 相应的有向图, 利用 Dijkstra 算法求出可接收路径 r_P , 跳到步骤 5

4) 如果 P_i 不存在可接收路径, 则调用算法 1

5) 将 r_P 映射到离散系统中, 获取离散路径 r_{PM}

假设集合 D 和 Q 的大小分别为 $|D|$ 和 $|Q|$, 那么算法 1 中第 1 个和第 2 个循环的时间复杂度分别为 $O(|D|)$ 和 $O(|Q|)$; 在最差的情况下, 对于 D 中的任意一个节点, 存在 $|D|-1$ 条边, 第 10 行的循环时间复杂度为 $O(|D|-1)$, 截至第 14 行, 算法的时间复杂度为 $O(|D|^2 \times |Q|)$ 。乘积自动机包含了 $|D| \times |Q|$ 个节点, 则 Dijkstra 算法的时间复杂度为 $O(|D| \times |Q| \log(|D| \times |Q|))$, 因此, 算法 1 的时间复杂度为 $O(|D|^2 \times |Q| + |D| \times |Q| \log(|D| \times |Q|))$ 。

4 仿真验证

为有效验证本文所提出的任务重规划算法, 本节针对图 1 所示的工作环境进行时序任务仿真。其中, 各个感兴趣区域的中心坐标分别为 $\pi_1(16.0, 80.5)$, $\pi_2(80.5, 90.0)$, $\pi_3(6.0, 6.5)$, $\pi_4(70.0, 6.5)$, $\pi_5(40.5, 42.5)$ 。

首先, 考虑式(3)所示的 LTL 任务, 当 α 取不同值时, 最终的离散任务规划见表 1。从中可以看出, 随着 α 取的增大, 离散任务规划将抵达更多的区域以完成任务, 而这将不可避免地违背了初始任务中的某些约束。

表 1 在不同 α 值得情况下, 时序逻辑任务 3 的离散规划

Tab.1 Discrete planning of the LTL specification 3 with different α

α 取值	无人机依次抵达的区域
10	π_1
50	π_1, π_2, π_5
100	$\pi_1, \pi_3, \pi_4, \pi_5$

接下来, 考虑这样一个任务, 无人机需要在区域 π_1 和区域 π_5 间来回访问, 同时避免经过提供服务 a_2 或 a_3 的区域。相对应的 LTL 表达式如下:

$$\phi_3 = \square \Diamond \pi_1 \wedge \square \Diamond \pi_5 \wedge \square \neg (a_2 \vee a_3) \quad (7)$$

从图 1 可以看出, 无人机在到达区域 π_5 之前必须经过区域 π_2 (提供服务 a_2) 或者区域 π_4 (提供服务 a_3), 这与“避免经过提供服务 a_2 或 a_3 的区域”这一要求相违背, 因此, 该任务在当前工作环境中是无法实现的。当取 $\alpha=100$ 时, 在只考虑感兴趣的区域时, 无人机的路径规划为

$$r = \pi_1 \pi_2 \pi_5 (\pi_2 \pi_1 \pi_2 \pi_5)^\omega \quad (8)$$

采用文献[21]所提出的无人机运动控制算法, 无人机路径规划里的前缀部分所对应的运动轨迹如图 7 所示。

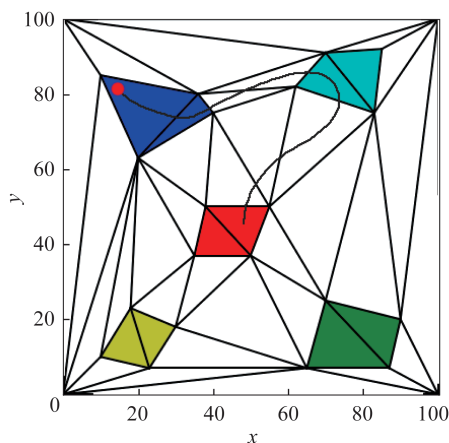


图 7 时序逻辑任务 7 对应的无人机运动轨迹
Fig.7 The UAV trajectory of the LTL specification 7

5 结束语

本文研究了复杂环境下基于时序逻辑的无人机运动重规划算法。通过深入分析模型检测的基本过程,在离散模型 M 中寻找满足时序任务 ϕ 的离散规划其实就是寻找两个自动机模型的语言交集,也就是 $L(M) \cap L(B)$,而这刚好可以通过两个系统的笛卡尔乘积来获取,这就是基于时序逻辑的运动规划算法的本质。为了解决时序任务无法实现的问题,本文首先根据初始时序任务构建一个松弛乘积自动机;然后通过该自动机生成一个可行的离散规划;最后根据获取的离散规划对初始 Büchi 自动机进行修改,以此获得松弛任务自动机。本文的重规划算法主要针对的是时序逻辑任务与工作环境存在冲突的情况,而对于一些由于无人机的运动约束,导致时序任务无法实现的情况,则需要做进一步的研究。此外,针对多无人机协同运动的情况也是以后的研究方向。

参考文献

[1] FAINEKOS G E, KRESS-GAZIT H, PAPPAS G J. Temporal logic motion planning for mobile robots [C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2005: 2020-2025.
[2] 袁成, 宋刚, 许佳, 等. 2019 年国外先进军用无人机研究进展[J]. 飞航导弹, 2020(1): 21-29.

[3] 符成山, 吴惟诚, 雷东. 美军无人机装备现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2019(9): 46-52.
[4] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT-connect: an efficient approach to single-query path planning [C]// Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2000: 995-1001.
[5] WARREN C W. Global path planning using artificial potential fields [C]// 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York, USA: IEEE Computer Society, 1989: 316-321.
[6] COPELAND B J. Logic and reality: essays on the legacy of arthur prior [J]. The Philosophical Review, 1996(1): 281-286.
[7] PNUELI A. The temporal logic of programs [C]// 18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1977: 46-57.
[8] CLARKE E M, EMERSON E A. Design and synthesis of synchronization skeletons using branching time temporal logic [C]// Workshop on Logic of Programs. Berlin, German: Springer, 1981: 52-71.
[9] FAINEKOS G E, GIRARD A, KRESS-GAZIT H, et al. Temporal logic motion planning for dynamic robots [J]. Automatica, 2009, 45(2): 343-352.
[10] FU J, TANNER H G, HEINZ J. Concurrent multi-agent systems with temporal logic objectives: game theoretic analysis and planning through negotiation [J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 9(3): 465-474.
[11] WOLFF E M, TOPCU U, MURRAY R M. Automaton-guided controller synthesis for nonlinear systems with temporal logic [C]// 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 4332-4339.
[12] RAMADGE P J G. Some tractable supervisory control problems for discrete-event systems modeled by buchi automata [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(1): 10-19.
[13] TUMOVÁ J, DIMAROGONAS D V. A receding horizon approach to multi-agent planning from local LTL specifications [C]// 2014 American Control Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 1775-1780.

(下转第 97 页)