Преддипломен проект

Решаване на оптимизационната задача FrozenLake с невробиологичен симулатор по метода поощрение/наказание

**Факултет по Математика и Информатика**  
**Студент:** Борислав Стоянов Марков  
**Факултетен номер:** **0MI3400048**  
**Учебен план:** **Изкуствен Интелект  
Научен ръководител**: Проф. Петя Копринкова-Христова, Институт по Информационни и Комуникационни Технологии (ИИКТ), БАН

София: 01.2023г.

# 1. Съдържание

[1. Съдържание 2](#_Toc126098427)

[2. Увод 2](#_Toc126098428)

[3. Средата „FrozenLake“[4] в Gym 3](#_Toc126098429)

[4. Въведение в неврологичните симулации 4](#_Toc126098430)

[4.1 Основи на неврологията 5](#_Toc126098431)

[4.2 Математически апарат на невроните 5](#_Toc126098432)

[4.3 Невробиологичен симулатор NEST 6](#_Toc126098433)

[5. Подход за решаване на задачата 8](#_Toc126098434)

[5.1 Q-learning 9](#_Toc126098435)

[5.2 Победителят печели всичко 10](#_Toc126098436)

[5.3 Постановка за решаване на задачата 12](#_Toc126098437)

[5. Реализация на проекта 12](#_Toc126098438)

[5.1 Анализ на резултатите 13](#_Toc126098439)

[6. Идеи за бъдещо развитие и подобрения 15](#_Toc126098440)

[7. Източници и използвана литература 15](#_Toc126098441)

[Приложения 15](#_Toc126098442)

[1. Сорс код (Source code) 15](#_Toc126098443)

# 2. Увод

Невробиологията все повече набира скорост в света на изкуствения интелект. Има все повече изследвания на функционирането на нервни клетки, които са довели до създаването на биологично обоснованите spike timing модели на невроните, както и много знания за структурната организация и функционирането на мозъка на бозайниците при вземане на решения. Доказано е, че много от решенията се вземат по метода на поощрението и наказанието (Reinforcement Learning).

Целта на преддипломния проект е да се разработи модел на биологично обоснована (spike timing) невронна мрежа посредством библиотеката NEST Simulator, която е в състояние да решава оптимизационната задача за преминаване на агент през известната среда FrozenLake от пакета Gym посредством reinforcement обучение. Задачата е с дискретни състояния на средата и 4 възможни действия на агента.

Проектът ще включва кратък обзор в областта на Spike Timing Neural Networks, описание на теоретичната постановка, код на Python с използване на библиотеката NEST Simulator и анализ на резултатите. В процеса на изработка на проекта ще се изпробват различни параметри на биологично подобните неврони и решението ще бъде илюстрирано с подходящи визуализации и графики съпътстващи обучителния процес.

# 3. Средата „FrozenLake“[4] в Gym

Средата Frozen Lake е част от подпакета а текстови игри. Това са много опростени игри с визуализация като текст. Имат малък на брой дискретни състояния и контрола на агента е също дискретен с малък брой дествия. Този пакет е разработен за обучителни цели по метода на поощрението и наказанието (Reinforcement Learning). Целта е да се сравняват различни решения при една и съща среда и да може да се прави сравнение на резултатите. На следващата фигура е показана примерна визуализация на тази среда. Имаме езеро, правоъгълна фигура, разграфена на квадранти, например 4х4 с кодове латинските букви S,F,H,G.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Фигура 3.1 – Примерна визуализация на FrozenLake вляво и текстов еквивалент вдясно.

Значенията на квадрантите са старт-S, заледен-F, дупка-H, цел-G. Човече тръгва от позиция „S” и трябва да стигне до крайната цел „G”, преминавайки по заледени участъци „F“. Някои от квадрантите имат дупки “H” и там текущият опит приключва неуспешно. Поощрението и наказанието е както следва:

* При достигане на крайната цел „G” награда от 1 точка и експериментът приключва.
* При попадане в дупка “H” награда „0“ и експериментът приключва.
* При попадане на заледен участък „F“ награда „0“.

