

# Covid-19 tracking utilizing graph convolutional network

the cat Dage

the cat Dage,

Copyright © 2020 Li Jian Bin

Licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License (the "License"). You may not use this file except in compliance with the License. You may obtain a copy of the License at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>. Unless required by applicable law or agreed to in writing, software distributed under the License is distributed on an "AS IS" BASIS, WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied. See the License for the specific language governing permissions and limitations under the License.

*First printing, Nov 2020*

# Contents

I	Introduction	
0.1	研究背景	9
0.2	研究意义	9
0.3	现有的相关研究	9
0.4	疾病传播模型仿真	11
0.5	SEIR	12
0.6	SEAIR	12
0.7	结合个体偏好的仿真	13
0.8	COVID-19病毒检测策略	13
0.9	Our proposed method	16
II	Methodology	
1	System Initialize .....	23
1.1	Environment Initialize	23
1.2	Individual Initialize	23
1.2.1	State Setting .....	23
1.2.2	Area Preference Setting .....	24
1.2.3	Individual Motivating and Mask Wearing .....	24

1.2.4	Contact Network Obtain . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Pandemic Spreading System . . . . .</b>	<b>27</b>
2.1	SEAIR	27
2.2	Our proposed method (待续)	27
<b>3</b>	<b>Intervention Strategy . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1	基于区域检测干预系统	29
3.2	基于邻居检测干预系统	30

### III

## 数据介绍

<b>4</b>	<b>Gowalla Data . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>区域数据划分 . . . . .</b>	<b>35</b>
5.1	划分方法	35

### IV

## Experiment

<b>6</b>	<b>系统参数设置 . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>result . . . . .</b>	<b>41</b>
7.1	遇到的问题	41
7.1.1	2021年9月21日 . . . . .	41
7.1.2	为什么不同干预强度下40天前的变化如此的大? . . . . .	42
7.2	Baseline	42
7.2.1	易感人群占比变化情况 . . . . .	42
7.2.2	潜伏者人群占比变化情况 . . . . .	43
7.2.3	无症状感染者和有症状感染者人群变化情况 . . . . .	43
7.3	各种策略下对病毒传播的影响	44
7.3.1	易感人群分布情况 . . . . .	44
7.3.2	潜伏者人口变化情况 . . . . .	45
7.3.3	无症状感染者和有症状感染者的人口变化 . . . . .	45
7.3.4	不同干预程度下的成本 . . . . .	45
7.4	延迟执行检测和追踪对结果的影响	49
7.4.1	延迟执行干预措施对感染人数的影响 . . . . .	49
7.4.2	开始执行策略的时间与检测数的影响 . . . . .	50
7.4.3	延迟执行干预措施对检测命中率的影响 . . . . .	50

7.4.4	图 .....	50
7.5	在执行追踪与隔离下不同的密切关注时间对病毒传播的影响	50
7.6	在执行追踪与隔离和封锁下不同的封锁时间对病毒传播的影响	50
	<b>Bibliography .....</b>	<b>53</b>
	<b>Articles</b>	<b>53</b>



# Introduction

- 0.1 研究背景
- 0.2 研究意义
- 0.3 现有的相关研究
- 0.4 疾病传播模型仿真
- 0.5 SEIR
- 0.6 SEAIR
- 0.7 结合个体偏好的仿真
- 0.8 COVID-19病毒检测策略
- 0.9 Our proposed method



## 0.1 研究背景

目前，COVID19疫情的爆发给与社会沉重的打击。一方面，由于该病毒是单链RNA病毒，导致病毒容易变异，从而增加疫苗研发的难度，并且病毒感染了患者后可能会出现无症状感染者，使得在防疫难度大大增大。另一方面，COVID19具有极强的传播能力，COVID-19通过感染者呼出含有病毒的飞沫和非常小的颗粒传播。这些飞沫和颗粒可能被其他人吸入，或落在他们的眼睛和口鼻中。在某些情况下，它们可能会污染所接触的表面，距离感染者小于6英尺距离最有可能被感染[CDC]。正因为这三个特点，在最初武汉的防疫阶段，由于经验不足将整个武汉市进行隔离以检测潜在感染者，庆幸的是，在国家领导下疫情控制了，但是消耗了巨大的成本。过于注重防疫力度虽然能够控制疫情的传播，但是需要消耗极大的成本，特别是对于经济落后的国家，而忽略防疫力度只注重成本是一种本末倒置的行为，因此平衡成本和防疫力度扮演着非常重要的角色。

目前，由于一些政府的防疫不力以及其他原因，全人类完全控制COVID19疫情传播是非常困难的事情。因此平衡经济与COVID19的传播这个问题备受多位研究者的关注。<sup>[5]</sup>考虑到了一直封锁区域进行核算检测会限制该区域的经济发展，因此提出了一种分区周期性封锁与解放区域的方法，作者建议选取某个地方或城市作为示范点，对里面所有的居民做周期性的核算检验，如果呈现出阳性则按照严格的居家隔离。

## 0.2 研究意义

因此在后疫情时代种以尽可能少的成本控制疫情的方法扮演着至关重要的作用。这种方法不仅能够节省巨额的成本，而且从侧面上减少人们的恐慌指数。。。

## 0.3 现有的相关研究

近年来，针对控制疫情的研究越来越受欢迎，由于真实数据可能涉及到个人隐私，数据收集的难度非常大，因此大量的研究中采用了传染病仿真模型模型疫情的传播，一般来说可以分为两个部分，第一部分是传染病的仿真部分，另一部分是针对策略模拟部分。对于传染病的仿真，在现有的研究中，最早提出的是SIR模型，是最经典的传染病传播模型之一，他能有效的模拟典型的传染病传播情况，而相对于狡猾的COVID-19明显是不适用于该模型的，对于SEIR模型，该模型在原来的SIR模型上增加了处于潜伏期的暴露人群(E),但是由于COVID19具有无症状感染者(A)，使得以往的传统的模型都不适用，因此最新提出的SEAIR模型来模拟疫情的变化。近期，有研究者提出了先进的仿真模型，...

【】【】

在这些仿真模型中，大部分的节点都是静态的，传播链是固定的，在参数上使用接触率来反映邻接节点之间的接触情况，使得节点之间仅能在固定的邻接节点之间传播，从而忽略的节点的动态性。【一些动态仿真模型的研究】<sup>【】</sup>

针对疫情的防疫策略，【一些防疫策略的研究】，

最近，一些研究上希望通过人工智能的决策方式控制疫情【一些使用人工智能控制疫情的研究】 figure 1 illustrate an example which simulates human mobility, 这在一定程度上

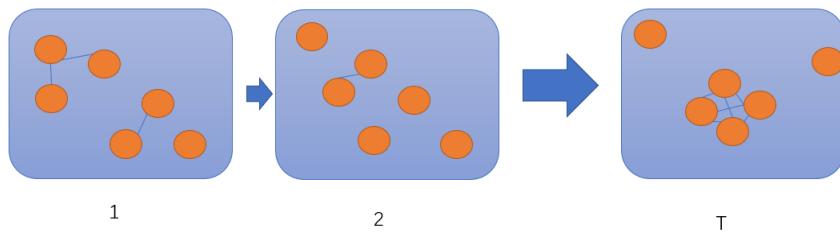


Figure 1: human mobility

增加了疫情传播模拟的真实性和多样性。人类当作节点时，城市中的人类的运动是在做最优化的过程，是符合一定的规律的[6]，因此，本文打算引用[6] 的模型去模拟人类的运动情况，然后在在这基础上仿真COVID-19的传播情况。

对于传播的追溯，目前来说并没有非常的高效(如果有，那就是中国现在用的方法)，在节点之间的追溯，难度是非常大的，因此本项目并不想在这方面探索，转而以子图为区块作为追溯点追溯，尽管在一定程度上花费的成本比节点之间的追溯要高，但是在实际应用上，不管在模型上还是国家都无法保证能百分百追溯成功，需要承担非常大的预测错误风险，因此以区域范围性质的检测是较为安全和高效的，相对于传统的地毯式检测减少巨大的成本。基于COVID-19追溯传染源的Research比，大佬前段时间发我一篇关于Tracking的文章，文章里面讲述的是用基站的覆盖范围以及信号的传播时间获得得于基站的距离来做Tracking，具体的细节我忘了，这篇文章是引起我做Tracking的兴趣，另外真正想做下去的是因为最近的发生的某个人在广州感染了在印度变异的COVID-19病毒。

对于节点移动模拟，目前实验采用引力模型模拟，引力模型可以设置一个或多个引力点，节点会被引力点吸引。因此，我们希望能够设定多个引力点，如家、工作点和其他(饭店，酒店、医院)这里的引力点我希望能吸引特定的人，如不同的家能够设定唯一的引力点，并仅对特定的人吸引。那么整个模型就有了家的概念，一般来说一个家可能会有1-4个人，在家里面，我们可以认为他们的距离为0，为如果其中一个人感染了，那么可以认为他们有非常大的概率也会感染。因此，在距离上的权重，可认为不同场景下的可传染的距离有不同的变化。如家在里面必然是密切接触的，在路上可认为可以设定在较近的距离为密切接触，而工作点上，可设定更大的距离为密切接触情况。

For

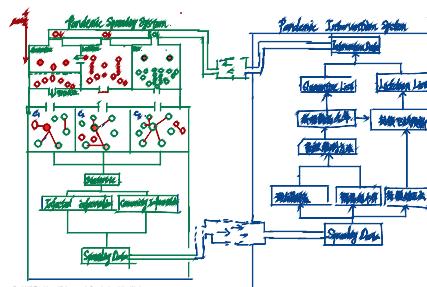


Figure 2: 工作流程图

The main contribution of our work are summarized as follows:

