



IMS - Modelování a simulace

Projekt: Epidemiologické modely - mikro-úroveň

Šíření virusu COVID-19 v továrně s větším počtem zaměstnanců

2. December 2020

Nikolas Masica (xmasic00)

René Rešetár (xreset00)

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Popis problému	2
1.2	Autori a zdroje	2
1.3	Validita modelu	2
2	Rozbor témy a použité technológie	2
2.1	Celulárne automaty	3
2.2	Použité technológie	3
3	Koncepcia modelu	3
4	Architektúra simulačného modelu	6
5	Podstata simulačných experimentov a ich priebeh	7
5.1	Postup experimentovania	7
5.2	Dokumentácia jednotlivých experimentov	7
6	Zhrnutie simulačných experimentov a záver	9

1 Úvod

Táto dokumentácia popisuje návrh a implementáciu modelu pre skúmanie šírenia vírusu COVID-19 v továrni s vyšším počtom zamestnancov. Náš model je založený na celulárnych automatoch. Berie v úvahu viacero faktorov ako sú nosenie rúška alebo socialne dištancovanie sa od nakazenej osoby. Model bol založený na článku od Maxa Brennera [8] popisujúcim šírenie vírusu v uzavretom priestore.

S vytvoreným modelom boli uskutočnené experimenty zisťujúce vplyv rôznych podmienok na šírenie vírusu.

1.1 Popis problému

V dnešnej zložitej situácii je modelovanie šírenia nového vírusu COVID-19 a z neho vyplývajúcej choroby dôležitým krokom pri učení sa správnym preventívnym opatreniam. Doteraz bolo vyvinutých veľa nových simulácií, ktoré pokrývajú rôzne oblasti SARS-CoV-2 alebo COVID-19. COVID-19 je spôsobený vírusom SARS-CoV-2, ktorý sa šíri medzi ľuďmi, hlavne keď je infikovaná osoba v blízkom kontakte s inou osobou.

Vírus sa môže šíriť z úst alebo nosa infikovanej osoby v malých tekutých časticách, keď silno kašle, kýcha, hovorí, spieva alebo dýcha. Tieto kvapalné častice majú rôznu veľkosť, od väčších „respiračných kvapôčok“ po menšie „aerosóly“.

1.2 Autori a zdroje

Autormi tohoto projektu sú študenti bakalárskeho štúdia na Fakulte informačných technológií - VUT v Brne: **Nikolas Masica** (xmasic00) a **René Rešetár** (xreset00).

Zdroje k našemu projektu boli primárne rôzne štúdiá a simulácie šírenia vírusu COVID-19.

1.3 Validita modelu

Validitu modelu sme overili pomocou experimentovania s modelom a porovnávania výsledkov s datami nazbieraných pri realnom šírení vírusu COVID-19 alebo rôznych už existujúcich simulácií a štatistík.

2 Rozbor témy a použité technológie

Tému sme si vybrali hlavne preto, že šírenie vírusu COVID-19 je v súčasnosti jednou z hlavných tém a tak nás zaujímalo aký vplyv to bude mať na zdravotný stav ľudí pracujúcich vo väčších továrňach alebo v zamestnaní kde sa stretávajú s vyšším počtom ľudí.

Ako hlavného kandidáta sme si vybrali továreň BOSCH Michalovce [1] na Slovensku, ktorá ma okolo 900 zamestnancov. V úvahu sme brali fakt, že zamestnanci sa rôzne pohybujú po továrni a pravdepodobnosť nakazenia je 0.2. Nakazený zamestnanec je infikovaný 14 dní. Infekčný status má človek 8 až 9 dní, čo znamená, že v tej dobe môže nakaziť ostatných jedincov. Symptomy nákazy sme rozdelili na vážne s pravdepodobnosťou 0.19, bezpríznakové s pravdepodobnosťou 0.35 a mierne. V prípade, že človek bude mať vážne symptomy tak je pravdepodobnosť 0.49, že sa už nezotaví a zomrie. Ak človek nezomrel tak po 14 dňoch prestáva byť infikovaný a zotavil sa z nákazy. Podľa štúdií človek, ktorí sa vyzdravel z nákazy nemôže byť určitú dobu znova nakazený.