Има една особеност на средата, че на заледените участъци агентът може да се подхлъзне и да не отиде в избраната посока, тоест имаме хлъзгане. Хлъзгането зависи с какви настройки е пусната средата: is\_slippery=False|True. Основна информация за средата са дадени в следващата таблица.

|  |  |
| --- | --- |
| Пространство на действията | Discrete(4) |
| Вектор на наблюдението | Discrete(16) |
| Импортиране в Питон | gym.make("FrozenLake-v0") |

Таблица 3.1. Общи параметри за средата

Човечето може да се придвижва в четири посоки, всяка с код от 0 до 3 включително, а именно: наляво-0, надолу-1, надясно-2, нагоре-3.

# 4. Въведение в неврологичните симулации

Неврологията е дисциплина която може да засяга един или друг аспект свързан с работата на нервната система при живите организми. За нашите цели по-интересно е математическият апарат, отколкото биологичната основа. Най-забележимият аспект на нервната система при човека и при други живи организми е начинът на вземане на решения и поразяващи имплементации на алгоритми с поощрение и наказание. Връзката между реинфорсмънт обучението (Reinforcement learning) и новрологичните науки се крие в химично имплементираната награда – допаминът ([1] глава 15). Допаминът пренася темпоралната грешка (TD error) до структурите в мозъка, които са отговорни за вземане на решение.

## 4.1 Основи на неврологията

Невроните са основните компоненти на нервната система. Това са клетки специализирани в пренасяне и обработка на информация посредством електрохимически и химически сигнали [1]. Невроните са различни по вид, но обикновено имат тяло, дендрити и един аксон. Дендритите са разклонения от тялото, чрез които клетката се свързва с аксони от други неврони или са сензори, в случай на сензорни неврони.

Невронът събира импулси от много входове и когато сумарно тези входове станат забележително големи и преминат някаква граница, невронът изстрелва потенциал(action potential) или тъй наречения импулс (spike). Това е и фундаменталният начин на комуникация между невроните ([2], Ch.2). Изходният сигнал на неврона са електрически импулси, пътуващи по аксона, наречени спайкове (spikes).



Фиг.4.1.1. Рисунка на два свързани неврони и ин-витро записан спайк  
Адаптирано от [3], Глава 1.1

## 4.2 Математически апарат на невроните

Към момента невроните се моделират по много различни начини и има описани десетки видове диференциални уравнения на различни неврони. Един от първите математически формализми на неврони е на Ходжкин и Хъксли, описан през петдесетте години на миналия век. Уравнението се оказва доста сложно за решаване на практически задачи и затова по-късно са предложени опростени модели. Integrate-and-fire са фамилия модели от които най-популярният към момента е leaky integrate-and-fire неврон. Това е идеализация на неврон с утечки(по закона на Ом) , който е суматор на токове.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2.1) |

Тук формализма е взет от [3], C е капацитетът на мембраната на неврона, V е мембранния потенциал, gleak e функция на утечка, Eleak e средно напрежение на мембраната в покой. На следващата фигура се онагледява действието на неврона.



Фиг. 4.2.1 Потенциална диаграма на суматорен неврон с утечка (Leaky integrate-and-fire neuron). Адаптация от [3].

На фигурата се вижда, че при сумарно напрежение надвишаващо Ethresh се произвежда токов импулс (spike) и напрежението се връща до стойност Ek. При липса на входни токове или шум се забелязва как напрежението намалява експоненциално, стремейки се към Eleak.

## 4.3 Невробиологичен симулатор NEST

NEST е симулатор за невронни мрежи основани на спайкове (spiking neural network models или SNN) и може да послужи за: модели за обработка на информация, модели на мрежова динамика, модели на обучение и синаптична пластичност [5]. Симулаторът представлява библиотека на Python и може да се вгради в по-голямо приложение. Структурата на програмата е например:

|  |
| --- |
| 1. Подготовка на невронните групи и шумогенератори 2. Свързване на групите неврони с определено тегло 3. Поставяне на виртуални измервателни уреди и свързване с интересуващите ни групи неврони; 4. Симулиране с метода nest.Simulate(t), който проиграва една евентуална симулация за време t милисекунди. 5. След това може да се наблюдават измервателните уреди(волтметри, детектори на импулси), да се променят теглата на връзките и други параметри и може отново да се премине към стъпка 4 или към край на програмата. |