- 我们对COVID-19做动态变化的仿真。
- 我们使用真实的人类活动偏好情况生成节点，并且使用随机活动的人类活动的算法。

那么对于提出的方法目前存在以下几个挑战：

- 如何构造人的数据，人的分布情况如何模拟？
- 如何模拟人的活动情况？

图3我针对了以上的两个问题做出了简单的分析，

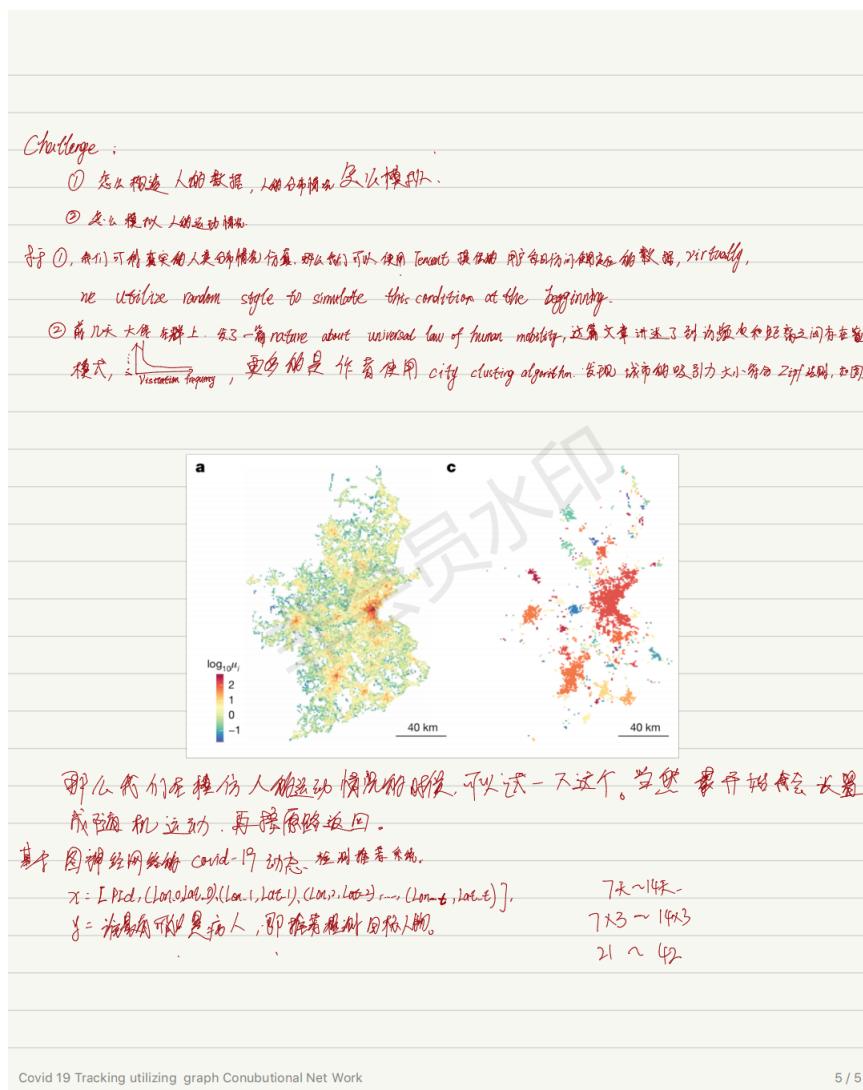


Figure 3: 目前我针对仿真存在的问题做出了简单的分析

## 0.4 疾病传播模型仿真

疾病传播仿真是在基于虚拟环境下模型病毒传播的仿真模拟，由于病毒的传播具有很大的随机性以及面对现实情况的复杂性，它只能一定程度上能够模拟在现实生活中病毒的

传播情况，目前大量的疾病传播模型被提出，在这里简单介绍典型的几种模型。

## 0.5 SEIR

这里参照16 February 2020 Kentaro Iwata发表在Journal of Clinical Medicine的文章假定人群中可以分成以下4种隔室：

- 易感人群S：能够被疾病感染的人群；
- 暴露人群E：已经被感染，但是还没有发病的人群；
- 感染人群I：能够传播疾病的人群
- 移除人群R：已经免疫或者死亡的人群

假设动物没有新的传播，个体免疫力没有差异，流行病的时间尺度比人口统计学过程（自然出生和死亡）的特征时间快得多，自然出生和死亡没有差异。那么该动力学系统可以由下图抽象表示：

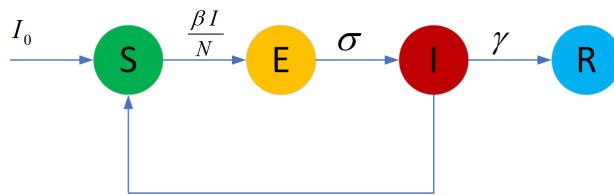


Figure 4: SEIR状态之间的关系图

根据该动力学系统的流程，建立传染病动力学模型，其微分方程组为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\frac{C\beta IS}{N}, \\ \frac{dE}{dt} = \frac{C\beta IS}{N} - \sigma E, \\ \frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I. \end{array} \right. \quad (1)$$

其中 $\beta$ 为疾病的传播速率， $\sigma$ 是由平均潜伏期的倒数计算出来的感染率， $\gamma$ 是由感染期的倒数计算出来的治愈率或者死亡率， $C$ 的接触率， $N = S + E + I + R$ 为总人口规模，其中接触率 $C$ 由于是根据节点之间的距离得到的并且节点具有移动能力，使得接触率 $C$ 是动态变化的。

## 0.6 SEAIR

这里参照16 February 2020 Kentaro Iwata发表在Journal of Clinical Medicine的文章假定人群中可以分成以下4种隔室：

- 易感人群S：能够被疾病感染的人群；
- 暴露人群E：已经被感染，但是还没有发病的人群；
- 感染人群I：能够传播疾病的人群
- 移除人群R：已经免疫或者死亡的人群

假设动物没有新的传播，个体免疫力没有差异，流行病的时间尺度比人口统计学过程（自然出生和死亡）的特征时间快得多，自然出生和死亡没有差异。那么该动力学系统可以由下图抽象表示：

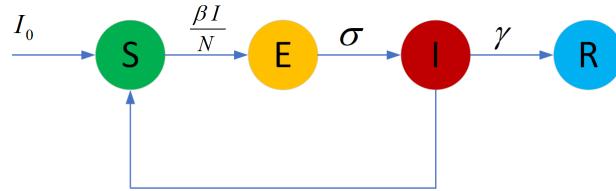


Figure 5: SEIR状态之间的关系图

根据该动力学系统的流程，建立传染病动力学模型，其微分方程组为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\frac{C\beta IS}{N}, \\ \frac{dE}{dt} = \frac{C\beta IS}{N} - \sigma E, \\ \frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I. \end{array} \right. \quad (2)$$

其中 $\beta$ 为疾病的传播速率， $\sigma$ 是由平均潜伏期的倒数计算出来的感染率， $\gamma$ 是由感染期的倒数计算出来的治愈率或者死亡率， $C$ 的接触率， $N = S + E + I + R$ 为总人口规模，其中接触率 $C$ 由于是根据节点之间的距离得到的并且节点具有移动能力，使得接触率 $C$ 是动态变化的。

## 0.7 结合个体偏好的仿真

目前的研究中大量的仿真实验中节点的生成，边的生成都是随机生成的，只有少量的研究使用的是真实数据模拟病毒的传播，然而，在生活中，大部分个体的活动都存在偏好，并不会随机运动。在这里，我们在病毒的传播仿真过程中添加个体的偏好，提高模拟的真实性。因此，我们使用签到数据获取个体的偏好。。。签到数据的介绍

## 0.8 COVID-19病毒检测策略

COVID-19 病毒传播迅速，传染力极强，全球只有少量的国家能放置该病毒的传播，面对病毒的快速传播，不同的国家采取了不一样的检测措施，针对检测不同的检测对象可以分为三种方法[1]。

- Symptomatic testing : Symptomatic testing 检测策略仅对有症状的感染者进行检测，迅速对感染者追踪隔离，因此在检测率上往往有较高的准确率。目前使用该策略的国家有日本。
- asymptomatic testing : asymptomatic testing 是一种针对无症状感染者的检测策略，这类方法目前是多数国家普遍采取的检测措施，并且不同的国家会针对不同的人群进行检测，英国和奥地利专注于定期检测保护易感染人群，高风险地区。德国和比利

时专注于对无症状感染者在5-7天进行每日检测，这类检测策略可以维持了成本和防疫力度的初步方法，对高风险地区进行检测可以大大提高检测命中率，但是，随着时间的推移以及感染人数的增加，该方法的可行性还有待证明。

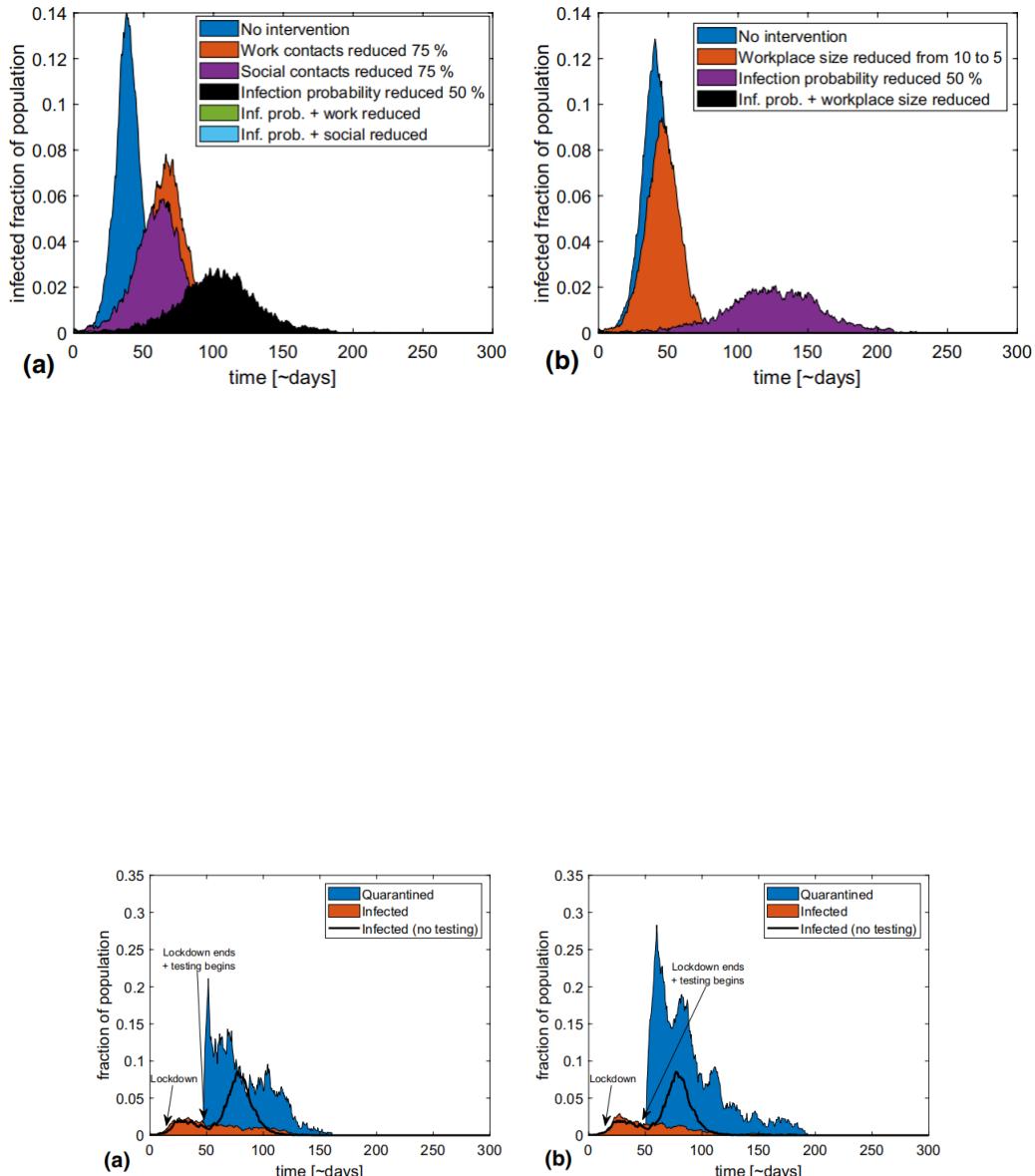
- Mass testing: Mass testing大量的对社区的所有人群检测，或者对少量人口停止社区活动并进行重复性的检测。目前使用这类方法的有中国和越南，这类方法可以高效的控制病毒的传播，从而有效的抵御疫情，然而，这种方法成本极高，对于一些经济实力较弱的国家很难长期执行，一旦出现短时间内超级传播者经过多个地区进行全市甚至全省的检测，便需要极高的成本。

以上的三种方法在实际生活呈现出不同的状况。除了中国坚持Mass testing的方法使得整个国家仅有少数的个体感染外，其他的方法并没有。尽管Mass testing是真正意义上控制了感染人数的增长，然而这需要大量的劳动力成本和材料成本。因此，提高检测效率和降低成本扮演着控制病毒传播的关键地位，目前大量的研究针对经济和疫情的控制之间的平衡做出了相关的研究。