2.1 Celulárne automaty

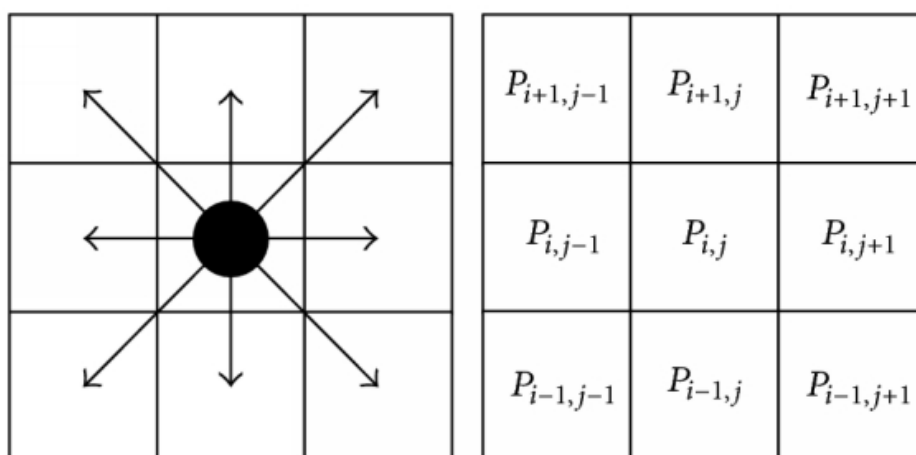
Celulárne automaty [9] sú diskrétné modely, ktoré pozostávajú z mriežky buniek, kde každá bunka môže byť určitým stavom z danej množiny stavov. Pri každom kroku sa každá bunka aktualizuje na nový stav na základe stavov susedov a jednoduchých pravidiel. Používajú sa na modelovanie rôznych oblastí od umelého života po šírenie lesných požiarov. Dôležitým aspektom celulárnych automatov je použitie lokalizácie. Pretože sa bunky aktualizujú na základe svojich susedov, akýkoľvek problém založený na interakciách medzi blízkymi entitami je možné efektívne modelovať pomocou celulárnych automatov. To sa perfektne hodí na modelovanie infekcií, ktoré sa zvyčajne šíria prostredníctvom kvapôčok vody od blízkych ľudí, ktorí kašľú alebo kýchajú.

2.2 Použité technológie

Pre implementáciu bol použitý jazyk C++ [2]. Preklad programu bol testovaný na servere Merlin Fakulty informačných technológií VUT v Brne. Program bol implementovaný na operacnom systéme Ubuntu 20.04 [4] a preložený pomocou nástroja g++ [3].

3 Koncepcia modelu

Model bol založený na dvojrozmernom celulárnom automate tvorenom bunkami so 4 možnými stavmi na základe infikovania a ďalšími 6 stavmi na štádiu infekcie. Okolie týchto buniek (do ktorých sa prípadne môže rozšíriť vírus z nakazenej bunky) je typu Moore [9], vírus sa tak môže rozšíriť do ôsmich smerov.