Таблица 4.3.1 Структура на програма използваща NEST simulator

Можем да разгледаме примерен код на програма, състояща се от един неврон, на който подаваме постоянен ток от 376 [pA] и замерваме напрежението на мембраната, както и генерираните импулси.

|  |
| --- |
| import nest  import matplotlib.pyplot as plt  import nest  nest.ResetKernel()  neuron = nest.Create("iaf\_psc\_alpha", {"I\_e":376.0})  voltmeter = nest.Create("voltmeter")  spikerecorder = nest.Create("spike\_recorder")  nest.Connect(voltmeter, neuron)  nest.Connect(neuron, spikerecorder)  nest.Simulate(1000.0)  plt.rcParams["figure.figsize"] = (5,2)  nest.voltage\_trace.from\_device(voltmeter)  plt.show()  nest.raster\_plot.from\_device(spikerecorder, hist=False, title="spikerecorder")  plt.show() |

Таблица 4.3.2 Примерна програма използваща NEST simulator с един неврон и симулация от 1000 милисекунди

Изходът от програмата са две графики изобразяващи скоковете в напрежението и генерираните импулси.

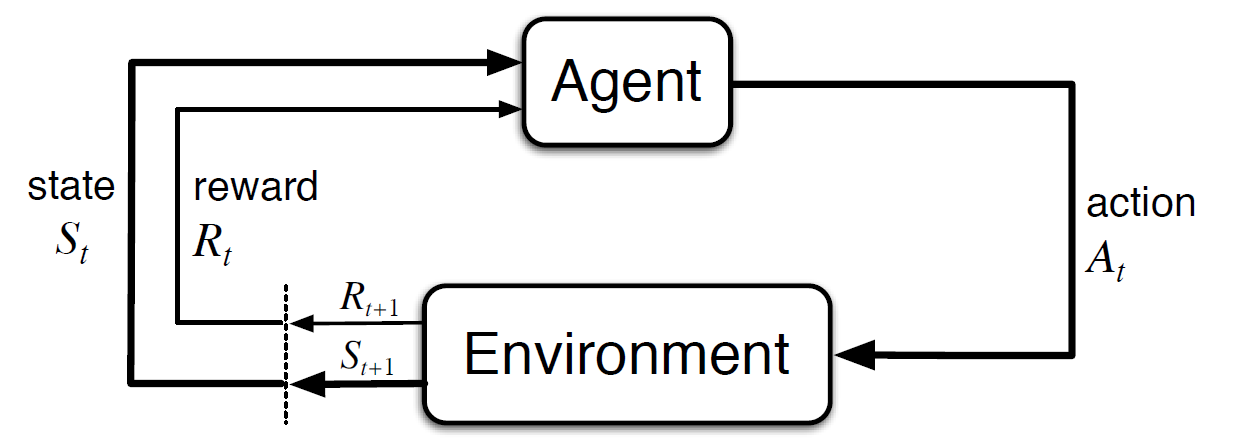
|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Фигура 4.3.1 Напрежение на мембраната и импулси от неврона

При по-голям ток, импулсите ще следват по-бързо, при по-малък ток на неврона импулсите ще намалеят или ще изчезнат.

# Подход за решаване на задачата

FrozenLake е задача, което съвпада с формализма въведен за Reinforcement Learning и можем да кажем, че имаме агент и среда, взаимодействащи си чрез марковски процес. След всяко действие на агентът At средата ни отговаря с ново състояние St+1 и се дава съответната награда Rt+1.



Фиг. 5.1. Взаимодействие Агент-Среда при марковски процес на решението, вж.[1]Глава 3.1

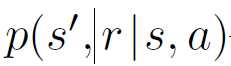
Динамиката на марковският процес на решенията(MDP) е определен от следната функция, даваща връзка между състоянията, наградите и действията:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.1) |

Функцията „p“ е плътност на вероятност при условие, че средата се намира в състояние „s“ и агентът е предприел действие „а“ то средата да премине в ново състояние „s‘” и да има награда ”r”. Знакът за равенство с точка означава „по дефиниция“. Тук интуитивно можем да съпоставим клетка от таблица на всеки квадрант от FrozenLake. Така ще имаме за всяка посока изчислени стойности какво би ни донесло всяко действие по дадената посока.

