

4-16-2020

## Modeling Method of Emergency Response based on Internal and External Areas of Disaster Zone

Liang Wei

*Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;*

Yanyan Huang

*Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;*

Jianyu Wang

*Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Modeling Method of Emergency Response based on Internal and External Areas of Disaster Zone

### Abstract

**Abstract:** The insufficient ability of the rescuers and the insufficient self-rescue ability of the victims are the two main reasons of the low efficiency in some conventional event emergency. *An emergency response model which combines the rescue ability and the self-rescue ability is presented.* The division of the internal and the external system in the disaster field is defined, the basic structure of the model and the emergency response process characteristics are described. MAS (multi-agent system) is used to describe the law of the emergency behavior. The synergistic rescue effect is simulated through an imaginary case. The results show that the cooperative method can be used to improve the relation between the rescuers and the victims, and can effectively to support the decision-making.

### Keywords

emergency response, system modeling, cooperation, multi-agent system

### Recommended Citation

Liang Wei, Huang Yanyan, Wang Jianyu. Modeling Method of Emergency Response based on Internal and External Areas of Disaster Zone[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 669-677.

## 灾场内、外域相结合的应急响应建模方法研究

梁魏, 黄炎焱, 王建宇

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对某些重大突发事件应急中暴露出的效率低下问题, 分析原因在于两方面: 救援人员的施救能力缺乏和受灾群体自救能力不足, 为此提出了一套综合利用受灾者自救能力和施救者救援能力的应急响应模型。界定了灾场内、外域系统的划分, 描述了模型基本框架, 分析了双方应急过程的行为特点, 并利用多智能体系统描述了内、外域结合的应急行为规律, 通过想定案例模拟了内、外域协同救援效果。结果表明, 提出的应急救援模型能够反映突发事件内、外域协作的内在规律, 对辅助决策有一定参考价值。

**关键词:** 应急响应; 系统建模; 协同; 多智能体系统

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 04-0669-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0346

### Modeling Method of Emergency Response based on Internal and External Areas of Disaster Zone

Liang Wei, Huang Yanyan, Wang Jianyu

(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The insufficient ability of the rescuers and the insufficient self-rescue ability of the victims are the two main reasons of the low efficiency in some conventional event emergency. An emergency response model which combines the rescue ability and the self-rescue ability is presented. The division of the internal and the external system in the disaster field is defined, the basic structure of the model and the emergency response process characteristics are described. MAS (multi-agent system) is used to describe the law of the emergency behavior. The synergistic rescue effect is simulated through an imaginary case. The results show that the cooperative method can be used to improve the relation between the rescuers and the victims, and can effectively to support the decision-making.

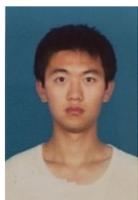
**Keywords:** emergency response; system modeling; cooperation; multi-agent system

## 引言

现代大地震、火灾或恐怖人质危机等复杂的突发灾难应急事件, 单靠传统的单一外部应急施援,

应急效能提升空间是很有限的, 故需要提高应急响应新思路新方法, 降低灾害损失。

纵观现阶段应急方法往往放在外部救援、自救一侧, 采用推理、建模、仿真及问卷调查的方法, 舒其林提出的“情景-应对”非常规突发事件应对的基本范式<sup>[1]</sup>, 李明磊等研究了应急预案、范例推理和智能规划的应急决策方法, 对多种决策方法进行比较, 给出每种方法面对非常规突发事件的实效性和针对性<sup>[2]</sup>; 王慧敏等提出了基于情景依赖的非常



收稿日期: 2018-06-08 修回日期: 2018-11-27;  
基金项目: 国家自然科学基金(61374186);  
作者简介: 梁魏(1990-), 男, 山西晋中, 博士, 研究方向为突发事件应急响应; 黄炎焱(1973-), 男, 广西荔浦, 博士后, 教授, 研究方向为体系工程、系统建模与仿真; 王建宇(1964-), 男, 江苏淮安, 博士, 教授, 研究方向为计算机, 控制工程。

<http://www.china-simulation.com>

规突发事件动态应急决策模型，并以突发水灾为例验证了模型了可靠性<sup>[3]</sup>。关于恐怖袭击类突发事件，Dana Nau 等运用层次任务网的方法进行了研究<sup>[4]</sup>。另外现阶段群体疏散有的主要研究方式主要有建模仿真<sup>[5-7]</sup>，问卷调查等方法<sup>[8-9]</sup>，还有利用先进 VR 技术对火灾人员疏散进行仿真<sup>[10]</sup>，描述了受灾群体产生的特殊应急心理、行为以及影响的相关要素。

