

PANEURÓPSKA VYSOKÁ ŠKOLA  
FAKULTA INFORMATIKY

FI-100786-21449

VYUŽITIE MS HOLOLENS 2 VO VZDELÁVANÍ

Diplomová práca

2024

Bc. Peter Drábik

**PANEURÓPSKA VYSOKÁ ŠKOLA  
FAKULTA INFORMATIKY**

**VYUŽITIE MS HOLOLENS 2 VO VZDELÁVANÍ**

Diplomová práca

**Bc. Peter Drábik**

|                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| Študijný program:    | Aplikovaná informatika      |
| Študijný odbor:      | Informatika                 |
| Školiace pracovisko: | Ústav aplikovej informatiky |
| Školiteľ:            | RNDr. Ján Lacko, PhD.       |

**Bratislava 2024**



PANEURÓPSKA VYSOKÁ ŠKOLA

Fakulta informatiky

## ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: **Bc. Peter Drábik**

Evidenčné číslo diplomovej práce: **FI-100786-21449**

Študijný odbor: **informatika**

Študijný program: **Aplikovaná informatika**

Forma a metóda štúdia: **externá prezenčná**

Vedúci diplomovej práce: **RNDr. Ján Lacko, PhD.**

Ústav/katedra: **Ústav aplikovanej informatiky**

Dátum zadania diplomovej práce: **11. 07. 2022**

Názov: **Využitie MS HOLOLENS 2 vo vzdelávaní**

Anotácia: Cieľom práce je navrhnúť a implementovať aplikáciu pre využitie zmiešanej reality prostredníctvom zariadenia MS HOLOLENS 2 vo vzdelávaní v oblasti prírodovedných predmetov. Autor navrhne, implementuje a otestuje aplikáciu využiteľnú pri výučbe s využitím herných enginov alebo ako natívnu aplikáciu.

.....  
RNDr. Ján Lacko, PhD.  
vedúci práce

.....  
prof. RNDr. Frank Schindler, PhD.  
vedúci ústavu

# **Podčakovanie**

Ďakujem vedúcemu práce RNDr. Jánovi Lackovi, PhD. za odborné vedenie, cenné rady a pomoc pri vypracovaní diplomovej práce.

Veľká vdaka patrí aj Mgr. Alexandrovi Kmetovi z Katedry didaktiky prírodných vied, psychológie a pedagogiky Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského v Bratislave za inšpiráciu pri volbe skúmanej problematiky, konzultácie v oblasti didaktiky biológie a asistenciu pri realizácii výskumu.

Taktiež by som sa chcel podčakovať študentom septimy a oktávy Školy pre mimoriadne nadané deti a gymnázia v Bratislave za hodnotnú spätnú väzbu, ktorá celej práci dala zmysel.

## Čestné prehlásenie

Čestne vyhlasujem, že záverečnú prácu som vypracoval samostatne a že som uviedol všetku použitú literatúru.

.....

# **Abstrakt**

Tu bude abstrakt.

Kľúčové slová: klúčové slovo1, klúčové slovo2, klúčové slovo3654654

# **Abstract**

Here we will have an abstract.

Keywords: keyword1, keyword2, keyword3

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Obsah</b>   | <b>7</b>  |
| <b>Zoznam ilustrácií</b>   | <b>9</b>  |
| <b>Zoznam skratiek a značiek</b>                                       | <b>10</b> |
| <b>Úvod</b>  | <b>11</b> |
| <b>1 Prehľad problematiky v oblasti zmiešanej reality</b>              | <b>12</b> |
| 1.1 Virtuálna realita . . . . .  | 12        |
| 1.2 Rozšírená realita . . . . .  | 14        |
| 1.3 Zmiešaná realita . . . . .   | 15        |
| 1.4 Microsoft HoloLens 2 . . . . .                                     | 18        |
| 1.5 Vývoj aplikácií pre Microsoft HoloLens 2 . . . . .                 | 20        |
| <b>2 Využitie umelej reality vo vzdelávaní</b>                         | <b>21</b> |
| <b>3 Návrh MR aplikácie na základe miskoncepcíí vo vzdelávaní</b>      | <b>23</b> |
| 3.1 Identifikácia miskoncepcíí . . . . .                               | 23        |
| 3.1.1 Bunka ako dvojrozmerný objekt . . . . .                          | 23        |
| 3.1.2 Nepresnosti pri výuke problematiky nervových vzeruchov . . . . . | 24        |
| 3.2 Návrh aplikácie . . . . .  | 24        |
| <b>4 Biologický základ nervového systému</b>                           | <b>26</b> |
| 4.1 Nervové bunky - neuróny . . . . .                                  | 26        |
| 4.2 Procesy na nervových vláknoch . . . . .                            | 26        |
| 4.2.1 Vzrušenie nervového vlákna . . . . .                             | 26        |
| 4.2.2 Vedenie akčného potenciálu . . . . .                             | 27        |
| 4.2.3 Iónové zmeny počas vedenia akčného potenciálu . . . . .          | 29        |
| <b>5 Tvorba MR aplikácie</b>   | <b>31</b> |
| 5.1 Tvorba modelu neurónu v Blenderi . . . . .                         | 31        |
| 5.2 Implementácia aplikácie v hernom engine . . . . .                  | 35        |
| 5.2.1 Kostra aplikácie . . . . .                                       | 35        |
| 5.2.2 Animácia prechodu častíc do nervového vlákna . . . . .           | 38        |
| 5.2.3 Animácia skoku nervového vzeruchu . . . . .                      | 41        |

|                           |  |           |
|---------------------------|--|-----------|
| 5.2.4                     | Vytvorenie výsledného Blueprintu . . . . . | 42        |
| 5.2.5                     | Ovládacie prvky . . . . .                  | 44        |
| 5.2.6                     | Tvorba scény . . . . .                     | 45        |
| 5.2.7                     | Nahratie aplikácie do headsetu . . . . .   | 45        |
| <b>6</b>                  | <b>Pedagogický výskum</b>                  | <b>46</b> |
| 6.1                       | Metodológia výskumu . . . . .              | 46        |
| 6.1.1                     | Charakter výskumného nástroja . . . . .    | 46        |
| 6.1.2                     | Spracovanie kvantitatívnych dát . . . . .  | 46        |
| 6.1.3                     | Spracovanie kvalitatívnych dát . . . . .   | 47        |
| 6.2                       | Výsledky pedagogického výskumu . . . . .   | 47        |
| 6.2.1                     | Kvantitatívny výskum . . . . .             | 47        |
| 6.2.2                     | Kvalitatívny výskum . . . . .              | 48        |
| 6.3                       | Diskusia . . . . .                         | 48        |
| 6.4                       | Limitujúce faktory výskumu . . . . .       | 48        |
| <b>Záver</b>              |  | <b>50</b> |
| <b>Použitá literatúra</b> |  | <b>51</b> |

# Zoznam ilustrácií

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Obrázok 1  | Zobrazovacie zariadenie Ivana Sutherlanda . . . . .                                  | 13 |
| Obrázok 2  | Zjednodušená reprezentácia RV kontinua [9]. . . . .                                  | 16 |
| Obrázok 3  | Headset Microsoft HoloLens 2. . . . .  | 18 |
| Obrázok 4  | Stavba neurónu [21]. . . . .   | 27 |
| Obrázok 5  | Šírenie nervového vzruchu v nemyelinizovaných nervových vláknoch [22]. . . . .       | 28 |
| Obrázok 6  | Saltatórne vedenie vzruchu v myelinizovaných nervových vláknoch [22]. . . . .        | 28 |
| Obrázok 7  | Tvorba modelu v Blenderi - počiatočná fáza. . . . .                                  | 32 |
| Obrázok 8  | Tvorba modelu v Blenderi - práca na koncoch výbežkov. . . . .                        | 33 |
| Obrázok 9  | Tvorba modelu v Blenderi - hotové telo neurónu. . . . .                              | 33 |
| Obrázok 10 | Tvorba modelu v Blenderi - telo neurónu spolu s axónom. . . . .                      | 34 |
| Obrázok 11 | Tvorba modelu v Blenderi - hotový model neurónu bez aplikovaných materiálov. . . . . | 34 |
| Obrázok 12 | Nastavenie ARSession v <i>Level Blueprint</i> . . . . .                              | 37 |
| Obrázok 13 | Nastavenie Hand Interaction Actors . . . . .   | 38 |
| Obrázok 14 | Nastavenia modulu NMS . . . . .  | 40 |
| Obrázok 15 | Krivka časovej osi pre zmenu parametra MorphingLerp . . . . .                        | 41 |
| Obrázok 16 | Rozmiestnenie objektov typu Spline Component . . . . .                               | 42 |
| Obrázok 17 | Skript udalosti Reset all positions . . . . .  | 43 |
| Obrázok 18 | <i>Construction Script Blueprint</i> BP_Neuron . . . . .                             | 44 |
| Obrázok 19 | Výsledná scéna v Unreal Engine . . . . .   | 45 |

# Zoznam skratiek a značiek

|             |                       |
|-------------|-----------------------|
| <b>AR</b>   | Augmented Reality     |
| <b>CRT</b>  | Cathode-Ray Tube      |
| <b>LBS</b>  | Laser Beam Scanning   |
| <b>MR</b>   | Mixed Reality         |
| <b>MRTK</b> | Mixed Reality Toolkit |
| <b>UI</b>   | User Interface        |
| <b>UX</b>   | User Experience       |
| <b>VR</b>   | Virtual Reality       |

# **Úvod**

Tu bude krasny uvod s diakritikou atd.