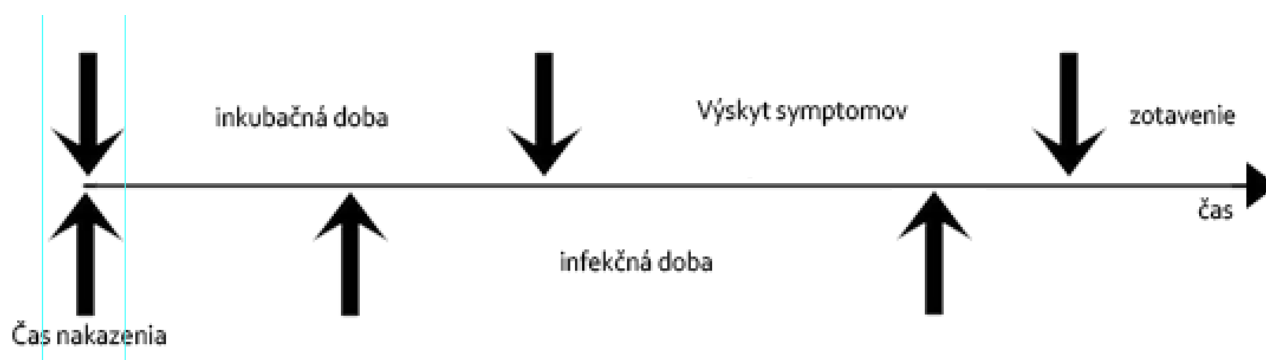


Obrázok 1: Možne smery šírenia vírusu COVID-19. Prevzaté z [6]

Mriežka celularného automatu bola zvolená tak aby jedna jeho bunka odpovedala rozlohe $4,5m^2$ keďže podľa článku SARS-CoV-2 Transmission [5] sa vírus COVID-19 šíri na vzdialenosť $4,5m$. Počiatočný stav automatu sme určili nakažením rôzneho počtu zamestnancov, ktorí sa nakazili mimo práce a budú šíriť vírus ďalej. Simulačné prostredie sa skladá z ľudí v uzavretom priestore. Jednotlivec môže byť náchylný, infikovaný alebo uzdravený. Toto sa riadi základným modelom epidémií SIR.

Zamestnanci v prostredí sa pohybujú a simulujú interakcie. Ľudia, ktorí sa dištancujú majú tendenciu sa pohybovať obranne, aby nestáli príliš blízko pri ostatných. Zatiaľ čo jednotlivci, ktorí nepraktizujú sociálne dištancovanie, sa pohybujú bez toho, aby sa obť ažovali dištancovať od potencialne infekčných ľudí.

Keď sa náchylný človek nakazí, nestane sa okamžite symptomatickým ani infekčným. Infekcia sa správa podľa časovej osi:



Obrázok 2: Časová os správania infekcie. Prevzaté z [7]

Po infekčnej stránke je vírus najskôr latentný, čo znamená, že osoba nie je okamžite infekčná. O niekoľko dní neskôr sa v prípade COVID-19 stanú infekčnými. Najskôr sú v inkubačnej dobe, čo znamená, že nevykazujú príznaky, potom sa stanú symptomatickými (alebo asymptomatický, nikdy nevykazujú príznaky, ktoré môžu byť pre ostatných nebezpečné). Nakoniec môžu príznaky prechádzať od ľahkých až po závažné a potom možno až k smrti. Väčšina však bude mať len mierne príznaky.

Premenná	Hodnota
Pravdepodobnosť nakazenia	20%
S rúškom	10%
Vážne symptomy (okrem bezpríznakových)	19%
Bez príznakov	35%
Šanca že zomrie(v prípade vážnych príznakov)	49%
Pravdepodobnosť pohybu	50%
Pravdepodobnosť pohybu ak je opatrný	25%

Šírenie infekcie sme počítali pomocou Kermack-McKendrick [7] modelu infekcie. Je to užitočné na výpočet počtu infikovaných ľudí v uzavretej populácii v priebehu času. Jedná sa o sériu diferenciálnych rovníc popisujúcich infekciu, avšak v tomto prípade sme na opísanie pravdepodobnosti infikovania použili nediferenciálnu deriváciu vzhľadom na počet infikovaných v okolí.