За някои приложения е подходящо да се направи извадков модел от опита, за други задачи е подходящо да се направи дистрибуционен модел. От многото алгоритми за решаване на подобна задача, подходящо е да се построи дистрибуционния модел MDP(Марковски процес на решенията), тъй като имаме изброими състояния на средата и можем да намерим функцията „p” от (5.1) и ще можем въз основа на нея да дефининираме полица на действията “π”. В случая подходящ алгоритъм е Q-learning от [1]. В началото на пускане на агента не знаем решението и агента трябва да стигне по случаен начин до решението. От това следва, че имаме случаен елемент или т.нар “exploration”, т.е. агента ще действа само на базата случайности. След научаване на правилното решение ще можем да кажем от къде е минал агента и ще можем да следваме модела или ще имаме т.нар. “exploitation”.

# Таблични методи

Същността на обучение с поощрение и наказание в най-простата си форма ни кара да търсим такива множества от състояния и пространства на действията, които да са достатъчно малки, че да могат да ни апроксимират функцията на натрупаните награди(value function) като масиви или таблици. В такива случаи методите могат да намерят точната функция на натрупаните награди и да стигнат до оптимален алгоритъм(policy). Табличните методи са фамилия от алгоритми използващи динамично програмиране за да стигнат до оптималния дистрибуционен модел MDP(Markov decision process) описан с функцията  от (5.1). Тук следва да напомним, че “p” е разпределение на вероятност за всяко s,a и сумата е 1.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.1.1) |

При MDP ние съответно оптимизираме функцията q\*(s,a) за всяко действие „a“ и за всяко състояние „s“ или апроксимираме функцията v\*(s) за всяко състояние „s“ давайки оптимални действия. Такива количества, зависещи от състоянието “s” могат точно да ни насочат къде е оптималното решение при забавена награда и да ни посочат оптималните действия. Оптималната функция на Белман „q\*(s,a)“ има следният вид (вж. [1] глава 3.6)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.1.2) |



Фиг.5.1.1 Диаграма на избор на действие за оптимална “q\*” функция. Адаптирано от [1] глава 3.

Имайки апроксимация на “q\*” избирането на оптималните действия е по-лесно отколкото ако имаме апроксимация на “v\*”, защото агентът не трябва да ходи една стъпка напред. Достатъчно е само да избере действието, което максимизира q\*(s,a). Оттук и извода, че с цената да пазим таблично двойки (s,a) вместо таблично да пазим само количествена мярка за състоянието (s) ще ни осигури най-добрата стратегия “π\*” за агента без да знаем нищо за останалите бъдещи състояния, което дефакто означава, че не е необходимо да знаем динамиката на средата[1].

Алгоритъмът осигуряващ ни най-доброто от Монте Карло методите и динамичното програмиране ни води до алгоритъмът „Sarsa: On-policy TD Control“(вж. [1] глава 6.4).



Фиг.5.1.2 Примерен епизод, вж. [1] глава 6.4

Тук разглеждаме преходът от двойката състояние-действие към друга двойка състояние-действие и съпоставяне на двойките с някаква стойност. Апроксимацията на функцията ще правим с TD(0) (Temporal difference 0) и промяната ще се прави след всеки ход към нетерминално състояние.