A mozno aj viac riadkovy uvod.

# 1 Prehľad problematiky v oblasti zmiešanej reality

Digitalizácia najrôznejších aspektov nášho života je prirodzeným prejavom technologického pokroku. Vďaka tomu sa pojmy, ako zmiešaná realita, rozšírená realita či virtuálna realita v priebehu posledných dekád začali stávať neoddeliteľnou súčasťou nášho jazyka. Na to, aby sme lepšie porozumeli tomu, čo to zmiešaná realita vlastne je, pokladáme za nevyhnutné venovať niekoľko odstavcov aj zvyšným dvom pojmom.

## 1.1 Virtuálna realita

*The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked [1].*

Týmito slovami v roku 1965 Ivan Sutherland vo svojom článku *The Ultimate Display* sformuloval ideu, ktorá predstavuje raný popis imerzívneho<sup>1</sup> displeja v dobe, keď vtedajšie zariadenia bežne umožňovali zobrazovať rovné čiary, uvažovalo sa, že zobrazovanie kriviek by mohlo byť užitočné a žiadna komerčne dostupná obrazovka nebola schopná vykresliť farbou vyplnenú plochu [1].

Sutherland vo svojom článku okrem iného zdôrazňuje, že počítačové displeje môžu umožniť zoznámenie sa s pojmi, ktoré nie sú realizovateľné vo fyzickom svete, a slúžia ako možnosť nahliadnuť do matematickej krajiny zázrakov (*sic!*). Článok sa zaobera aj rôznymi vstupnými zariadeniami na interakciu s počítačovými displejmi, ako sú klávesnice písacích strojov, svetelné perá, dotykové pero RAND Tablet<sup>2</sup>, tlačidlá, joysticky a hlasový vstup, pričom zdôrazňuje ich užitočnosť pri interakcii s počítačom.

Okrem toho sa v článku uvádzajú potenciálne využitie pohybov svalov a očí na ovládanie počítačov. Poukazuje na to, že hoci súčasné systémy využívajú na ovládanie počítača predovšetkým svaly ruky a ramena, existuje možnosť využiť na interakciu aj iné svalové skupiny.

Článok navyše uvažuje o perspektíve osvojenia si jazyka pohľadov na ovládanie počítača, navrhujúc, že prezentácia na displeji by sa mohla meniť na základe pohybov očí

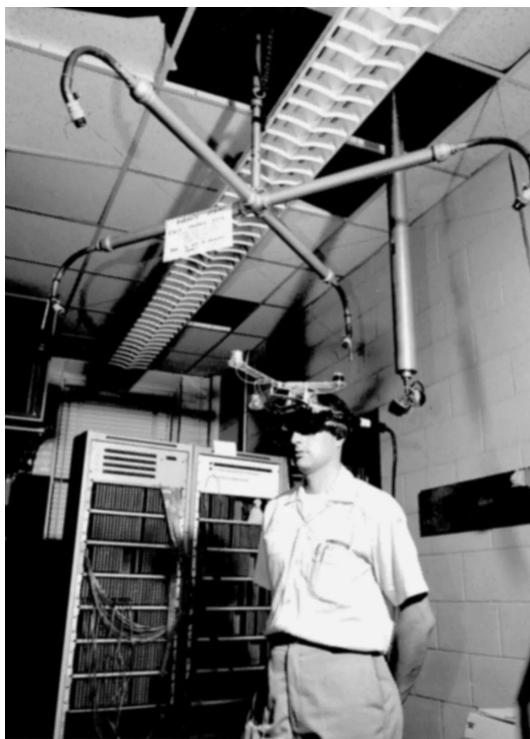
---

<sup>1</sup>Z angl. *immersive* - volne preložené ako vtahujúci do dejania

<sup>2</sup>Jedno z prvých digitálnych zariadení pre kreslenie rukou a prvé, ktoré bolo predávané ako „low-cost“

používateľa. Táto koncepcia otvára priestor pre vytváranie intuitívnejších a personalizovaných rozhraní, čo môže viesť k inovatívnym spôsobom interakcie s počítačovými systémami.

Krátko potom Sutherland skonštruoval prvý interaktívny systém slúžiaci na zobrazovanie virtuálnej reality, ktorý si vyslúžil priliehavú prezývku *Damoklov meč* [2, s. 5], pozri obr. 1. Trojrozmerný displej s upevnením na hlavu, ktorý Sutherland vo svojej práci [3] popísal v roku 1968, pozostával zo špeciálnych okuliarov, ktoré na sebe mali upevnené dve miniatúrne obrazovky typu CRT a boli pevnou súčasťou ramena visiaceho zo stropu miestnosti. Okrem zníženia fyzickej záťaže používateľa, ktorá vznikala kvôli hmotnosti zariadenia, toto rameno slúžilo ako mechanický snímač polohy hlavy a spolu s ďalším, ultrazvukovým snímačom generovalo vstupné údaje pre výpočet rotačnej a translačnej matice. Tie boli súčasťou operácií nevyhnutných pre dynamické generovanie obrazu. Objekty, z ktorých pozostával výsledný obraz, boli poskladané z jednoduchých čiar a vytvárali tzv. wireframe model.



Obr. 1: Zobrazovacie zariadenie Ivana Sutherlanda

Sutherlandovo dielo významne prispelo k rozvoju myšlienok a technológií súvisiacimi s vizualizáciou umelého sveta. Postupom času vzniklo množstvo ďalších prototypov rôznorodých systémov, ktoré sa líšili nie len účelom použitia, ale aj spôsobom vzájomnej interakcie s človekom a aj tým, či a ako veľmi bol umelý svet prepojený s tým skutočným. Ako

príklad uvedieme systém VIDEOPLACE Myrona Kruegera z roku 1985, ktorý kombinuje zosnímanú postavu používateľa s umelo vytvoreným prostredím. Krueger navrhuje využitie tohto systému pre účely telekomunikácie uvádzajúc, že komunikácia medzi priateľmi či obchodnými partnermi nie je obmedzená len slovami, a teda je jednoznačne žiadúce, aby geograficky vzdialené osoby mohli zdieľať spoločné virtuálne prostredie [4].

Práve Kruegerov systém sprostredkúva to, čo v súčasnej terminológii môžeme označiť ako virtuálnu realitu. Tá prenesie človeka do úplne odlišného prostredia, reálne okolie a objekty v ňom nahradí počítačom generovanými, s cieľom poskytnúť používateľovi intenzívny zážitok z nového sveta, akoby sa v ňom skutočne nachádzal [5].

V deväťdesiatych rokoch minulého storočia bola snaha o rozšírenie zariadení pre virtuálnu realitu medzi bežných spotrebiteľov. Tieto zariadenia však boli cenovo nedostupné a spôsobovali používateľom nevoľnosť. Príčinou nevoľnosti bol nesúlad medzi zrakovým a vestibulárnym vnemom; ten bol spôsobený vysokou latenciou medzi pohybom hlavy používateľa a reakciou VR zariadenia na tento pohyb prekreslením virtuálnej scény.

Prelom nastal až v roku 2014, keď Palmer Luckey, zakladateľ spoločnosti Oculus, objavil spôsob, ako znížiť dobu trvania vyhodnocovania polohy hlavy za použitia gyroskopu, akcelerometra a magnetometra. Tento úspech opäť naštartoval záujem o túto technologickú oblasť [5]. V súčasnosti medzi najrozšírenejšie zariadenia patria Oculus Rift S, HTC Vive Pro, HTC Vive Cosmos, Valve Index a Samsung HMD Odyssey+ [6]. Ďalšou z možností, ktorú propagujú výrobcovia, ako Samsung, Google a LG, je použitie smartfónu ako displeja vo VR headsete, čo predstavuje cenovo dostupnú alternatívu. Ako príklad uvádzame Samsung Gear VR, ktorý je kompatibilný s akýmkolvek modelom Samsung Galaxy; ďalší príklad je dnes už nepodporovaný Google Cardboard a Google Daydream.

## 1.2 Rozšírená realita

Podľa výskumu popísaného v článku [7] definícia rozšírenej reality nie je ani zdaleka tak jednoznačná, ako v prípade virtuálnej reality. Jeho autori položili desiatim osobám, ktoré sa zaoberajú virtuálnou a rozšírenou realitou v komerčnej a akademickej sfére, súbor šestnásťich otázok, ktoré boli navrhnuté tak, aby odhalili rozdiely vo vnímaní toho, čo je virtuálna, rozšírená a zmiešaná realita. Autori uvádzajú, že respondenti sa nezhodovali pri vymenovávaní relevantných charakteristík rozšírenej reality. Niektorí za rozšírenú realitu pokladajú aj jednoduchú vrstvu<sup>3</sup> s kontextuálnymi informáciami, zatiaľ čo ostatní explicitne uvádzali interakciu s reálnym prostredím a prekrývanie skutočných objektov počítačom generovanými ako jej súčasť.

---

<sup>3</sup>pôvodne použitý angl. termín *overlay*

Chen a Xue uvádzajú, že typický AR systém musí splňať tri podmienky: musí umožňovať interakciu medzi reálnym a virtuálnym obsahom, dokáže v reálnom čase prekrývať reálne objekty virtuálnymi, a musí pracovať v trojrozmernom priestore. Takáto funkcionálita vyžaduje použitie rôznych techník sledovania, zobrazovania a interakcie [8].

Techniky sledovania sú používané na zaznamenávanie a overovanie pozície a orientácie používateľov. Zohrávajú dôležitú úlohu pri zosúladení polohy reálnych a virtuálnych objektov. Pozíciu a orientáciu je možné zistovať pomocou metód spracovania obrazu, za použitia rozličných senzorov, či kombináciou oboch spôsobov.

Zobrazovacie techniky spájajú virtuálny obsah a reálne prostredie a zobrazujú oboje naraz. V praxi sa uplatnili tri spôsoby zobrazovania: pomocou ručného zariadenia (*handheld display*) - napr. smartfón alebo tablet, pomocou náhlavného zariadenia (*headmounted-display*) a za použitia projekcie na povrch reálneho objektu (*projection-based display*).

Interakčné techniky zabezpečujú intuitívne používateľské prostredie a adekvátne reakcie systému. Používateľské vstupy pritom môžu byť vo forme gest, hlasových povelov, prípadne je možné použiť reálny objekt ako ovládací prvok [8].

Pomerne známym zástupcom zariadení pre rozšírenú realitu je zariadenie od spoločnosti Google s názvom Google Glass. Zariadenie v tvare bežných okuliarov, dostupné len počas pomerne krátkeho obdobia (2013 - 2015) [5] dokázalo používateľovi zobrazovať informácie na malom displeji tesne nad pravým okom.

### 1.3 Zmiešaná realita

Zmiešaná realita je najmenej preskúmaný typ umelej reality, pretože je spomedzi trojice VR, AR a MR najmladší. Podobne, ako v prípade rozšírenej reality, ani tu nejestvuje úplna zhoda v definícii.

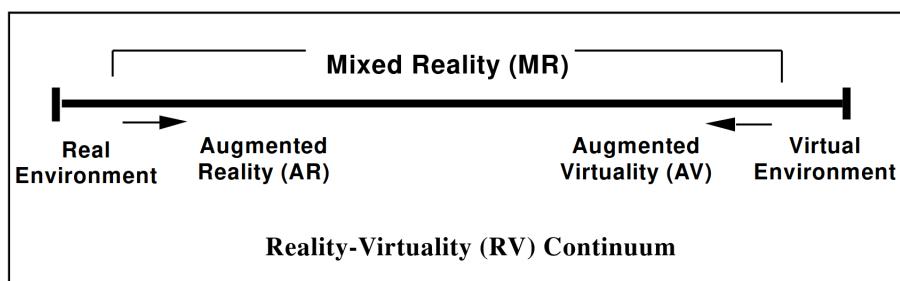
Podľa [7] existuje šesť spôsobov chápania MR; ich názvy ponechávame v pôvodnom znení:

- *Continuum*
- *Synonym*
- *Collaboration*
- *Combination*
- *Alignment*
- *Strong AR*

Vymenované spôsoby chápania MR sú vysvetlené v nasledujúcich podkapitolách.

## Continuum

MR je chápané v súlade s RV kontinuom<sup>4</sup>, ktoré je znázornené na obrázku č. 2. V tomto prípade MR predstavuje kombináciu reálnych a virtuálnych objektov v rámci spektra medzi úplne reálnym a úplne virtuálnym svetom. To znamená, že MR môže pozostávať z prevažne skutočného sveta s nejakými virtuálnymi objektmi, alebo môže pozostávať z prevažne virtuálneho sveta za prítomnosti nejakých reálnych predmetov. V rámci tohto kontextu možno chápať VR, ktoré je na okraji spektra, ako súčasť MR.



Obr. 2: Zjednodušená reprezentácia RV kontinua [9].

## Synonym

V mnohých článkoch, ktoré autori [7] skúmali, sa používalo MR ako synonymum pre AR. To znamená, že tieto pojmy sa navzájom zamieňali; MR bolo použité na označenie systému, ktorý jednoznačne spadal pod AR, alebo bola použitá definícia AR na popisanie toho, čo niektorí autori skúmaných článkov chápali pod pojmom MR.

## Collaboration

Ďalší pohľad vníma MR ako druh spolupráce. V tomto prípade MR predstavuje interakciu medzi rôznymi používateľmi AR a VR, ktorí sa nemusia spoločne nachádzať v jednom priestore. Súčasťou tohto typu MR je rekonštrukcia prostredia, v ktorom sa nachádza používateľ AR, pre druhého používateľa prostredníctvom VR.

## Combination

V tomto prípade je MR chápané ako kombinácia AR a VR v zmysle systému, ktorý využíva oddelené časti postavené na VR, respektíve AR. Hoci tieto časti medzi sebou dokážu

<sup>4</sup>Reality-Virtuality Continuum

interagovať, nie sú navzájom pevne prepojené; systém prípadne dokáže podľa potreby prepínať medzi AR a VR. Autori [7] uvádzajú ako príklad aplikáciu Pokémon GO, kde samotné chytanie Pokémonov je realizované v AR, zatiaľ čo prehľad mapy je plne virtuálny.

## Alignment

MR ako zarovnanie prostredí<sup>5</sup> predstavuje synchronizáciu medzi skutočným a virtuálnym prostredím. Takýto systém kombinuje virtuálne a skutočné prvky, vďaka čomu tu nájdeme čiastočný prienik s *Combination*, ale prostredia samotné nemusia nutne byť AR a VR. Podobnosť jestvuje aj s *Collaboration*, ale bez prítomnosti aspektu spolupráce a bez toho, aby boli prostredia fyzicky oddelené. Ako príklad sa uvádza systém prenášajúci pohyb človeka v reálnom svete do plne imerzívneho virtuálneho prostredia prostredníctvom zariadenia Leap Motion Controller.

## Strong AR

Posledný pohľad na túto problematiku chápe MR ako *silnejšiu* verziu AR. Zmiešaná realita je tu charakterizovaná pokročilým vnímaním prostredia a pokročilými interakciami medzi používateľom a virtuálnymi objektmi, ako aj medzi virtuálnymi objektmi a prostredím. To vytvára predpoklad, že MR závisí na konkrétnom hardvéri alebo zariadení, ktoré dokáže poskytnúť požadovanú funkcionality. Taktiež sa predpokladá, že *obyčajné* AR nemá takéto schopnosti, a tým pádom je MR evolúciou AR.

O niečo jednoduchší pohľad na problematiku ponúka Brigham [5]. Zmiešaná realita (MR) sa opisuje ako spojenie fyzického a virtuálneho sveta, ktoré vytvára nové prostredia, v ktorých fyzické a virtuálne objekty koexistujú a interagujú v reálnom čase. MR kombinuje hlavné črty AR aj VR. Umožňuje používateľom vidieť a komunikovať s prvkami reálneho aj virtuálneho sveta, ktoré sú uveriteľné a responzívne. Ak je napríklad v MR prostredí virtuálny objekt umiestnený pod skutočným stolom, používateľ sa musí zohnúť, aby ho videl, rovnako ako v prípade skutočného objektu. Táto integrácia virtuálnych prvkov do reálneho sveta v MR umožňuje viac imerzívny zážitok v porovnaní s AR, kde sú reálne objekty jednoducho prekryté virtuálnymi prvkami bez akejkolvek interakcie alebo vnímania hľbky.

Brigham konštatuje, že MR je v porovnaní s AR a VR relatívne menej známa, najmä preto, že ide o novší koncepciu a mnohé zariadenia a technológie MR sú stále vo vývoji. Terminológia MR sa používa na vytvorenie rozdielu medzi určitými zariadeniami a softvérom

---

<sup>5</sup>z angl. *alignment of environments*, súosovost

v MR a AR. Spoločnosti ako Microsoft so svojimi HoloLens, Meta s náhlavnou súpravou Meta 2 a Magic Leap sa uvádzajú ako príklady spoločností vyvíjajúcich technológiu MR.

Spomenieme, že autor sa zaoberá aj obavami súvisiacimi so zavádzaním a prijímaním technológií na báze umelej reality, ako je MR. Tieto obavy zahŕňajú technické otázky, použiteľnosť, súkromie, bezpečnosť a etické aspekty. Napríklad zariadenia MR, ktoré neustále mapujú okolie používateľa, vyvolávajú otázky týkajúce sa ochrany umiestnenia a bezpečnosti týchto údajov. Brigham predpokladá, že so zvyšujúcou sa popularitou týchto technológií sa do popredia dostanú obavy o súkromie a bezpečnosť, najmä v súvislosti so zhromažďovaním a používaním údajov.

## 1.4 Microsoft HoloLens 2

Microsoft HoloLens 2 je MR zariadenie, ktoré dokáže fungovať samostatne, bez potreby pripojenia k počítaču. Je to druhá generácia tohto zariadenia spoločnosti Microsoft a ponúka niekoľko zlepšení a zdokonalení oproti svomu predchodcovi. Je postavený na platforme Snapdragon 850 od spoločnosti Qualcomm, ktorá je dostačne výkonná na to, aby na HoloLense dokázal bežať samostatný operačný systém. Microsoft pre tento headset vytvoril upravenú verziu ich operačného systému Windows 10 pod názvom Windows Holographic OS.



Obr. 3: Headset Microsoft HoloLens 2.

HoloLens 2 využíva na zobrazovanie obrazu dva priehľadné holografické displeje typu LBS, každý s rozlíšením 1440x936 pixelov a obnovovaciou frekvenciou 60 Hz [10]. LBS dokáže poskytnúť široké zorné pole; v spojení s vysokým rozlíšením umožňuje v prostredí používateľa zobraziť hologramy s vysokou úrovňou detailov.

Súčasťou HoloLenu sú taktiež rôzne senzory a kamery, ktoré umožňujú snímať

a vyhodnocovať prostredie, v ktorom sa používateľ práve nachádza [11]. Dáta o prostredí sú získavané pomocou nasledujúceho vybavenia:

- Kamery sledujúce prostredie vo viditeľnom spektre<sup>6</sup>
- Hĺbková kamera
- Farebná kamera
- Pohybové senzory
- Infračervené kamery
- Pole mikrofónov

Štvorica kamier sledujúcich prostredie vo viditeľnom spektre snímajú obraz v škále šedej; ich obraz sa používa na sledovanie pohybu hlavy a vytváranie priestorovej mapy. Hĺbková kamera sníma priestor v dvoch režimoch. Prvý režim sníma priestor rýchlosťou 45 snímkov za sekundu a slúži primárne na zaznamenávanie pohybu rúk; presnú vzdialenosť dokáže detegovať približne do jedného metra. V druhom režime, ktorý je určený na priestorové mapovanie, je rýchlosť snímania v rozmedzí jeden až päť snímkov za sekundu. V oboch režimoch však kamera dokáže poskytovať obrázky v infračervenom spektre, ktoré nie sú ovplyvnené ambientným svetlom.

Pohybové senzory, ktoré HoloLens používa, sú nasledovné:

- akcelerometer, ktorý sníma zrýchlenie na všetkých osiach,
- gyroskop, ktorý slúži na detekciu rotácie, a
- magnetometer, ktorý pomáha určiť absolútnu orientáciu.

Farebná kamera umožňuje snímať obrázky v rozlíšení 8 megapixelov, alebo natáčať video v rôznych rozlíšeniach. Medzi jej funkcie patrí automatické zaostrovanie, vyváženie bielej, automatické nastavenie expozície a ďalšie. Pomocou tejto kamery je možné zaznamenávať MR zážitok a zdieľať ho s ostatnými ľuďmi tak, ako ho vidí používateľ prostredníctvom funkcie Mixed Reality Capture.

Pomocou infračervených kamier zabudovaných v headsete je možné sledovať pohyb očí používateľa. Táto funkcia umožňuje detegovať používateľov pohľad a reagovať naň, vďaka

---

<sup>6</sup>Visible Light Environment Tracking

čomu môže byť MR zážitok intenzívnejší a interakcia s virtuálnym svetom dokáže byť intuitívnejšia. Prostým pohľadom dokáže používateľ presúvať virtuálne objekty, posúvať čítaný text; taktiež je možné sledovať pozornosť používateľa v danom okamihu [12]. Táto funkcia je oproti predchádzajúcej verzii headsetu novinkou.

Prostredníctvom poľa mikrofónov dokáže HoloLens reagovať na hlasové povely, čo v spojení so sledovaním pohybu očí umožňuje efektívne používanie headsetu aj bez použitia rúk.

## 1.5 Vývoj aplikácií pre Microsoft HoloLens 2

Microsoft vývojárom poskytuje MRTK (Mixed Reality Toolkit), čo je multiplatformová knižnica, ktorá významne urýchluje a zjednodušuje prácu vývojárov pri tvorbe aplikácií pre umelú realitu. Prostredníctvom tejto knižnice je možné rýchle prototypovanie aplikácií za použitia rôznych UI/UX nástrojov, predpripravených šablón objektov (napr. tlačidiel) a hotových príkladov aplikácií [13].

MRTK je dostupný pre populárny herný engine Unity. Unity je dostupné bezplatne pre osobné použitie, čo robí takýto vývoj prístupný širokému spektru záujemcov. Programový kód aplikácií vyvájaných v tomto prostredí je písaný v jazyku C#. Samostatná verzia MRTK existuje aj pre nástroj s názvom Unreal Engine. Unreal Engine sme si zvolili na realizáciu aplikácie tejto diplomovej práce; jeho detailnejšiemu popisu a dôvodom jeho volby sa budeme venovať v kapitole 5.2.

Okrem HoloLens 2 je podporovaných niekoľko ďalších zariadení, napr. Meta Quest [14]. Takztiež sú podporované platformy postavené na platforme iOS a Android. Jednou z výhod multiplatformovosti je aj jednoduchý prenos aplikácie napísanej pre pôvodnu verziu HoloLens na verziu 2. Rovnako sa dá veľká časť programu otestovať na jednom zariadení, a na ostatných zariadeniach, s ktorými sa pri vývoji počíta, sa už len doladujú špecifické detaily.

Na to, aby dokázal vývojár otestovať svoju aplikáciu, nemusí mať prístup k headsetu ako takému. Nástroj s názvom HoloLens Emulator umožňuje odskúšanie takejto aplikácie na počítači, pričom vstupy sú simulované pomocou myši, klávesnice, prípadne ovládača Xbox. Pre použitie v emulátore nie je nutné aplikáciu žiadnym spôsobom upravovať. Pohyb v priestore je ovládaný rovnako, ako v typickej počítačovej hre (klávesy W, A, S a D), pohybom myši sa simuluje pohyb rúk a hlavy [15].

## 2 Využitie umelej reality vo vzdelávaní

Umelá realita sa čoraz viac využíva vo vzdelávaní v oblasti biológie. Imerzívne zážitky, ktoré využívajú ľudské zmysly, sú vo vzdelávaní v oblasti biológie obzvlášť prínosné, pretože umožňujú študentom oboznámiť sa s komplexnými biologickými systémami, ktoré nie je ľahké realizovať vo fyzickom svete, ako sú napríklad štruktúry bielkovín alebo bunkové procesy. Napríklad VR platformy, ako sú VRLab Academy, Labster a ClassVR, simulujú biologické a chemické experimenty v prostredí VR, čím zlepšujú zážitok z učenia [16].

Turhan ďalej tvrdí, že randomizované štúdie ukázali, že stereoskopické 3D nástroje pomáhajú pri učení anatómie a študenti ich prijímajú veľmi pozitívne. Zvyšujúca sa dostupnosť vzdelávacích platform a nástrojov vo VR svedčí o jej rastúcej úlohe vo vzdelávaní v oblasti biológie. Využívanie herných mechanizmov v týchto platformách, ako je napríklad VR nástroj Peppy založený na Unity, pomáha pri pochopení zložitých biologických štruktúr a procesov. Tieto imerzívne vizualizácie uľahčujú pochopenie abstraktných pojmov, ktoré sú tradične náročné na pochopenie prostredníctvom fyzických modelov alebo 2D reprezentácií.

Potenciál VR vo vzdelávaní v oblasti biológie je významný, pretože ponúka nové spôsoby skúmania, experimentovania a pochopenia zložitých biologických údajov a konceptov. S ďalším vývojom technológií sa očakáva, že využívanie umelej reality vo vzdelávaní v oblasti biológie sa bude rozširovať a bude ponúkať interaktívnejšie a pútavejšie vzdelávacie skúsenosti.

Pozitívna spätná väzba od študentov a preukázaná účinnosť pri napomáhaní k hlbšiemu pochopeniu biologických systémov ďalej motivujú výskumníkov k vývoju a integrácii týchto technológií do vzdelávacích osnov. Prispôsobiteľnosť umelej reality rôznym vzdelávacím kontextom spolu s rýchlym technologickým pokrokom otvára nespočetné možnosti budúcich aplikácií nielen v biológii, ale aj v iných oblastiach vedy a vzdelávania.

Malone vo svojej metaanalýze vyhodnocuje vplyvy využitia AR vo vzdelávaní počas posledných tridsiatich rokov [17]. Ústredným zistením tejto štúdie je zistenie, že AR má konzistentný a stredne silný vplyv na výsledky vzdelávania v rôznych vzdelávacích prostrediach. Výskum dokazuje, že účinnosť AR presahuje hranice akademických disciplín, demografických charakteristík účastníkov a typov výsledkov vzdelávania. Táto široká použiteľnosť zdôrazňuje úlohu AR ako univerzálneho vzdelávacieho nástroja, ktorý dokáže zlepšiť kvalitu vzdelávania v rôznych spektrach výuky.

Štúdia skúma, ako AR ako technologický nástroj ovplyvňuje procesy a výsledky vzdelávania. Syntézou údajov zo širokého spektra štúdií predstavuje holistický pohľad na

úlohu AR vo vzdelávaní. Výskum sa zaobrá potenciálnymi vplyvmi rôznych faktorov, ako sú oblasť vzdelávania, charakteristiky účastníkov a typ vzdelávacích výsledkov. Dochádza však k záveru, že tieto faktory významne nemenia účinnosť AR. Toto zistenie je klúčové a poukazuje na potenciál AR ako univerzálneho nástroja vo vzdelávaní, ktorý sa môže využívať v rôznych vzdelávacích prostrediach a s rôznymi skupinami učiacich sa.

Štúdia ďalej potvrzuje potrebu neustáleho výskumu v tejto oblasti a poukazuje na možnosti budúceho skúmania uplatnenia AR vo vzdelávaní. Napriek určitým obmedzeniam poskytujú zistenia silný základ pre pochopenie možností AR pri zlepšovaní vzdelávacích procesov a výsledkov. V štúdii sa tiež zdôrazňuje kvalita zahrnutých metaanalýz, pričom sa konštatuje ich všeobecne prijateľná až dobrá kvalita, čo prispieva k spoľahlivosti zistení.

# 3 Návrh MR aplikácie na základe miskonceptí vo vzdelávaní

## 3.1 Identifikácia miskoncepcíí

### 3.1.1 Bunka ako dvojrozmerný objekt

Vijapurkar uvádza, že problém pri vzdelávaní študentov, pokiaľ ide o presnú vizualizáciu buniek, vyplýva z ich hlboko zakorenenej mylnej predstavy o bunkách ako dvojrozmerných štruktúrach [18]. Aj keď sú bunky na ilustráciách znázornené ako trojrozmerné, tieto snahy často nepomáhajú študentom vytvoriť si správnu trojrozmernú predstavu. Tento problém sa neobmedzuje len na nedostatok trojrozmernosti v mentálnych modeloch študentov; ide aj o ich neschopnosť vnímať bunky ako dynamické, funkčné jednotky života, čo je v biológii klúčový koncept.

Jedným z klúčových faktorov, ktoré prispievajú k tomuto problému, je charakter ilustrácií v učebniciach. Učebnice a vzdelávacie materiály sa zvyčajne vo veľkej miere spoliehajú na 2D projekcie 3D objektov. Hoci tieto ilustrácie majú znázorňovať trojrozmerné štruktúry, často to študentom účinne nesprostredkujú. Je to preto, že prevod 2D projekcie na 3D koncept je zložitá kognitívna úloha, najmä pre mladších študentov. Problém ešte znásobuje skutočnosť, že bunky, ktoré sú mikroskopické, sú mimo rozsahu bežnej ľudskej skúsenosti, čo stáže študentom pochopiť a predstaviť si ich skutočnú povahu a rozsah.

Štúdia zdôraznila, že aj keď sa študentom ukážu skutočné fotografie buniek, ktoré ich zobrazujú ako 3D objekty, ich už existujúce 2D mentálne modely môžu narušiť ich interpretáciu týchto obrázkov. Táto nesprávna interpretácia naznačuje, že problém nespočíva len v spôsobe zobrazovania buniek, ale aj v tom, ako sa študenti učia chápať tieto zobrazenia.

Ďalej Vijapurkar spomína, že keď sa študenti v triede venovali vytváraniu fyzických modelov buniek, ich prvé pokusy stále odrážali 2D perspektívu, pričom modely mali podhodnotený tretí rozmer. Ako však vyučovanie postupovalo so zameraním na spochybňovanie a pretváranie ich mentálnych modelov, následné modely študentov vykazovali výrazné zlepšenie v zobrazovaní 3D povahy buniek. Tento prechod podčiarkuje význam aktívnych, praktických skúseností pri učení sa, ktoré pomáhajú študentom vytvárať presné mentálne modely.

Pretrvávajúca povaha tohto problému s 2D vizualizáciou naznačuje, že by mohli byť potrebné interaktívnejšie a imerzívnejšie vyučovacie metódy. Tu môžu zohrávať klúčovú

úlohu počítačové 3D modely a aplikácie zmiešanej reality (MR). Tieto pokročilé technologické nástroje môžu študentom poskytnúť interaktívne trojrozmerné reprezentácie buniek, ktoré im umožnia preskúmať a pochopiť zložité štruktúry intuitívnejším a pútavejším spôsobom. Najmä aplikácie MR ponúkajú imerzívny zážitok, ktorý môže preklenúť rozdiely medzi 2D reprezentáciami a 3D realitou a pomôcť študentom lepšie pochopiť koncept buniek ako dynamických trojrozmerných štruktúr. Kombináciou vizuálnych, sluchových a hmatových podnetov môže MR vytvoriť komplexnejší vzdelávací zážitok, ktorý môže účinne riešiť a korigovať hlboko zakorenенé mylné predstavy študentov o povahе buniek.

Na záver možno konštatovať, že hoci tradičné metódy zobrazovania buniek v 3D nestačia na to, aby pomohli študentom vytvoriť si presné vizuálne predstavy, začlenenie moderných technológií, ako sú počítačové 3D modely a aplikácie zmiešanej reality, by mohlo poskytnúť účinnejšie riešenie pri pretváraní študentských predstáv o bunkách ako komplexných, dynamických a trojrozmerných štruktúrach.

### **3.1.2 Nepresnosti pri výuke problematiky nervových vzruchov**

Odomova štúdia [19] identifikuje osiem klúčových konceptov týkajúcich sa akčného potenciálu a hodnotí ich presnosť a obsiahnutie v šiestich stredoškolských učebniciach biológie. Zistenia odhalujú rôznorodosť rozsahu pokrycia konceptov súvisiacich s nervovým vzruchom, pričom niektoré učebnice poskytujú komplexnejšie a presnejšie informácie ako iné. Uvádza sa, že väčšina učebníc prezentuje pojmy prostredníctvom textu alebo ilustrácií, pričom chýbajú praktické úlohy v laboratóriu.

V dokumente sa tiež uvádzajú konkrétnе miskoncepcie zistené v vyhodnocovaných učebniciach, ako napríklad nepresnosti týkajúce sa úloh sodno-draselnej pumpy pri repolarizácii a zavádzajúce analógie porovnávajúce nervové vzruchy s elektrickým prúdom v drôtoch.

Okrem toho štúdia ďalej zdôrazňuje nevyhnutnosť presného a komplexného pokrycia problematiky nervových vzruchov v učebniciach biológie, najmä vzhľadom na zásadnú úlohu neurobiológie pri porozumení biológie človeka. V článku sa tiež pojednáva o vývoji modelov a počítačových simulácií na pomoc pri výučbe pojmov akčného potenciálu, pričom sa poukazuje na potrebu praktických skúseností študentov na pochopenie týchto abstraktných konceptov.

## **3.2 Návrh aplikácie**

Výsledky vyššie spomenutých štúdií jednoznačne podporujú a vytvárajú priestor na ďalší výskum a experimenty v oblasti využitia moderných technológií v rámci vyučovacieho

procesu. Doteraz používané platné učebnice samy o sebe nie sú zdrojom miskoncepcíí, no zo svojej podstaty nedokážu vždy odovzdať informácie o trojdimenzionálnej štruktúre biologických objektov alebo procesoch; žiacke miskoncepcie však môžu vznikať ako dôsledok nesprávnej interpretácie ilustrácií či modelov. Aplikovanie rozšírenej reality sa preto ponúka ako možné riešenie tohto problému.

Na základe záverov vyššie spomenutých štúdií sme sa rozhodli pre vytvorenie aplikácie, ktorá bude splňať nasledujúce kritériá:

- aplikácia bude vyobrazovať trojrozmerný model nervovej bunky,
- v rámci aplikácie bude naimplementovaná animácia reprezentujúca zjednodušený model mechanizmu skokového prenosu nervového vzruchu po myelinizovanom vlákne,
- na základe používateľského vstupu bude možné túto animáciu opakovane spustiť
- rýchlosť tejto animácie bude prispôsobiteľná grafickým ovládacím prvkom.

# 4 Biologický základ nervového systému

## 4.1 Nervové bunky - neuróny

Nervové bunky (neuróny) predstavujú základnú morfologickú a funkčnú jednotku nervového tkaniva. Sú to bunky s charakteristickými výbežkami, pomocou ktorých sa sústredujú v rôznych častiach nervovej sústavy, v sivej hmote mozgu a miechy, na sietnici, v cerebrospinalných a vo vegetatívnych uzloch. Odlišujú sa od seba tvarom, veľkosťou a funkčne.

Neurón pozostáva z častí:

- telo nervovej bunky (neurocit, perikaryon),
- výbežky (dendrity) - výbežky slúžiace k príjmu podráždenia, vedú vznacky smerom k telu bunky (celulipetálne),
- neurit (axón) - výbežok odvádzajúci vznacky z bunkového tela na perifériu (celulifágne),
- nervové zakončenie (telodendrie) - konečné vetvičky axónu, ktoré sú súčasťou synapsí.

Neurón, vzhľadom na jeho tvar a morfologické zvláštnosti, je bunkou rôznorodého vzhľadu a veľkosti. Telo nervovej bunky je trofickým centrom neurónu. Prijíma a spracováva prichádzajúce podnete a prevádzka ich do neuritu. Tvar tela nervových buniek je rozmanitý, Závisí od počtu výbežkov, od druhu nervových buniek a ich lokalizácie, napr. v kôre mozgu sú bunky tvaru štíhlych pyramíd (pyramídové bunky), v mieche sa nachádzajú multipolárne neuróny hviezdicového tvaru, v mozočku má telo tvar guľovitý, resp. hruškovitý. [20]

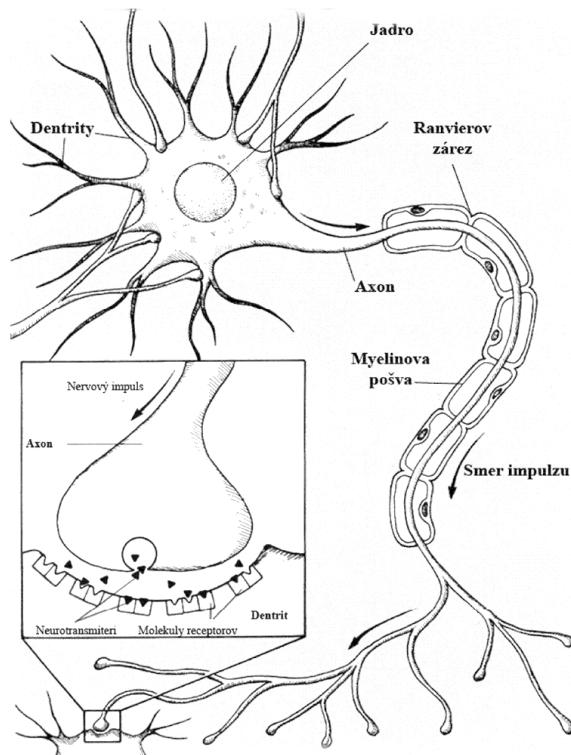
## 4.2 Procesy na nervových vláknach

Na nervových vláknach prebiehajú dva procesy:

- vzrušenie (excitácia), teda vznik nervového vznacky
- vedenie nervového vznacky (kondukcia, šírenie, propagácia)

### 4.2.1 Vzrušenie nervového vlákna

Nervový vznack je stereotypný sled depolarizácie a repolarizácie vzrušivej membrány nervového vlákna, ktorý vzniká spontánne vždy, keď depolarizácia dosiahne úroveň prahovej depolarizácie. Nervový vznack sa tiež nazýva akčný potenciál. Ak nervové vlákno dráždime slabými podnetmi, voltáž membránového potenciálu sa sice zníži, ale táto depolarizácia



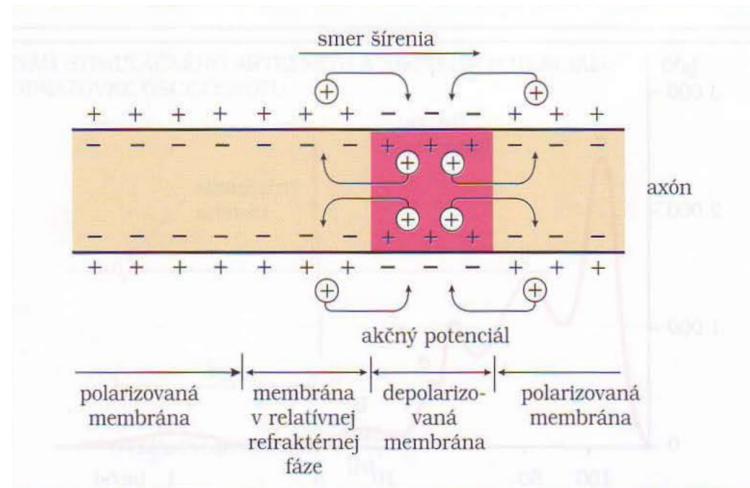
Obr. 4: Stavba neurónu [21].

nedosiahne úroveň prahovej depolarizácie a akčný potenciál nevznikne. Takéto podnety nazývame podprahovými podnetmi. Až prahový podnet depolarizuje membránu k prahovej úrovni a zrodí sa akčný potenciál.

#### 4.2.2 Vedenie akčného potenciálu

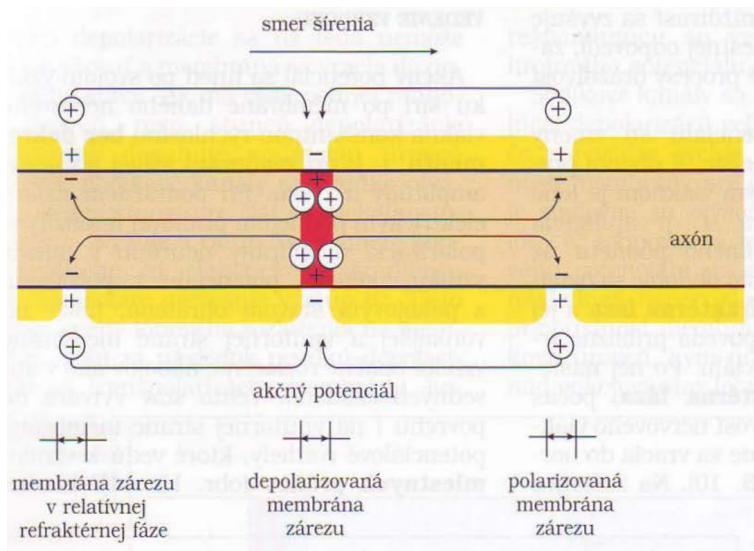
Sú dva typy vedenia akčného potenciálu - vedenie po nemyelinizovanom a vedenie po myelinizovanom nervovom vlákne.

**Vedenie na nemyelinizovanom vlákne.** Vzrušený úsek vlákna má obrátenú polaritu - povrch je elektronegatívny a vnútro elektropozitívne. Zo susedného normálne polarizovaného miesta (povrch pozitívny, vnútro negatívne) prechádzajú kladné náboje k vzrušenému elektronegatívнемu miestu a potom spolu s  $\text{Na}^+$  vnikajú dovnútra a tam idú niekoľko milimetrov opačným smerom. Týmto pohybom nábojov sa oslabuje elektropozitivita susedného miesta zvonku a posilňuje zvnútra. Oslabovanie elektropozitivity znamená oslabovanie polarizácie, pokles membránového potenciálu až k úrovni prahovej depolarizácie, čím sa vyvolá akčný potenciál už na novom mieste. Posun akčného potenciálu je plynulý, no rýchlosť jeho vedenia je relatívne malá.



Obr. 5: Šírenie nervového vzruchu v nemyelinizovaných nervových vláknach [22].

**Vedenie na myelinizovanom vlákne.** Myelinizované nervové vlákna sú obalené myelinovými obalmi (pošvami). Tie nie sú súvislé, ale prerušované v miestach Ravnierovych zárezov. Iba v týchto miestach je vodivá membrána v styku s mimobunkovou tekutinou a teda len v týchto miestach je polarizovaná. Ak sa akčný potenciál práve nachádza v jednom Ravnierovom záreze, povrch membrány je tu elektronegatívny a jej vnútorná strana elektropozitívna. Opäť je tu prítomný fenomén oslabovania elektropozitivity, tentokrát ale najbližšieho Ravnierovho záreza, ktorý môže byť vzdialenosť jeden až dva milimetre. Aj tu platí, že ak depolarizácia membrány v susednom zárese dosiahne prahovú hodnotu, zrodí sa v ňom nervový vzruch. Ten sa naň teda presunul skokom.



Obr. 6: Saltatérne vedenie vzruchu v myelinizovaných nervových vláknach [22].

Tento typ vedenia možno charakterizovať týmito vlastnosťami:

- ióny nemôžu prestupovať cez myelínový obal, len cez obnaženú membránu v Ranvierovom záreze,
- nervový vzruch „skáče“ zo zárezu do zárezu, preto hovoríme o saltatórnom vedení („vedení skokom“),
- dĺžka jedného myelinizovaného úseku (internódium) závisí od priemeru vlákna - čím je hrubšie, tým je myelinizovaný úsek (a teda i skok) dlhší,
- čas jedného skoku nezávisí od dĺžky internódia, je rovnaký pri dlhých i krátkych internódiach. Ak sú dlhšie (na hrubších vláknach), ich počet je menší a teda i počet skokov na jednotku dĺžky vlákna bude menší. To zvyšuje rýchlosť vedenia a následne napr. reflexný a reakčný čas,
- iónové prúdy sú obmedzené len na Ranvierove zárezy, teda menej iónov prechádza na jednotku povrchu nervového vlákna a sekundárne menej energie treba na udržovanie a obnovu koncentračných rozdielov  $\text{Na}^+$  a  $\text{K}^+$  v mimobunkovej a vnútrobunkovej tekutine.

Saltatórne vedenie je takto nielen veľmi rýchle, ale i veľmi hospodárne. Je obdivuhodne dômyselnou inováciou informačných tokov v živých systémoch [23].

#### **4.2.3 Iónové zmeny počas vedenia akčného potenciálu**

Zmenou polarizácie membrány oproti pokojovým podmienkam sa výrazne mení jej prieplustnosť pre ióny  $\text{Na}^+$  - pri depolarizácii sa prieplustnosť pre  $\text{Na}^+$  zvyšuje, pri hyperpolarizácii sa znížuje. Zmena prieplustnosti pre  $\text{Na}^+$  sa uskutočňuje prostredníctvom napäťovo závislých sodíkových kanálov. Depolarizácia membrány vyvoláva aj otváranie pomalých draslíkových kanálov.

Pri podprahových stimuláciách, na ktoré reaguje membrána iba miestnym podráždením, t.j. stupňovaným potenciálom, výstup  $\text{K}_+$  prevažuje nad vstupom  $\text{Na}^+$ . Úroveň depolarizácie sa už teda nemôže ďalej zvyšovať a membrána sa vracia do pokojového stavu. Ak má však podnet prahovú úroveň, resp. stupeň depolarizácie membrány dosahuje spúšťaciu úroveň  $-55 \text{ mV}$ , sodíkové kanály sa prudko otvárajú, prieplustnosť pre  $\text{Na}^+$  sa niekoľkostonásobne zvyšuje a vstup  $\text{Na}^+$  v smere koncentračného aj elektrického gradientu mnohonásobne prevyšuje výstup  $\text{K}^+$ . Tieto rýchle zmeny iónového rozloženia na membráne majú za následok prudkú depolarizáciu až transpolarizáciu membrány, korešpondujúcu so vzostupným ramenom hrotového potenciálu.

Sodíkové kanály sa aj napriek pretrvávajúcej depolarizácii veľmi rýchlo inaktivujú, čo sprevádza rýchle znižovanie priepustnosti membrány pre ióny  $\text{Na}^+$ . Táto zmena je spoločne so zvýšením permeability pre ióny  $\text{K}^+$  zodpovedná za rýchly návrat hrotového potenciálu na pokojovú úroveň. Pri následnej hyperpolarizácii už dosahuje priepustnosť membrány pre  $\text{Na}^+$  východiskovú úroveň, kým pre  $\text{K}^+$  zostáva zvýšená nad pokojový stav.

Na následnej hyperpolarizácii (pozitívny následný potenciál) sa zúčastňuje aj elektrogénny efekt sodno-dráselnej pumpy, ktorá participuje i na obnovení pôvodného rozloženia iónov. Intracelulárному hromadeniu  $\text{Na}^+$  a zvyšovaniu extracelulárnej koncentrácie  $\text{K}^+$  za- braňuje trvalé pôsobenie sodno-dráselnej pumpy ktorá udržuje stály pokojový membránový potenciál. [22]

# 5 Tvorba MR aplikácie

Na realizáciu aplikácie boli použité nástroje Blender a Unreal Engine. Blender je FOSS softvér pre prácu s trojrozmernou grafikou. Používa sa na 3D modelovanie, animáciu, tvorbu vizuálnych efektov, a pod. Unreal Engine je herný engine vyvíjaný spoločnosťou Epic Games. Pôvodne bol určený pre vývoj FPS hier, no dnes má širokú škálu použitia od vývoja najrôznejších herných titulov a tvorbu filmových efektov až po architektonické vizualizácie a tvorbu aplikácií určených pre virtuálnu, rozšírenú a zmiešanú realitu.

## 5.1 Tvorba modelu neurónu v Blenderi

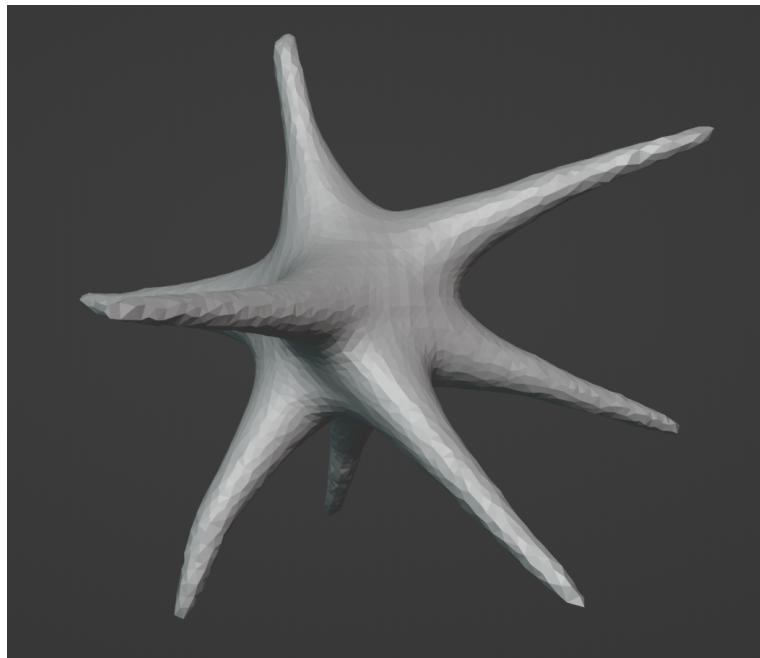
Model neurónu sme si pripravili v Blenderi. Prvým krokom bolo vytvorenie nového projektu voľbou **General** v úvodnom dialógu po spustení Blendera. Štandardne sú v novom projekte umiestnené vzorové objekty (kocka, zdroj svetla a kamera). Tieto neboli pre naše použitie potrebné, odstránili sme ich. Do projektu sme pridali nový objekt typu **UV Sphere**, ktorý nám poslúžil ako základ pre ďalšie tvarovanie pomocou techniky zvanej sculpting.

Sculpting v digitálnom modelovaní je podobný tradičnému sochárstvu, kde 3D grafik formuje a upravuje digitálny objekt ručne. Tento proces zahŕňa použitie rôznych nástrojov a techník, ako je napríklad *Snake hook* slúžiaci na vyťahovanie dlhých, tiahlych tvarov, *Inflate* pre dodanie objemu alebo zväčšenie špecifických oblastí modelu, *Crease* pre vytváranie ostrých línií a zárezov, alebo *Smooth* pre vyhladzovanie povrchov. Tento prístup je obzvlášt vhodný pre modelovanie prírodných objektov, ako sú neuróny, ktoré majú komplexnú a nepravidelnú štruktúru. Na rozdiel od iných metód modelovania, kde sa kladie dôraz na geometrickú presnosť a dodržiavanie technických výkresov, sculpting umožňuje väčšiu flexibilitu a intuitívnosť. Týmto spôsobom sme mohli efektívne zachytíť jedinečné a zložité tvary neurónu, čo by bolo pri použití iných modelovacích techník náročnejšie. Táto metóda poskytuje slobodu v tvorbe a umožňuje dosiahnutie vyššiu úroveň vizuálnej autenticity, čo je klúčové pre správne reprezentovanie organických štruktúr, akými sú neuróny.

**UV Sphere**, ktorý sme v predošлом kroku vytvorili, sme použili pre vytvorenie tela neurónu. To zahŕňalo formovanie základnej štruktúry neurónu, kde sme sa zamerali na vytvorenie výbežkov, ktoré predstavovali základ pre dendrity. Následne sme tento základ rozvetvili do komplexnejšej stromovej štruktúry.

Po prepnutí sa do režimu *sculpting* sme v pravom paneli zaškrtli voľbu **Dyntopo**, čo je skratka pre *Dynamic topology*. Táto funkcia Blenderu umožňuje dynamickú zmenu topológie pri sculptingových úpravách. Flexibilita pri práci, ktorá sa vykonáva pomocou

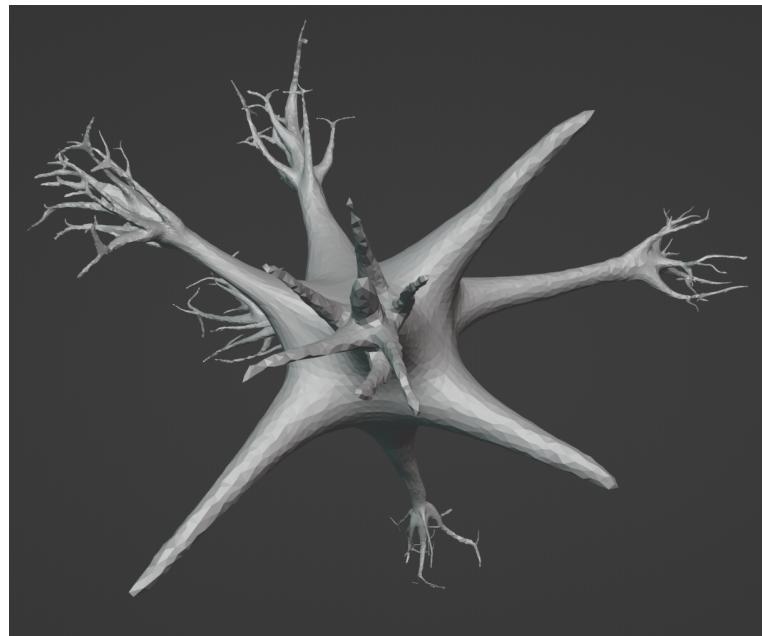
sculptingu, by bola významne obmedzená pevne definovaným počtom polygónov. *Dyntopo* tento problém rieši tým, že automaticky pridáva alebo odoberá v oblastiach, s ktorými sa pracuje. To znamená, že pri používaní rôznych sculptingových nástrojov sa topológia mení automaticky podľa potreby. Pre vytváranie výbežkov sme použili nástroje *Snake hook* a *Elastic deform*, ktoré nám umožnili presne a flexibilne modelovať ich dlhé a tenké štruktúry. Počiatočná fáza modelovania je vyobrazená na obrázku č. 7