$$P_{infect} = 1 - (1 - p)^R$$

kde R je počet infekčných susedov a p je pravdepodobnosť infekcie (pravdepodobnosť, že infekčný sused nakazí náchylnu osobu), ktoré vypočítame ako

$$p = [PN + (-1 * (SR * 0.1))] \\ p = \frac{sum(p)}{len(p)}$$

kde PN je pravdepodobnosť nakazenia a SR je číslo *true(1)* alebo *false(0)* podľa toho či nosí rúško alebo nie, keďže sa ukázalo, že nosenie rúška obmedzuje šírenie infekčných častíc. Inými slovami, infekčná osoba, ktorá nosí rúško, má menšiu pravdepodobnosť šírenia vírusu na náchylné osoby v jej blízkosti. Takže vo vyššie uvedenej rovnici p nie je rovnaké pre všetkých infekčných jedincov. Bude nižšie pre tých, ktorí nosia rúško.

Jedným z najdôležitejších krokov k presnému modelovaniu COVID-19 a nielen akejkol'vek generickej infekčnej choroby je získanie správnych pravdepodobností. Mnoho hodnôt nie je ustanovených, takže sme sa držali dôveryhodných zdrojov, ako

sú novšie výskumné práce. Niektoré dôležité hodnoty, ako je základná pravdepodobnosť infekcie a zníženie pravdepodobnosti infekcie pri použití rúška, neexistujú. Preto sme použili hodnoty z článku Maxa Brennera [8]. V programe sme počítali aj SAR (miera sekundárneho útoku) čo znamená pomer celkového počtu infikovaných k celkovému počtu náchylných ľudí, ktorý sme vypočítali na konci simulácie ako

$$SAR = \frac{IP}{T}$$

kde IP je celkový počet infikovaných ľudí za dobu simulácie a T je celkový počet zamestnancov.

Náš model nezohľadňuje fakt, že ľudia sa mohli nakaziť mimo ich zamestnania alebo sme nebrali v úvahu niekoľko dňovú karanténu v prípade, že je človek nakazený. V simulácii sme počítali aj s faktom, že ak človek už raz bol nakazený tak na určitú dobu ma imunitu a nemôže sa znova nakaziť.

4 Architektúra simulačného modelu

Implementácia modelu prebehla pomocou jazyka C++ [2]. Boli použité štandardné knižnice jazyka C++. Program sa preloží príkazom *make* a následne spustí príkazom *./main*. V prípade, že užívateľ chce zmeniť percentuálnu mieru bezpečnostných opatrení (socialne distancoanie alebo nosenie rúška) treba v súbore **Worker.cpp** zmeniť premennu *policy*.

Pre reprezentáciu buniek a ich stavov bola definovaná trieda **Worker** a obsahuje atributy ako vek, súradnice, pravdepodobnosť pohybu, pravdepodobnosť pohybu v prípade, že jednotlivec je starostlivý, dĺžka pohybu, stav a bunka v ktorej sa bude nachádzať pri nasledujúcej iterácii alebo či nosí rúško alebo či praktikuje socialne distancovanie.

Premenné *GRID_WIDTH* a *GRID_HEIGHT* uchovávajú rozmery celulárneho automatu (teda počet buniek v stĺpcoch a riadkoch automatu). Premenna *policy* nam určuje s akou pravdepodobnosťou bude daný jedinec nosiť rúško alebo praktikovať socialne distancovanie.

Program na začiatku simulácie inicializuje pracovníkov a vybere náhodný počet ľudí, ktorí budú nakazení a keď dosiahnu infekčného štádia budú šíriť vírus ďalej. Potom začne proces šírenia nákazy. Pracovníci sa pohybujú po továrni a vírus sa šíri na základe či osoba nosí rúško, praktikuje socialne distancovanie a podľa počtu nakazených susedov.

Funkcia *check_neighbors_n_SD* alebo *check_neighbors_SD* skontroluje susedov podľa toho či daný pracovník praktikuje distancovanie alebo nie. Ak áno tak sa pracovník pohybuje iba na takú pozíciu aby okolo seba nemal iných pracovníkov. Ináč sa

pohybuje kde chce. Funkcia *check_infection* skontroluje či sa v danej iterácii jednotliviec nakazil a zvýši počet nakazených v **DataCollectore**. Nakazený jedinec prejde procesom infekcie popísanej v kapitole vyššie. Počet simulovaných iterácií (počet dní) určuje premenna *ITERATION*.

