

Звіт про проєкт Cancer-cellular-automata

8 травня 2025 р.

1 Вступ

Cancer-cellular-automata — це Python-проєкт, що моделює ріст пухлини за допомогою клітинного автомата (КА). Проєкт реалізує дискретну модель, де кожна клітина сітки представляє біологічний стан, що змінюється згідно з локальними правилами.

2 Структура проєкту

Основні файли проєкту:

- `cells.py` — визначає класи клітин та їх стани.
- `grid.py` — реалізує сітку КА та правила переходів.
- `visualization.py` — відповідає за візуалізацію процесу росту пухлини.
- `requirements.txt` — список залежностей для запуску проєкту.

2.0.1 Автомат **RegularTumorCell** (RTC)

Кожна звичайна пухлинна клітина є стохастичним скінченним автоматом

$$\mathcal{A}_{\text{RTC}} = (S_{\text{RTC}}, \Sigma, \delta_{\text{RTC}}, s_0^{\text{RTC}}),$$

де

- $S_{\text{RTC}} = \{\text{RTC}_k \mid k = 0, 1, \dots, K\} \cup \{\text{EMPTY}\}$,
 - RTC_k — клітина з k залишковими діленнями,
 - EMPTY — порожня позиція (апостроф означає, що автомат припиняє існування).
- Вхідний алфавіт

$$\Sigma = \{ \text{мультимножина сусідніх станів} \}.$$

- Початковий стан $s_0^{\text{RTC}} = \text{RTC}_K$.
- Переходи $\delta_{\text{RTC}}(s, \sigma)$ задаються стохастично:

1. **Апоптоз:** з ймовірністю $p_{\text{apoptosis}}$ - перехід клітини у порожній стан

$$\Pr[s(t+1) = \text{EMPTY}] = p_{\text{apoptosis}}.$$

2. **Проліферація:** якщо $s = \text{RTC}_k$ з $k > 0$, з ймовірністю p_{prolif} :

$$s(t+1) = \text{RTC}_{k-1}, \quad \text{додається новий автомат в стані } \text{RTC}_{k-1}.$$

в сусідній порожній клітинці

3. **Міграція:** з ймовірністю $p_{\text{migration}}$

$$s(t+1) = \text{RTC}_k \quad \text{у новій порожній сусідній позиції.}$$

4. **Спокій:** якщо жодна з попередніх подій не сталася,

$$s(t+1) = s(t).$$

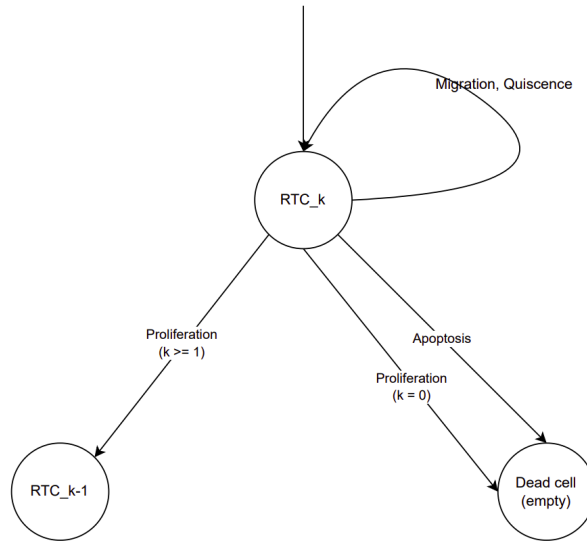


Рис. 1: Автомат RTC, k - кількість поділів, що залишились

2.0.2 Автомат StemTumorCell (STC)

Стовбурова пухлинна клітина:

$$\mathcal{A}_{\text{STC}} = (S_{\text{STC}}, \Sigma, \delta_{\text{STC}}, s_0^{\text{STC}}),$$

де

- $S_{\text{STC}} = \{\text{STC}, \text{EMPTY}\}.$
- Початковий стан $s_0^{\text{STC}} = \text{STC}.$
- Переходи $\delta_{\text{STC}}(s, \sigma):$

1. **Апоптоз:** з ймовірністю $p_{\text{apoptosis}}$

$$\Pr[s(t+1) = \text{EMPTY}] = p_{\text{apoptosis}}.$$

2. **Проліферація:** з ймовірністю p_{prolif} :

$$\begin{cases} \text{симетричне ділення (з ймовірністю } p_{\text{symm}}) : & \text{додається новий автомат в стані ST} \\ \text{асиметричне ділення (з ймовірністю } 1 - p_{\text{symm}}) : & \text{додається новий автомат в стані RT} \end{cases}$$

3. **Міграція:** з ймовірністю $p_{\text{migration}}$ пересувається в порожню сусідню клітинну позицію.

4. **Спокій:** інакше залишається у стані STC.

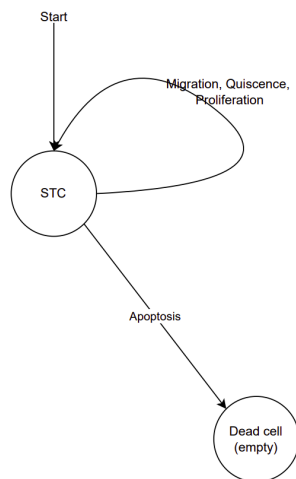


Рис. 2: Автомат STC

2.0.3 Автомат ImmuneCell (IC)

Імунна клітина — більш складний стохастичний автомат:

$$\mathcal{A}_{\text{IC}} = (S_{\text{IC}}, \Sigma, \delta_{\text{IC}}, s_0^{\text{IC}}),$$

де

- $S_{\text{IC}} = \{\text{IC}_\ell \mid \ell = 0, 1, \dots, L\} \cup \{\text{EMPTY}\},$
 - ℓ — число вже виконаних атак,
 - **EMPTY** — позиція без клітини.
- Початковий стан $s_0^{\text{IC}} = \text{IC}_0.$
- Переходи $\delta_{\text{IC}}(s, \sigma):$

1. **Апоптоз:** з ймовірністю $p_{\text{apoptosis}}$

$$\Pr[s(t+1) = \text{EMPTY}] = p_{\text{apoptosis}}.$$

2. **Атака пухлинної клітини:** якщо в сусідах є хоча б одна пухлинна клітина, вибирає ціль і атакує з ймовірністю

$$r_I = \min\left\{1, \text{SUCCESS_RATE} \cdot \frac{n_{\text{IC}}}{n_{\text{TC}}} \cdot f_{\text{type}}\right\}.$$

— при успіху \rightarrow ціль стає EMPTY, $\ell \rightarrow \ell + 1$, після чого можливий перехід у стан EMPTY, якщо $\ell \geq L_{\text{max}}$.

3. **Проліферація після вдалого вбивства:** з ймовірністю $p_{\text{prolif_IC}}$

$$s(t+1) = \text{IC}_\ell \text{ додається новий автомат IC}_0.$$

4. **Міграція:** з ймовірністю $p_{\text{migration}}$ переміщується до порожньої сусідньої позиції, обираючи ту, що мінімізує відстань до пухлинної клітини.

5. **Смерть від невдалої атаки:** якщо атака неуспішна, з ймовірністю

$$r_{\text{death}} = \min\left\{1, \text{DEATH_RATE} \cdot \frac{n_{\text{TC}}}{n_{\text{IC}}}\right\}$$

переходить у EMPTY.

6. **Смерть за віком:** при досягненні lifespan \rightarrow EMPTY.

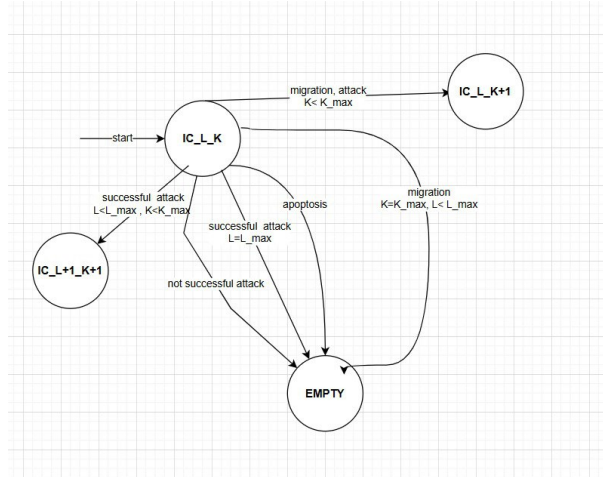


Рис. 3: Автомат ImmuneCell

2.0.4 Автомат ImmuneCell (IC)

3 Візуалізація та інтерактивний інтерфейс

У `visualization.py` додано розширений інтерфейс, який дає змогу не лише спостерігати за ростом пухлини, а й управляти симуляцією в реальному часі.

- **Зміна швидкості ітерацій.** Використовується слайдер для налаштування інтервалу між кадрами (у мілісекундах).
- **Відображення статистики.** Над полем виводиться поточна кількість клітин кожного типу:

$$N_{\text{RTC}}, N_{\text{STC}}, N_{\text{IC}}.$$

- **Завантаження клітин з файлу.** Кнопка «Load Cells» відкриває JSON-файл (наприклад, `cells.json`) з попередньо збереженими позиціями й типами клітин.
- **Генерація клітин за допомогою AI.** Кнопка «AI Generate» викликає метод `ai_generate_cells()`, який на основі заданих параметрів (щільності, розміру пухлинного вогнища тощо) створює початковий розподіл клітин.
- **Терапевтичні інструменти.**
 - *Chemotherapy*: кнопка застосовує хіміотерапію до всіх пухлинних клітин, автоматично змінюючи коефіцієнти `PROLIFERATION_DECREASE` та `DEATH_CHEMOTHERAPY_CHANCE`.
 - *Immunotherapy*: кнопка підсилює імунні клітини викликом методу `apply_immunotherapy`.
- **Налаштування ймовірностей.** Використовується текстове поле (TextBox) для динамічної зміни параметрів кожного типу клітини:

$$p_{\text{apoptosis}}, p_{\text{proliferation}}, p_{\text{migration}}, p_{\text{symm}}, \dots$$

3.1 Моделювання хіміотерапії

Хіміотерапія в моделі реалізується як зовнішнє втручання, що динамічно змінює параметри пухлинних клітин (`RegularTumorCell` та `StemTumorCell`). Основні ефекти:

- Зменшення шансу проліферації на фіксований коефіцієнт $\Delta_p = \text{PROLIFERATION_DECREASE}$.
- Збільшення шансу смерті (апоптозу) на величину $\Delta_d = \text{DEATH_CHEMOTHERAPY_CHANCE}$.

Нехай до застосування хіміотерапії параметри автоматів були:

$$p_{\text{prolif}}^{(0)}, \quad p_{\text{apoptosis}}^{(0)}.$$

Після застосування (однієї `apply_chemotherapy()` або циклічно за розкладом) вони оновлюються так:

$$p'_{\text{prolif}} = p_{\text{prolif}}^{(0)} \times (1 - \Delta_p), \tag{1}$$

$$p'_{\text{apoptosis}} = p_{\text{apoptosis}}^{(0)} + \Delta_d, \tag{2}$$

при цьому стежимо, щоб

$$0 \leq p'_{\text{prolif}} \leq 1, \quad 0 \leq p'_{\text{apoptosis}} \leq 1, \quad p'_{\text{prolif}} + p'_{\text{apoptosis}} + p_{\text{migration}} \leq 1.$$

3.2 Моделювання імунотерапії

Імунотерапія в моделі посилює функціональні можливості імунних клітин (`ImmuneCell`). Основні ефекти:

- Збільшення максимальної кількості атак:

$$\text{max_attacks}' = \text{max_attacks}^{(0)} + \Delta_a,$$

де Δ_a — приріст атак (метод `apply_immunotherapy()` додає, наприклад, 2 атаки).

- Подовження життєвого циклу:

$$\text{lifespan}' = \text{lifespan}^{(0)} + \Delta_\ell,$$

де Δ_ℓ — додаткові кроки життя (наприклад, +10).

- Зменшення шансу смерті під час атаки:

$$p'_{\text{death}} = p_{\text{death}}^{(0)} \times (1 - \Delta_d),$$

де Δ_d — коефіцієнт зниження (наприклад, 0.2).

- Збільшення шансу успішної атаки:

$$p'_{\text{success}} = p_{\text{success}}^{(0)} \times (1 + \Delta_s),$$

де Δ_s — приріст ефективності (наприклад, $\times 3$).

При виклику методу:

параметри кожної `ImmuneCell` автоматично оновлюються:

$$\text{max_attacks} \leftarrow \text{max_attacks} + \Delta_a,$$

$$\text{lifespan} \leftarrow \text{lifespan} + \Delta_\ell,$$

$$\text{death_chance_of_attack} \leftarrow \text{death_chance_of_attack} \times (1 - \Delta_d),$$

$$\text{chance_of_succesfull_attack} \leftarrow \text{chance_of_succesfull_attack} \times (1 + \Delta_s).$$