

团队控制号码

仅限办公用途

T1 _____

T2 _____

T3 _____

T4 _____

1924801

仅限办公用途

F1 _____

F2 _____

F3 _____

F4 _____

问题选择

D

2019年

MCM/ICM

总结表

(您团队的摘要应包含在电子提交的第一页中。)

在此页面上输入结果摘要。不包括
此页面上您的学校、顾问或团队成员的名称。

最近恐怖袭击的增加提高了全球对安全紧急疏散计划的需求。我们专注于解决世界上最大的艺术博物馆卢浮宫疏散造成的困难。由于游客数量多、种类多,疏散变得困难;因此,卢浮宫管理层希望有一个适应性强的模型,以便在考虑广泛的情况下探索一系列疏散计划。

在我们的计算网络分析中,我们将卢浮宫划分为几个部分,并构建了一个基于代理的模型来模拟每个部分的疏散情况。在开发了代理的逻辑后,我们对每个部分进行了模拟,以确定代理退出的经验率。为了连接各个部分,我们通过将建筑物表示为图表来抽象问题,从而使它能够根据网络流问题求解疏散计划所需的总时间。这种抽象的一个称为强对偶性的属性也确定了图中的瓶颈边缘。我们强调抽象的力量

我们模型的适应性;模拟堵塞的通道或新的秘密出口只是简单地去除和添加边缘。瓶颈识别是我们考虑公共安全的首要任务,以便在紧急情况下轻松找到有问题的区域。

我们的模型预测候选人疏散计划涉及所有 4 个公共出口可以在 24.34 分钟内疏散卢浮宫。此外,我们的瓶颈分析表明,虽然金字塔入口周围有许多瓶颈,但入口本身并不是瓶颈。我们还发现,在紧急情况下保留金字塔的这一特性至关重要,因为它可以为紧急救援人员建立通道并减轻

卢浮宫最具标志性的入口周围的公共安全问题日益增加。此外,我们发现确保黎塞留通道的安全对于疏散至关重要,因为它的安全与金字塔的安全直接相关。因此,保持这些入口开放和有用对于疏散时的速度和安全考虑至关重要。

总的来说,我们的模型非常强大,因为我们有能力对人类个体行为进行建模其次是建筑流动动力学的强大适应性抽象。我们模型的一个弱点是我们的理论保证是根据最坏情况给出的,这可能是更常见情况下实际疏散的上限。然而,我们认为这个弱点在疏散模拟中是可以接受的。



关注数学模型
获取更多资讯

团队 #1924801 问题 D:离开卢浮宫的时间: 计算网络分析

简介和背景信息

法国巴黎卢浮宫是世界上最大的艺术博物馆,2017年接待游客810万人次[1]。参观者的构成多种多样,其中 70% 的客人来自国际,来自美国、中国、巴西、英国等国家[1]。然而,法国境内的恐怖袭击事件也在不断增加[2],因此卢浮宫官员必须制定明确的紧急情况疏散计划。

主要的公共入口是地下两层的金字塔入口[3]。里希留通道入口、卢浮宫卡鲁塞尔入口和狮子门入口也是潜在的入口,尽管这些入口通常需要会员资格或预订。然而,紧急情况肯定会作为例外情况,允许使用额外的入口,以便快速安全地疏散游客。此外,还存在公众通常不知道的其他入口。一个自然的问题是,这些秘密入口是否提供足够的补偿,以证明通过向公众透露其位置而损害卢浮宫的安全是合理的。

由于这些秘密入口不为公众所知,因此需要一种适应性强且易于解释的模型,卢浮宫管理层可以用它来测试多个疏散计划。这包括可能打开秘密出口、考虑潜在的堵塞以及通常能够比较不同的疏散策略。由于游客、需要团结在一起的家庭以及难以快速移动的残疾人的语言障碍,游客人口的多样性也使得疏散变得困难。

问题的重述

我们的任务是解决为卢浮宫设计一个疏散模型的广泛问题,该模型允许探索一系列选项。为了阐明我们的目的,我们确定我们的主要目标如下:

- (1) 确定评估给定疏散计划效率的方法。
- (2) 根据上述评估,在不妥协的情况下制定最佳疏散计划安全。
- (3) 找出关键瓶颈和其他障碍,以实现更安全、更高效的疏散。
- (4) 确定额外出口或封锁路线对最佳疏散计划的影响。
- (5) 通过建议的政策和程序建议传达明确的实施计划强调安全的约会。

其次,我们还要考虑:

- (a) 游客人口结构的多样化 (口语、群体规模、残疾状况)对疏散和有用的反应或对策
- (b) 技术在协助疏散方面的潜在好处
- (c) 应急人员可能的部署路线
- (d) 模型对其他大型建筑的适应性



关注数学模型
获取更多资讯

一般假设

为了解决上述各种目标,我们经常做出假设和决策以使问题更容易处理。这些假设如下:

- 假设1:撤离者将严格按照自身利益行事。

疏散人员不会考虑对每个人来说都是全局最优的解决方案,而是会制定局部贪婪的解决方案,对疏散情况的紧迫性进行建模。

- 假设2:疏散人员“自然流动”。

在收到需要疏散的通知后,人员应前往并通过最近的出口,以便尽快离开建筑物,除非疏散程序和官员另有明确指示。

- 假设3:严格遵守程序。

人们通常会遵循卢浮宫管理部门提供的疏散计划。例如,他们将移动到疏散计划指定给他们的出口。

- 假设4:撤离人员安全且不在卢浮宫紧急事件的责任范围内管理团队离开大楼后。

虽然我们对卢浮宫内部的几何结构和环境了如指掌,但外部世界却是复杂多变的。由于这一事实以及各种各样的潜在疏散威胁,试图确保建筑物外人员的安全也被认为超出了我们的计划范围。

- 假设5:日益加剧的恐慌导致人们做出越来越次优或非理性的选择。

模拟个人在紧急疏散情况下的反应可以帮助我们理解我们的模型如何扩展到现实世界的情况。

- 假设6:除紧急情况外,在疏散情况下电梯是禁止使用的人员和残疾人。

电梯在紧急情况下可能很危险[5]。



- 假设7:可以通过适当的标牌和技术来缓解语言障碍多种语言,例如多语言电话应用程序。

卢浮宫目前的许多标志都不是用法语书写的,而是包含普遍理解的符号说明[6]。此外,为潜在的非法语撤离人员提供指示的软件包和手机应用程序很容易编写以适应不同的语言。

简介:定义和路线图

第一个定义

为了设计“有效的疏散计划”,我们必须首先定义“疏散计划”的内容以及如何“有效”。

我们将疏散计划简单地定义为疏散官员为每个疏散人员提供和执行的程序集合。我们允许程序以撤离者的位置和状态为条件;也就是说,不同情况下的两名疏散人员可能会被引导至两个不同的出口。最简单的疏散计划是完全遵循疏散人员的“自然流动”,即根据假设1和2,疏散人员向离他们最近的出口移动。

现在,为了衡量每个疏散计划的效率,第一个也是常见的方法就是



关注数学模型
获取更多资讯

估计根据给定的疏散计划完全清空建筑物所需的时间。然而,这种措施有些幼稚,因为它忽略了安全等因素,并且高度依赖于初始条件。例如,在大多数游客聚集在《蒙娜丽莎》周围的一天中,某项疏散计划可以最大限度地减少退出时间,可能会尝试将所有这些游客集中通过一个出口,这可能会因过度拥挤、践踏和暴民恐慌风险而危及安全。因此,这种“快速”疏散计划不一定是可取的。

作为时间度量的替代方案,我们考虑最大退出率,或者从数学上讲,退出撤离人员的时间导数的最大值。从表面上看,这似乎是相同的措施,因为完全疏散时间的减少必然意味着逃生率的增加,而时间的增加则意味着逃生率的下降。然而,这些是直接受时间影响的平均退出率,而不是最大退出率。假设撤离率在疏散中间的某个时间达到峰值,则撤离人员与所经过时间的关系图将类似于图 1。

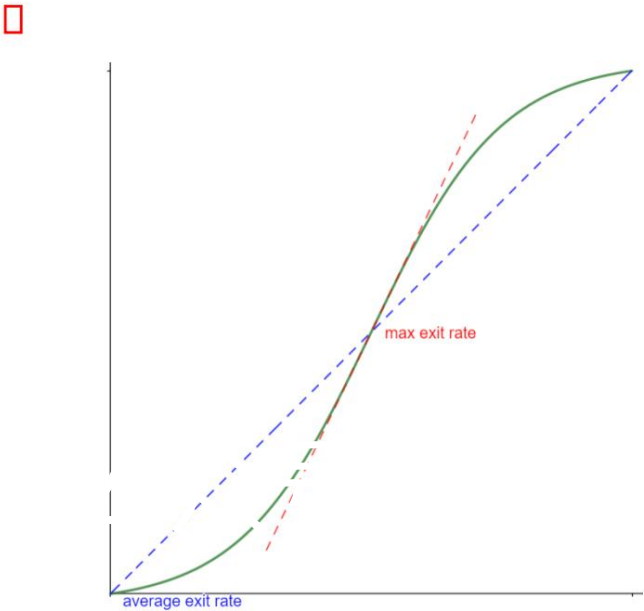


图 1:示例图 :撤离人员到经过的时间

使用最大疏散率的好处在于,虽然它仍然具有“快速”疏散的价值,但主要重点是允许更大的人流。换句话说,在优化最大撤离率时,我们实际上优化了撤离者通过卢浮宫的吞吐量,而不是输出。优化最大退出率的价值有两个:1)如果卢浮宫容量很大,平均退出率应接近最大退出率; 2)如果卢浮宫容量较低,更高的吞吐量应该会降低拥挤风险。因此,吞吐量最大化与公共安全最大化直接相关。