V **DataCollectore** ukladáme všetky informácie o stave pracovníka {*mild, severe, asymptomatic, death, S, I, R, WM, SD*}. Po ukončení simulácie sa spočítajú všetci, ktorí boli nakazení, vyzdraveli, zomreli alebo sú stále nakazení v rôznom štádiu, s rôznymi príznakmi a všetko je vypísané na štandardný výstup.

5 Podstata simulačných experimentov a ich priebeh

Simulácia má za úlohu zistiť ako sa bude šíriť vírus COVID-19 v uzavretom prostredí s vyšším počtom ľudí za rôznych podmienok či už nosenia rúška alebo praktikovaním sociálneho dištancovania.

5.1 Postup experimentovania

Simulácia bola postupne niekoľko krát spúšťaná na viacerých rôznych experimentoch, kedy sa simuloval počet nakazených zamestnancov, koľko zamestnancov prekonalo nákazu s miernymi, vážnymi príznakmi alebo dokonca koľko ľudí podľa toho náhlo nákaze. Pri každej simulácii výjdu trochu iné čísla, tak sme nakoniec zo získaných dát spravili priemer a vytvorili z nich grafy pre dokumentáciu experimentov. V každom experimente bolo simulovaných 30 iterácií (v našom prípade 30 dní).

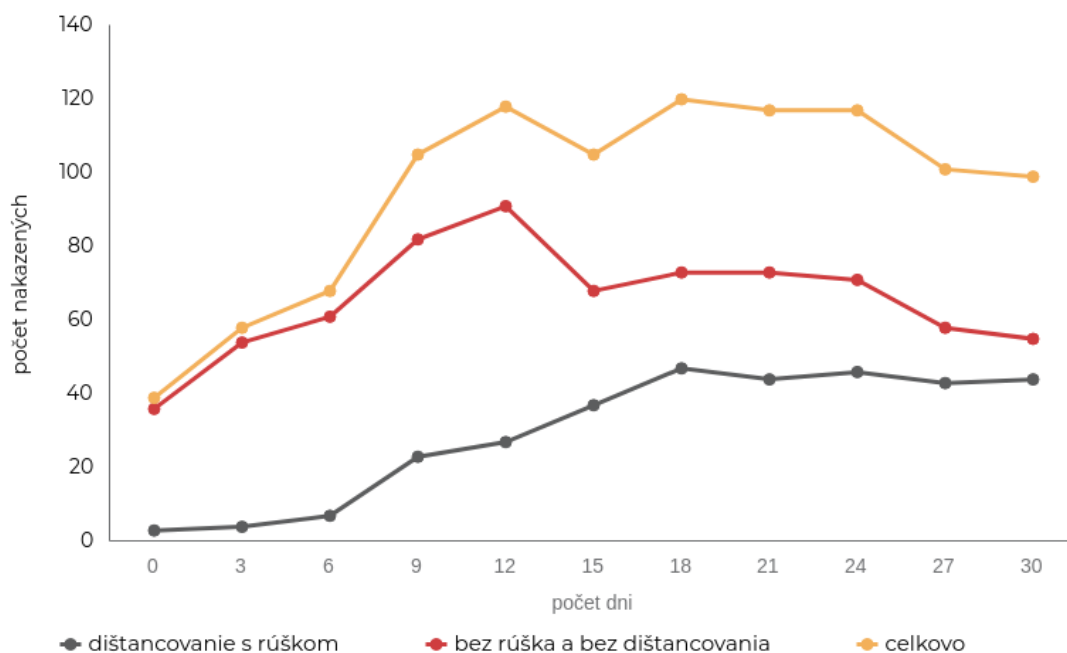
5.2 Dokumentácia jednotlivých experimentov

V prvom experimente sme spustili simuláciu s 900 zamestnancami a sledovali aké následky bude mať vírus COVID-19 na zdravotný stav zamestnancov firmy BOSCH [1] v Michalovciach. Simulácia bola spustená s 10% šancou, že jednotliviec bude nosiť rúško alebo praktikovať dištancovanie.