单从救援或者自救的角度来提高应急效能的方法有一定局限性，本文拟通过内、外域结合的方法，对应急效能的提升进行研究。在研究群体行为的基础上，将其作为应急决策的主要影响因素，构建一套“以人为本”的非常规突发事件应急响应体系框架，以提高受灾群体和救援人员的协同效率为目标，为非常规突发事件的应对提供相应的辅助决策。

## 1 内、外域的划分

宏观上，一切受某突发事件影响的区域都可称作内域，其他区域为外域，假设内域用集合  $E$  表示，则外域可以用  $\sim E$  表示。微观上，内域指受灾人员中无法自救或者自救代价较大的人员的统称，外域指通过各种方式营救受灾人员的救援者的统称。在突发事件发生发展的过程当中，内、外域的结构可能会随着突发事件的变化而不断变化。

以地震灾害为例，等震线是地震突发事件内、外域划分的重要指标，如图 1 所示，该图为汶川地震等震线图，烈度评定按照中国国家标准《中国地震烈度表 GB/T17742-1999》进行。亟待救援的地带可划分为内域，可按地震烈度 VI 度的边界作为边界进行划分，中心大部分地区均属于内域；相对的，地震烈度为 VI 度以外的地区被判定为外域。而在救援任务制定的过程中，根据不同的震害强度采取不同的救援类型，根据需求程度、人员分布等，及时调整救援任务。

除等震线外，火灾边界，飓风影响带边界均可作为内、外域划分指标。总体来说，突发事件的影

响边界均可作为内、外域划分指标。

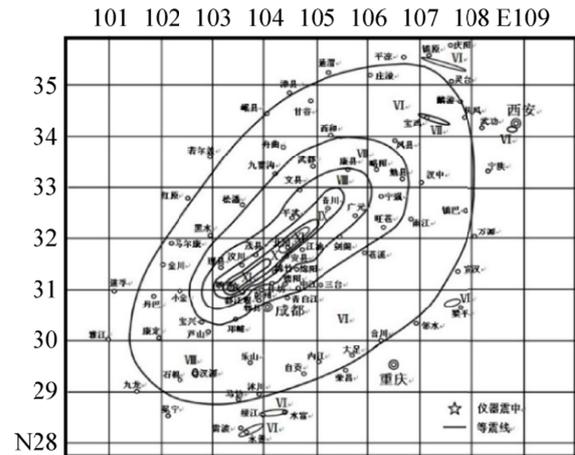


图 1 汶川地震等震线

Fig. 1 Isoseismal line of Wenchuan earthquake

## 2 内、外域协同应急框架

突发事件的应急响应系统属于开放式的复杂大系统，包含复杂大系统的一般特点：高阶次、多重反馈回路、高度非线性。除了环境因素外，该系统在运作过程中主要分为待救援群体和救援群体 2 个子系统，2 个子系统相互作用来应对突发事件。协同学理论认为，子系统之间存在自组织的现象，内、外域 2 个子系统也不例外。若单纯按照系统自身的演化规律完成子系统之间的自组织行为，势必会耗散大量的资源，在应急过程中的时间资源浪费，导致应急效能降低，带来不必要的损失。

本文研究了救援和自救相结合的应急响应过程，通过协调突发事件内、外域子系统之间的协作关系，在外力的驱使下加快子系统得自组织行为，以提高总体应急效能。研究的整体框架如图 2 所示，具体内容有：

(1) 内、外域的划分及其协作理论。分别从不同角度定义了突发事件内、外域的概念，提出了不同情况下内外、域划分的重要指标。并结合协同学理论基础，对内、外域子系统之间的协同效应、序参量和自组织特点进行了分析。

(2) 构建了内、外域结合的建模思想。以 OODA 理论(3.1 节)作为主导思想，构建了内、外

域结合的应急响应流程, 并根据实际情况, 分析了受灾群体和救援群体的独立行为和协作行为。

(3) 基于多 Agent 的内、外域结合系统。对结合系统模型进行了数学描述, 并将系统模型的各个部分用 Agent 来实现, 对子系统之间的协作行为进行了描述, 并以用例图的形式描述了完整系统。