建模路线图

我们现在着手开发一个模型,可以根据我们的最大疏散率衡量标准充分评估、设计和优化疏散计划。为了实现这些目标,我们实施了一个两阶段模型。

第一阶段旨在使用基于计算代理的建模来了解卢浮宫各区域内当地疏散人员的流动动态。第二阶段将各个部分的信息整合到一个流动网络中,我们可以根据该网络评估和优化疏散计划。为了澄清这一点,我们的模型的路线图由以下步骤描述:

- 1. 将卢浮宫的每一层划分为更小的区域。
- 2. 在 NetLogo 中开发基于计算代理的模型来研究局部疏散现象和卢浮宫每个分区/部分的疏散流程。



关注数学模型
获取更多资讯

- 3. 开发一个全球网络,将卢浮宫的每个分区/部分建模为节点、通道
它们之间作为边缘,疏散人员作为重量流动。
- 4. 执行相关图形算法以最大化疏散人员流量并预测添加或移除的效果
荷兰国际集团的边缘。
- 5. 用现实世界的术语解释局部模型和图算法的结果并推断出有用的结果
根据这些结果提出政策建议。

第一部分 :局部剖面模型

本节的主要内容是路线图中描述的步骤 1 和 2。具体来说,对卢浮宫进行分区并开发局部疏散模型。

分区部分

我们在讨论卢浮宫疏散模型时发现的主要挑战是理解博物馆复杂的布局或几何形状所涉及的理论和计算困难。卢浮宫由嵌套的画廊布局、通往其他楼层的多个入口以及多个出口点组成,这使得除了非常简单的整个建筑疏散流程模型之外的任何东西都变得困难。此外,随着卢浮宫每天接近数十万游客,整个建筑的模型在计算上开始变得不可行。因此,任何纯粹的计算建模范式都将被简化为仅包括非常简单的行为以进行补偿。然而,通过将博物馆划分为更小、更简单的部分来单独建模,我们减少了建模中的计算和理论复杂性,从而可以对现实世界的行为进行更丰富、更有意义的推断。

我们选择通过将每个楼层分为图 2 中划分的五个小部分来对卢浮宫进行建模,并标记部分 AE (例如,底层的左下部分将标记为“底层 A”)。此外,拿破仑大厅有一个任何楼层都不存在的金字塔入口 (如图 3 所示),并且实际上是该楼层唯一相关的分区。我们将其表示为“Napoleon P”。

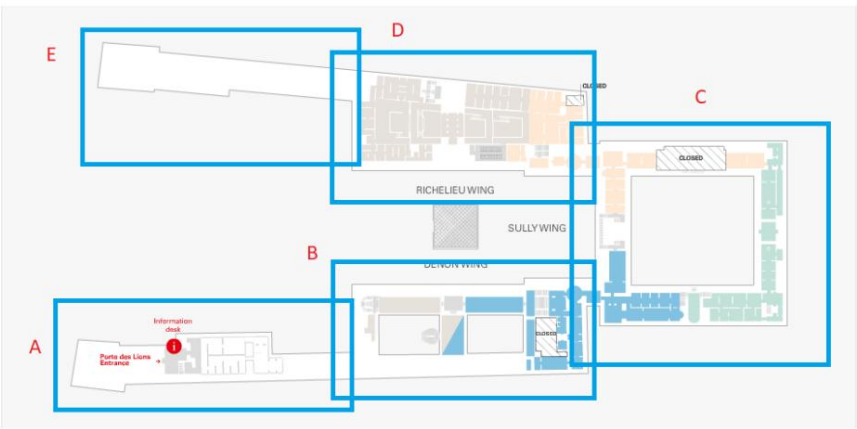


图 2:我们将卢浮宫的每一层分为五个部分,以保证建模的计算和理论可行性。从底部开始逆时针移动,它们分别标记为AE。

发展

我们的局部疏散模型 (以下称为局部区域模型)是在 NetLogo 中开发的,NetLogo 是一种基于代理的建模软件,旨在研究 Uri Wilensky [7] 构建的复杂系统。主要思想



关注数学模型
获取更多资讯

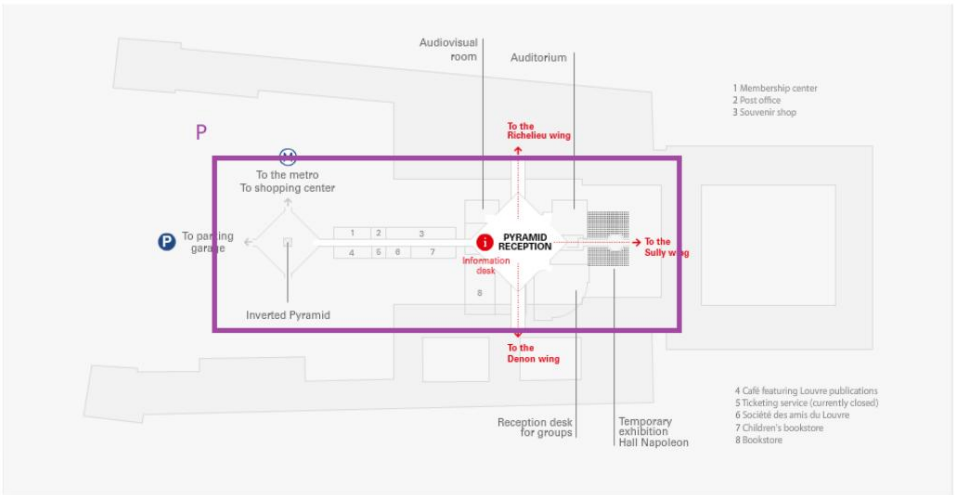


图 3:拿破仑大厅的地板上有一个独特的金字塔形分区,将表示为“Napoleon P”。事实上,这是拿破仑大厅唯一相关的部分。

基于代理的建模的一个特点是,代理是具有特定的、明确定义的目标的单个单元。虽然单个智能体的行为通常很简单,但智能体系统的复杂行为通常超过其各部分的总和[9]。在这个问题的背景下,由于每个人的目标都是成功疏散,因此基于代理的模型非常适用。此外,图 4 显示生成的界面非常易于使用和解释。特别是,该图显示了我们对于 Ground D 部分的表示,特别是其复杂的画廊系统。白色特工在绿色 (可通行)和黑色 (不可通行)网络上行动,代表疏散人员在各个画廊中寻找出路。蓝色斑块代表更多疏散人员进入的入口,红色斑块代表疏散人员离开的出口。代理的具体行为逻辑如图5所示。注意,每个代理都配备了可变的panic属性和固定的速度属性。有关速度属性的更多信息包含在下一节中,而恐慌属性则在此处进行解释。