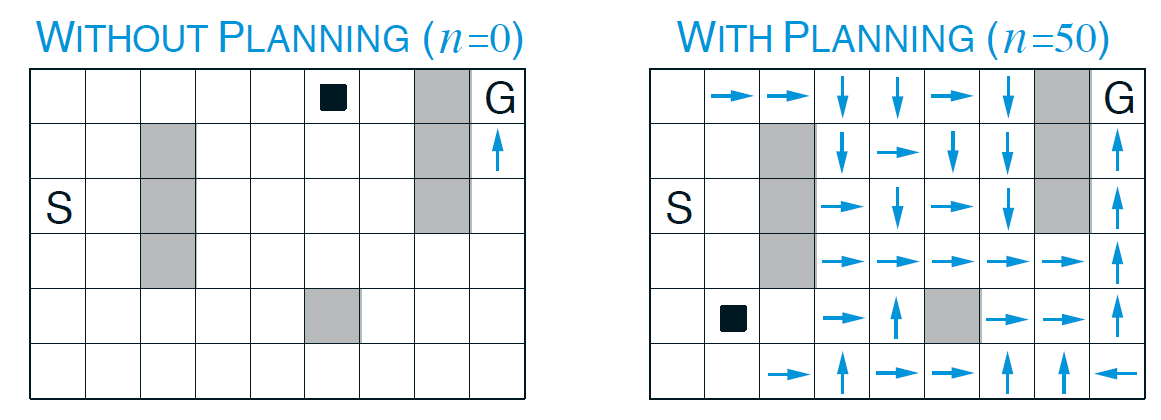
|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.1.3) |

Даваме и алгоритъмът разписан в по-долната фигура.



Фиг. 5.1.2 Алгоритъм на SARSA TD(0), вж. [1] глава 6

Тук говорим за ε-greedy(ε-алчен), което на практика означава, че не винаги предприемаме максималното действие, а има вероятност да вземем друго неоптимално действие, с цел да разкриваме нови състояния.



Фиг.5.1.3 Таблично решаване на задачата Maze без планиране и с планиране, вж. [1] глава 8.1

На по-горната фигура черното квадратче е позицията на агента, стрелките означават действието (ляво,дясно,горе, долу), което максимизира общата награда в края на еизода. В няшият случай FrozenLake може да пусната като детерминирана среда без хлъзгави участъци, но може да бъде пусната и като недетерминирана среда с хлъзгане. Недетерминирана означава, че въпреки, че сме посочили посока, като например надясно, агентът може да премине и надолу в определени случаи, което прави решението много по-трудно.

## 5.2 Победителят печели всичко

При динамичните системи изборът на различни действия при различни параметри понякога може да се окаже проблем, тъй като невронните групи навлизат в стабилен еквилибриум, и не могат да бъдат изместени от него. Това би се изродило в нашият случай като например агентът да отива само надясно да кажем. За тези положения при динамични системи от един неврон се споменава Изикевич в [3] в глава 3.2.6. Наистина за системи с повече неврони теоретичното изчисление на практика е невъзможно и единствено симулациите са водещото, тъй като няма добре установена математическа теория за това. Ще разгледаме механичната интерпретация според [3] на стабилен и нестабилен еквилибриум на следващата фигура.



Фиг. 5.2.1 Механична интерпретация на стабилен и нестабилен еквилибриум. Вж. [3].

Топката на фигурата няма маса (без инерция) и се движи към възможно най-ниската точка със скорост пропорционална на наклона. Механичната диаграма се променя по време на симулацията. Искаме да има 4 различни устоичиви положения (по една за четирите възможни действия на агента) тръгвайки от една нестабилна точка. За целта ще използваме WTA (Winner Takes All) схема, което представлява начин на свързване на невронни групи и като цяло е известен подход в невронните мрежи. WTA има един изход от K възможни. За WTA са необходими възбуждане и потискане на невроните. Всеки изход е представен от група неврони с положителна връзка (excitatory neurons). Входният сигнал възбужда невроните от всяка група, но всеки от тях потиска всички останали и така се състезава с тях. След време само една от невронните групи се оказва най-силна.