(4) 模型的应用。给出了想定内容, 并以伪代码的形式实现了内、外域结合的应急响应系统模型, 验证了该模型的可行性, 及其在提高应急救援效能中的重要作用。

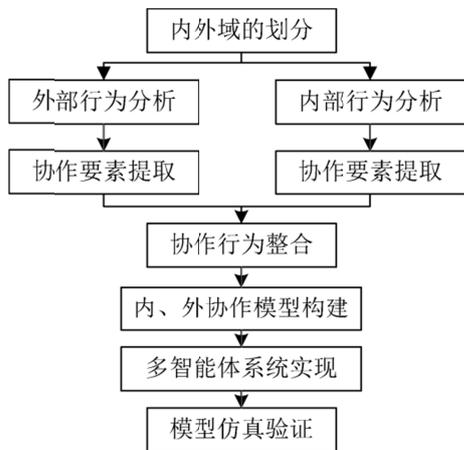


图 2 内、外域协作应急响应框架

Fig. 2 Emergency response framework of internal and external areas cooperation

### 3 灾场内、外域建模

#### 3.1 内、外域总体建模思想

内、外域结合的应急救援方法是在传统应急救援的基础上, 加入了受灾群体的自救行为, 救援人员与受灾群体之间快速协作, 以此提高各阶段执行效率。本文引入了 OODA 循环理论作为构建模型的总体思路, OODA 循环由 4 个操作过程“观察、判断、决策和行动”组成。这个理论由 John Boyd 提出的, 用于制定空战战术, 也称为“Boyd 环”。

具体的执行流程如图 3 所示: 非常规突发事件发生, 救援部门按照应急预案先制定该事件的应急方案, 按照应急方案的流程; 若在应急过程中观察到受灾群体的特殊信号, 根据受灾群体的状态、环

境和紧急程度等影响因素, 对原有的任务或部署进行相应的调整(或不调整), 若受灾群体有能力参与救援, 可作为应急救援力量进行分配, 实现受灾群体之间的互救。

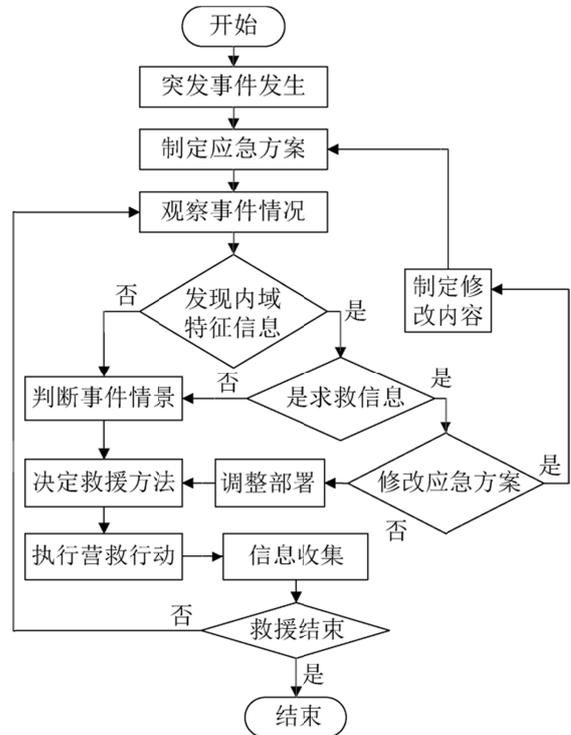


图 3 基于 OODA 的内、外域结合的应急救援流程图

Fig. 3 Emergency response flow chart combining internal and external space based on OODA

#### 3.2 内、外域行为特征分析

##### 3.2.1 内域群体行为建模

内、外域结合的应急响应方法中内域群体的行为需要兼顾突发事件中人员的基本应急行为以及与外域结合的协作行为。个体属性对群体的行为有着重大影响, 在对群体行为的建模时需要优先考虑属性分布<sup>[12]</sup>。疏散人群协作能力, 也会影响群体应急行为<sup>[13-14]</sup>, 在确认了群体属性后, 确定人员之间的交互行为也必不可少。基本行为有:

- (1) 当有多个安全区域供选择时, 优先考虑距离最近的;
- (2) 若 2 个安全区距离相近, 优先考虑疏散人员密度小的;

(3) 疏散开始后, 智能体选择的安全区域一般不会发生改变;

(4) 人员因恐慌等心理因素, 容易做出一些不理智的行为且易产生从众行为等。

协作行为有:

(1) 对自身状态如: 行动能力、健康状况、具体位置、需求等有较准确的评估;

(2) 拥有可识别的求救方法表达能力;

(3) 服从救援者的救援指挥。

### 3.2.2 外域救援行为建模

救援者的行为属性有行动力和救援力, 由于各救援部门的属性不同, 直观的体现就是救援能力的差别, 本文利用时间作为研究的主要因素, 所以将救援人员的速度独立于救援能力考虑。

基本行为有:

(1) 通过现有设备进行现场观测, 如卫星、摄像头、雷达等;

(2) 有识别信息的能力, 区别救援信息与非救援信息;

(3) 救援方案制定后, 一般情况不改变原始方案;

(4) 拥有完整的救助方式, 如医疗设备、灭火设备及相关专业人员;

(5) 有绝对的执行力。

协作行为有:

(1) 可根据受灾者需求制定相应的应急方法;

(2) 在执行原始方案时, 遇到内域紧急情况可中断原始救援方案, 启用新的救援方案。

## 4 基于 Agent 的内、外域协作应急响应模型实现

由于 Agent 的自主性、反应性、社会性以及推理能力等属性可以很好的反应内、外域及应急环境的特点, 所以本文利用多 Agent 系统来描述内、外域协作应急响应模型。

### 4.1 数学描述

内、外域结合的应急响应模型是若干个 Agent 按照一定关系组成的系统, Agent 之间存在着复杂的交互关系。关系是交互的约束, 又通过交互体现。我们将内、外域结合的应急响应模型用一个四元组来定义:

$$\langle IN, EX, REM, INAC \rangle$$

式中:  $IN$  为受灾群体 Agent;  $EX$  为救援人员 Agent;  $REM$  为救援环境模型;  $INAC$  为 Agent 之间的交互关系。它们共同组成了多 Agent 内、外域结合应急救援模型的基本结构。

在联合应急救援过程中, 整个应急系统包括各种救援力量编成(指挥中心、医疗救助部门、交通部门等), 所有的受灾群体(有受突发事件影响的所有人组成的群体)和整个救援环境(气象、温度、地形等)。当采用多 Agent 系统建模时, 我们假定各组成要素的处理函数为:  $S$  代表救援人员组成的救援力量,  $G$  表示受灾群体,  $E$  表示联合应急现场环境, 根据假设, 我们得到如下问题描述模型:

$$E \in REM, S \in EX, G \in IN,$$

$E, S, G$  都可以看作是有限集合, 分别代表系统空间集合, 即  $E$  是联合应急环境空间集合,  $S$  是应急部门集合,  $G$  是待救群体集合, 这样就建立了内、外域结合的应急响应的多 Agent 系统,  $E \times S \times G$  即为联合应急响应系统空间。将对应的问题定义为  $Q$ ,  $Q$  为  $E, S, G$  的函数, 可以表示为:

$$Q = (E, S, G)$$

式中:  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_\alpha\}$  为应急响应现场环境集合;  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_\beta\}$  为各应急救援部门集合;  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_\gamma\}$  为受灾群体集合。

应急响应环境包括  $\alpha$  个元素子集, 救援部门包括  $\beta$  个元素子集, 受灾群体包括  $\lambda$  个元素子集。在内、外域结合的应急响应系统中各空间集合在系统运行时都是一个信息处理函数,  $E, S$  和  $G$  在应急过程中相互影响, 不断改变自身的状态, 从而生成动作的执行结果。联合应急响应环境集合不断受到

内、外域的作用, 改变应急响应状态空间, 同样, 内、外域结构也会随着环境的改变而不断变化, 调整内部的参数和状态, 以适应动态的应急态势。因此, 重新描述为:

$$Q = (E, S, G, C)$$

式中:  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_\xi\}$ ;  $C_k = E \times S \times G \rightarrow P, (k=1, 2, \dots, \xi)$ ,  $C_k$  定义为一个二阶函数,  $E \times S \times G$  为函数空间,  $\times$  表示笛卡尔乘积,  $C_k$  即为  $E \times S \times G$  到  $P$  的映射。这样 Agent 自身行为处理结果用  $Q$  函数进行度量, 从而实现其形式化描述。

内、外域结合的应急响应问题就转换为如下行为动作函数, 即: 当给定  $E, S$  和  $G$ , 采取怎样的内、外域协同应急行为, 使  $C$  满足式(1):

$$\max(C) = C(E, S, G) \quad (1)$$

根据对联合应急响应中多 Agent 问题的描述, 可以定义为: 为了获得最大的应急响应作战效能, 在给定的目标判别函数  $C(E, S, G)$  的前提下, 如何确定应急响应环境、救援部门 Agent 和受灾群体 Agent 的信息处理函数。如果  $E, S$  和  $G$  确定后, 则确定了应急响应的救援环境空间, 救援部门 Agent 空间, 受灾群体 Agent 空间的信息处理函数, 就构成了  $E \times S \times G$  问题域的解空间。

## 4.2 系统主要 Agent 模型

### 4.2.1 救援部门 Agent

救援部门的行为有: 接收来自环境的各种信息且有信息处理能力, 将处理后的信息进行判断, 然后进行应急决策, 最后控制执行部门进行相应的活动; 并且与同级部门 Agent 可以相互交流信息, 救援部门 Agent 模型如图 4 所示。

图 4 中虚线框内为外域救援 Agent 的各模块: 救援 Agent 首先获得外部信息, 这一块是信息感知模块完成的, 包括各种传感器设备; 然后通过识别模块对采集的数据进行分析、融合; 将信息递交至决策模块, 通过决策算法对当前情景进行决策; 最后将决策结果传递到控制模块, 由控制模块做出相应行动, 并将信息传递至通信模块, 与 Agent 外部

进行数据交互。

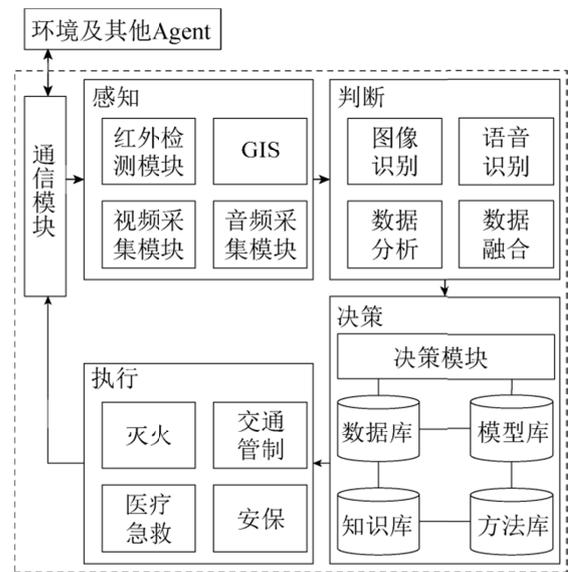


图 4 外域救援 Agent 模型  
Fig. 4 External rescue Agent model

### 4.2.2 受灾群体 Agent

受灾群体 Agent 能够体现出突发事件给受灾群体带来的影响, 并做出相对合理的反应。有明确的目标: 减少突发事件带给自身的损失。受灾群体在与环境和救援 Agent 交互过程中体现群体的行为特征, 人受到突发事件会处于不同状态, 处于不同状态的行为也是不同的, 为了方便研究, 我们假设受灾群体 Agent 建模过程中的群体行为是理智的, 能够做出正确判断, 不会受到感情因素的影响。受灾群体 Agent 模型如图 5 所示。

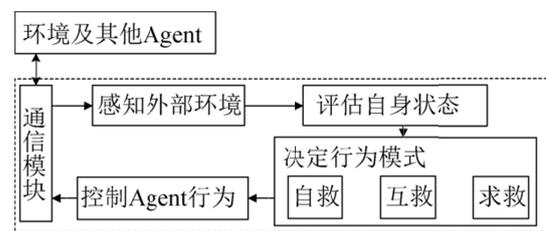


图 5 内域群体 Agent 模型  
Fig. 5 Internal group Agent model

虚线框内为受灾群体 Agent, 该 Agent 可以通过通信模块与环境或者其他 Agent 进行互动, 该 Agent 能够感知外部环境并且通过外部环境和自身

身体状态对自己的应急能力进行评估,评估的主要内容包括当前突发事件情景对自身的影响、群体是否具备自由行动能力、是否具备营救他人的能力和是否具有求救能力;根据环境和自身状态,对当前 Agent 行为进行决策,可以选择自救、互救和求救等模式,并将结果作为控制信息控制 Agent 行为,将其行为通过通信模块传递给外部环境及其他 Agent。

### 4.2.3 救援环境 Agent

救援部门和受灾群体所处的环境决定了它的应急响应行为。具体来说,包含了 2 种环境,分别为空间环境和应急环境:

空间环境是一个静态的环境。在内、外域结合的应急响应模型中,就行为而言,作为具有认知部件应急行为的一个重要因素在于所处空间环境的认识,其周围的地理环境,气象条件、水源条件等决定了它采取的作战行动。本文以坐标设定来定义空间环境,定义类型为水平面坐标系( $x, y$ ),分别表示应急空间在地图中的横、纵坐标。

应急环境是一个动态的环境。当 Agent 开始执行时,应急现场的一些特殊环境可能阻碍施援者的正常行动,或者对行动内容需进行适时的调整,有可能是危险源也有可能是其他一些不可预知的现场环境,从本质上来看,这些因素具有和救援对象类似的性质,因此也可以采用 Agent 的形式建立模型描述其行为特征。本文是将应急响应环境作为一个独立的 Agent 进行描述,以枚举(enum)的方式量化地图中的受灾程度,分别以 high(4), mid(3), low(2), none(1)表示应急环境受灾程度严重、中等、较轻和未受灾。

### 4.3 内、外域结合系统整体用例

本文提出的内、外域并行的应急推演方法是在应急过程中同时考虑救援人员和受灾群体的建模方法。在灾情信息不确定、受灾人群位置不明、受灾程度难以估计的情况下,救援人员只能

通过逐步搜索,寻找受灾人员。受灾群体的行为与救援人员行为类似,一方面要躲避突发事件发生形成的危险地带,另一方面要积极寻找安全地带并寻求救援人员的庇护,共同抵御来自突发事件的威胁。

如图 6 所示,在救援过程的 4 个阶段中,每个阶段内、外域相结合的方式均存在差异。总体的协同思想是信息的整合和分发,目标修正和任务重分配,以辅助决策系统的形式指导内、外域的应急救援过程。

### 4.4 内外域应急协作过程伪代码描述

本文仅提供施援者与被救者关键协作描述伪代码作为参考,主要描述其信息共享和能力增强,具体实现如下:

```

init rescuer,civtim,environment;//初始化
for(i=1000;i>0;i--){//仿真步数 1000
rescuer.searching(rescuer.location,destination,step);
//以步长为 step 更新搜救位置
if(dis(rescuer.location,victim.location)<=(R+r)){
//判断两者距离是否小于发现范围 R+r
if(victim.state==1){rescuer.ability=rescuer.ability-1};//被救者需要救援,施援者能力减 1
if(victim.state==2){rescuer.ability=rescuer.ability+1};//被救者可提供帮助,施援者能力加 1
if(victim.information!=0){//被救者可否提供信息
if(victim.information> rescuer.information){//判断被救者提供的信息与当前信息救援环境破坏程度
rescuer.information=victim.information;
rescuer.destination=victim.destination
}}}}//更新救援目标及破坏性等级