[[3]] 提出了一个在多种高效干预措施下的SEIR的仿真模型，目的是权衡经济影响和健康之间的联系。在模型的模拟方面，作者模仿了现实情况，设置了一个E-R网络，每个节点的平均度为3.6(在没有任何干预下他引用别人的文章说是合理的),病人的平均潜伏期和平均感染期分别设置了6, 8天，而感染率 $q = 0.5$ , 病发概率为 $p_{symp} = 1 - q^{1/8}$ ,总节点数10000，整个实验模型模拟了540天。在干预措施上作者在Lockdowns下按概率切断节点之间的边，也就是说，封锁程度0.3意味着存在连边的两个节点的边可能有30%的概率会切断，针对隔离和追踪措施的干预下，对感染者的直接接触者进行检测，只隔离检测呈阳性的人。此外，作者使用封锁程度来衡量劳动力的损失情况，即考虑到的只是封锁程度与劳动力存在线性关系。结果表明，检测和隔离的结合能有效的减少经济经济成本呢死亡率，但是大量的检测有显著的效果。跟踪结合适度的测试能力可以在没有封锁的情况下实现遏制。(copy) 跟踪和检测结合起来以降低死亡率和经济成本的政策极其有用，它们有可能在不施加任何社交距离限制的情况下遏制疫情。这突出了交易的棘手的社会问题——这些收益与病人的隐私相冲突，追踪不可避免地侵犯了病人的隐私。

[[2]] 专注于衡量在有限的隔离与检测的情况下减缓成本收益同样地使用SEIR仿真模型进行研究，但作者不仅将个体分为30%Work,40%Family,15%Friends,15%Public，而且在状态的持续时间有所调整，令S,I,R的状态平均维持在时间3天，从E到I的平均时间为5天，其中有一半的时间维持着E的状态，后半段时间维持Pre-symptomatic(infectious)的过度状态。在个体的设置上是模仿了丹麦的人口分布，平均每个个体有2位亲人，10位工友，两组朋友每组有5位。每个个体每一轮(0.5day)具有一定概率抽到扮演着这4中角色的机会，总共5000个个体，最后感染率的设置是美国死亡率 + 23%。结果表明，图0.8是实验的结果，减少工作、社交接触、减少工作间的规模程度能有效的延缓并降低感染人数。接着，作者使用 1 step tracing and quarantine strategy(1STQ)策略，即

- close the workplaces of people who are tested positive for the disease.
- isolate their regular social contacts for a limited period
- keep symptomatic individuals in quarantine until they recover.



**Figure 4.** Various trajectories of the epidemic when combining a lockdown and a late-onset ISTQ strategy. (a) shows a possible course of an epidemic where restrictions in public and work life (by 75%) are implemented when 1% are infected and lifted after 30 days, being replaced by a testing and tracing regime with a testing probability of 20% per day and quarantine duration of 5 days. The black line shows the fraction of infected if no testing is implemented. We see that this level of testing and quarantine is sufficient to prevent a resurgence of the epidemic. (b) is similar, but here quarantine lasts 10 days. This is about as effective as (a) but costs a lot more in terms of number of people in quarantine.

这种策略与overall Lockdown相比可以大大减少损失的工作日。如图0.8为采取封锁与未采取任何措施的结果，非常有意思的是，当Lockdown解除以后的30天开始检测隔离措施，隔离了大量的个体，最高甚至达到约30%，而no testing 的感染人数尽管并没有隔离任由病毒在相同的环境下传播，但是最高的感染人数不过10%， Quarantined 的节点是需要隔离5天的，无隔离措施的感染人数最高占约10%，并持续时间大概在50天左右，而采取隔离措施的情况却是隔离人数最高甚至接近30%，并持续约150天。我认为这样的隔离措施过于粗糙，假设病毒不会变异的情况下，尽管采取了这样的措施在50-100天的感染人数大大减少，隔离的人数和持续时间可以侧面反应成本，因此不难发现成本之大，也就是说尽管从结果上看采取1STQ的措施能大大减少损失的工作日，但是由于隔离的人数大大增加，损失了大量的劳动力。

## 0.9 Our proposed method

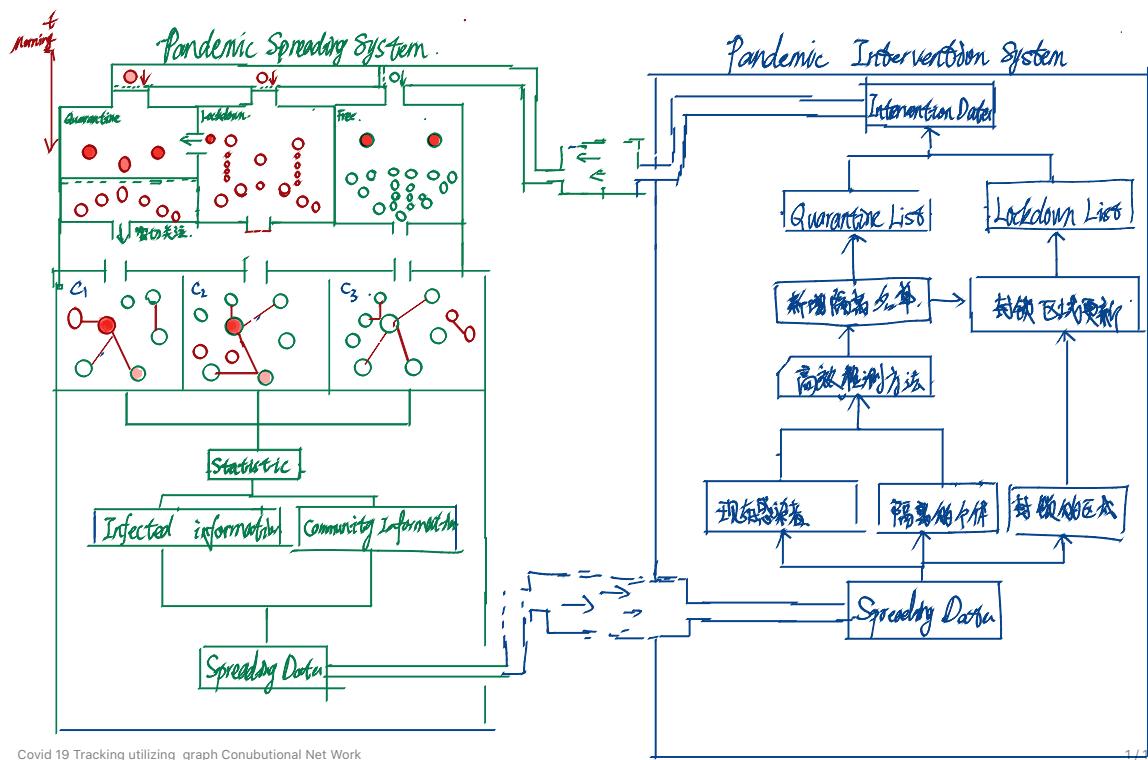
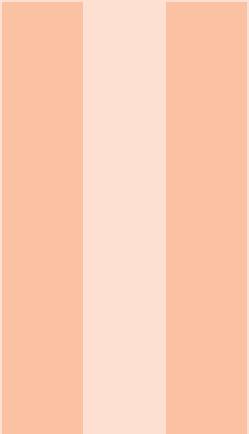


Figure 6: 整个系统包括病毒传播系统(Pandemic Spreading System,PSS)和病毒干预措施系统(Pandemic Intervention System,PIS)，在PSS中，红色的节点代表已确诊，红白的节点代表密切关注者，而绿白的节点代表易感人群和潜伏者。此外，流程图中设定了1个隔离区，1个封锁区，4个自由区作为示例。在隔离区，以虚实线分为必须隔离区和非必须隔离区，已确诊的节点隔离在必须隔离区，密切关注者则的行动与绿色的节点无差异，但必须采取戴口罩的措施，否则不能进入自由区。在自由区，节点可以根据偏好随意活动，只能跟同一区域内的节点接触。接着，每天统计感染者信息和所在的社区信息传输到PIS系统。收到了PSS传输的数据后，PIS根据现存的感染者和隔离的个体的状态信息，统计全部在自由区的有症状感染者所在的区域，对这些区域中所有的节点都进行检测并隔离，对于检测到为感染者的则安排到必须隔离区，而其他的节点则安排到非必须隔离区。接着，如果实行区域封锁，则将感染者所在区域进行全面封锁，除了已确诊的节点可以通往必须隔离区，封锁区域中的节点不能到其他的区域直到封锁期结束。





# Methodology

<b>1</b>	<b>System Initialize</b>	23
1.1	Environment Initialize	
1.2	Individual Initialize	
<b>2</b>	<b>Pandemic Spreading System</b>	27
2.1	SEAIR	
2.2	Our proposed method (待续)	
<b>3</b>	<b>Intervention Strategy</b>	29
3.1	基于区域检测干预系统	
3.2	基于邻居检测干预系统	



Symbol	Description	Symbol	Description
$v_n^t$	节点n中第t天的属性集合	$\alpha_{M_1A}$	抗疫人群转变成无症状感染者的概率
$s_n^t$	节点n中第t天的状态	$\alpha_{M_1I}$	抗疫人群转变成症状感染者的概率
$m_n^t$	节点n第t天活动的区域	$\alpha_{M_2A}$	亲密接触者转化为无症状感染者的概率
$C_n^t$	节点n第t天偏好活动的区域	$\alpha_{M_2I}$	亲密接触者转化为症状感染者的概率
$w_n^t$	节点n第t天是否戴口罩	$\alpha_{EA}$	潜伏者转变成无症状感染者的概率
$q_n^t$	节点n从第t开始剩余隔离天数	$\alpha_{EI}$	潜伏者转变成症状感染者的概率
$E_n^t$	节点n在第t天接触的节点集	$\beta$	易感人群转变成潜伏者的概率
$e_{i,j}$	节点i和j的接触	$\mu_{AI}$	无症状感染者变成症状感染者的概率
$V$	节点集合	$\gamma_{AR}$	无症状感染者康复概率
$N$	节点个数	$\gamma_{IR}$	症状感染者康复概率
$U$	区域个数	$\eta$	节点之间的接触率
$C$	区域集合	$\eta_{SM_1}$	易感人群转化为自愿戴口罩人群的概率
$I_C^t$	第t天存在感染者区域集合	$\eta_{M_1S}$	自愿戴口罩人群转化为易感人群的概率
$P$	节点偏好活动区域个数	$\eta_{SM_2}$	易感人群转化为亲密接触者的概率
$d_q$	隔离个体的天数	$\sigma_{AQ_2}$	无症状感染者被隔离的概率
$d_l$	封锁区域的天数	$\varphi$	潜伏者转化为亲密接触者的概率
$\xi$	干预程度		
$\kappa$	节点戴口罩指数		
$G$	区域吸引力集合		
$g_u$	任意的区域 $c_u \sim$ 的吸引力指数		
$\theta$	节点对病毒的预防措施系数		
$\bar{C}$	封锁区域集		

考虑到整体系统的运转可分为两个子系统，分别为病毒传播系统(Pandemic Spreading System,PSS)和病毒干预措施系统(Pandemic Intervention System,PIS)。在PSS中专注于病毒在所有个体上的传播，而PIS则是根据PSS的传播情况及时做出干预措施以抵御PSS的运转，当PIS传输到PSS的信号越强烈，PSS输出的信号则越强烈，进一步抵制PIS的输出。为了方便阅读和理解，在这里我将下面会用到的符号列出，以便读者查阅。



# 1. System Initialize

## 1.1 Environment Initialize

环境的初始化在本系统中只有区域设置的部分。实验使用的区域划分在原始数据上有提供，但由于不清楚区域划分的算法，因此令初始化划分的区域集  $\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_U\}$ ，其中  $U$  为区域个数，其中每个区域  $\forall C_u^t \in \mathbf{C}, C_u = c_u, c'_u, \bar{c}^t$  表示第  $t$  天时区域的属性，分别是区域的唯一 ID  $c_u$ ，是否存在感染者  $c'_u$  和封锁天数  $\bar{l}_u$ ，当  $\bar{l}_u > 0$  表示该区域处于封锁状态，待解封的天数剩余  $\bar{l}_u$  天，在这期间，区域内的所有节点不能外出，区域外的所有节点不能进入。在之后的时间中，由于病毒传播的模拟可能一些地区可能会出现一些病例，则记  $C'^t = \{c'_1, c'_2, \dots, c'_H\}$  为存在感染者的区域集合，当  $t = 0$  初始化时， $C'^0 = \emptyset$ 。此外，系统记录每日封锁的区域为  $\bar{C}^t = \{\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_U\}$ ，当  $t = 0$  初始化时， $\forall \bar{c}_u = 0$