Počet zamestnancov	900
Počiatočne nakazených	39
Nakazených celkovo	226
Mrtvých	9
Celkovo vyliečených	118
Nakazených na konci simulácie	99
Nosili rúško na konci simulácie	130
Praktikovali dištancovanie	134

Môžeme vidieť, že väčšina z celkového počtu 226 nakazených sa aj vyliečila z nákazy ale 9 nešťastných jednotlivcov podľašlo nákaze.

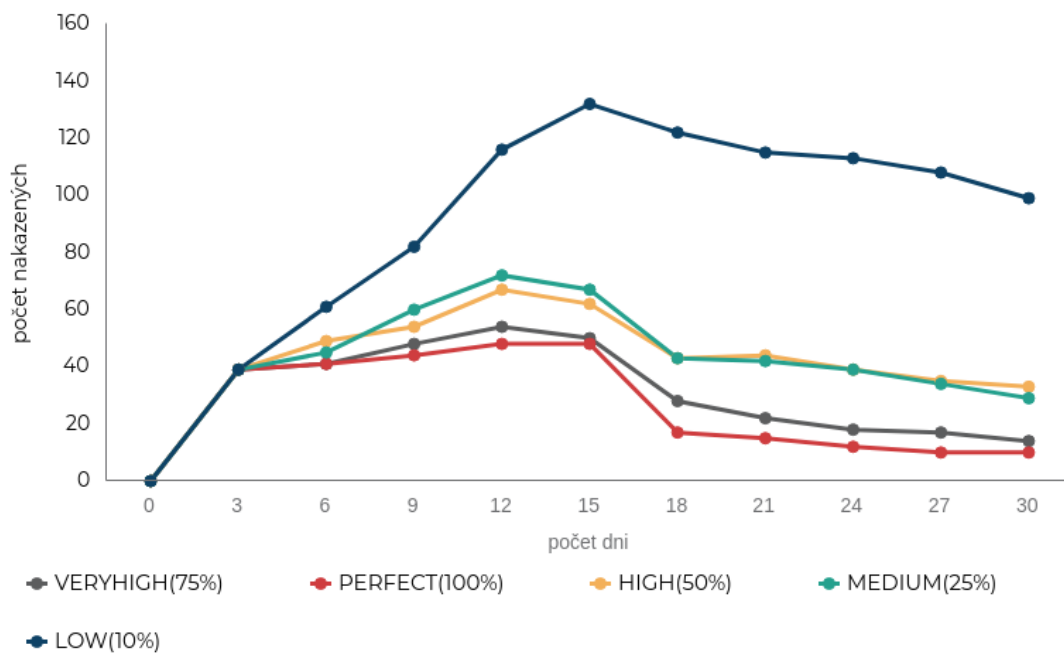
Porovnali sme aj vplyv rúška a sociálneho distancovania na pravdepodobnosť, že sa človek nakazí. Na grafe nižšie môžete vidieť, že ľudí, ktorí rúško nenesli bolo nakazených oveľa viac ako v prípade ak jednotlivec nosil rúško a praktikoval distancovanie.



Ďalej sme porovnali štatistiky v prípadoch s rozdielnou pravdepodobnosťou nosenia rúška a praktikovania distancovania aby sme ukázali, že je dôležité dodržiavať nariadenia a chrániť seba a ľudí okolo nás.

Dobрым spôsobom, ako porovnať účinnosť rôznych bezpečnostných opatrení, je jednoducho sa pozrieť na pomer infikovaných a celkových náchylných jednotlivcov na konci simulácie. Porovnali sme SAR(miera sekundárneho útoku) jednotlivých bezpečnostných opatrení čo sa týka nosenia rúška a distancovania.