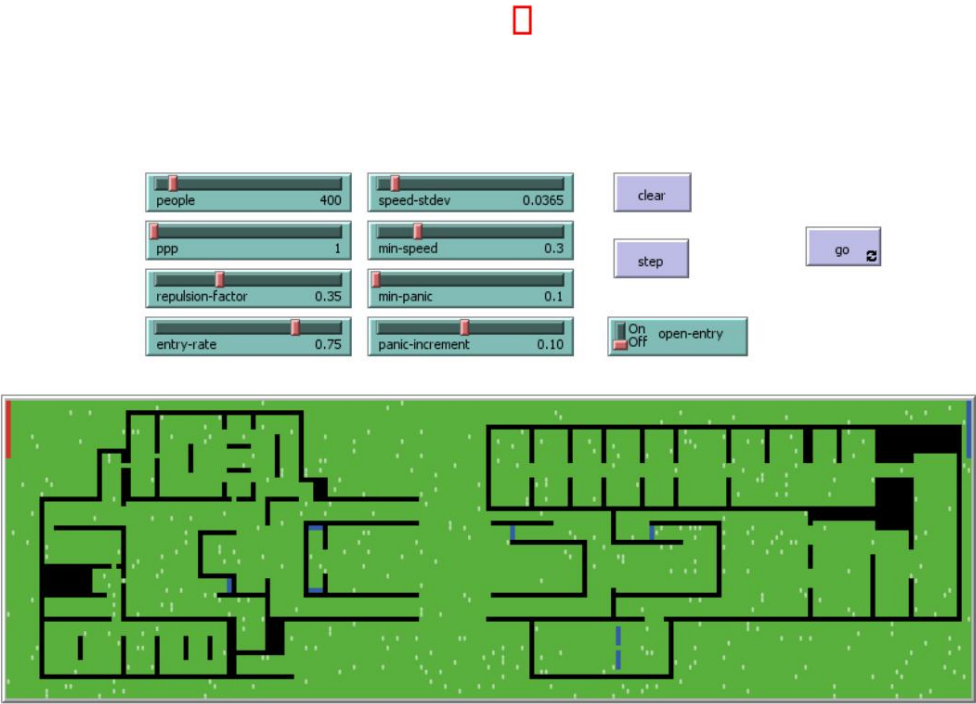


图 4:D 层复杂画廊的示意图。

图 5 中的逻辑与我们的假设一致,即每个代理都按照自己的利益行事,例如



关注数学模型
获取更多资讯

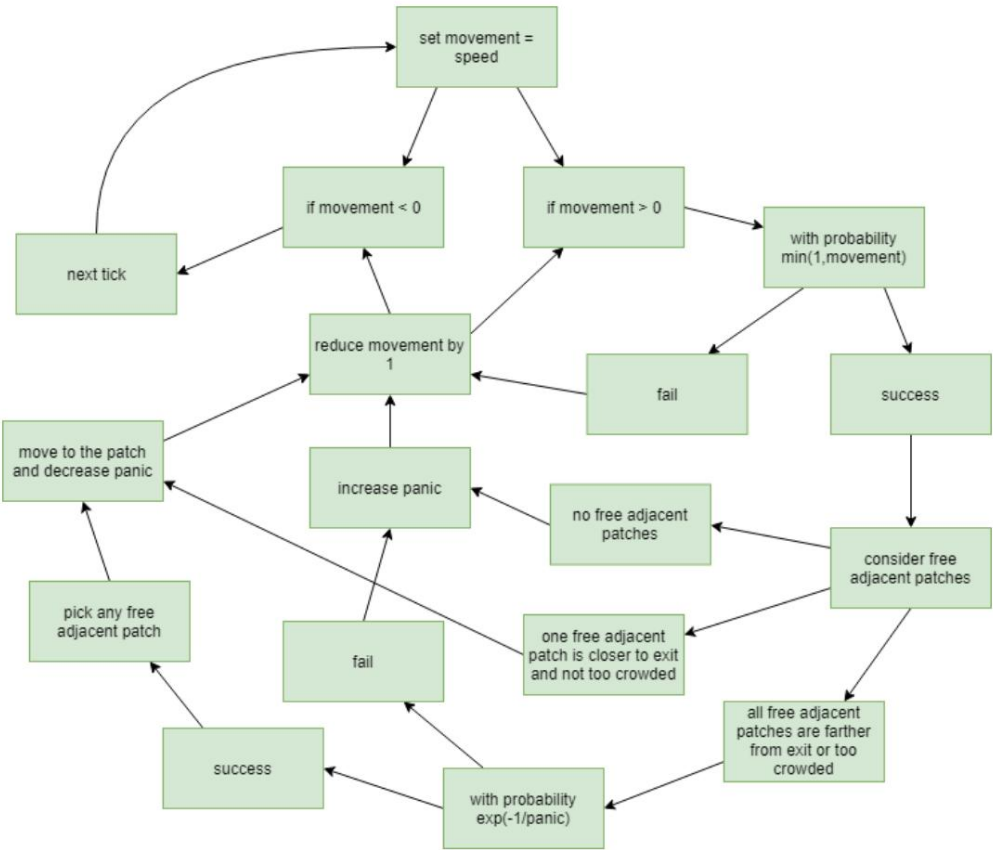


图 5:描述单个代理的行为逻辑的流程图。

朝着最近的出口采取局部最优的步骤。然而,仅这个因素就会导致纯粹的确定性行为,而这种行为似乎无法准确地模拟人类的运动,尤其是在紧张的情况下。为此,我们添加了一个恐慌参数来表示个人紧张感的增加,因为疏散人员因人群密度高而无法移动,因此会四处走动,寻找其他出口路线。虽然很难准确地量化恐慌,但根据我们对恐慌的假设将其影响纳入模型并不困难。为此,我们从称为模拟退火的概率技术中获得灵感[14]。

根据这种通用技术,我们选择在代理每次静止时增加其恐慌程度,并计算pm,移动到距离目的地稍远的补丁的概率,通过

$$pm = \exp(- \frac{1}{恐慌})$$

我们在一般模拟退火技术背景下对pm的选择进行了研究,以与真实的物理系统进行类比 [14]。此外,它很有用,因为对于恐慌的积极价值,

$$\lim_{恐慌 \rightarrow 0} pm = 0, \lim_{恐慌 \rightarrow \infty} pm = 1$$

这意味着pm的所有值实际上都可以用作概率。

最后,我们应该提到图 4 中出现的滑块参数。人员滑块指的是房间中存在的初始代理人数。缩放此参数会更改初始条件。 ppp 滑块是指每个可通过补丁的最大代理密度。增大此参数会增加最大允许拥挤度。排斥因子滑块与每个代理在本地寻路过程中确定的“太拥挤”相关。增大此参数会降低拥挤容忍度。 speed-stdev 滑块指的是代理群体中速度属性的方差,而



min-speed 是指代理可以具有的最小速度属性。恐慌增量滑块指的是每个代理在无法移动时变得更加恐慌的程度,而最小恐慌指的是代理可以拥有的最小恐慌属性。进入率和开放进入与通过蓝色进入补丁产生的新代理有关。

物理可解释性

为了确保我们的模型具有真实的、物理上可解释的结果,我们采取措施确保我们计算的速率具有合理的物理对应物。为了放大卢浮宫的尺寸,我们使用谷歌地图来查找卢浮宫各个角落的全球坐标。图 6 显示了我们选择用作参考的点。有了这些坐标,我们使用一个名为 GeoPy [10] 的 Python 包来计算距离,这些距离的示例也显示在图 6 中。

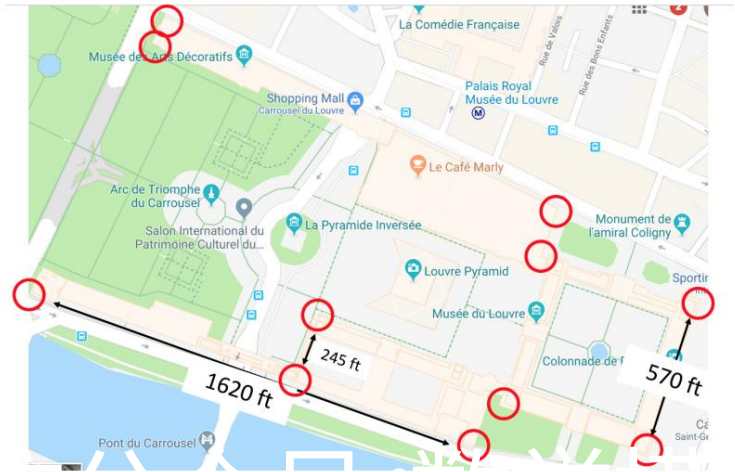


图 6:Google 地图上 ping 的点,以及一些示例距离。

为了确定代理的速度,我们参考了 Yosritzal 等人所做的研究,他们模拟了印度尼西亚的海啸疏散[8]。鉴于我们也在对疏散进行建模,我们选择合并他们的结果。他们的结果给出了疏散期间个人的平均步行速度 = 4.656 英尺。因此,我们缩放每个小节的表示,使一个补丁为 4 英尺 x 1.419 4 英尺。因此,模型进程中的一个刻度 (Netlogo 中的单位时间)大致相当于现实世界时间中的一秒。我们将此视为合理的近似值,因为英尺转换 $\frac{m}{s}$ 允许代理在基本方向和对角线方向上移动。鉴于这些运动分别代表 4 英尺运动或 $4\sqrt{2} \approx 5.66$ 英尺运动,因此将每秒 4.656 为每个刻度 1 个补丁是合理的。此外,为了对不同人群的不同步行速度进行建模,假设年龄在 20-60 岁之间的人口规模较大,我们用平均值 4.656 ft/s 和标准差 0.170 ft/s 的正态分布来近似步行速度的分布。该分布源自[8]对20-60岁人群的统计。

拐角瓶颈:转弯的代价

在讨论进一步的结果 (稍后将详细介绍)之前,讨论拐角和转弯的效果很重要。对人员行为的检查表明,转弯行为和拐角的简单存在对局部截面模型中的最佳疏散流构成了重大瓶颈。此外,转弯和拐角的普遍存在使得分析其影响对于出口吞吐量的整体全球分析非常重要。

考虑到个体代理希望采取最短路径到达出口,压缩现象开始在两个角和正交出口处显现,其中正交出口被定义为垂直出口



关注数学模型

获取更多资讯

到特工进入的入口走廊。图 7a 给出了 A 地狮子门出口处这种压缩现象的示例,我们同样可以清楚地看到单个特工想要尽快逃离的效果:三角形楔形结构限制了最大向外流动,而不是限制了最大流动。图 7b 描述的线性流。虽然我们的代理的排斥力显着减轻了影响,但效果仍然很显着;图 7a 建模的正交出口的最大输出流量为每秒 4.2 个代理,而图 7b 建模的线性出口的最大输出流量接近每秒 4.8 个代理,增加了 14%。