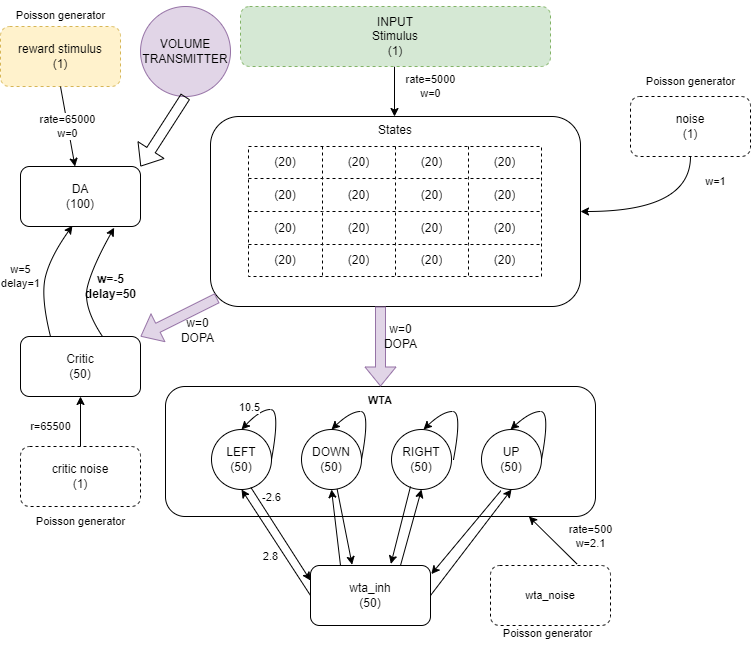


Фиг. 5.2.2 Примерен WTA с два неврона и ефективно потискане. Две популации с възбудими неврони взаимодействат с обща група от потискащи неврони. Адаптирано от [6] глава 16.3.

На фигура 5.2.2 са показани как са свързани две невронни групи. Всяка от групите AE,1 AE,2 действа усилващо на обща група Ainh, която пък от своя страна действа потискащо на АЕ,1 и АЕ,2. Групите АЕ действат самоусилващо с някакво тегло w0. Изборът на действие при WTA става като след някакви милисекунди на симулация, достатъчна да се възбудят невроните, преброим спайковете генерирани във всяка от групите АЕ . Избираме действието отговарящо по индекс.

## 5.3 Постановка за решаване на задачата

За решаване на задачата естественият избор е подобие на Q-learning но с невронни групи отговарящи за всеки квадрант от таблото на FrozenLake. Входът от средата ще са невронни групи от по NUM\_STATE\_NEURONS=20 неврона в група, разположени таблично. Ще ги обозначим със „States“ Например ако решаваме 4х4 FrozenLake, ще имаме вход 20х4х4 неврона. При преместване на агента на различен квадрант ще активираме само определената група неврони отговаряща за това състояние с определени координати, например States(0,4). Активацията към определената клетка с NUM\_STATE\_NEURONS неврона на States ще става като на всяка стъпка подаваме шум от генератор на поасон , наречен „Stimulus“ с определена честота и някакво тегло, например 1.0. „States“ ще бъдат вързани към WTA схема от т.5.2 с К=4 възможни състояния като свързването ще е „всеки с всеки“. Всяка група от WTA ще е от по NUM\_WTA\_NEURONS=50 неврона и ще отговаря съответно на действията на агента от 0 до 3 включително, а именно: наляво-0, надолу-1, надясно-2, нагоре-3. Тези невронни групи от WTA съпоставени на действията на агента ще наричаме „Actions“. Връзките на „States“ и „Actions“ ще са с допаминови синапси, първоначално с тегла 0.0 и ще могат да се обучават посредством пластичност STDP (spike-timing dependent plasticity – Markram et al., 1997; Bi and Poo, 1998, 2001),. За STDP също може да се научи повече в [7]. Диаграмата на свързване е дадена на Фиг.5.3.1.



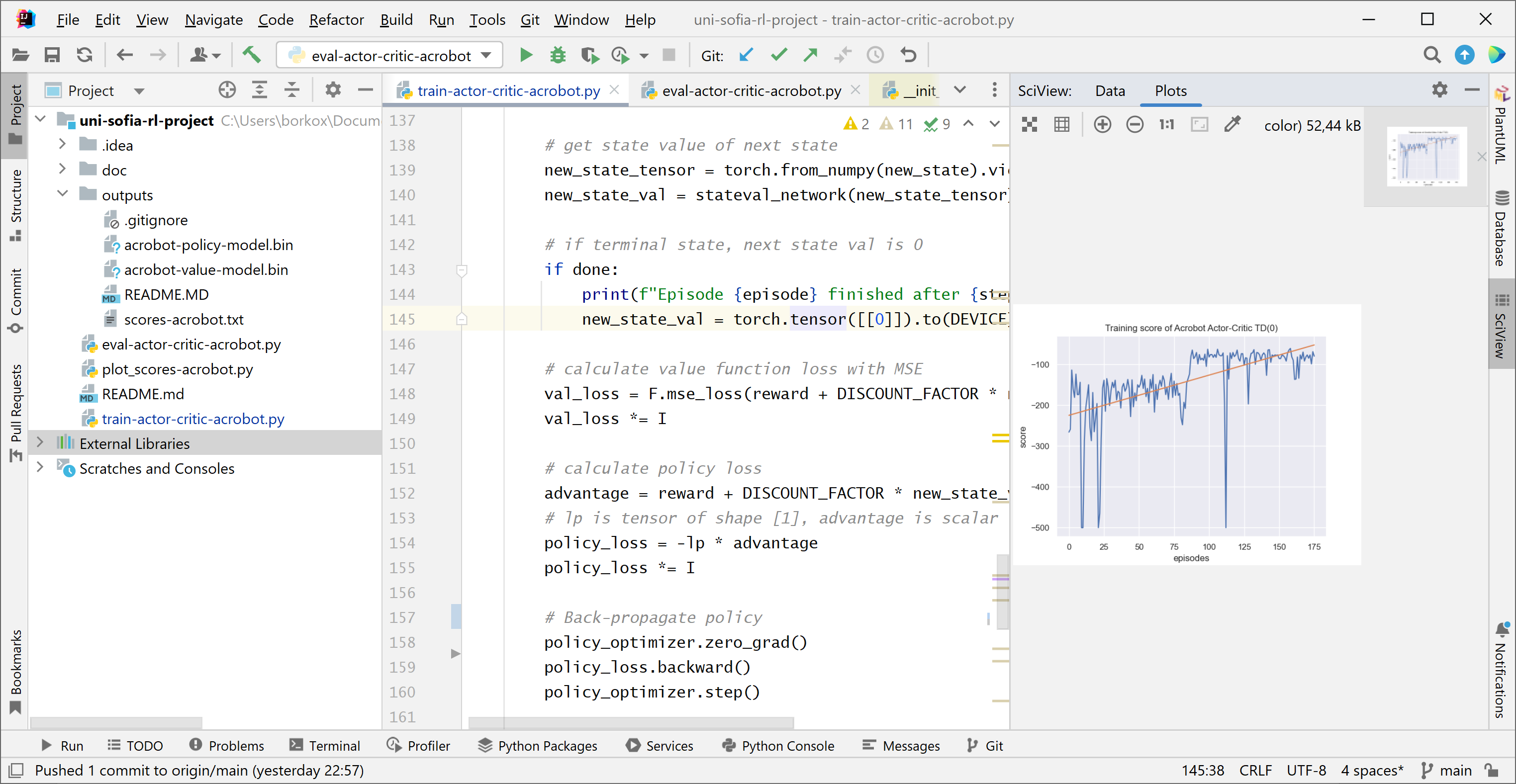
Фиг.5.3.1 Диаграма на свързване на невронните групи

„States“ ще бъдат свързани с друга невронна група, наречена „Critic“ от 50 неврона също с допаминови връзки. Тази нова група ще представя „q“ функцията от уравнението на Белман (3.1.1). „Critic“ ще е свързана с друга група от 100 неврона, отговарящи за нивото на допамина, условно наречена „DA“. Наградата от средата FrozenLake ще се формира като сигнал от поасонов шумогенератор с някаква честота пропорционална на наградата. Ще наричаме този вход „Reward Stimulus“.

Ще заложим връзка от „Reward Stimulus“ към „DA“. Така получаваме, че в „DA“ ще се отчита очакваната награда, а не абсолютната награда. Именно ако имаме награда повече от очакваната, ще можем да отпушим обучението посредством допаминовия обемен трансмитер (на диаграмата показан като VOLUME TRANSMITTER). Обучение на синапси с допаминов обемен трансмитер е заложен в симулатора NEST под формата на модел „stdp\_dopamine\_synapse“. Увеличавайки спайковете в DA увеличаваме и скоростта на обучение на неврони активирани по едно и също време. Тъй като средата FrozenLake дава награда само накрая на успешен експеримент, а в междинните стъпки няма награда, то трябва да изчакаме първо алгоритъмът случайно да намери решението и така ще имаме обучени стонойности за последния квадрант преди квадранта “G”.