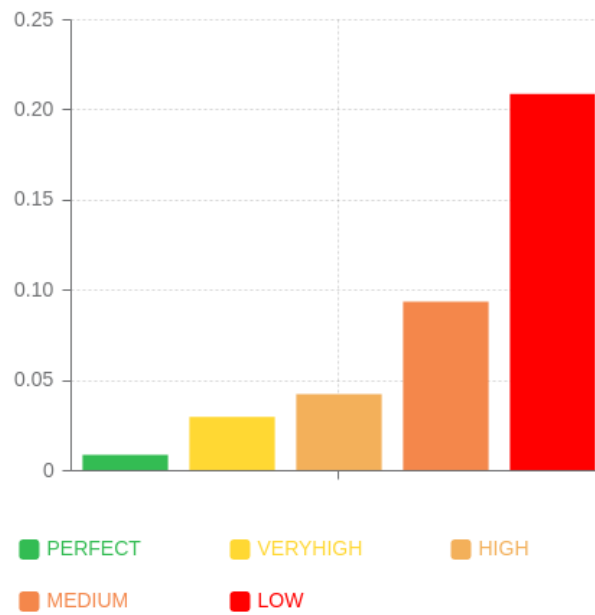
SAR s najnižšími bezpečnostnými opatreniami (v našom prípade 10% , že jednotlivec si vezme rúško) bol skoro 23 krát väčší ako v prípade, že jednotlivec mal šancu 100%, že si vezme rúško. Je zrejmé, že sociálne distancovanie a nosenie rúška znamená nižšiu SAR, tj. menej infikovaných. Dokázali sme tiež, že sociálne distancovanie je veľmi dôležité, pretože medzi SAR hodnotou pre rôzne úrovne sociálneho distancovania je obrovský rozdiel.



6 Zhrnutie simulačných experimentov a záver

V tomto projekte bol vytvorený celulárny automat pre predpoveď šírenia vírusu COVID-19. Prostredníctvom tejto jednoduchej simulácie šírenia vírusu COVID-19 (pomocou štatistík COVID-19) pomocou celularneho automatu môžeme vidieť, aké dôležité je prijať bezpečnostné opatrenia, ako je napríklad spoločenské dištančovanie a nosenie rúšok. Preto treba vykonávať tieto veci a pomôcť spomaliť mieru infekcie COVID-19 aby sa svet vrátil do starých kolíají.

K tejto simulácii je možné pridať oveľa viac vecí, ako sú vplyv veku, hospitalizácia, testovanie a izolácia čo by priblížilo túto simuláciu ešte viac k realite.



Reference

- [1] Bosch Slovensko, 2020
<https://www.bosch.sk/>
- [2] C++ reference, 2020
<https://en.cppreference.com/w/>
- [3] g++ reference, 2020
<https://www.cprogramming.com/g++.html>
- [4] Ubuntu 20.04, 2012
<https://ubuntu.com/>
- [5] Worldometer, SARS-CoV-2 Transmission, 2020
<https://www.worldometers.info/coronavirus/transmission/>
- [6] Zhou, Suiping and Chen, Dan and Cai, Wentong and Luo, Linbo and Low, Malcolm Y. H. and Tian, Feng and Tay, Victor and Ong, Darren and Hamilton, Benjamin, Crowd modeling and simulation technologies, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 2010
- [7] Fu, Shih and Milne, George, 2003, Epidemic Modelling Using Cellular Automata, ACAL2003: The First Australian Conference on Artificial Life; Canberra, Australia

- [8] Max Brenner, Simulating COVID-19 with Cellular Automata, 2020
<https://towardsdatascience.com/simulating-covid-19-with-cellular-automata-aeb820910a9>
- [9] Peringer Petr, Hrubý Martin, Modelování a simulace, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií