

基于时空混成 Petri 网的无人机集群行为建模方法

卢楠¹, 王晓东², 唐政³, 何佩²

- 1.西北工业大学宁波研究院, 浙江 宁波 315103;
2.西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072;
3.中国电子科技集团公司数据链技术重点实验室, 陕西 西安 710072

摘 要:越来越广泛应用的无人机集群作战在信息化全球新军事变革中受到高度关注,集群一体化建模对作战模式的测试验证具有重要的意义和价值。结合作战场景的建模仿真需求,以异构无人机集群协同作战过程为研究对象,从无人机单体建模入手,在单体作战过程形式化和数学描述的基础上,基于时空混成 Petri 网描述异构无人机集群系统的离散状态和连续过程,有效解决了集群系统中物理、计算过程的融合问题和交互事件建模问题。选取 UPPAAL 对无人机集群打击任务建模进行形式化验证,表明所提建模方法可行、有效。

关 键 词:异构无人机集群;时空混成 Petri 网;集群建模;形式化验证
中图分类号:TP301.1, V279 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2022)04-0812-07

随着新一代人工智能技术和自主技术快速走向战场,将催生新型作战力量,颠覆传统战争模式,未来战争必将是智能化战争。无人机集群作战作为智能作战的重要形式,正在崭露头角。采用建模仿真方法对无人机集群作战的有关问题开展研究,可为这一新型作战样式的发展和运用提供理论支撑,具有重要现实意义。文献[1]提出了一种扩展混成 Petri 网模型并对无人驾驶车辆系统的躲避障碍场景进行建模。文献[2]提出一种混成 Petri 网作为信号控制交叉口市区交通网络的模型。文献[3]提出了一种基于 AOP 的时空 Petri 网的 CPS 模型,并以智能机器人为例,将该模型成功应用到其故障检测和修复中。文献[4]提出了一种混成时空 Petri 网的 CPS 实时事件模型,并以医疗控制系统为例,分析了其建模方法的可靠性。

然而,当前针对无人机的建模多以单一物理实体为研究对象进行建模,缺少结合异构无人机集群特点,深度融合离散状态和连续过程、物理和计算过

程的建模与实战应用场景建模形式化验证的研究。为此,面向集群建模技术在集群作战仿真中的迫切需求,从作战任务需求出发,研究基于时空混成 Petri 网的异构无人机集群机动行为模型构建方法,定义交互事件解决一体化建模问题。最后选取 UPPAAL 工具对所建模型进行验证。

1 无人机集群建模方法

无人机飞行过程中的状态变化量可以表示为^[5]

$$\boldsymbol{u} = [x_g, y_g, z_g, \theta, \phi, \psi, p, q, r, \boldsymbol{V}, \alpha, \beta, m]^T$$

式中,依次为 3 个方位参数、俯仰角、滚转角、偏航角、滚转角速度、俯仰角速度、偏航角速度、速度矢量(又分为三轴速度分量 u, v, w)、迎角、侧滑角和质量。

1.1 无人机交互事件建模方法

无人系统集群可以看作一个包括物理空间和信

息空间的典型赛博物理系统。在无人机执行任务中,信息物理系统之间的交互可以看作感知和控制事件之间的交互,感知事件包括速度、高度、俯仰角、翻滚角等关键属性信息的感知,控制事件包括各种机动动作,如平飞加减速、俯冲、跃升和战斗转弯等。

1) 感知事件模型定义

定义传感器感知无人机关键属性这一事件为元感知事件,该事件是否发生仅由一个关键属性的数值大小决定。定义元感知事件的形式化模型为:

定义 1 元感知事件形式化模型

$$e_s: \tau \langle x, c \rangle$$

式中: e_s 为某一类元感知事件; τ 为该类事件名称; x 为相关属性名称; c 为触发条件; f 为函数, $f: x \rightarrow \mathbf{R}$; x 为函数中任一变量。