# 5. Реализация на проекта

Проектът е реализиран като github публичен проект и може да се види дори и през браузър(виж Приложения). За да се пусне локално се изисква инсталация на Python, конкретно 3.9.8 е използван тук. Линк към сорс кода е качен в гитхъб (Вж. Приложение 1) и е неразделна част от този документ. Структурата на приложението е дадена на фигура 5.1. Използваната среда за текстообработка и работа с git е IntelliJ .



Фигура 5.1. Обща структура на проекта

Подробни инструкции на са дадени в README.md файла.

В централната папка има скрипт “train-actor-critic-acrobot.py” на програмния език Python. С него се стартира процеса на обучение. По време на обучение резултатите от точките (поощрението) се записват във файл „outputs/scores-acrobot.txt“ за последваща визуализация. Скриптът „plot\_scores-acrobot.py“ ще ни визуализира картинка с резултатите след текущото обучение. След като сме обучили невронните мрежи можем да пуснем друг скрипт „eval-actor-critic-acrobot.py“, който ще ни визуализира готовото решение и ще проиграе няколко епизода за демонстрация. За край на обучение се приема момента, когато средно аритметичната награда от последните 100 епизода е над -100.

## 5.1 Анализ на резултатите

Като анализ можем да разгледаме графики при различни коефициенти на α(коефициент на обучение) и γ(коефициент на отстъпка). При този тип експерименти точната повторяемост на експериментите е невъзможна, поради случайния характер на актьора π (изборът на действие е с вероятности), случайната инициализация на теглата на невронните мрежи, както и поради случйната подредба на параметрите на средата в Gym при всяко пускане. Следва таблица с графики за различни стойности на параметрите.

|  |  |
| --- | --- |
| α=0.001, γ=0.99 |  |
| α=0.001, γ=0.95 |  |
| α=0.002, γ=0.95 |  |

Таблица 5.1.1

Оранжевата линия представлява линейна апроксимация на всички точки през епизодите. Тя ни показва тренда на обучение. Виждаме, че при α=0.002, γ=0.95 резултатите са най добри и обучението е само за 95 епизода и съответно няма катастрофални забравяния както в първия случай. Наистина този алгоритъм е доста надежден и дава решение в много от случаите. Тук дори не се интересуваме какви са връщаните стойности на състоянието, алгоритъмът би работил с произволни дължини на вектора. Единствено би се наложила промяна при преминаване в непрекъснато пространство на действията.

# 6. Идеи за бъдещо развитие и подобрения

# 7. Източници и използвана литература

[1] Reinforcement Learning: An Introduction, 2018, Richard S. Sutton and Andrew G. Barto, [PDF] <http://www.incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html>

[2] Computational Cognitive Neuroscience, Randall C. O’Reilly et al., 2020, Open Textbook, freely available, <https://ccnlab.org/>

[3] Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting, Eugene M. Izhikevich, 2005, The MIT Press, (<https://www.izhikevich.org/publications/dsn.pdf>)

[4] FrozenLake, OpenGym, <https://www.gymlibrary.dev/environments/toy_text/frozen_lake/>

[5] NEST simulator, https://nest-simulator.readthedocs.io/en/v3.3/index.html

[6] Neuronal Dynamics, Wulfram Gerstner, M.Kistler, R.Naud, L.Paninski, 2014, Cambridge university press, <https://neuronaldynamics.epfl.ch/online/index.html>

[7] Enabling functional neural circuit simulations with distributed computing of neuromodulated plasticity, W.Potjans A.Morrison and M.Diesmann, 2010, Frontiers in COMPUTATIONAL NEUROSCIENCE.

# Приложения

## 1. Сорс код (Source code)

<https://github.com/borkox/uni-sofia-rl-project>

В таблици са дадени скриптовете на Питон.

|  |
| --- |
| train-actor-critic-acrobot.py |