```

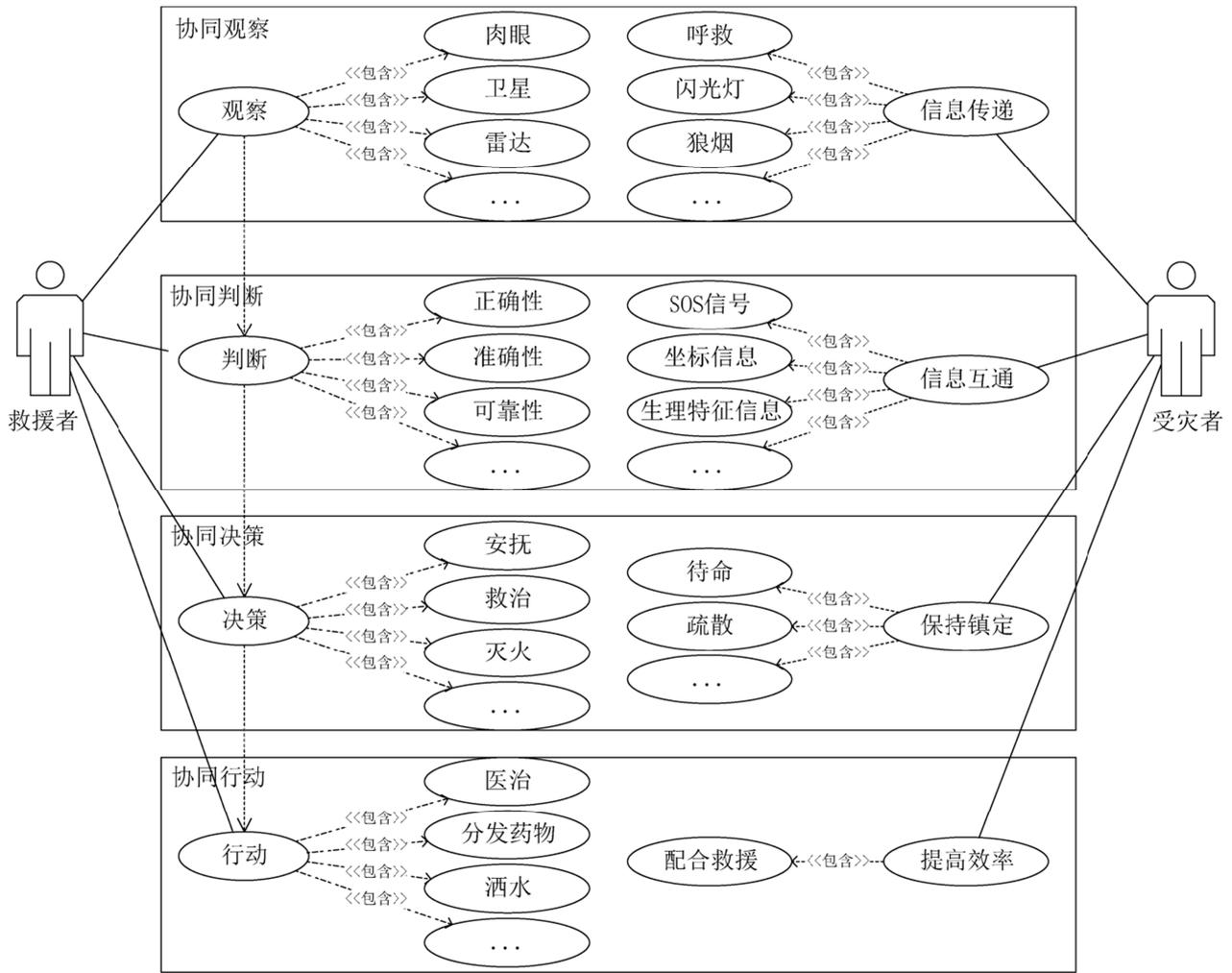


图 6 内、外域协作应急过程

Fig. 6 Internal and external areas cooperative emergency process

## 5 应用示例

### 5.1 想定背景

假定我国西南部 S 省在 20XX 年 5 月 14 日, 发生里氏 8.0 级大地震, 位于震中的某 Y 镇, 损伤惨重, 前往 Y 镇的道路损坏严重, 网络通信受损, 迫切需要应急响应。

本文将根据内外域应急救援理论展开应用验证。围绕 Y 镇地震主要灾害的区域划定边界, Y 镇内部应急事务属于内域应急, Y 镇外部为外域。如图 7 所示, 红色线条内部为内域, 外侧为外域, 救援队伍选择从 Y 镇北和西北道路进入 Y 镇救援。



图 7 内、外域划分及救援路径选择

Fig. 7 Internal and external areas division and rescue path selection

### 5.2 模型效果

如图 8 所示, 为了能够同时保障内部应急的疏散效率以及外部应急的快速抵达现场, 施援者放弃

带红×的 3 条拥挤的主要疏散道路，选择蓝色箭头的两条比较顺畅的道路。主要搜救目标分别为 A, B, C, D, 每经过一个搜救点时, 救援队的能力值-1, 部队 1 定制的搜救路线为(T1, A, B, C, D, T2), 部队 2 定制的路线与部队 1 相反, 两者相遇后该搜救目标完成。

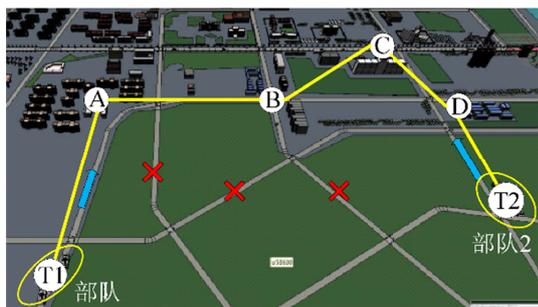


图 8 外域应急救援效果图  
Fig. 8 Rescue of external emergency response

地震的内域应急主要以疏散为主, 使受灾人群尽快离开危险区域, 防止地震引发的次生灾害在该地区造成更多灾民的伤亡, 如图 9 所示, 受灾者正在进行有序疏散。除正在疏散的受灾者外, 在救援路线旁分布着被救者, 当救援者与被救者距离小于救援距离  $R+r$  时, 对被救者的状态及信息进行分析, 判断是否需要救援者在该处进行救援。若其可提供救援帮助, 则救援者能力值+1; 若其需要帮助, 救援者能力值-1; 若非上述两者, 则安排其与疏散人群汇合。然后结合被救者提供的信息及该地区损毁等级计算待救援区域的救援顺序, 按照救援顺序重新规划搜救路线, 此时完成内、外域的协作应急响应。

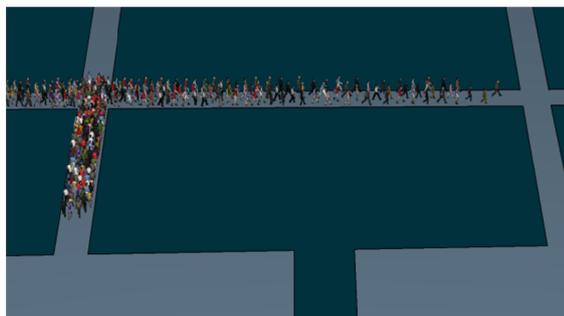


图 9 内部应急疏散效果图  
Fig. 9 Evacuation of internal emergency response

当部队 1 的能力值下降为 0 时, 依然可以进行搜救任务, 但是遇到需要救援的情况, 需向部队 2 申请帮助协作, 此时部队 1 的能力值+1, 部队 2 能力值-1; 部队 2 能力值为 0 的应对情况一致。当两个部队的救援能力值均降为 0 时, 需向应急指挥中心申请更多救援资源。此处完成了外部救援力量之间的协作。

效果分析如下: 由于受灾者提供了较为可靠的待救援信息, 救援路径发生变化, 原本笔直的路径变的复杂; 又因被救者状态不同, 救援者能力值会随着时间不断变化, 相比没有协作的单一情况, 该模型更符合内、外域联合救援的实际情况。此处完成了施援者与被救者的协同应急响应, 表现为信息的共享和救援能力提升, 该方法有效利用了被救者的能动性, 从而使得搜救过程能够覆盖的面积扩大, 从而提升搜救者搜索到更多被埋压人的概率, 挽救更多生命。

## 6 结论

本文研究了突发事件受灾群体行为和应急响应的内在机理, 建立内、外域结合的突发事件应急响应模型, 阐述了内、外域在应急过程中出现的协作行为。以 Multi-Agent 建模方法构建了内、外域结合的协同应急响应模型, 利用形式化语言对该系统进行描述。以内、外域结合的应急响应系统在应急救援过程中具备更强的针对性, 能够提高应急响应效能, 减少应急响应系统中的内耗现象, 对应急管理有较好的参考意义。

## 参考文献:

- [1] 舒其林. 非常规突发事件的情景演变及“情景-应对”决策方案生成[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(11): 936-941.  
Shu Qilin. Study on scenario evolvement and alternative generation of "scenario-response" decision-making in unconventional emergencies [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(11): 936-941.
- [2] 李明磊, 王红卫, 祁超, 等. 非常规突发事件应急决

- 策方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(3): 158-163.
- Li Minglei, Wang Hongwei, Qi Chao, et al. Research on Unconventional Event Emergency Decision-making Methodologies[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(3): 158-163.
- [3] 王慧敏, 刘高峰, 佟金萍, 等. 非常规突发水灾害事件动态应急决策模式探讨[J]. 软科学, 2012, 26(1): 20-24.
- Wang Huimin, Liu Gaofeng, Tong Jinping, et al. Study on Dynamic Emergency Decision-making Mode of Unconventional Water Disaster[J]. Soft Science, 2012, 26(1): 20-24.
- [4] Nau D, Au T C, Ilghami O, et al. Applications of SHOP and SHOP2[J]. IEEE Intelligent Systems (S1541-1672), 2005, 20(2): 34-41.
- [5] 屈云超. 密集人群疏散行为建模与动态特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- Qu Yunchao. Modeling Evacuation Behavior and Analyses of Dynamic Behavior Characteristics of Crowd[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [6] 谢康. 基于 DISC 性格模型的人员疏散行为建模与仿真研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
- Xie Kang. Research on Modeling and Simulation of Evacuation Behavior Based on DISC Character Model [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015.
- [7] 隋杰, 万佳慧, 于华. 基于社会力的应急疏散仿真模型应用研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1197-1201.
- Sui Jie, Wan Jiahui, Yu Hua. Research on Simulation of Emergency Evacuation Based on Social Force Model[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(6): 1197-1201.
- [8] 周健, 姜学鹏, 陈大飞. 公路隧道人员疏散心理行为调查及分析[J]. 消防科学与技术, 2014 (7): 814-817.
- Zhou Jian, Jiang Xuepeng, Chen Dafei. Investigation and analysis on human evacuation psychological behavior in road tunnel fire[J]. Fire Science and Technology, 2014(7): 814-817.
- [9] 何理, 蒋仲安, 穆娜娜. 地铁乘客特性与疏散行为特征相关性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015(9): 94-100.
- He Li, Jiang Zhongan, Mu Nana. Correlation analysis on properties and evacuation behavioral characteristics of subway passengers[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015(9): 94-100.
- [10] 何高奇, 郁明强, 蒋正清, 等. 基于 VR 火灾逃生游戏的应急行为评估系统[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(11): 2796-2803.
- He Gaoqi, Yu Mingqiang, Jiang Zhengqing, et al. Emergency Behavior Assessment System Based on VR Fire Escape Game[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2796-2803.
- [11] Huang Y Y. Modeling and simulation method of the emergency response systems based on OODA[J]. Knowledge-Based Systems (S0950-7051), 2015, 89(C): 527-540.
- [12] 黄炎焱, 何新, 梁魏, 等. 基于 DI-GUY 的群体应急疏散建模仿真方法研究[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(4): 409-416.
- Huang Yanyan, He Xin, Liang Wei, et al. Modeling and Simulation Method on Crowd Emergency Evacuation Based on DI-Guy[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(4): 409-416.
- [13] Cheng Y, Zheng X. Emergence of cooperation during an emergency evacuation[J]. Applied Mathematics & Computation (S0096-3003), 2018, 320(期): 485-494.
- [14] Cirillo E N M, Muntean A. Can cooperation slow down emergency evacuations?[J]. Comptes Rendus Mécanique (S1631-073X), 2012, 340(9): 625-628