定义 2 感知事件触发规则

$$c: = c \& c \mid c'' \mid "c \mid ! \mid c \mid (c) \mid a$$

$$a: = f(x) \text{ OP } D$$

$$\text{OP}: = > \mid < \mid \geq \mid \leq \mid = \mid !=$$

$$D \in \mathbf{R}$$

式中: OP 为属性值数量关系操作符号; D 为某一实数; c 为感知事件触发规则。如无人机平飞加减速机动动作, $\text{Acc} \langle a, a > 0 \rangle$ 用 Acc 表示机动动作名称, a 为关键属性, 当 a 的值大于 0 时, 事件平飞加速 Acc 触发, 无人机随即开始执行平飞加速机动动作。又因为无人机任务执行过程是包含时空属性的, 故将在某一时刻某一空间地点的某感知事件模型表示为 $\text{Acc} \langle a, a = 30, l_0 \rangle @ t_0$, l_0 和 t_0 分别代表感知交互事件的时间和空间属性。

无人机大多机动动作的触发是由多个关键属性和多个元感知事件共同控制。在定义 1 的基础上, X 重新定义为组合感知事件相关的属性名称, C 为感知事件触发的条件集合。在定义 2 的基础上, 将组合感知事件模型定义为:

定义 3 组合感知事件模型定义

$$e_c: = \tau \langle X, C \rangle$$

$$C: = C \& C \mid C'' \mid "C \mid ! \mid C \mid (C) \mid a$$

$$a: = g_v \mid X \mid \text{OP } D$$

$$\text{OP}: = > \mid < \mid \geq \mid \leq \mid = \mid !=$$

$$D \in \mathbf{R}$$

2) 交互事件模型定义

无人机的每个机动行为都是以事件为驱动产生的, 定义交互事件模型为:

定义 4 定义交互事件为四元组:

$$E_i = (e_s, \text{Capture}, \text{Reactor}, e_c)$$

4 个参数分别为交互事件中的感知事件、感知事件的接收者、感知事件的响应者或者控制事件的产生者、交互事件中的控制事件, 其中控制事件又可以定义为

$$e_c: = \tau \langle Y, N \rangle$$

式中: Y 为包含多个关键属性的集合; N 为关键属性具体值的集合。

1.2 异构无人机集群系统行为建模

异构无人机集群系统是既有离散行为也有连续行为的混成系统。对混成系统建模方法有形式化和非形式化两种, 由于非形式化方法无法穷尽地检测系统所有可能的状态, 故这类方法不具有完备性。在形式化建模方法中有混成自动机、混成行为系统、混成通信顺序进程、混成 Petri 网等。其中, 混成 Petri 网相比其他方法具有可描述有限状态、可更精细化描述、应用范围广等优势, 故在混成 Petri 网的基础上加入时空因素建立时空混成 Petri 网来描述异构无人机集群系统行为。

定义 5 时空混成 Petri 网为一个十元组^[6]:

$$\text{STHP} = (\mathbf{P}, \mathbf{T}, \mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{M}_0, \mathbf{H}, \mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{I}, \mathbf{A})$$

式中: $\mathbf{P}$ 为有限库所集合, 包含离散行为 P_d 和随时间连续变化的 P_c , 用圆形节点表示; $\mathbf{T}$ 为有限变迁集合, 包含离散行为的 T_d 和随时间连续变化的 T_c , 用方形节点表示; $\mathbf{F}$ 为流关系集合, 用有向弧曲表示; $\mathbf{W}$ 为 HPN 上的权函数; $\mathbf{M}_0$ 为库所集合上初始标识向量; $\mathbf{H}$ 为既包含离散又包含连续的混合函数; $\mathbf{E}$ 为离散变迁激发结束的条件集合; $\mathbf{V}$ 为连续变迁的激发速度; $\mathbf{I}$ 表示时间函数, $[t_1, t_2]$ 表示变迁上的时间区间函数, 即事件完成的时间要求; $\mathbf{A}$ 表示空间位置信息, 可以用区域坐标信息或者经纬度表示, $A_i = (x_i, y_i)$ 。

定义 6 事件和离散变迁是一一对应关系, 离散变迁的触发表明相应事件的发生;

时空混成 Petri 网中既有离散状态节点, 也有连续状态节点, 通过有向弧来表示它们之间的相互作用, 变迁的激发表明有对应事件的发生。

2 无人机集群建模及其形式化验证

针对异构无人机集群协同作战, 采用基于时间自动机的 UPPAAL 工具, 对建立的模型进行属性验证, 证明所建模型的可靠性、可达性、有效性和实时

性的,以评价建模方法的可行性。

2.1 实例建模

假设由 2 架侦察无人机、3 架攻击无人机和负责决策的无人机决策控制中心组成异构无人机集群系统,对敌方 13 架无人机进行侦察攻击,整个作战系统如图 1 所示。

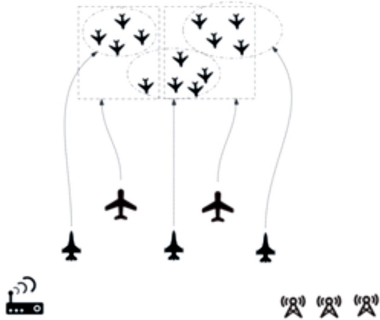


图 1 异构无人机集群作战系统场景图

异构无人机集群系统中物理实体有侦察类无人机实体、打击类无人机实体和察打一体化无人机实体。将物理实体类分为无人机实体类和传感器实体类,形式化表示如(1)~(2)式所示

$$U = (U_{id}, U_p(D, K, M, R), U_b(S, A), U_{st}(Z, T)) \quad (1)$$
$$S_n = (S_{id}, S_p(u, v, w, p, q, r, a), S_b(C_1, C_2), S_{st}(Z, T)) \quad (2)$$

式中: D 表示动力学属性; K 表示运动学属性; S 表示侦察行为; A 表示攻击行为; Z 表示实体坐标信息; T 表示时间点或区间; C_1 表示传感数据变化; C_2 表示传感数据未变化。

每个类下的物理实体具体定义为:

加速度传感器:

$$(S_{ai}, S, S_{ap}(v, u, w, a), S_{ab}(C_1, C_2),$$
$$S_{ast}(Z, T), STHP)$$

陀螺仪传感器

$$(S_{gi}, S, S_{gp}(p, q, r), S_{gb}(C_1, C_2), S_{gst}(Z, T), STHP)$$

侦察无人机实体

$$(U_{si}, U, U_p(p_f, p_h), U_b(S), U_{st}(Z, T))$$

攻击无人机实体

$$(U_{ki}, U, U_p(p_d, p_p), U_b(A), U_{st}(Z, T))$$

察打一体无人机实体

$$(U_{ski}, U_p(p_f, p_h, p_d, p_p), U_b(S, A), U_{st}(Z, T))$$

式中: $STHP$ 表示时空混成 Petri 网; p_f, p_h 表示直线飞行和定常盘旋机动属性; p_d, p_p 表示俯冲增速和急上升转弯机动属性; Z 表示侦察无人机侦察区域、攻

击无人机攻击区域、决策中心所在区域、侦察无人机监视区域,定义为库所 $S_1 \sim S_6$ 。

在描述整个异构无人机集群作战任务过程时用库所表示时空混成 Petri 网中各个物理实体,用变迁表示物理实体之间信息和控制决策指令的传输。

将无人机集群执行任务的整个过程看作是事件顺序执行的过程,可将整个过程描述为图 2 所示的 Petri 网。其中,无人机决策控制中心库所负责发送控制任务。指令发送和信息反应用变迁 $T_1 \sim T_{10}$ 表示。整个过程每个库所都有时空属性,信息获取和指令发送对应时间点 t_i ,每个库所中令牌变化时间段对应 $[t_1, t_2]$ 。

图 2 中各个变迁含义如表 1 所示。异构无人机集群系统的事件表如表 2 所示。

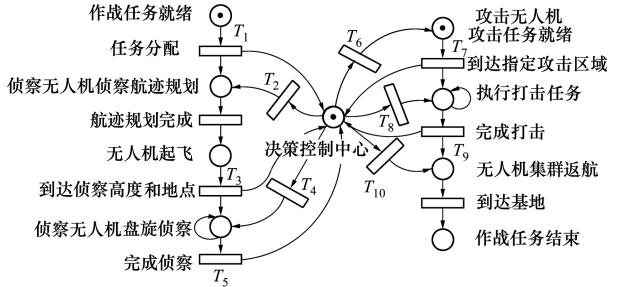


图 2 异构无人机集群完成任务 Petri 网模型

表 1 异构无人机集群执行任务过程变迁含义表

变迁名	表示含义
T_1	作战任务分配完成消息
T_2	侦察无人机开始侦察任务指令
T_3	侦察无人机到达指定高度和地点消息
T_4	侦察无人机开始盘旋侦察指令
T_5	2 架侦察无人机均完成侦察任务消息
T_6	侦察任务结束打击无人机准备开始打击任务指令
T_7	打击无人机到达指定攻击区域消息
T_8	打击无人机开始打击任务指令
T_9	3 架打击无人机均完成打击任务消息
T_{10}	侦察打击任务均完成无人机集群准备返航指令

表 2 异构无人机集群系统事件表

事件	发送方 库所	接受方 库所	含义
E_1	S_4	S_1, S_2	无人机到达指定地点执行任务
E_2	S_2	S_4	侦察无人机侦察任务完成
E_3	S_4	S_2, S_3, S_5	打击无人机开始打击任务
E_4	S_3	S_4	打击无人机完成打击任务
E_5	S_4	S_2, S_3, S_5, S_6	任务完成返回基地

对异构无人机集群打击任务建模先用 Petri 网对整体协同打击过程进行建模,然后用时空混成 Petri 网对单架打击无人机机动行为进行建模。

所有打击无人机到达指定位置后开始打击任务,3架打击无人机协同打击过程可用 Petri 网描述如图3所示。

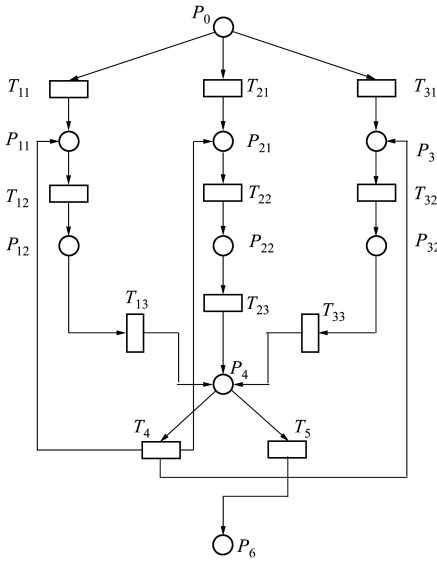


图3 3架打击无人机协同打击过程 Petri 网表示图

在图3中, P_0 为打击无人机到达指定打击区域, P_{ij} 表示打击无人机各自状态, $1 \leq i \leq 3, i \in \mathbf{N}, 1 \leq j \leq 3, j \in \mathbf{N}$. $j=1$ 时, 无人机开始协同打击, $j=2$ 时, 当前序号无人机将自身打击完成情况发送到控制中心, P_4 为控制中心接收所有打击信息. P_6 为协同打击任务完成; T_{ij} 表示打击无人机状态变化. $j=1$, 协同打击任务下发事件, $j=2$, 开始打击任务准备完成事件, $j=3$, 当前无人机成功发送打击任务完成情况到控制中心. T_4 为控制中心获取到的信息为没有完成全部打击任务, T_5 为13个打击目标均已打击完成。

当用 Petri 网对3架打击无人机协同打击任务整体建模以后, 具体单个无人机状态用时空混成 Petri 网表示, 所建模型如图4所示。

完成打击任务先经过平飞加速到达指定打击空间位置点; 再执行俯冲到达第一个目标正上方; 然后平飞减速靠近目标; 再进行战斗转弯; 最后快速跃升完成打击任务。离散库所表示机动动作的转移, 连续库所表示打击无人机运行过程中关键属性数值的变化, 连续变迁表示关键属性变化规律。

P_1 为平飞加速, V 从200 m/s加速到300 m/s, 在

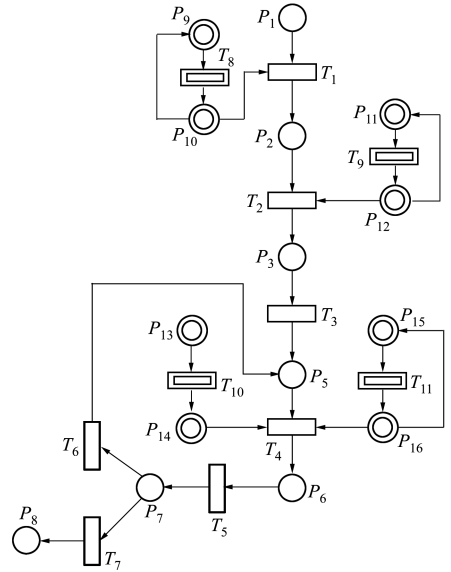


图4 单架无人机打击过程时空混成 Petri 网表示图

此过程中涉及速度、切向过载等关键属性变化, 连续库所 P_9 表示 t_1 时刻打击无人机的速度 v_1 , T_8 表示速度变化的微分方程, 即

$$dV = \frac{F_x \cos \alpha \cos \beta + F_y \sin \beta + F_z \sin \alpha \sin \beta}{m}$$

P_{10} 表示 t_1 到 t_i 时刻速度具体变化值 ΔV . T_1 表示平飞加速机动动作完成. P_2 为俯冲机动动作. T_9 表示迎角变化的微分方程, 即

$$d\alpha = \frac{F_z \cos \alpha - F_x \sin \alpha}{mV \cos \beta} + q - \tan \beta (p \cos \alpha + r \sin \alpha)$$

T_2 为俯冲机动动作完成. P_3 表示平飞减速机动动作, 与平飞加速机动动作类似. P_5 表示战斗转弯机动动作. T_{10} 表示高度变化的微分方程 $dH = \cos \theta (v \sin \phi + v \cos \phi) - u \sin \theta$. T_{11} 表示滚转角变化的微分方程 $d\phi = q \cos \phi - r \sin \phi$. T_4 表示战斗转弯机动动作完成. P_6 表示跃升机动动作与俯冲机动动作类似. T_5 表示跃升机动动作完成. P_7 表示本次打击任务完成. T_6 表示还有待打击目标需再次到达目标执行打击任务. T_7 表示本架无人机已完成所有打击任务. P_8 表示打无人机打击任务结束。

在异构无人机集群打击实例中, 交互事件关键属性包括速度 v 、高度 h 、气流角迎角 α 、滚转角 ϕ , $\mathbf{X} = \{v, h, \alpha, \phi\}$, 不同属性值代表不同事件, 对感知事件、控制事件和交互事件建模如下所示:

感知事件模型:

$$\{e_{\text{speeding}}(v, v \geq 200), e_{\text{subing}}(\alpha, \alpha \geq 0), e_{\text{turning}}(\{h, \phi\}, (h \geq 2000) \& (\phi \geq 30))\}$$

控制事件模型:

$$\{e_{\text{speed}}(v, v = 300), e_{\text{speed}}(\alpha, \alpha = 60), \\ e_{\text{turn}}(\{h, \phi\}, (h = 3\ 000) \& (\phi \geq 60))\}$$

交互事件模型:

$$\{\langle e_{\text{speeding}}, S_v, e_{\text{ctrlsystem}}, e_{\text{speed}} \rangle, \langle e_{\text{subing}}, S_\alpha, e_{\text{ctrlsystem}}, e_{\text{sub}} \rangle, \\ \langle e_{\text{turning}}, S_h, e_{\text{ctrlsystem}}, e_{\text{turn}} \rangle, \langle e_{\text{turning}}, S_\phi, e_{\text{ctrlsystem}}, e_{\text{turn}} \rangle\}$$

2.2 实例模型的形式化验证

Acc_Action、Sub_Action、Turn_Action、Jump_Action、Attack_Action、Finished_Action 6 个离散机动作

作模块和 Velocity、High、Roll、Pitch 4 个连续属性变化模块,分别表示水平加速机动动作、俯冲机动动作、战斗转弯机动动作、跃升机动动作、打击机动动作和完成任务行为。模块之间通过同步信道进行交互。将表示离散连续的 10 个模块组件分别映射成时间自动机模板,将模块中执行的每个过程映射为时间自动机模板中的位置,将机动动作转换事件映射为时间自动机模板中的同步通道,得到如图 5 所示模型。

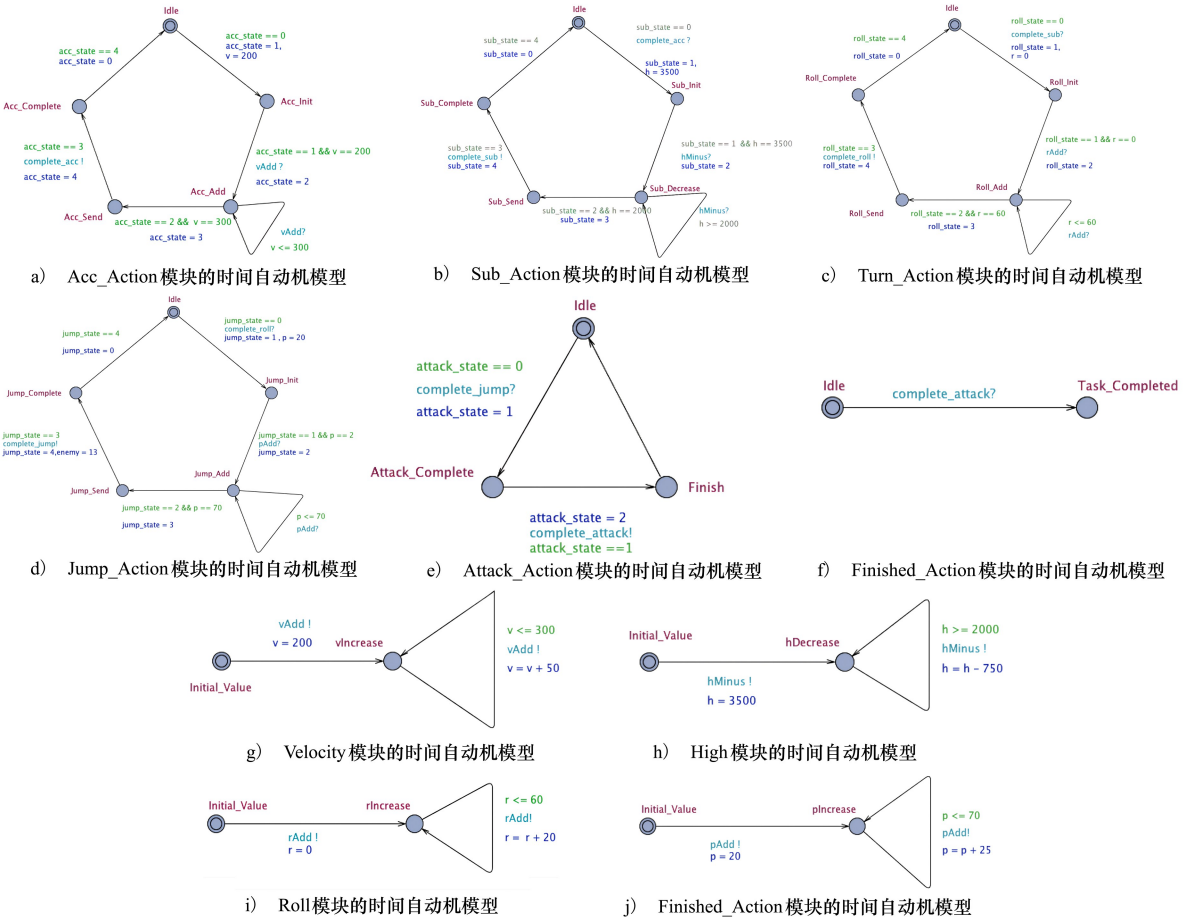


图 5 实例各个模块时间自动机模型

时间自动机模型中,圆圈代表系统各种状态,带箭头有向线段代表系统中状态之间的转换,红色圆圈表示当前正在执行的状态,深蓝色数据表示当前状态的更新操作,绿色数据表示当前状态的转移条件,浅蓝色数据表示当前状态的同步信道传输。

2.3 实例验证分析

运用 UPPAAL 工具^[7-8],进行自动分析,得到实例执行打击任务过程的流程图,如图 6 所示。

基于时间自动机模型,借助 UPPAAL 工具对无

人机打击过程中的各种属性进行验证:

E<>(enemy == 13):验证了完成任务过程中,至少存在一条路径,最终将 13 个敌方目标都消灭掉,可验证模型的可达性;

A<>(Sub.Sub_Complete imply roll_state == 0):验证了如果俯冲机动动作完成则认为紧接着进入了下一个机动动作——战斗转弯,可验证模型的实时性;

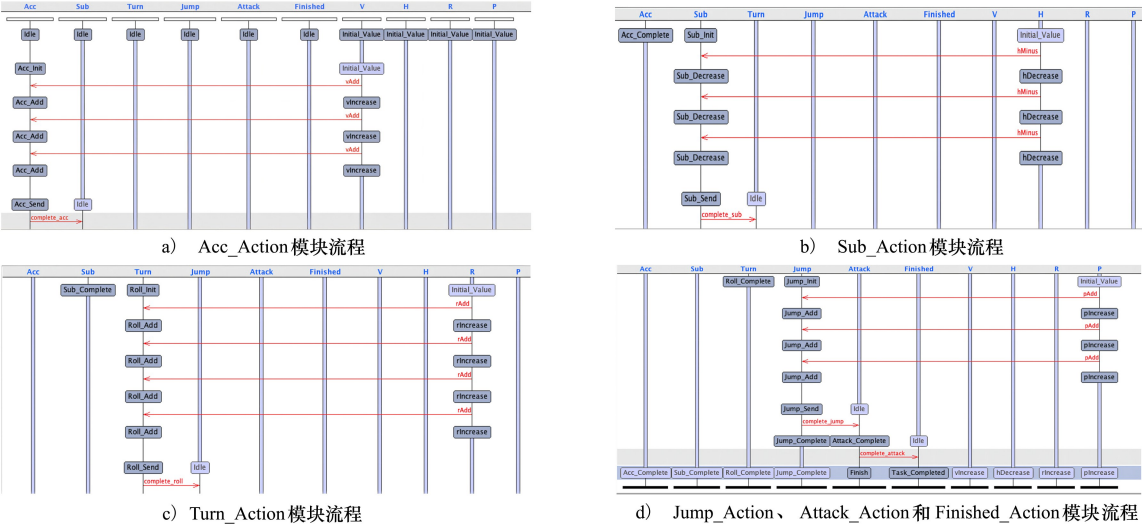


图 6 实例执行打击任务过程流程图

$E[] (h \geq 0)$:验证了过程中的高度属性不会有负值;
 $A[] (\text{Attack}.\text{Attack_Complete} \text{ imply } \text{enemy} = 13)$:验证了如果打击任务完成,则敌方 13 个目标全部被消灭,可验证模型的有效性;
 $E<> (\text{Acc}.\text{Acc_Complete})$:验证了存在水平加速这个机动动作完成这个状态。
以上验证的属性均可代表某一类属性。验证结果如图 7 所示。

结果表明所建模型能很好地对该实例过程进行描述,性质均验证通过。该模型满足可靠性、可达性、有效性和实时性的要求。

3 结 论

针对异构无人机集群作战仿真中物理实体数字模型描述这一关键技术,围绕异构无人机集群作战任务过程的建模和验证,通过对无人机实体和无人机集群关键属性值变化的运动学和动力学方程描述,以及无人机实体的感知事件、控制事件和两者之间的交互事件的形式化建模,将无人机的建模由单一物理实体增加到多个物理实体;选用时空混成 Petri 网描述军用实战-异构无人机集群打击过程。该方法有效描述无人机集群系统中物理过程和计算过程的融合过程,刻画出各节点之间信息的交换和协同。论文采用 UPPAAL 工具进行验证和分析,为无人机集群作战系统提供验证框架和环境,证明所建模型满足可靠性、可达性、有效性和实时性要求。

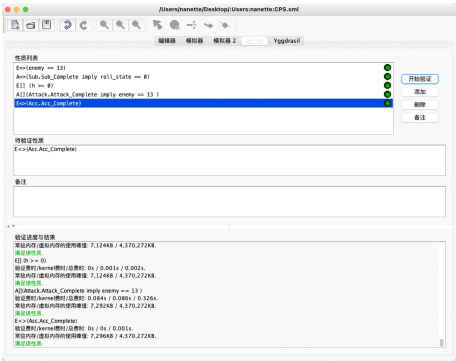


图 7 实例属性验证结果

参考文献:

[1] 宋相君, 张广泉. 基于扩展混成 Petri 网的 CPS 无人车系统建模与分析[J]. 计算机科学, 2017, 44(7): 21-24
SONG Xiangjun, ZHANG Guangquan. Modeling and analysis of CPS unmanned vehicle systems based on extended hybrid Petri net[J]. Computer Science, 2017, 44(7): 21-24 (in Chinese)
[2] 张晶, 袁振宇. 基于增广混合 Petri 网的 CPS 事件建模[J]. 计算机工程与科学, 2020, 303(3): 173-179
ZHANG Jing, YUAN Zhenyu. Modeling of CPS events based on augmented hybrid Petri nets[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 303(3): 173-179 (in Chinese)

- [3] 宋振华, 张广泉. 基于 AOP 的时空 Petri 网的 CPS 建模[J]. 计算机科学, 2017, 44(7): 38-41
SONG Zhenhua, ZHANG Guangquan. Modeling of CPS based on aspect-oriented spatial-temporal petri net[J]. Computer Science, 2017, 44(7): 38-41 (in Chinese)
- [4] 谭朋柳, 汪亚亚, 朱明. 混成时空 Petri 网的 CPS 实时事件模型[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(10): 32-35
TAN Pengliu, WANG Yaya, ZHU Ming. Real-time event CPS model based on hybrid spatial-temporal Petri nets[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(10): 32-35 (in Chinese)
- [5] 王峰. 无人机飞行运动建模与自主飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009
WANG Feng. Research on the flight movement modeling and autonomous control technology of unmanned aeral vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009
- [6] 汪亚亚. 基于混成时空 Petri 网的 CPS 建模及验证[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016
WANG Yaya. Modeling and verification based on hebrid spatial-temporal Petri net for cyber physical system[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016 (in Chinese)
- [7] BENTSSON J, LARSSON F, LARSON F, et al. UPPAAL-a tool for automatic verification of real-time systems[C] // Proc of Workshop on Verification and Control of Hybrid Systems III, 1995: 232-243
- [8] EPETERSSON K. GLarsen UPPAAL2K: SmallTutorial[J]. Bulletin of the European Association for Theoretical Computer Science, 2000(70): 40-44

Modeling method of unmanned aerial vehicle swarm behavior based on spatiotemporal hybrid Petri net

LU Nan¹, WANG Xiaodong², TANG Zheng³, HE Pei²

(1. Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315103, China;
2. School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. CETC Key Laboratory of Data Link Technology, Xi'an 710072, China)

Abstract: The more and more widely used UAV swarm operations have received great attention in the new global military revolution of informatization, and the integrated modeling of UAV swarms has great significance and value for the testing and verification of combat modes. Aiming at the modeling and simulation requirements of combat scenarios, taking the collaborative combat process of heterogeneous UAV swarms as the research object, starting from the modeling of a single UAV, on the basis of the formalization and mathematical description of the single combat process, this paper employs Petri nets based on the hybridization of time and space to describe the discrete states and continuous processes of heterogeneous UAV swarm systems, and effectively solves the problems of the fusion between physics and computing processes, and modeling of interactive events in swarm systems. UPPAAL is selected to formally verify the modeling of UAV swarm strike mission, which shows that the proposed modeling method is feasible and effective.

Keywords: heterogeneous drone swarm; spatiotemporal hybrid Petri net; cluster modeling; formal verification

引用格式: 卢楠, 王晓东, 唐政, 等. 基于时空混成 Petri 网的无人机集群行为建模方法[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(4): 812-818

LU Nan, WANG Xiaodong, TANG Zheng, et al. Modeling method of unmanned aerial vehicle swarm behavior based on spatiotemporal hybrid Petri net[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(4): 812-818 (in Chinese)