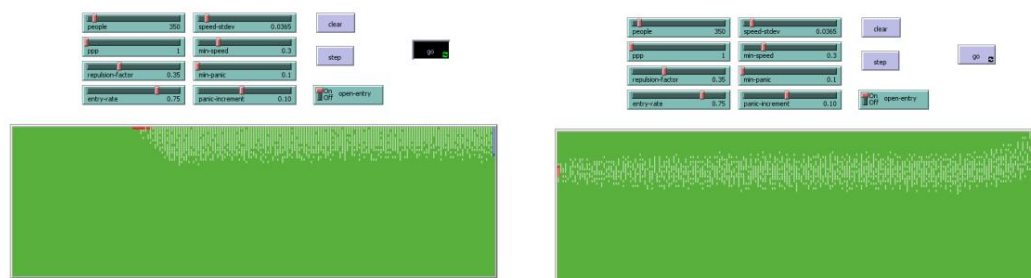


图 7:左 (a):描述打开出口流的效果,每秒总共有 4.2 名疏散人员。右 (b):描述线性退出流,每秒总共有 4.8 个代理。

这种现象可以扩展到大多数转弯,当检查图 8a 中的拐角时,这种扩展变得很明显。图8a代表的模型的输出流量为每秒2名疏散人员,而图8b代表的模型的输出流量为每秒2.6名疏散人员,增加了30%。

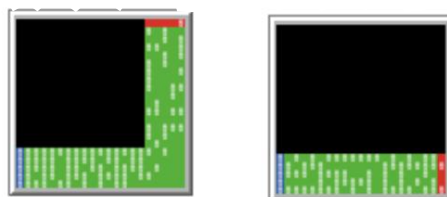


图 8:左图 (a):描述了拐角对出口流量的影响,每秒总共有 2 名疏散人员。右 (b):描述了用于比较的线性输出流,每秒总共有 2.6 名疏散人员。

我们知道狮子门出口的方向无法实际改变以匹配入口的方向。然而,我们提出的一项政策建议是配备应急人员来引导疏散人员的交通,使他们的流程更接近 7a 而非 7b 以及 8a 而非 8b。此外,未来建造的任何秘密出口都应考虑到这种现象,即面向最大的开放走廊。我们将在后面的章节中详细介绍进一步的结果和进一步的政策建议,我们通过这个角落分析来演示 NetLogo 在理解局部疏散现象方面的实用性。



第二部分:全球流动模型

本节通过使用网络流公式抽象问题、求解最佳解决方案以及讨论模型适应性来解决路线图的第 3 和第 4 部分。

抽象为网络

我们使用图表来表示不同的部分以及它们之间的联系。图 $G = (V, E)$ 是一组顶点 V 和边 E ,表示顶点之间的连接。也就是说,一条边可以表示为一个有序对 (u, v) ,这意味着该边从 $u \in V$ 开始,到 $v \in V$ 结束。在我们的问题中,我们让预定义的更简单的部分代表顶点,并让这些部分之间存在的路径代表边。这些通道可以是走廊或楼梯。通过检查平面图 [3],我们确定了所有楼梯的位置及其相连的分段。图 9 显示了生成的图形表示。注意,节点由两个字母表示,例如 LA,对应“下地A”。其余节点对应“Napolean”:N、“Ground”:G、“First”:F 和 “Second”:S,类似地。作为参考,图 2 中显示了 A – E 字母。

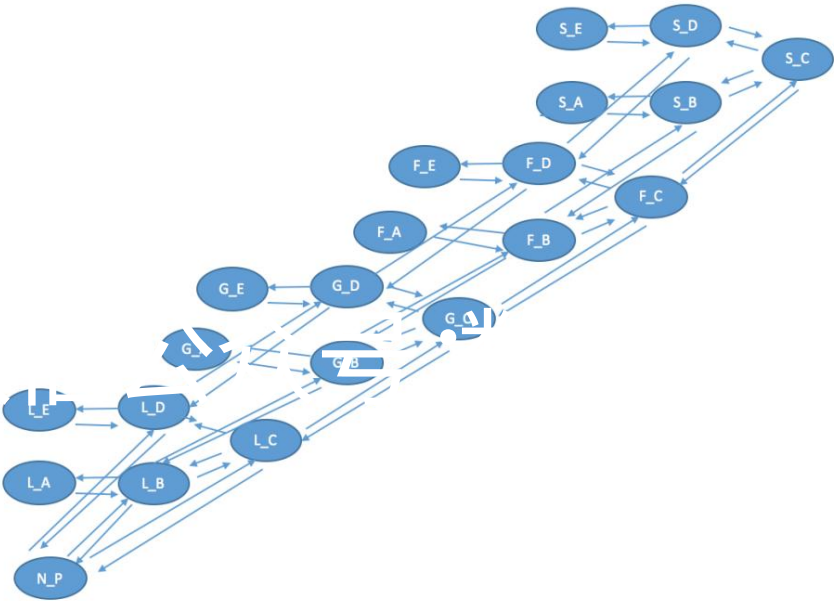


图 9:显示所有可能边的通用图

网络流量公式

为了在抽象环境中表述这个问题,我们引入了网络流问题[13]。
特别是,我们讨论了最大流量问题并明确讨论了与我们模型连接。
考虑一个通用有向图 $G = (V, E)$,其源顶点 $s \in V$ 和汇顶点 $t \in V$ 。此外,在边缘上定义容量函数。如果我们定义一条有向边 $e = (u, v)$,则 $c(u, v) : E \rightarrow \mathbb{R}_+$ 。网络上的 $s - t$ 流是满足以下约束的函数 $f(u, v) : E \rightarrow \mathbb{R}_+$:

斜对称: $f(u, v) = -f(v, u), \forall (u, v) \in E$
容量: $f(u, v) \leq c(u, v), \forall (u, v) \in E$
平衡: $f(u, v) = 0, \forall v \in V \setminus \{s, t\}$



关注数学模型
获取更多资讯

请注意平衡约束如何排除 s 和 t 。这是因为流的值 $|f|$ 定义为

$$|f| = \sum_{v \in V} f(s, v) = \sum_{v \in V} f(v, t)$$

最大流量问题要求找到给定网络上的最大值流量。直观上,流动问题可以被认为通过管道网络输送水。如果我们将流量视为水,将管道视为边,将顶点视为交汇点,那么偏斜对称约束表示网络上跨边发送的水量相当于沿相反方向发送的负流量。容量限制是指管道可以流过的水量是特定的。

最后,平衡约束规定流经任何非终端连接点的每个单位的水也必须流出。那么问题来了,单位时间内可以通过管道从源头输送多少水到水槽?具体示例如图10所示。

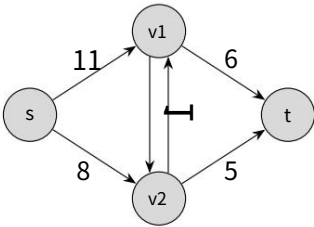


图 10:边缘写有容量的示例网络。最大流量 = 11 (在顶部路径上发送 6,在底部路径上发送 5)。

为了将我们的疏散问题转化为网络流的具体情况,我们需要对前面描述的一般网络结构进行轻微修改。例如,经典的网络流问题假设单个源和单个接收器。然而,疏散期间卢浮宫的初始状态会让游客从博物馆的多个区域出发。我们通过创建连接到博物馆每个部分的“超级源”顶点来解决这个问题。对于节点 r ,我们将 $c(s, r)$ 设置为该部分的初始种群。当我们计算最大流量时,这组额外的边最多可以将房间的初始人口作为流量发送,之后从一个部分到另一个部分的移动会限制移动。同样,我们添加了一个“超级水槽”,每个部分都会有一个定向边缘,允许人们离开博物馆到达“超级水槽”。这种结构将我们的问题简化为最大流问题。在为我们的特定网络生成答案方面,有许多经过充分研究的算法,它们不仅给出了最大流量,还给出了边缘上的流量分配。

特别是,我们使用 Edmonds-Karp 算法 (1972) [15] 来解决网络上的最大流量。

一旦我们有了最大流量值 m ,我们就可以解释为给定的疏散计划允许每秒最多从卢浮宫疏散 m 人。这是约束下的最优速率;如果呼叫疏散时有 p 人在卢浮宫,则疏散卢浮宫的最短时间 t_{min} 为

$$t_{min} = \frac{p}{m}$$

t_{min} 的值给了我们一个启发式的方法,我们可以通过它对不同的疏散策略进行排序。虽然这也给我们留下了一些空间来讨论 t_{min} 低估了实际时间的程度,但我们仍然可以相对于彼此对策略进行排名。此外,当我们讨论瓶颈在哪里时,我们可以对 t_{min} 实际上是否明显低估了所需时间进行更多评估。

寻找瓶颈

我们减少的一个很大的优点是它使我们能够轻松找到瓶颈。为了理解如何实现,我们需要引入图上的另一个抽象问题:最小割问题。与最大流问题类似,我们有一个图 $G = (V, E)$,一个源顶点 $s \in V$ 和一个汇顶点 $t \in V$ 和 a



关注数学模型
获取更多资讯

容量函数 $c(u, v) : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ 。 $s - t$ 割由边 $C \subseteq E$ 的子集定义,这样从 E 中删除 C 会产生一个断开的图,其中 s 和 t 位于不同的分量中。削减成本由下式给出

$$\text{成本} = \sum_{(u,v) \in C} c(u, v)$$

最小割问题要求以最小成本进行割。引入最小割问题的原因是,通过最大流最小割定理[16],它与最大流问题密切相关。该定理表明网络中从 s 到 t 的最大流恰好等于最小 $s - t$ 割。此外,由于该定理是线性规划中所谓的强对偶性 [17] 的结果,因此最优解表现出一种称为互补松弛的属性。在这种情况下,互补松弛表示最小割中的边正是 G 中流量等于其最大容量的那些边。因此,我们可以将其解释为: G 中具有最大流的边正是对应于瓶颈的边的集合。

调整我们的模型

由于我们不知道任何秘密出口的确切位置,因此我们被迫在需要打开秘密出口的情况下保持模型非常灵活。这一要求凸显了我们使用图和网络流进行抽象的力量。例如,在某个部分中添加秘密出口可以用从该顶点到超级汇的一条边来表示,而部分之间的阻塞则简单地通过删除相应的边来表示。这种移除边缘的技术还可以表示通过移除超级水槽的相应边缘来关闭额外的边缘,例如黎塞留通道。尽管超级源没有在图中明确示出,但它也可以用于适应性。正如开发部分所讨论的,我们使用超级源顶点来喂养初始人群。因此,卢浮宫工作人员可以在整个博物馆内设置不同的游客初始分布,以查看疏散程序的结果。

卢浮宫管理层还可以试验 NetLogo 模型中的参数;例如,他们可以观察恐慌率增加对个人和群体的影响。或者,他们可以故意将某些代理设置为比其他代理慢得多,并用它来代表禁用的 `evac-uees`。通过这些参数的灵活性,管理层可以测试不同的疏散计划以及人类行为对这些计划的影响。这样,他们就可以根据不同的疏散情况,决定部署一套疏散策略。

值得注意的是,尽管我们专注于卢浮宫布局的细节,但我们的模型非常适合卢浮宫以外的建筑物和楼层布局。事实上,模型中唯一需要更改以响应不同建筑布局的部分是局部剖面模型;在这种情况下,必须构建新建筑物的楼层部分的 NetLogo 表示,并且在这些 NetLogo 表示中表示不同的疏散计划。然而,我们断言,这些是使我们的模型适应新建筑所需的唯一变化,特别是因为全局流模型不特定于任何特定建筑,只需要准确识别边缘权重 (我们提供的一个例子)在附录A中。

第三部分 :结果、讨论和建议

在本节中,我们通过讨论以下主题来解决路线图的第 5 步

- 1. 金字塔不是瓶颈
- 2. 黎塞留通道对疏散程序至关重要
- 3.地面D是一个瓶颈
- 4.布雷斯特论



关注数学模型
获取更多资讯

5.残差网络为应急人员提供路径建议

六、政策建议总结

在本节中,我们讨论可能的疏散计划和我们的模型结果。对于我们的主要模型运行,我们选择允许主金字塔入口、黎塞留通道入口、卢浮宫卡鲁塞尔入口和狮子门入口作为博物馆出口,因为它们都是公共的,不用于富裕地区 [12],并且通常用过的。特别是,我们发现相应的路段是下层 D 区的里希留通道、E 区的卢浮宫卡鲁塞尔和 A 区的狮子门。考虑到这些信息,我们的疏散计划会为每个路段计算最近的出口路段就欧几里得距离而言,并将所有人送向那个出口。对于此设置,我们计算出每秒 17.8 人的吞吐量。

作为参考,由于卢浮宫 2017 年有 810 万名游客[1],而卢浮宫周二不开放 [4],因此平均每天约有 26,000 人次。现在,虽然最繁忙的一天的游客量可能明显高于平均水平,但所有游客不太可能同时出现在卢浮宫。因此,我们将这 26,000 人作为疏散中最坏情况的代表,但这很容易在我们的模型中进行调整,如前所述。如果我们能够找到整个时间段内人口分布的信息,我们就可以对这个数字做出更好的判断,但我们的实验只是使用 26,000 人作为人数。此外,在没有有关人员分布的额外信息的情况下,我们只是将他们均匀地分配在房间内。尽管如此,这是该模型的一个易于调整的部分。通过这些决定,该疏散计划给出了

最小时间= $\frac{26000}{17.8} = 1460.67 \text{ 秒} = 24.34 \text{ 分钟}$

要查看瓶颈,请参阅图 11 的可视化。LD、GA、

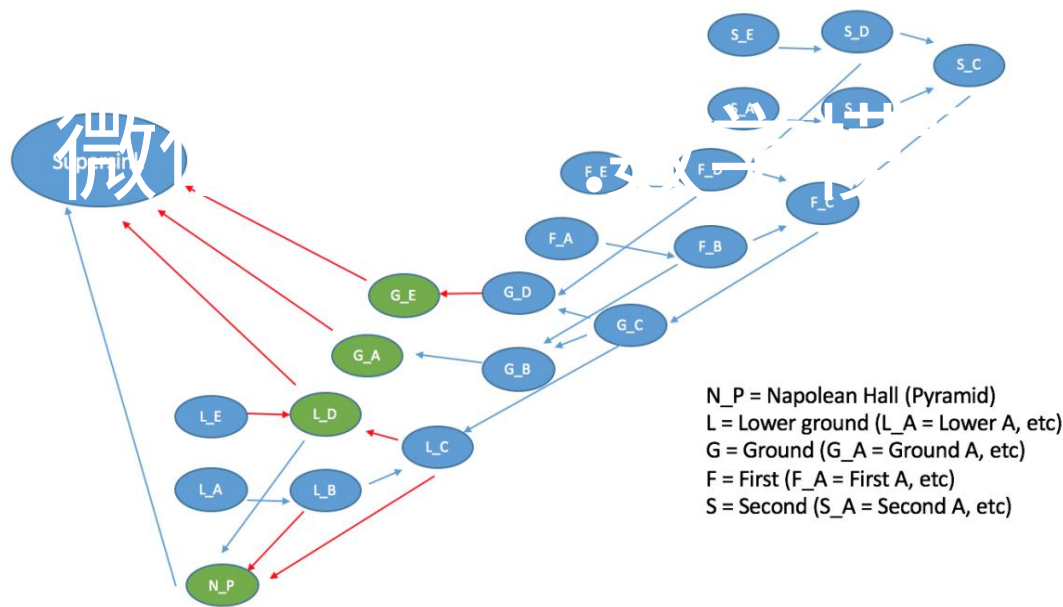


图 11:我们构建的图上瓶颈的表示。绿色顶点有一个到超级汇的直接出口边缘。红色边缘标识最小割中的边缘,代表向外退出流的固有瓶颈。任何缩短卢浮宫疏散时间的尝试都应该从这些边缘开始。

和GE到超级汇。这些边缘分别对应于 Passage Richilieu、Portes Des Lions 和 Carrousel du Louvre 入口。这意味着这些部分的全局瓶颈实际上是在建筑物外,而不是到达那里。这与金字塔的NP顶点形成对比。

对于金字塔来说,瓶颈实际上是到达金字塔而不是穿过金字塔。特别是, LB和NP之间以及LC和NP之间的楼梯构成了该特定疏散计划的瓶颈。



关注数学模型

获取更多资讯

金字塔不是瓶颈

拿破仑 P,或者更通俗地说金字塔,是为公众提供的主要入口。此外,它还受到一组通往地面的楼梯的限制。因此,我们直观地预期从 Napoleon P 向外延伸的边 (或超级汇)是上一节中介绍的最小割的一部分,因此是需要进一步分析的瓶颈。

事实证明并非如此。金字塔本身并不是瓶颈;金字塔本身并不是瓶颈。通过检查最小割,我们看到,凭借从较低地面 C 到拿破仑 P 以及从较低地面 B 到拿破仑 P 的边缘,实际上进入代表真正瓶颈的金字塔,而不是金字塔本身。

因此,我们对金字塔的政策建议理论上很简单:提供更高的金字塔访问率。然而,实际上,我们知道这很困难,需要建造新楼梯或拓宽现有楼梯。更可行的政策建议是优先开放金字塔周围的秘密出口,这可能会为金字塔的入口提供缓解。

更具体地说,如果地下 B 或地下 C 存在秘密出口,则考虑到我们当前的疏散计划,这些出口将提供最大的救济。我们将在下面的章节中了解为什么金字塔出口对给定疏散计划的效果有如此大的影响。另请注意,我们仅在博物馆工作人员决定开放秘密出口的情况下才推荐这些位置,因为建议建造新的公共出口超出了本项目的范围。

黎塞留通道对疏散程序至关重要

我们的疏散计划中确定的最重要的部分是较低的地面 D,因为它在进入金字塔时提供了缓解作用。我们看到这一点不仅是因为黎塞留通道是我们最小切割的一部分,还因为删除了连接较低地面 D 和超级汇的代表性边缘 (表示为(LD, S)),导致我们的模型每秒疏散人数减少 6.8 人吞吐量。这将我们最初估计的每秒 17.8 名疏散人员减少到每秒 11.0 名疏散人员,我们估计的总疏散时间从 24.34 分钟减少到 39.39 分钟,疏散时间惊人地增加了 64%。然而, (LD, S)每秒可疏散7名人员;每秒 0.2 名疏散人员的差异是由于我们的最大流量网络中的重新路由造成的。实际上,这是我们模型适应性的一个例子,我们在前面的部分中详细介绍了这一点。

然而,更重要的是,我们观察到 (LD, S)的去除极大地改变了我们的最小切割;特别是,从金字塔到超级汇的边缘 (表示为 (P,S))成为瓶颈点。

对于图表来说,这是无关紧要的;输出流就是输出流,无论它来自哪里。然而,从质量上来说,金字塔周围的安全问题比我们其他出口瓶颈周围的安全问题更为严重。金字塔的玻璃成分是一个令人担忧的问题。另一个原因是,鉴于金字塔作为卢浮宫标志和主要公共入口的地位,一旦发生外部攻击,它很可能首先成为攻击目标。因此,保护黎塞留通道也是保护金字塔的一种形式。

因此,我们的政策建议是加强安全部署,重点关注黎塞留通道的安全。这与我们对黎塞留通道进行建模的事实非常吻合,以每秒 7 名疏散人员的速度,成为我们四个公共入口中最大的出口吞吐量。此外,它在减少金字塔入口压力方面的额外作用对于某些紧急情况下的安全疏散非常重要。

地面 D 是一个瓶颈

最小切割中限制性最强的边,也就是疏散人员流出流中最强大的瓶颈,是连接地面 D 和地面 E 的边。事实上,这条 DE 边实际上只允许每秒 1.8 名疏散人员的最大吞吐量,当给定连接地面 D 和地面 E 的走廊宽度 (保守地以 4 个块或 20 英尺宽建模)时,这是一个意想不到的数字。

为了理解这种差异,我们求助于我们的局部模型来获得洞察力。我们给定的疏散计划要求 D 地块的所有疏散人员向 E 地块的卡鲁塞尔杜卢浮宫出口移动。但是,



关注数学模型
获取更多资讯

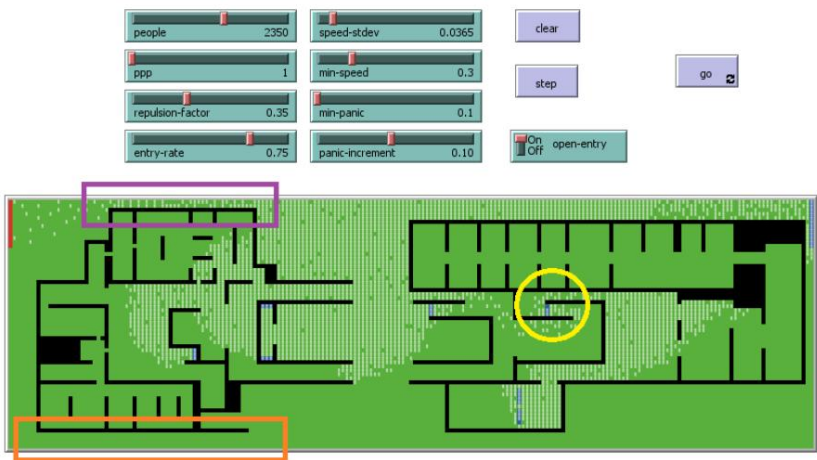


图 12:地面 D 瓶颈的描述。楼梯和其他走廊等来源标记为蓝色,而出口走廊标记为红色。最突出的瓶颈部分用紫色框表示,而未使用的路径则用橙色框表示。次要 (角落)瓶颈的示例以黄色圈出。

他们的前进受到狭窄走廊和复杂嵌套走廊的复杂转变的阻碍,如图4所示。因此,被要求穿过D地前往通往E地的走廊的疏散人员被其他疏散人员阻挡,导致瓶颈上述情况以及人们的恐慌程度不断增加。这是特别有问题的,因为接地 D 是通向接地 E 的唯一部分;请注意,在图 12 中,有多少疏散人员被困在中间的公共区域,以及相应地很少疏散人员能够通过出口。此外,恐慌程度的加剧、过度拥挤以及由此产生的公共安全危险,导致了超出限制出口流量的困难。

为了理解地面 D 瓶颈对全球总流量的定量影响,我们注意到,由于地面 D 是唯一一连接到地面 E 的部分,因此从卡鲁塞尔杜卢浮宫出口流出的出口流量定义为 $\min(F_e, F_d)$,其中 F_e 和 F_d 分别是卡鲁塞尔杜卢浮宫流出的流量 (以每秒疏散人数为单位)以及从地面 D 到地面 E 的流量。实验结果得出 $F_e =$ 每秒 4.2 名疏散人员, $F_d =$ 每秒 1.8 名疏散人员,因此从卡鲁塞尔杜卢浮宫流出的总出口流量为每秒 1.8 名疏散人员。因此,D 地的布局直接导致每秒净损失 2.4 名疏散人员。因此,从理论上讲,消除 F_d 的限制可以将全球疏散人数从每秒 17.8 名疏散人员提高到每秒 20.2 名疏散人员,将总疏散时间从 24.34 分钟提高到 21.45 分钟。这是我们模型中发现的最大的此类潜在改进,因此对于了解如何加强卢浮宫疏散至关重要。

我们进行的另一项理论实验是将卢浮宫卡鲁塞尔出口替换为 D 地块大小相同的出口,恰好放置在疏散人数最多的地方 (图 13)。将这个新出口称为“D 通道”。通道地面 D 的布置导致出口流量为每秒 4.8 名疏散人员,而卡鲁塞尔杜卢浮宫出口提供每秒 1.8 名疏散人员。请注意,该值与图 7b 中描述的从 Porte Des Lions 出口流出的线性流量提供的值非常匹配。由于狮子门出口已建模为与卢浮宫卡鲁塞尔出口相同的尺寸,这表明通道地面 D 在其出口吞吐量方面已达到某种程度的最优。通道地面 D 的存在将导致每秒 20.8 名疏散人员的全球输出流量,将总疏散时间减少至 20.83 分钟,与原始值 24.34 分钟相比减少了 15%。

卢浮宫卡鲁塞尔是公共出口,因此使用它不涉及泄露秘密的成本



关注数学模型
获取更多资讯

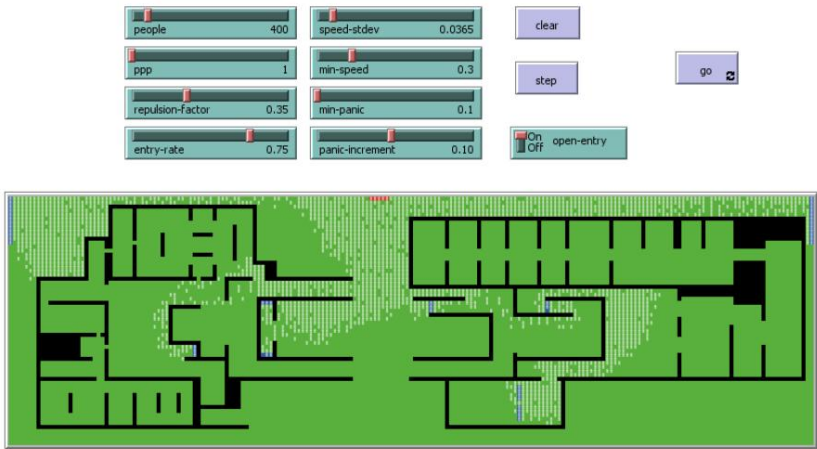


图 13:在最大数量的疏散人员开始聚集的位置放置一个标记为红色的出口,提供每秒 4.8 名疏散人员的网络流量,而不是每秒 1.8 名疏散人员的基本流量。

出口;因此,除了障碍物外,卢浮宫卡鲁塞尔出口对于大多数疏散计划都很重要。然而,与我们疏散计划中的最大输出能力相比,卢浮宫卡鲁塞尔出口目前未得到充分利用。事实上,对于涉及卡鲁塞尔杜卢浮宫出口的所有疏散计划都是如此,因为卡鲁塞尔杜卢浮宫出口所在的地面 E 仅与地面 D 连接。然而,其吞吐量目前受到大型、地面 D 中包含的复杂画廊网络,尤其是图 12 中紫色轮廓部分。



从这些观察中可以得出一些政策建议。第一个是图 12 紫色轮廓部分的加宽,可以减少墙壁与博物馆墙壁的距离,从而引导疏散人员自然流向出口的距离,也减少了恐慌程度。加宽这个部分将使更多的疏散人员能够利用这个空间。

第二项政策建议是安排应急人员通过图 12 橙色轮廓部分引导“后方”周围的疏散人员。目前,智能体出于自身利益,遵循最短路径到达出口,开始挤向紫色轮廓部分,导致我们的瓶颈。通过引导人们通过橙色轮廓的路径,对于一个人来说局部次优路径将增加总吞吐量,从而提供全局更优化的解决方案。另外,诸如手机应用程序之类的软件包可以突出显示未使用或不太拥挤的目的路线,也可以优化全球疏散情况。

我们提出的另一项政策建议是消除“次要”瓶颈或角落瓶颈,其中一个例子在图 12 中以黄色圈出。其中几个瓶颈存在于 D 地段,限制了疏散人员的流动,并为出口点提供了多个瓶颈,将大量人员困在狭小的空间内,限制了他们感受最终目标进展的能力,从而增加了人们的恐慌程度。

请注意,其中一些第二个瓶颈可能对我们用来从出口提取最大容量的大量人员所隐藏。提供更简单的廊道结构将有助于疏散人员更自然地流动,从而有可能增加吞吐量并减少对过度拥挤的公共安全担忧。

更激烈的建议集中在围绕图 13 所示出口的分析上。直接建设新出口超出了本文提出的合理建议的范围;然而,如果地面 D 存在一个秘密出口,则其开放将提供我们模型预测的出口吞吐量的最大收益。此外,如果要建造一个新的出口,无论是公共的还是秘密的,我们预测这种新出口的最佳位置将大约是通道地面 D 的位置。

当前位于图 13 中。

布雷斯悖论

我们可以提出的一个程序建议与博物馆的各个部分有关,这些部分具有诸如一楼 B 等部分的一般形状。我们可以以图形形式绘制该部分,如图 14 所示。此示例的目的是说明 Braess 的悖论[11],它指出从网络中删除边缘(即移动选项)实际上可以增加网络上的流量。请注意,本文中的流量涉及人们穿越网络所花费的实际时间,而不是第二部分中讨论的抽象设置中的网络流量。

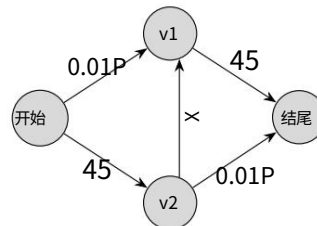


图 14:说明 Braess 悖论的示例,由 [11] 给出。

在图 14 中,假设有 4000 人尝试从起始节点穿越到结束节点。

遍历一条边所需的时间为 45 或 $0.01P$,具体取决于标签,其中 P 是当前在边上的人数。首先,考虑标记为 x 的边不存在的情况。我们将通过 $v1$ 的路径表示为 $v1$ 路径,并且类似地表示 $v2$ 路径。如果 A 人走 $v1$ 路径, B 人走 $v2$ 路径,那么每条路径的时间将分别为 $0.01A + 45$ 和 $0.01B + 45$ 。假设理性的人会采取最小化自己最短路线的路径,他们将达到每条路径花费相同时间的平衡,给出以下方程组:

$$\begin{aligned} 0.01A + 45 &= 0.01B + 45 \\ A + B &= 4000 \end{aligned}$$

该系统求解为 $A = B = 2000$ 。在这种情况下,每个人需要 $45 + .01(2000) = 65$ 个时间单位。

现在,考虑边 x 确实存在的情况,但需要非常慷慨的 0 时间来遍历它。考虑一个人走路径 $\text{start} - v1 - v2 - \text{end}$ 的情况。对于这个人来说,遍历的时间变为 $0.01(2000) + (0.01)(2001) = 40.01$,节省了近 25 个单位。然而,有多人会尝试这条路线,每增加一个人,路线的时间就会增加,直到有 2500 人决定走这条路线,此时路线需要 $0.01(2500) + 0.01(4000) = 65$ 单位时间,和之前一样。然而,那些只走 $v2$ 路径的人会发现他们的路线现在需要 85 个时间单位,因此他们也会被激励走 $\text{start} - v1 - v2 - \text{end}$ 路径。现在,每个人的路径都需要时间 $.01(4000) + .01(4000) = 80$ 个时间单位,而任何采用任一原始路径的人都需要时间 $45 + .01(4000) = 85$ 。所以,每个人都会采取这个新航线和增加一条额外航线实际上使全球流量对每个人来说都变得更糟。

本节演示了布雷斯悖论在自私行为假设下的疏散情况下可能产生的影响。不管这个理论例子如何,Valiant 等人都已经证明了这一点。[11] 网络中很可能会出现布雷斯悖论,并产生与图 14 所示示例类似的结果。这纯粹是每个人自私选择的结果,这与我们对疏散环境中人们行为的假设是一致的。根据这次讨论,我们提出一项政策建议,即对于卢浮宫任何具有中间走廊的区域,例如我们定义的 B 区域,都应在那里安置应急人员。特别是,应急人员应努力引导人们离开这些区域的中间走廊。不允许任何人进入中间走廊将允许更高的全球疏散流量。



关注数学模型
获取更多资讯

残差网络为紧急救援人员提供路径建议

全球流量网络的另一个结果是,通过在我们构建的图上使用最大流量解决方案,我们可以计算[13]中定义的残差网络,以便找到应急人员的进入路径。残差网络的定义是,当且仅当存在从超级水槽到内部的路径时,存在从任何出口点 (金字塔、卢浮宫、卡鲁塞尔、黎塞留通道或狮子门)到博物馆任何内部部分的路径残差图中的节点。请注意,如果不存在这样的路径,应急人员将不得不完全逆着车流强行通行;然而,通过使用剩余网络中的通道,紧急救援人员在进入建筑物时不会阻碍疏散人员的流动。这凸显了确保黎塞留海峡安全的另一个原因;通过保持从超级水槽到金字塔的边缘远离最小切口,即不成为瓶颈,我们确保了紧急救援人员可以进入博物馆的通道。

因此,我们提出了更多的政策建议。首先是确定疏散计划的优先顺序,以便在剩余网络中存在进入路径;从很多方面来说,这可以概括为防止金字塔出口成为瓶颈。二是利用残差网络寻找应急人员的进入通道,使他们进入建筑物时不会影响疏散人员离开建筑物的流程。

政策建议摘要

我们在下一节中总结了之前的政策建议,并添加了一些不直接针对我们的结果而是针对模型结构的建议。

- 建议1:增加进入金字塔的机会
- 建议2: 如果紧急情况需要向公众透露秘密出口,则优先考虑金字塔周围区域的秘密出口 (前提是存在此类出口)。在金字塔敏感的紧急情况以及需要大量应急人员的情况下,进一步优先考虑这些出口。
- 建议3:加强黎塞留通道周围的安全部署,并优先考虑确保其疏散用途的有效性,以确保金字塔出口的安全。
- 建议 4:使用应急人员指导疏散人员,确保他们的安全
出口方向类似于图 7b 中详述的线性流。
- 建议5:未来建造的任何秘密或公共出口的方向应确保通过最近的入口或走廊建立线性流动。
- 建议 6:使用应急人员引导 D 地 “后方”周围的疏散流程,即图 12 中橙色突出显示的部分。或者,可以轻松实施电话应用程序等技术,为不同个人或团体分配路径,实际上可能是该建议的最佳实施。
- 建议7:消除D 层等区域的角落和复杂情况,这里复杂的画廊布局会产生次要瓶颈,降低公共安全。更简单的画廊布局将显着提高疏散效率。
- 建议8: 如果紧急情况需要向公众透露秘密出口,则优先考虑 D 地段存在秘密出口的情况。在以更高吞吐量为主要目标的情况下,进一步优先考虑此退出。
- 建议 9:使用应急人员引导疏散人员远离中间走廊,如 14 中详述的内容。
- 建议10:优先考虑疏散计划,以便我们构建的图上最大流量解决方案的残差网络有一条进入博物馆的路径。



- 建议 11:使用上述路径,以便紧急救援人员能够进入博物馆内不限制疏散人员向外流动。
- 建议 12:使用技术和适当的标牌来减轻语言的影响不同人群面临的障碍。任何路由电话应用程序,例如建议 6 中推荐的必然会变成多语言。

模型评估

敏感性分析

特别是我们的全球流动模型非常强大。提供适当的边缘容量,我们使用算法被证明可以找到最优解[15]。因此,该模型主要在局部截面模型由于基于代理的模型的高方差性质并且需要几个有意义的描述人类行为的超参数。因此,我们的敏感性分析涉及改变一些 NetLogo 模型中的参数,以观察其对此类方差的鲁棒性。尤其,我们选择专注于改变以下 4 个参数:排斥因子、速度标准偏差、恐慌增量、和 ppp (每个补丁的人数)。给定我们先前结果所使用的常量的基值,我们使用一次对单个变量进行控制实验。然后我们对这 4 个参数中的每一个重复此操作,并找到了 3 种区域类型的结果:画廊、狭窄的走廊和角落。的基值常数如表 1(a)所示。为了比较,我们还提供了我们发现的流量使用我们的默认参数。

节类型默认常量		截面类型 流量	
斥力.35	1	画廊1.8	
速度标准偏差 .0365		走廊2.58	
恐慌增量 .1		角落 2.00	
相对			

表 1:左 (a):局部流动模型中计算的默认值,右 (b):流量1。默认参数

部分类型	Repl	Speed-stdev	Panic-increment	ppp	
画廊 2.38		1.14 .98		1.06	4.44
走廊4.78		2.16 2.45		2.56	
角落		1.93 1.88		1.99	

表 2:将 3 个变量保留为默认值并更改另一个变量的结果摘要。价值观:排斥因子 = 1,速度标准偏差 = .15,恐慌增量 = .2,ppp = 2

从上表中我们可以看出,NetLogo 模型的灵敏度取决于参数正如预期的那样,原始输出。然而,这三种类型之间的相对顺序永远不会改变实验,鉴于我们对复杂性的定性理解,这是我们所期望的每个布局。此外,在我们的模型背景下,没有一个结果是不合理的,这显示了这些参数选择的稳定性,更重要的是,有意义。计算模型发展不佳

如果没有经过严格调整的参数,则无法简单地将其某些参数加倍或三倍导致得到不合理的答案。

排斥因子的增加会增加特工对拥挤区域的厌恶,从而使他们彼此远离。结果,越过出口线的人就会减少。然而,如此高的一个有趣的副作用排斥因子的特点是其性能与默认参数相近。检查这种现象表明,高排斥效应实际上会导致更优化的代理转向行为,如图 15 所示。更具体地说,高排斥力会导致智能体更多地利用角的宽度有效地,在一个非常罕见的局部贪婪行为导致全局优化行为的例子中。



关注数学模型

获取更多资讯

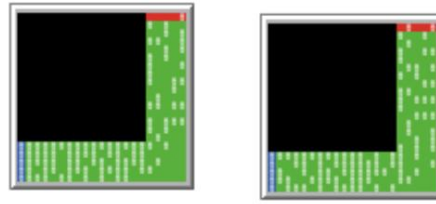


图 15:左图 (a) 描述了拐角对出口流量的影响,每秒总共有 2 名疏散人员。右图 (b) 描述了用于比较的高斥力输出流,尽管斥力增加通常会对出口流产生负面影响,但每秒仍有近 2 名疏散人员。

由于采样正态分布的对称性,步行速度标准差的增加在先验上似乎没有影响。然而,事实并非如此,因为群体的行走速度是由前面移动最慢的成员控制的。因此,让一些人移动得更慢也会导致他们后面的人也放慢速度,所以我们的结果也有合理的现实世界解释。恐慌增量也很有趣,因为它严重影响画廊部分,但对角落或走廊影响不大。我们手动检查了这些运行,发现恐慌的增加只会因为画廊的复杂布局而发挥作用。在另外两种情况下,人们可以很容易地保持运动,因此恐慌不会增加那么多,这在上下文中也是有道理的;更定性地,如果人们被困在更复杂、更迷宫般的环境中,高度恐慌是最重要的。最后,对于 ppp,观察到的速率计算增加符合我们的合理预期,即每个补丁有更多的人将表明最终的退出吞吐量较大。

总体而言,我们的模型分析和模型在参数增加时不会出现异常行为。这不仅意味着该模型易于定制,而且与净Logo管理层将能够测试大量的场景和布局,并且仍然保留模型的全部优点。

优势劣势

优势

- 基于代理的建模使我们能够观察复杂的行为如何从一组简单的规则中产生。此外,NetLogo 提供了直观的界面来更改参数。我们还采取了许多措施来确保物理可解释性,以便我们可以将解决方案映射回现实世界。
- 我们决定将卢浮宫分成多个更简单的部分,使我们能够观察和理解特定部分内的代理行为以及导致瓶颈的行为。
- 在我们的全局流模型中,我们使用高层次的抽象,可以轻松集成局部模型的结果来评估整个系统。此外,使用强对偶性可以对全局瓶颈进行非常自然的解释。
- 高水平的抽象自然有助于适应性。大多数测试场景 (例如秘密或阻塞路径)可以轻松映射到全局流模型并纳入策略中。
- 局部截面模型对于参数的较大变化非常稳健。此外,参数变化的结果在具体情况下有合理的解释。



关注数学模型
获取更多资讯

弱点

- 我们选择最大化吞吐量（或最大流量），而不是时间流逝，产生的疏散计划在最坏的情况下理论上是很好的，但在平均或更多情况下可能不是最快的
常见案例。
- 局部模型本质上对卢浮宫布局和离散环境中的人员寻路进行建模。如果有足够的计算能力，更连续的模型将给出更现实的结果。
- 我们的本地部分模型中的代理逻辑非常重视与出口的距离，这导致大多数人涌向一个出口。只有当瓶颈后面排起长队时，一些工作人员才能找到替代出口。
- 局部分模型中的代理优化与全局流模型中的流优化之间存在差异。特别是，顾名思义，局部分模型中的代理逻辑优先考虑局部最优的自私行为，而全局流模型则找到对总体而言最优的解决方案。

结论与未来工作

在我们的论文中，我们设计了一个高度可解释的两部分模型，能够准确评估任何特定疏散计划的有效性及其安全风险，因此可用于搜索最佳的卢浮宫疏散计划。该模型分为基于代理的计算模型（表示局部模型）和最大流图计算（表示全局流模型），还能够识别此类疏散计划中的关键瓶颈，使卢浮宫工作人员有机会了解任何给定的情况如何进行。疏散计划在博物馆布局、疏散人员寻路等方面还有待改进。特别是，我们发现了疏散计划中的关键瓶颈，因为我们认为准确解决这一瓶颈问题是关系到公共安全的最关键问题。重要的是，本地部分模型的智能使用还允许卢浮宫工作人员模拟不同人群的影响 - 包括不同的主要语言、残疾人群体或大家庭。此外，我们的模型不限于四个给定的公共出口，而是可以将出口和障碍物的任意组合映射到全局流量模型上；事实上，我们的模型可以适应任何其他大型建筑，而无需对其结构进行重大改变。此外，我们还传达了一项包含十二项建议的明确计划，供卢浮宫工作人员考虑，包括强调保护金字塔出口以确保紧急人员的进入路径，并减轻特别是与金字塔出口有关的问题，如增加公共安全。因此，我们确定并提供有关总体策略、流程和程序和技术建议。

未来的工作将包括解决我们模型中的一些弱点，包括开发更强大、更稳健的路径查找算法，以更准确地模拟出口排队现象，以及在卢浮宫每个楼层部分的 NetLogo 表示中提供更高级别的粒度。



关注数学模型
获取更多资讯

参考

- [1] “2017 年卢浮宫参观人数为 810 万人次。”卢浮宫新闻稿,2018 年 1 月 25 日,presse.louvre.fr/8-1-million-visitors-to-the-louvre-in-2017/。
- [2] 记者、电讯报。“法国的恐怖袭击:从图卢兹到卢浮宫。”《电讯报》,电讯媒体集团,2018 年 6 月 24 日,www.telegraph.co.uk/news/0/terror-attacks-france-toulouse-louvre/。
- [3] “交互式平面图”。卢浮宫 - 互动平面图 卢浮宫博物馆 巴黎,30 2016 年 6 月,www.louvre.fr/en/plan。
- [4] “时间、入场和路线。”卢浮宫。 <https://www.louvre.fr/en/hours-admission-direction>
- [5] 《电梯安全》。国家电梯工业公司 http://www.neii.org/safety_lift.cfm -
- [6] 《出口标志》。 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:出路标志,卢浮宫,2011年11月25日.jpg> - - -
- [7] Wilensky, J. (1999)。网络标志。 <http://ccl.northwestern.edu/NetLogo/>。西北大学互联学习和计算机建模中心,伊利诺伊州埃文斯顿。
- [8] Yosritzal, Yosritzal M Kemal, 学士, Purnawan Putra, Hasdi。 (2018)。印度尼西亚巴东模拟海啸疏散期间疏散人员步行速度的观察。 IOP 会议系列 地球与环境科学。 140.012090。10.1088/1755-1315/140/1/012090。
- [9] M.莫里斯,迪恩·亚当斯,凯文。(2013)。整体大于部分之和:理解和管理复杂系统中的紧急行为。相声。 26. 15-19。
- [10] <https://geopy.readthedocs.io/en/stable/#module:geopy.distance>
- [11] 引自:格雷戈里·拉加普。 (2016)。大型随机图中的布局问题。随机结构。算法。 37.495-515。
- [12] <https://www.affluences.com/louvre.php>
- [13] <http://www.cs.cmu.edu/~avrim/451/lectures/lect1005.pdf>
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/模拟退火> -
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Edmonds%E2%80%9393Karp算法> -
- [16] <https://en.wikipedia.org/wiki/最大流最小割定理> - -
- [17] <https://en.wikipedia.org/wiki/强对偶性> -



关注数学模型
获取更多资讯

SB)	流量边缘(SA,
7.8 (SB, FB) 5	
(SC , FC) 5.6	
(SD, FD) 2.6	
(SE, SD) 7.8 (FA,	
FB) 7.8 (FB, GB)	
5 (FC, GC) 5.6	
(FD, GD)	
2.6 (FE, FD)	
7.8 (GA、	
SS) 4.2 (GB、	
GA) 7.4 (GC 、	
LC) 5 (GC 、	
GD) 9 (GC 、	
GB) 3 (GD、	
GE) 1.8 (GE,	
SS) 4.2 (LA, LB)	
7.8 (LB, NP)	
3.2 (LC , NP)	
3.3 (LD, NP)	
4.8 (LD, SS) 7	
(LE, LD) 7.8	
(NP , SS) 5	

表 3:通过局部截运模型找到并输入全局流梯度的边权重示例。每个楼层都有一个缩写: (基础,B), (下层,L), (地面,G), (第一,F), (第二,S), GA代表地面A的部分。请注意,SS 代表超级水槽,而不是二楼的部分。



关注数学模型
获取更多资讯