## 1.2 Individual Initialize

首先初始化节点集合  $\mathbf{V} = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ ， $N$  表示节点个数。节点在  $t$  时刻任意个体  $V_n^t \in \mathbf{V}$ ， $V_n^t = \{v_n^t, s_n^t, m_n^t, C_n^t, w_n^t, q_n^t, E_n^t\}$  表示个体  $n$  在  $t$  天分别具有属性节点 ID  $v_n^t$ 、身体状况  $s_n^t$ 、位置  $m_n^t$ 、偏好区域  $C_n^t$ 、是否戴口罩  $w_n^t$ 、剩余隔离天数  $q_n^t$ 、邻居集合  $E_n^t$

### 1.2.1 State Setting

$-1 \leq S_n^t \leq 3, S_n^t \in Z$  中的值如表 1 所示分别代表着节点的所扮演的角色  $s_{v_n}^t$ ，从 -1 到 3 分别表示为易感染状态，潜伏期，有症状感染期，无症状感染期。初始状态  $t = 0$  下，除了随机筛选  $i$  个得到节点集合  $I$  作为有症状感染者外，其他节点的状态都设定为 0。当  $t \geq 1$  时，

所有的节点状态都会随着PSS 计算得到 $t^{th}$ 天的状态。在初期节点状态的表达式为

$$s_{v_n}^0 = \begin{cases} 0 & v_n \in I \\ 2 & v_n \notin I \end{cases} \quad (1.1)$$

### 1.2.2 Area Preference Setting

偏好区域 $C_n^0$ 是根据现实区域吸引力指数集 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_U\}$ , 按区域吸引力带权重有放回地随机选择 $P$ 个获得的,  $\forall g_{c_u} \in G$ ,

$$g_{c_u} = \frac{\rho}{N} \quad (1.2)$$

表示某地区的吸引力指数, 其中 $\rho$ 表示有多少个节点在区域 $c_u$ 上打过卡, 接着带权重的随机抽取的区域集作为初始化的偏好区域集 $C_n^0$ 可表示为

$$C_n^0 = \text{Random}(G, C, P) \quad (1.3)$$

,其中,  $G$ 为区域集 $C$ 的吸引力系数集,  $P$ 为随机抽取偏好区域的大小, 值得注意的是, 这样有放回的选择会使得 $C_n^0$ 中存在重复值, 那么这种方法可以获得获得节点独特的移动偏好, 但是人类集中的区域分布极不均匀, 会导致很多的节点用拥挤到一个区域内, 从而某个区域在 $t^{th}$ 时刻某些权重高的区域人数数量极大(在实际实验中并没有考虑到某区域人口爆炸的问题)。然而如果系统PIS如果启动了隔离政策, 那么 $C_n^t$ 可能会有所改变, 具体的改变在下一个节会考虑到整体系统的运转可分为两个子系统介绍。

### 1.2.3 Individual Motivating and Mask Wearing

在第 $t$ 天节点可以从偏好区域 $C_n^t$ 中随机选择一个作为节点当天活动的区域 $m_n^t$ , 在初始化过程中不设任何值。 $w_n^t$  代表在第 $t$ 天是否会戴口罩, 在初始化的过程中, 也就是说所有节点并没有意识到病毒的到来, 因此假设所有节点都不戴口罩  $w_n^0 = 0$ , 同样的 $q_n^0 = 0$ 意味着所有节点初始化时无需隔离。对于节点活动区域选择方式, 首先节点会优先选择在偏好的区域中未存在病例的区域

$$\Delta C_{v_n}^t = C_{v_n}^0 \cap C'^t, \quad (1.4)$$

此外, 当PIS干预系统执行了区域封锁(Lockdown)的时候, 节点的活动收到了一定程度的限制。首先, 当节点在第 $t$ 天存在被封锁的区域 $\bar{C}^t$ 内, 那么节点被受到禁锢, 在封锁期间内只能在第 $t$ 天的区域内活动, 最后节点 $v_n$ 每日活动的区域表达式为

$$m_{v_n}^t = \begin{cases} \text{Random}(\Delta C_{v_n}^t) & m_{v_n}^{t-1} \in \bar{C}^t \\ m_{v_n}^{t-1} & m_{v_n}^{t-1} \notin \bar{C}^t \end{cases} \quad (1.5)$$

其中 $\text{Random}()$ 表示的是随机选择的方法。随着时间的推移, 由于病毒的传播可能会导致大量的易感人群感染, 节点逐渐意识到病毒的危害性, 病毒传播系统中的节点被设置自愿

地戴上口罩，在这里我们定义 $\theta$ 作为节点对病毒的预防措施系数，而节点每日的预防措施系数可表示为

$$\theta' = \frac{\text{Length}(\Delta C_{v_n}^t \cap C^t)}{P}, \quad (1.6)$$

其中 $\text{Length}()$ 表示的是取集合的个数， $C^t$ 表示在第 $t$ 天存在感染者区域集合， $P$ 为节点偏好区域大小，当 $\theta' \in [0, \theta]$ 时，节点会执行戴口罩的预防病毒传播的措施。此外，对于戴口罩的行为还有一种强制性质的，就是节点 $v_n$ 成为维持 $q_{v_n}^t$ 密切关注者 $M$ 的时候，这种情况节点必须戴上口罩才能到达自由区，最后节点每日是否戴口罩可用表达式

$$w_{v_n}^t = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta' \leq \theta, q_{v_n}^t \geq 0 \\ 0 & \theta \leq \theta' \leq 1, q_{v_n}^t = 0 \\ 1 & \theta \leq \theta' \leq 1, q_{v_n}^t > 0 (\text{Mandatory}) \end{cases} \quad (1.7)$$

其中Mandatory表示节点到达区域 $m_{v_n}^t$ 之前被强迫性地戴上口罩。

---

#### Algorithm 1: Motivate

---

**Input :** individual  $D_n^t = \{S_{v_n}^t, m_{v_n}^t, \hat{C}_{v_n}^t, w_{v_n}^t, Q_v^t\}$ ,

Infected community  $C^t$ ,

Day  $t$

1

2 if  $m_{v_n}^{t-1} \neq -1$  then

$$3 \quad \begin{aligned} w_{v_n}^t &= \begin{cases} 0 & q = 0 \\ 1 & q > 0 \end{cases} \\ \hat{C}_{v_n}^t &= \hat{C}_{v_n}^0 \cap C^t \\ m_{v_n}^t &= \begin{cases} \text{Random}(\Delta C_{v_n}^t) & \hat{C}_{v_n}^t \neq \emptyset, l = 0, S_{v_n}^t \neq 2 \\ \text{Random}(C_{v_n}^0) & \hat{C}_{v_n}^t = \emptyset, l = 0, S_{v_n}^t \neq 2 \\ m_{v_n}^{t-1} & l > 0, S_{v_n}^t \neq 2 \\ -1 & S_{v_n}^t = 2 \end{cases} \end{aligned}$$

4 return  $m_{v_n}^t$

---

#### 1.2.4 Contact Network Obtain

在系统中，节点的接触行为是疾病传播的唯一途径，节点之间在同一网络中会有一定概率下接触，也就是在网络上存在连边，但是节点间不能在不同区域中接触。 $E_n^t = \{v_1, v_2, \dots, v_J\}$ 是在同一天同一个区域节点 $v_n$ 和其他节点的以概率 $\eta$ 接触的集合， $\forall v_j \in E_n^t$ 表示节点 $v_n$ 和节点 $v_j$ 存在接触关系。在初始化 $t = 0$ 时 $E_n^0 = \emptyset$ 。



## 2. Pandemic Spreading System

### 2.1 SEAIR

这里参照16 February 2020 Kentaro Iwata发表在Journal of Clinical Medicine的文章假定人群中可以分成以下4种隔室:

- 易感人群 $S$ : 能够被疾病感染的人群;
- 暴露人群 $E$ : 已经被感染, 但是还没有发病的人群;
- 感染人群 $I$ : 能够传播疾病的人群
- 移除人群 $R$ : 已经免疫或者死亡的人群

假设动物没有新的传播, 个体免疫力没有差异, 流行病的时间尺度比人口统计学过程(自然出生和死亡)的特征时间快得多, 自然出生和死亡没有差异。那么该动力学系统可以由下图抽象表示: 根据该动力学系统的流程, 建立传染病动力学模型, 其微分方程组为:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{C\beta IS}{N}, \\ \frac{dE}{dt} = \frac{C\beta IS}{N} - \sigma E, \\ \frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I. \end{cases} \quad (2.1)$$

其中 $\beta$ 为疾病的传播速率,  $\sigma$ 是由平均潜伏期的倒数计算出来的感染率,  $\gamma$ 是由感染期的倒数计算出来的治愈率或者死亡率,  $C$ 的接触率,  $N = S + E + I + R$ 为总人口规模, 其中接触率 $C$ 由于是根据节点之间的距离得到的并且节点具有移动能力, 使得接触率 $C$ 是动态变化的。SEAIR的微分方程不会推导

### 2.2 Our proposed method (待续)

在宏观层面上, 整个系统可以归纳为SEAIR的拓展, 在SEAIR的基础上加入了状态M,

Q。在这里假定人群中可以分成以下4种隔室:

- 易感人群 $S$ : 能够被疾病感染的人群;
- 密切关注人群 $M$ : 可能与感染者存在联系的人群
- 暴露人群 $E$ : 已经被感染, 但是还没有发病的人群;
- 感染人群 $I$ : 能够传播疾病的人群
- 隔离人群 $Q$ : 被隔离的感染者人群
- 移除人群 $R$ : 已经免疫或者死亡的人群

假设个体没有新的传播, 个体免疫力没有差异, 流行病的时间尺度比人口统计学过程(自然出生和死亡)的特征时间快得多, 自然出生和死亡没有差异。那么该动力学系统可以由下图抽象表示: 根据该动力学系统的流程, 建立传染病动力学模型, 其微分方程组为(还不会写。。。):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\frac{C\beta IS}{N}, \\ \frac{dE}{dt} = \frac{C\beta IS}{N} - \sigma E, \\ \frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I. \end{array} \right. \quad (2.2)$$

其中 $\beta$ 为疾病的传播速率,  $\sigma$ 是由平均潜伏期的倒数计算出来的感染率,  $\gamma$ 是由感染期的倒数计算出来的治愈率或者死亡率,  $C$ 的接触率,  $N = S + E + I + R$ 为总人口规模, 其中接触率 $C$ 由于是根据节点之间的距离得到的并且节点具有移动能力, 使得接触率 $C$ 是动态变化的。

### 3. Intervention Strategy

#### 3.1 基于区域检测干预系统

**Algorithm 2:** AreaTesting Function

---

```
Input :V,Ct',t,q,l
1 for Vnt = V1t, V2t, ..., VNt do
2   if snt = I(Infected) then
3     | Ct' = Ct' ∪ {mvnt}
4     |   if ̄cmnt = 0 then
5       |     | ̄cmnt = l
6   end
7 for vnt = v1t, v2t, ..., vNt do
8   if {mvnt} ∩ Ct' ≠ ∅ then
9     | if Svn = A or Svn = I then
10    |   | mvt = -1;
11    | else
12    |   | Qvnt = q;
13 end
```

---

实验设计了采用一种基于区域的检测策略，当检测器检测到病人时，系统隔离的不仅仅是病人，还将当时刻病人所在的整个区域的个体都经过检测器检测一次，如果确认是病人则隔离，在这片区域设置 $l$ 天的封锁天数。然后存在一个问题就是，个体偏好的活动区域都存在被隔离的时候，当偏好的区域数超过偏好某个值时，个体大概率意识到问题的

严重性，因此会带上口罩，以隔绝病毒的传播，在这里，实验不考虑一些个体存在无论如何都不带口罩的偏执行为。此外，当 $\forall n \in [0, N], s_n^t = 2$ 时，实验立刻对对应的区域 $m_n^t$ 的所有个体检测，如果检测到个体为无症状感染者或者症状感染者时，那么对该个体执行强制隔离并护送到隔离区，除此以外的其他人在 $q$ 天内成为了密切关注者，并采取一种软隔离的方法，即不强制互动到隔离区隔离，让个体仍然具有移动能力，但监督并强制该个体进入其他区域时戴上口罩。

### 3.2 基于邻居检测干预系统

基于邻居的干预系统(One Hop Intervention System, OHIS)是一种以一阶邻居为基础干预系统，实验中的传播系统中，最大的一阶邻居集合为整个区域的个体，仅对一阶邻居检测而言，他的对比与区域检测的成本来说是相对较低的，但由于病毒存在潜伏期和无症状感染者，使得病毒更加得隐蔽，单靠一阶邻居的检测是很难控制住或有效减缓病毒的传播的，因此，我们在一阶邻居的基础上，加入了区域封锁，密切关注检测隔离的策略。整个干预系统的算法如算法3 所示，该系统不考虑感染者隐瞒病情，谎报等人为因素，首先任意的节点 $v_n$ 如果具有发病症状即为有症状的感染者后，节点 $v_n$ 立刻汇报到干预系统中，干预系统OHIS立刻对节点所在的区域 $m_{v_n}^t$ 进行维持 $l$ 天的封锁，随机便开始对节点的一阶邻居 $E_{v_n}^t$ 进行核酸检测，当检测结果为阳性那么节点的邻居 $v_j^t$ 立刻被隔离，直到不具备感染能力为止，而检测结果为阴性则视该节点 $v_j$ 为密切关注者，持续事件为 $q$ 天，密切关注者在活动时必须采取戴口罩或者能够隔绝病毒传播途径的方式才被允许进入到其他的区域中。值得注意的是，当 $q = 0$ 表示节点不是密切关注者， $l = 0$ 时表示区域开放。

---

**Algorithm 3:** OneHopTesting Function

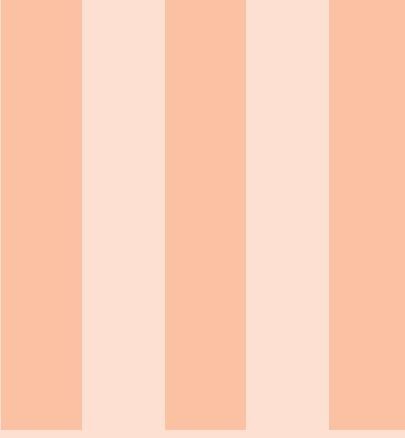
---

```

Input :  $V, C^t, t, q, l$ 
1 for  $v_n^t = v_1^t, v_2^t, \dots, v_N^t$  do
2   if  $s_n^t = I(\text{Infected})$  then
3     if  $\bar{c}_{m_{v_n}^t} = 0$  then
4        $\bar{c}_{m_{v_n}^t} = l$ 
5       for  $v_j^t = v_1^t, v_2^t, \dots, v_l^t \in E_{v_n}^t$  do
6         if  $s_j^t = A$  or  $s_j^t = I$  then
7            $m_v^t = -1;$ 
8         else
9            $Q_{v_j}^t = q$ 
10      end
11    end

```

---



# 数据介绍

4	Gowalla Data .....	33
5	区域数据划分 .....	35
5.1	划分方法	





## 4. Gowalla Data





## 5. 区域数据划分

### 5.1 划分方法



# Experiment



<b>6</b>	<b>系统参数设置</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>result</b>	<b>41</b>
7.1	遇到的问题	
7.2	Baseline	
7.3	各种策略下对病毒传播的影响	
7.4	延迟执行检测和追踪对结果的影响	
7.5	在执行追踪与隔离下不同的密切关注时间对病毒传播的影响	
7.6	在执行追踪与隔离和封锁下不同的封锁时间对病毒传播的影响	
	<b>Bibliography</b>	<b>53</b>
	Articles	



## 6. 系统参数设置

实验中疾病传播模型的定值参数有以下， $\beta_{SE} = 0.1$ ,  $\alpha_{EI} = 1/14$ ,  $\alpha_{EA} = 1/14$ ,  $\mu_{AI} = 1/14$   $\gamma_{AR} = 1/14$   $\gamma_{IR} = 1/28$  初始化随机选择*i* = 1 个得到节点为有症状感染者，在PIS干预系统上，实验进行了多种组合方式对模拟仿真模型的干预情况，首先使用偏好区域类型为{"Read From Gowalla","Random"}，其中Gowalla真实的打卡数据是基于真实的打卡数据生成的区域引力权重，而Random则随机生成。在节点的偏好大小设置上分别为{10,15,30}，此外，当执行密切关注措施时，实验设置了参数集为q = {0,7,14}，表示密切关注的天数，而检测方式分别设置了{"AreaTesting",OneHopTesting} 作为对比，当执行封锁措施时，实验设置了l = {0,7,14}的参数集，表示存在区域封锁的天数。而抗议人群指数，实验设置了阈值θ = {0,0.3,0.7,1.0}。以上的参数集合使用网格搜索的方式，将组合的参数组全部执行一次完整的模拟。



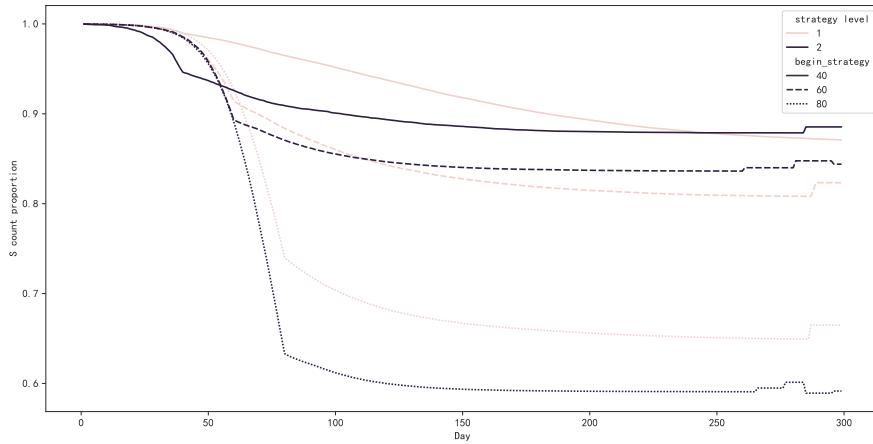
## 7. result

为了更好的比较各种干预措施下对疾病传播模拟系统PSS的影响，实验结果统计了多组参数下各个状态的节点个数曲线。所有的实验都重复5次，在实验过程中，一些参数的组合可能使得病毒无法正常传播，因此设置了一个忍耐值为20来减少随机的传播的影响，当一组参数每重复一次都会有20次的忍耐，当所有重复的实验都无法实行时，也就是说一组参数的实验执行  $5 \times 20$  都无法传播成功，系统即判断该参数组为失败组，反之系统则判定该参数加入到成功组中。[分析成功组和失败的情况]

### 7.1 遇到的问题

#### 7.1.1 2021年9月21日

排除了一些bug再次从结果上看，我发现有些时候一些组的传播情况与其他的不一样。这里的组可以说是任何的参数组下传播的情况。举个例子，如图7.1.1, 橙色的竖线表示第40天的分割线，虚线的曲线表示在40天开始执行区域检测，在40天以前，易感人群的变化程度都是差不多的，但从结果上不难发现，深色的曲虚线即40天后执行了隔离+封锁阶段的区域检测的易感人群已经有明显下降的趋势，在这之前并没有执行任何的策略，这可能是节点运动差异导致增快病毒的传播，当初始节点在吸引力较高的区域，并且经常逗留在这些区域，那么他就成为了一个超级传播者，在这种情况下，是有可能加速病毒的传播的。由于这种情况的出现，那么可以多一组实验，我觉得如果考虑到初始时刻的节点位置和偏好，也就是说在实验中设计三组实验，一种是随机初始感染节点，另一种是设置在偏远地区上随机初始感染节点，还有一种是在地区非常活跃的地方设置初始感染节点。



### 7.1.2 为什么不同干预强度下40天前的变化如此的大？

通过图7.1.1不难发现，黑色的曲线已经进入到病毒传播的爆发期了，而其他的两种还没有什么变化，出现这种情况的原因有两个。最主要的原因是因为初始感染节点大都集中在吸引力强的区域上，这样每次初始感染节点就会比其他的情况下传播得更多，从侧面反应(猜测)，初始感染节点的设置位置不一样，可能会影响整个病毒的传播情况，导致病毒传播的爆发期前移。在过去的研中，也有学者针对不同的网络结构评估信息的传播情况，结果表明不同的网络结构会影响着信息的传播[4]，而在同一结构中，初始信息传播点在不同度的情况下会有不同[]。另一个原因是因为实验的问题，实际上，由于随机选择初始化感染者，会导致有一些节点偏向与偏远地区，从而在病毒的传播过程非常缓慢甚至无法传播，在实验前便考虑到了这种情况，因此在实验设计时，我们对每一组实验重复5次，然后每次实验忍耐度20，也就是说一组实验会执行100次，直到成功执行5次为止，正因为如此，在执行程序的时候，系统会偏向于病毒传播成功且速度快的方向，也就是说在干预程度2级和执行区域检测时，一些传播慢但又能传播成功的实验可能会在执行干预措施后快速阻碍病毒的传播，导致这些传播慢的实验都被系统识别为无效传播而重新实验，那么传播快的实验则被系统认定为有效传播。因此执行干预等级高的实验会因为系统需要病毒成功且快速的传播，因此可能会在曲线中呈现出40天前已经出现病毒爆发式传播的趋势了。

## 7.2 Baseline

Baseline 是不没有PIS干预系统下仅通过PSS传播系统运行而来的。

### 7.2.1 易感人群占比变化情况

首先观察易感人群在不同偏好区域大小下的变化情况如7.2, 图中颜色的深浅随着偏好区域大小的增大而变深，其中，橙色，红色，黑色的曲线分别为偏好区域大小设置为10, 15, 30下的易感人群变化曲线。横坐标表示天数，纵坐标表示人口百分比。节点的偏好区域大小可以反应节点活动的流动范围大小，当PreferenceSize p 增大时，可以认为节点的流动范围较大，而p设置较小则可认为节点的流动范围较小。从整体的曲线的变化情况观察，

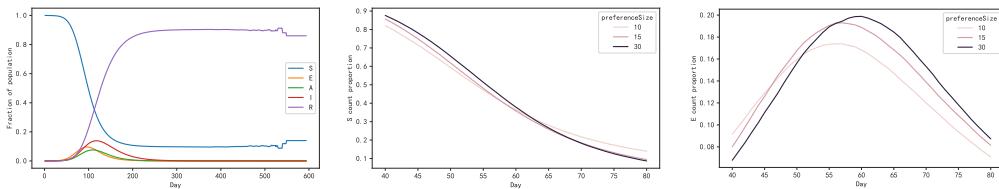


Figure 7.1: S

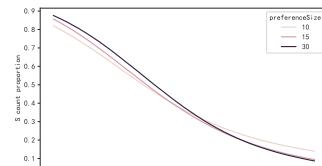


Figure 7.2: S

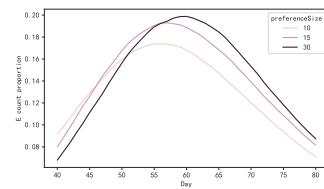


Figure 7.3: E

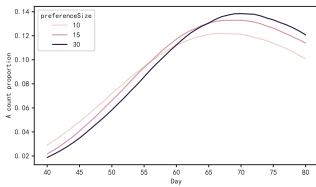


Figure 7.4: A

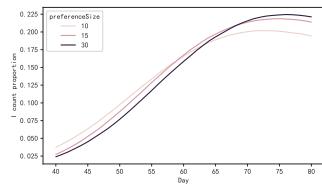


Figure 7.5: I

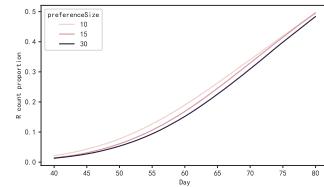


Figure 7.6: R

Figure 7.7: 不同偏好大小的情况下各个状态个数统计情况

无任何干预下三种p下的变化趋势大致相同，传播系统传播病毒的前几天，不难看出存在大部分的易感人群，而在四十天左右开始，病毒的传播开始呈蔓延时的传播，易感人群占比急速下降，直到在100天左右降至最低。而在最后的易感人群人口占比具有微弱的差异以及在100天左右传播最后剩余易感人群的变化情况有不同，最后的易感人群变化中，观察到PreferenceSize越小在最后的剩余的易感人群减少的速率会有所减慢，也就是说，流动范围小的节点可能在最后的传播中因为节点在偏僻区域且流动范围小而导致传播缓慢甚至时有极小部分的人群没有被传播(如果证明这个理论，还要添加每日流动范围小的易感人群占比)。

## 7.2.2 潜伏者人群占比变化情况

潜伏着人口占比的变化情况7.3，橙色，红色，黑色的曲线分别为偏好区域大小设置为10, 15, 30下的潜伏者人群占比变化曲线。观察到整个传播过程，潜伏者人群占比最高不超过总人口20%，在PreferenceSize分别为10, 15, 30的情况下，潜伏者人群占比在整个传播过程中为17.5%, 18%, 19% 最高相差1.5%，而PreferenceSize为15和30相差一倍的情况下，潜伏者人群最高占情况变化极小，只相差总人口的1%，紧接着，当PreferenceSize越小时，不难看出达到峰值的时间有稍微前倾。最高相差5天，而在PreferenceSize相差一倍的15和30下，并没有明显的变化，两个达到峰值的天数仅相差2天。而在100天时，不同PreferenceSize下潜伏者人口占比和易感染人群也有相同的趋势。

## 7.2.3 无症状感染者和有症状感染者人群变化情况

无症状感染者和有症状感染者在baseline中的变化趋势几乎是一摸一样，只有在总人口上有多差别，在三种偏好设置情况下，PreferenceSize  $p = 30$ 的情况下，无症状感染者最高占比达到17.5%，而有症状感染者人数占比最高达13%，在趋势变化上，两者在80天前保持着指数式增长，对于P为10和15的情况下，无症状感染者和有症状感染者的人口占

比在70天时达到顶峰，而P为30的情况下，即人口活动范围增大的情况下，达到峰值的时间在80天，与其他相比延长了10天。

### 7.3 各种策略下对病毒传播的影响

本章节我们主要分析区域检测和邻居检测下在不同的管控强度对病毒传播的影响，在这基础上，我们同样考虑了两者的检测成本和检测精度。由于实验中的可变参数较多，为了能准确的分析及减少其他干预措施所带来的影响，实验将固定参数封锁天数 $l=7$ ，隔离天数 $q=7$ ，开始执行干预措施时间 $t'=40$ ，节点偏好区域大小设置=15，整个系统变化的参数只有strategy level 和 strategy 两个参数，在strategy level中设置了三个等级的干预程度，其中等级为0表示使用任何检测策略都不做任何的防控措施，等级为1表示使用对检测到的患者进行追踪与隔离，其中对密切关注者进行每日检测并且维持 $q$ 天，等级2表示在1的基础上，对患者所在的区域维持 $l$ 天的封锁，在检测方法上，系统使用了基于患者所在区域中全体检测的区域检测和基于一阶邻居的检测。实验将固定参数封锁天数 $l=7$ ，隔离天数 $q=7$ ，开始执行干预措施时间 $t'=40$ ，节点偏好区域大小设置=15，整个系统变化的参数只有strategy level 和 strategy 两个参数。

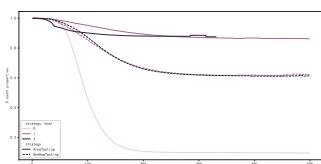


Figure 7.8: S

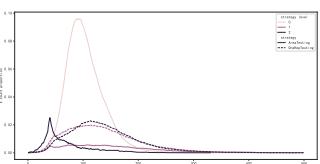


Figure 7.9: E

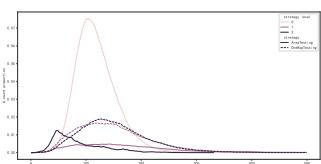


Figure 7.10: A

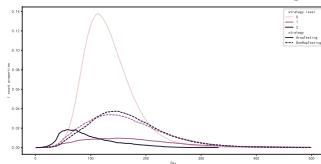


Figure 7.11: I

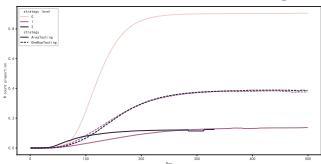


Figure 7.12: R

Figure 7.13: 不同检测策略和强度各个状态个数统计情况

#### 7.3.1 易感人群分布情况

图7.3.1展示了系统在这些干预措施和病毒传播下易感人口比例情况，线条颜色的深浅代表着干预程度的强弱，颜色越深表示干预程度越强，线条的样式表示着干预系统使用检测的策略，实线和虚线分别表示使用了区域检测和一阶邻居检测。通过观察发现，执行不同程度上干预强度，随着时间的推移，最终易感人群有明显的变化。当执行干预的强度越高，最终易感人群的数量占总人数比例越高。在不执行任何干预措施下，易感人群占比最终仅剩下10%，而在干预程度等级在1级以上并且使用一阶邻居检测的情况下，易感人数占比可达到60%，比不执行任何策略人数占比高50%，更多地，在开始执行干预措施时，红色的线人数变化较少，整个传播阶段在爆发前期，而黑色的线则不一样，易感人数变化

开始增大，曲线的斜率肉眼可见的在增大，说明这组实验的传播阶段在爆发期，这使得阻碍病毒的传播更加困难，然而执行强度提升到2级时依然能够迅速控制，一旦干预强度达到2级，曲线的斜率开始迅速减少。值得注意的是，使用这种检测策略时，提升干预程度并不能使得最终的易感人群变少，但能够迅速的阻碍病毒的传播。

#### + 【两种策略的对比】

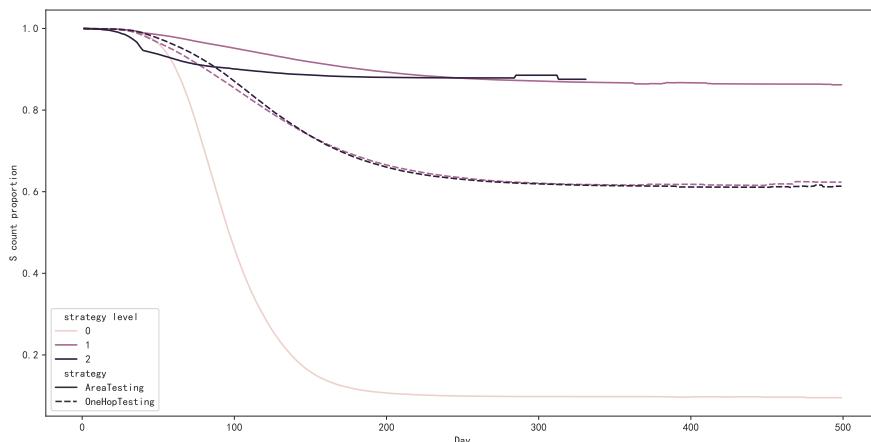


Figure 7.14: 不同干预措施和干预强度下S的变化曲线

### 7.3.2 潜伏者人口变化情况

病毒的潜伏阶段，也就是病毒的孵化期间，以现在的技术PCR是无法检测到的[1]，因此在实际中只能计算或猜测可能存在的潜伏者个数。通过系统的模拟，潜伏者的人口占比变化如图7.3.2所示，不采取任何的干预措施下潜伏者的占比最高达到总人口10%，而采取了干预措施的潜伏者的占比最高达到5% 在采取与不采取两者相差5%，其中采取区域检测和一阶邻居检测的潜伏者人口占比最高分别达到5%,?%，在执行干预措施后开始，潜伏者的人口迅速下降，并且随着干预程度的提升，曲线的变化程度有所不同，干预等级越高，那么曲线的斜率变化越大，同样的，为什么执行干预前干预等级为2的曲线比干预等级为1的人口比例变化如此明显？这点在小节??。【两种检测策略相比。】

### 7.3.3 无症状感染者和有症状感染者的人口变化

无症状感染者(A)和有症状感染者(I)的人口变化在总体上相似。在不执行干预措施的情况下，...

### 7.3.4 不同干预程度下的成本

干预程度下的成本的定义是多样化的，很多学者在研究中根据研究内容做出不同的对“成本”的定义，有的学者使用检测数作为其中的成本之一[]，还有的学者使用损失劳动的人口作为衡量的成本[]，【针对封锁，。。。忘了】。对于本实验来说，我们考虑了检测数、隔离数和封锁区域数作为成本。实际上，检测数和区域封锁数都能非常容易的计算出成本，而隔离数则不一样，由于系统执行的是软隔离的形式，也就是说不强制隔离，节点

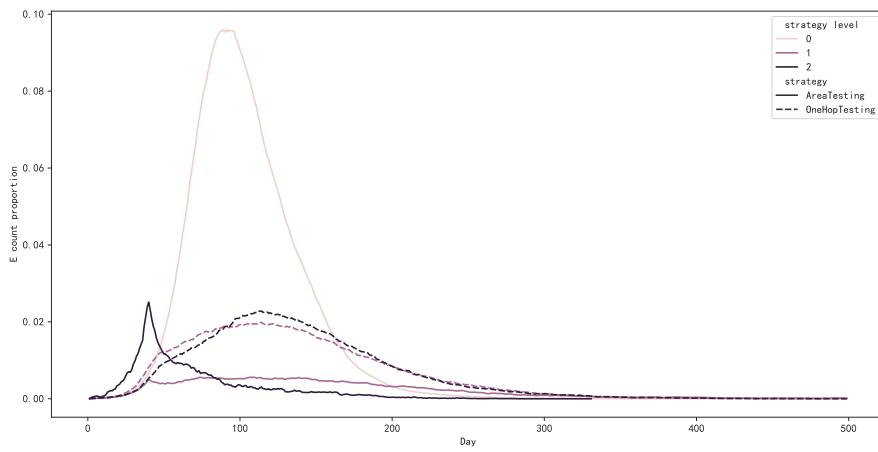


Figure 7.15: 不同干预措施和干预强度下E的变化曲线

可以随意到各个区域，但进入区域之前必须戴口罩，如果考虑这种隔离情况，那么成本将很难计算，因为如果执行这种策略，那么一直需要在各个区域有口罩检测工人，强制隔离人群必须戴口罩才能在区域内活动，这使得维持的成本是巨大的。毋庸置疑，由于隔离人员每日都需要一次核酸检测，当隔离人数增加时，成本也是会增加的。每日检测数变化曲线如图7.3.4所示，为了方便观察，我们将横坐标(天数)限制59-100之内。由于启动干预是在60天，那么之前的检测数都为0，在60天时，由于前期的延误导致积累了很多的感染者，因此执行干预措施的第一天需要检测很多人，对于强度高的干预措施，检测人数也会较多，最高达到总人口的9%。对于使用了区域检测的干预方式，在执行的第一天最高检测了9%的人口，然而却只有2.5%的人口被检测出(命中数)，而干预等级为1的命中数占比相对较少，这在图7.3.4得到证明。随后，检测数迅速下降，那是因为系统已经对所有已经出现病例的区域做了针对性的措施，干预程度最高的是将所有出现病例的区域全部封锁，转而将大量的检测资源投入到隔离人群中。实际上短时间检测大量的个体对于政府的执行力来说极具挑战性，对于疫情爆发的初期，如果政府在执行干预措施时能高效地对节点进行检测，即使用区域检测的检测策略下政府有能力能一天检测9%的人口，那么对于后续的检测相对容易很多，后续只需要保持一段时间高强度的检测并针对隔离人群进行严格把控，控制疫情的时刻指日可待。值得注意的是，提前执行干预措施有着至关重要的作用，这个问题会在下一章节中讨论。隔离人群是重点关注对象，由于COVID-19的特性，能否真正控制住病毒的传播，隔离的人群的管控至关重要。图7.3.4为隔离人群的检测曲线，在执行干预措施的第一天，隔离的人口并不多，最高占总人口的6%。随着时间的流逝，隔离的人口逐渐增加，在47天的时候达到顶峰，最高占总人口的9%。隔离中的命中人数曲线如图7.3.4，通过观察发现，命中人数非常的少。执行干预措施的前期，隔离的人如此庞大下，最终检测到的病人不超过总人口的0.15%，也就是说，使用这种区域检测的干预措施，在隔离人群中投入了大量的检测资源，但最终能检测得到病例的人数不超过总人口的0.15%。

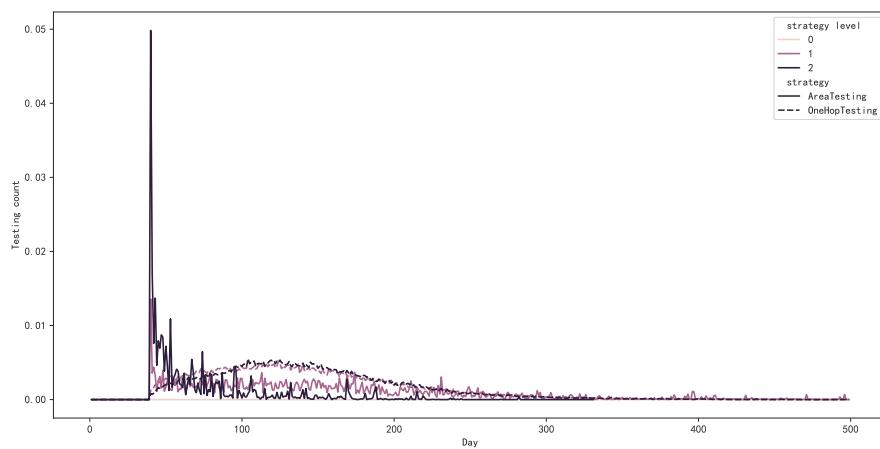


Figure 7.16: 不同干预措施和干预强度下检测数的变化曲线

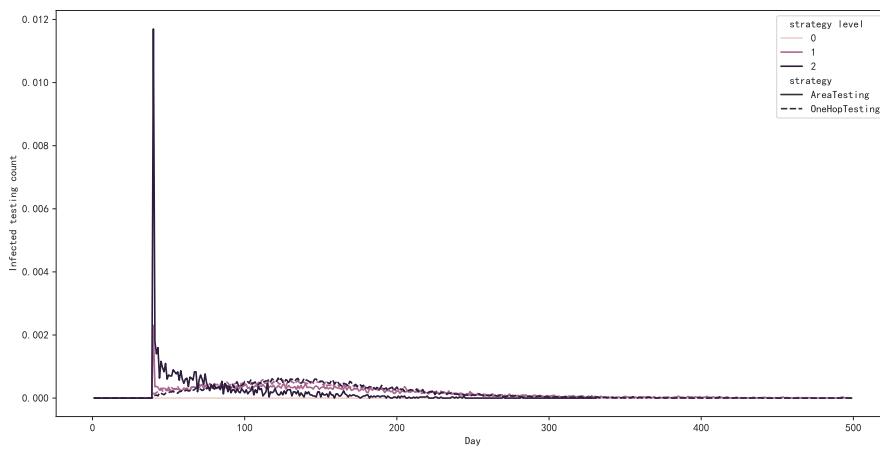


Figure 7.17: 不同干预措施和干预强度下检测命中数的变化曲线

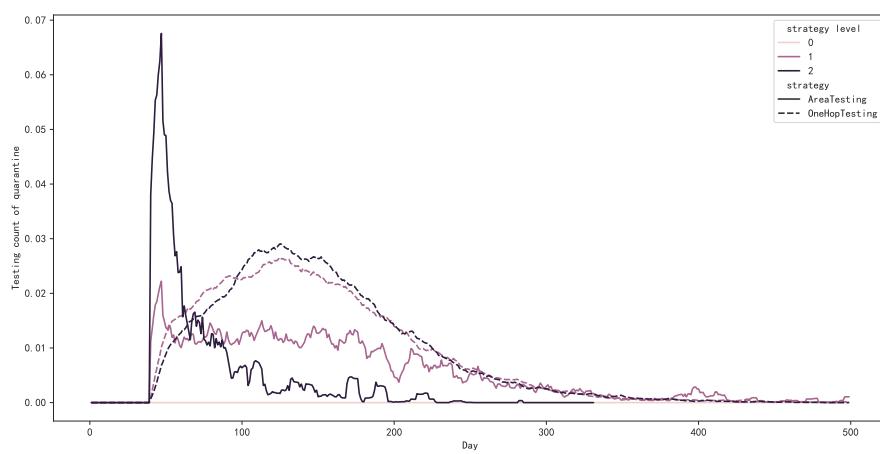


Figure 7.18: 不同干预措施和干预强度下隔离人数的变化曲线

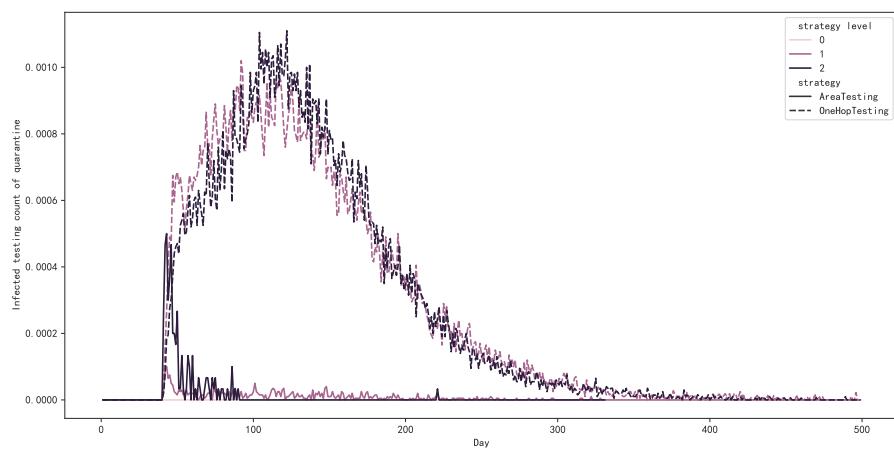


Figure 7.19: 不同干预措施和干预强度下隔离节点检测到发病个数的变化曲线

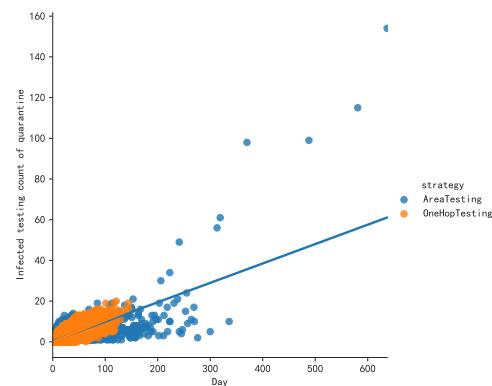


Figure 7.20: 两种检测策略下检测数和检测命中数的分布情况

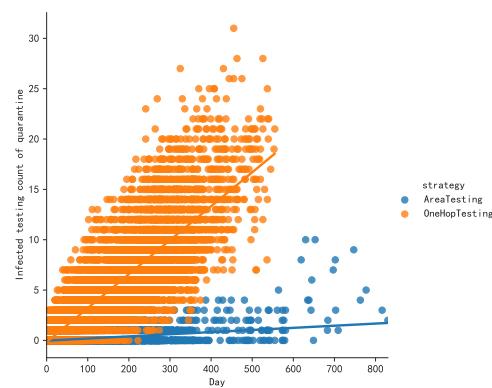


Figure 7.21: 两种检测策略下隔离人数和隔离检测命中数的分布情况

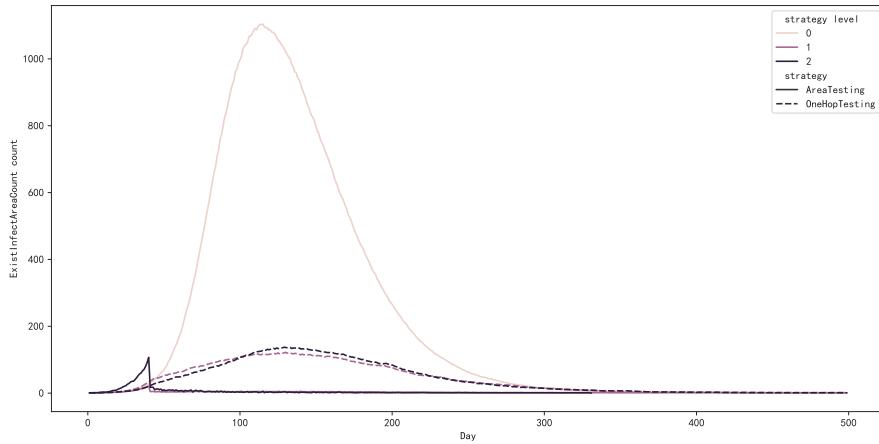


Figure 7.22: 不同干预措施和干预强度下存在感染者区域个数的变化曲线

## 7.4 延迟执行检测和追踪对结果的影响

策略执行的延误严重影响着病毒传播情况，在分析延迟执行干预措施的分析上，已经有不少的学者做出了相当详细的分析[10]. 由于在上一章节中得出同干预等级下，区域检测的方法要比一阶邻居检测的性能好，因此我们选择以区域检测的方法分析不同执行策略的时间对病毒传播的影响。

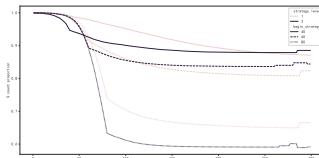


Figure 7.23: S

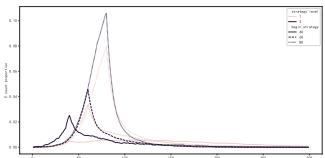


Figure 7.24: E

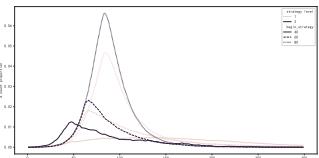


Figure 7.25: A

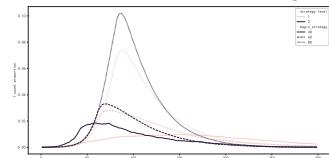


Figure 7.26: I

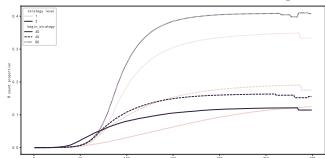


Figure 7.27: R

Figure 7.28: 不同执行干预措施时间下各个状态个数统计情况

### 7.4.1 延迟执行干预措施对感染人数的影响

如图7.26展示的是不同开始执行干预措施和不同等级与感染人数占比曲线图。由于病毒首次爆发到执行策略在现实时间中大概在40天【1】，那么实验的执行措施 $t'$ 的时间从40天开始，采取间隔20天直到80天，这在图中用线的样式表示，图中曲线的颜色表示干预等级，其中等级为1表示为执行检测和追踪的策略，而等级为2表示为检测、追踪和封锁的策略。在干预等级为1时，随着 $t'$ 增加，感染的人数也会增加，其中当 $t'$ 分别为40, 60, 80时，每日统计的感染人数最高达到总人口的7%, 3%, 10%. 最大相差总人口的7%，随着时

间的流逝，越晚执行干预措施，那么系统中每日的感染人数也会越高，这可以在图7.26中得以证明。

### 7.4.2 开始执行策略的时间与检测数的影响

检测是通过医学上的PCR技术实现的，检测数能直接反应原料的需求。实际上，检测的原料的需求受多方面的影响，执行策略的时间 $t'$ 与需求具有关键的影响，当 $t'$ 越大的时，那么检测的需求就越多，这点可以在图7.4.2可以证明，当 $t'$ 达到80的时候，干预系统的检测数已经达到了2222，达到总人口的10%，即使对于国家来说，短时间内检测国家总人口的10%是非常具有挑战性的，而当 $t' = 40$ 时，系统的检测数为500，占总人口的2.5%，两者相差7.5%的人口。考虑到

#### $t'$ 和检测人数的关系

$t'$ 和检测人数需求在执行策略的第一天的时间存在指数式的关系，

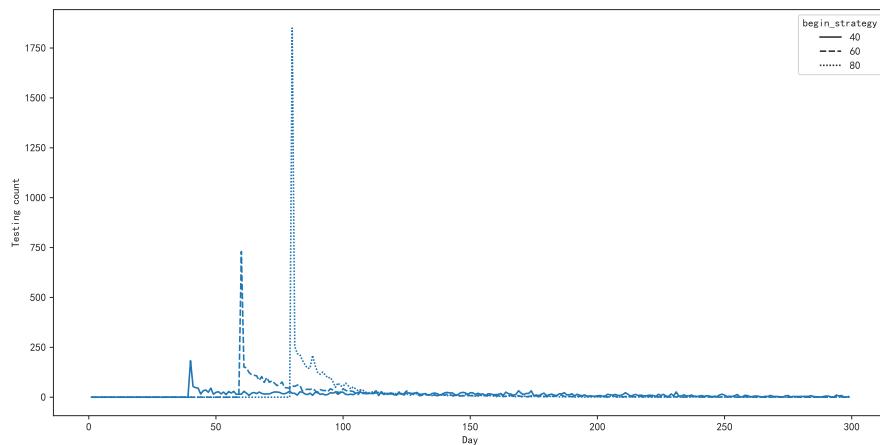


Figure 7.29: 延迟执行干预措施对检测数的变化曲线

### 7.4.3 延迟执行干预措施对检测命中率的影响

$t'$ 和首日执行检测的检测命中率同样地存在指数关系。

### 7.4.4 图

#### 7.5 在执行追踪与隔离下不同的密切关注时间对病毒传播的影响

图太多了，待续

#### 7.6 在执行追踪与隔离和封锁下不同的封锁时间对病毒传播的影响

图太多了，待续

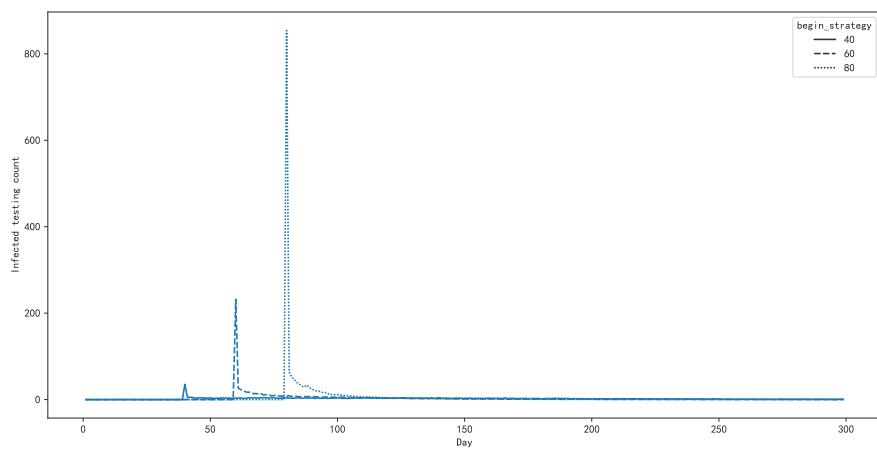


Figure 7.30: 延迟执行干预措施对检测命中数的变化曲线

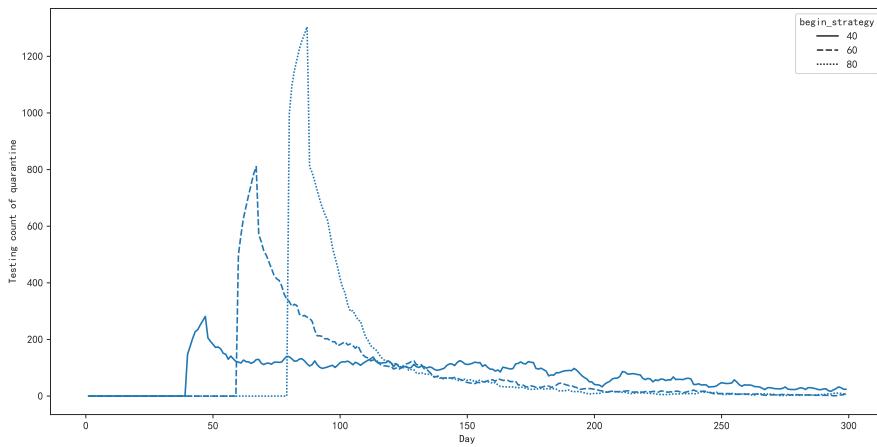


Figure 7.31: 不同干预措施和干预强度下隔离人数的变化曲线

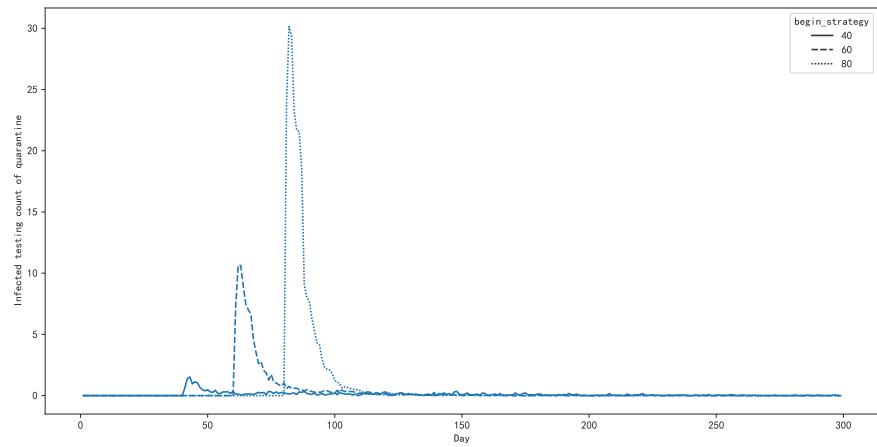


Figure 7.32: 不同干预措施和干预强度下隔离节点检测到发病个数的变化曲线

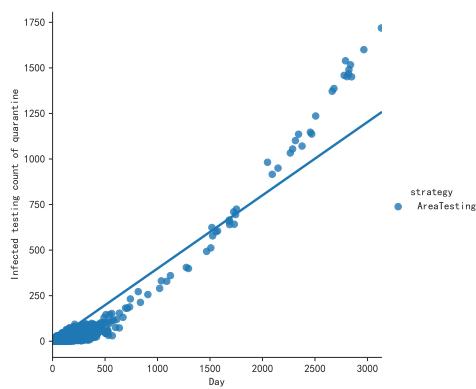


Figure 7.33: 区域检测策略下检测数和检测命中数的分布情况

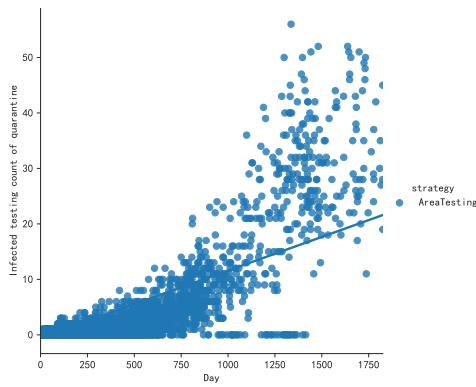


Figure 7.34: 区域检测策略下隔离人数和隔离检测命中数的分布情况

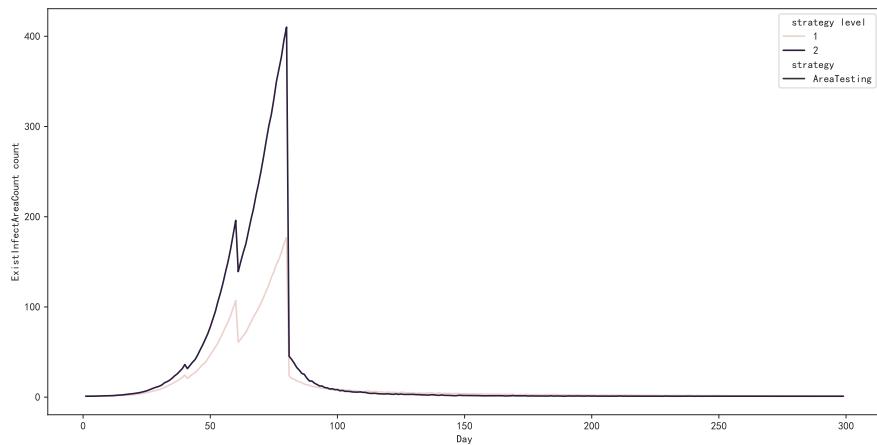


Figure 7.35: 不同干预措施和干预强度下存在感染者区域个数的变化曲线



## Bibliography

### Articles

- [1] Alex Crozier et al. “Put to the test: use of rapid testing technologies for covid-19”. In: bmj 372 (2021).
- [2] Andreas Eilersen and Kim Sneppen. “Cost–benefit of limited isolation and testing in COVID-19 mitigation”. In: Scientific reports 10.1 (2020), pages 1–7.
- [3] Yoav Kolumbus and Noam Nisan. “On the effectiveness of tracking and testing in SEIR models for improving health vs. economy trade-offs”. In: Scientific Reports 11.1 (2021), pages 1–14.
- [4] Kristina Lerman and Rumi Ghosh. “Information contagion: An empirical study of the spread of news on digg and twitter social networks”. In: Fourth international AAAI conference on weblogs and social media 2010.
- [5] Julian Peto et al. “Universal weekly testing as the UK COVID-19 lockdown exit strategy”. In: The Lancet 395.10234 (2020), pages 1420–1421.
- [6] Markus Schläpfer et al. “The universal visitation law of human mobility”. In: Nature 593.7860 (2021), pages 522–527.