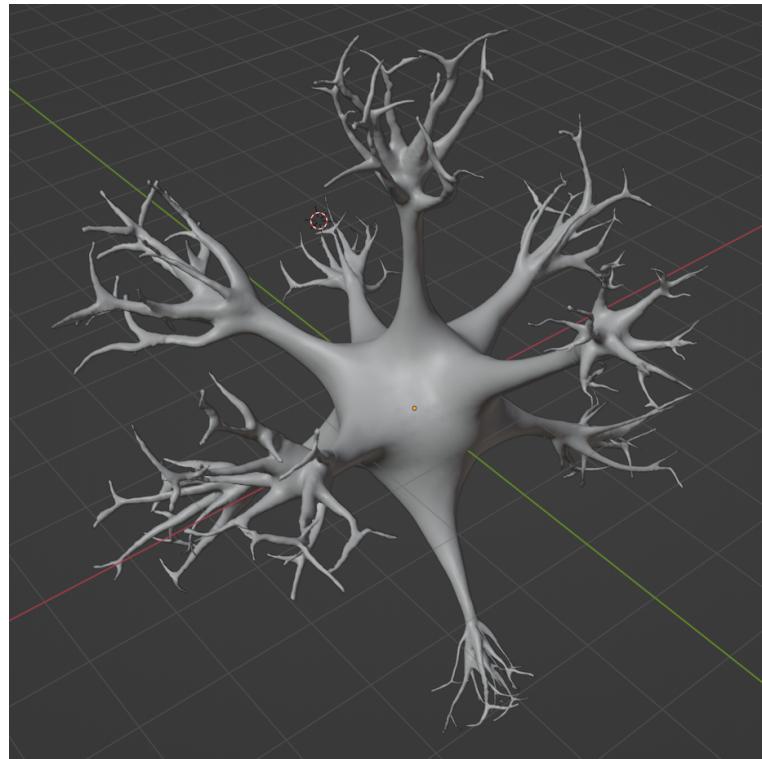
Obr. 7: Tvorba modelu v Blenderi - počiatočná fáza.

Po vytvorení základných výbežkov sme prešli k detailnejšej práci na stromových štruktúrach na koncoch výbežkov, ako vidno na obrázku č. 8. Na ich tvorbu sme využili rovnaké nástroje, pričom sme dbali na to, aby rozloženie a hustota vetiev reflektovala vyobrazenie neurónu v dostupných materiáloch.

Ďalším krokom bolo vymodelovanie axónu. Ako základ axónu sme použili Bézierovú krivku. Bézierová krivka je parametrická krivka umožňujúca tvorbu hladkých zakrivených tvarov, pričom výsledný tvar je jednoducho modifikovateľný pomocou riadiacich bodov. Do projektu sme vložili novú Bézierovu krivku. Jej umiestnenie v priestore sme volili tak, aby jeden koniec zasahoval do tela neurónu a druhý koniec sa nachádzal v adekvátej vzdialosti - v mieste, kde sme mali v úmysle neskôr vytvoriť zakončenia axónu. Po vhodnom vytvarovaní krivky sme v záložke **Object Data Properties** v sekcií **Geometry** → **Bevel** nastavili parameter **Depth** tak, aby táto krivka nadobudla adekvátny objem. Následne sme túto krivku prekonvertovali na mesh, aby sme ju neskôr mohli detailnejšie tvarovať pomocou sculptingu. Pomocou nástroja *Inflate* sme zväčšili objem meshu v oblasti



Obr. 8: Tvorba modelu v Blenderi - práca na koncoch výbežkov.



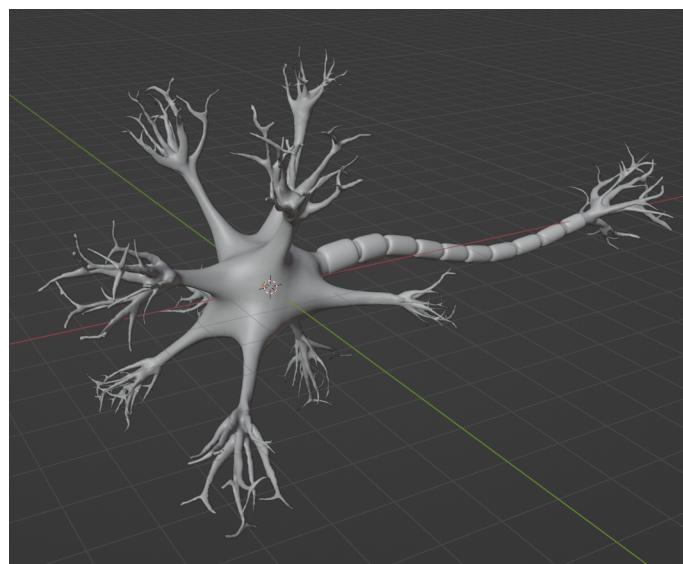
Obr. 9: Tvorba modelu v Blenderi - hotové telo neurónu.

konca krivky a tiež v mieste, kde sa krivka spája s telom neurónu. Výsledok vidno na obrázku č. 10



Obr. 10: Tvorba modelu v Blenderi - telo neurónu spolu s axónom.

Poslednou časťou neurónu, ktorú sme potrebovali zahrnúť do modelu, bola myelínová pošva. Ako jej základ poslúžil objekt typu *Cylinder*, ktorý sme viacnásobným použitím nástroja *Bevel* postupne upravili do zodpovedajúceho tvaru pripomínajúceho súdok. Tento objekt sme následne zduplicovali celkom desaťkrát a jednotlivé kópie sme umiestnili za sebou na vymodelovaný axón tak, aby medzi nimi boli medzery reprezentujúce Ranzierove zárezy. Na obrázku č. 11 je vyobrazená výsledná podoba modelu neurónu, zatiaľ bez aplikovaných materiálov.



Obr. 11: Tvorba modelu v Blenderi - hotový model neurónu bez aplikovaných materiálov.

## 5.2 Implementácia aplikácie v hernom engine

Aplikáciu sme po zvážení viacerých faktorov implementovali v Unreal Engine. medzi aspekty, ktoré ovplyvnili toto rozhodnutie, patria:

- rozsiahla dokumentácia a podpora komunity,
- možnosť vývoja prostredníctvom Blueprint Visual Scripting,
- predošlá skúsenosť s vývojom v Unreal Engine.

Unreal Engine má k dispozícii rozsiahlu dokumentáciu, aktívnu komunitu na diskusných fórách a nespočetne veľa inštruktážnych videí na platformách ako YouTube a pod. To pomáha prekonat počiatočné ťažkosti vývojárom, ktorí ešte nenadobudli hlbšie znalosti používania Unreal Engine. Množstvo problémov, na ktoré začínajúci vývojár potenciálne môže naraziť, tak s najväčšou pravdepodobnosťou už niekto riešil. To jednoznačne prispieva k rýchlejšiemu vývoju aplikácií.

Ďalší aspekt, ktorý zohral zásadnú úlohu vo výbere nástroja na vývoj, bola prítomnosť Blueprint Visual Scriptingu. Blueprint Visual Scripting je výkonný, používateľsky prívetivý nástroj v rámci Unreal Engine určený na vývoj hier a tvorbu interaktívneho obsahu. Umožňuje vývojárom a dizajnérom vytvárať komplexnú hernú logiku a správanie bez potreby tradičného textového programovania. Namiesto toho Blueprint využíva rozhranie založené na uzloch, kde sú funkcie a akcie reprezentované ako vzájomne prepojené bloky. Vďaka tomuto vizuálnemu prístupu je dostupný aj pre tých, ktorí nemajú hlboké znalosti programovania. Okrem Blueprint Visual Scriptingu je možné použiť aj jazyk C++, ktorý je však vhodnejší pre skúsenejších vývojárov.

Pomocou Blueprint Visual Scriptingu vieme vytvárať vlastné objekty (*Blueprint Class*), ktoré môžu dediť svoje správanie a vlastnosti od iných Blueprintov.

### 5.2.1 Kostra aplikácie

K výberu finálnej množiny verzií použitých nástrojov viedla pomerne zložitá cesta. Na začiatku sme pracovali s predpokladom, že kompatibilita MRTK a Microsoft OpenXR s Unreal Engine nebude závislá od verzie Unreal Engine, a teda voľba padla prirodzene na najnovšiu verziu, čo bola v čase písania tejto práce verzia 5.3.2. Ukázalo sa však, že najnovšia verzia Unreal Engine, pre ktorú bol plugin Microsoft OpenXR k dispozícii, bola verzia 5.1. Po nainštalovaní tejto verzie Unreal Engine sme však zistili, že nám nie je k dispozícii plugin Mixed Reality Toolkit Hub. Ten nám bol, ako sme neskôr zistili, prístupný len pre verziu Unreal Engine 5.0. Rozhodli sme sa teda započať vývoj aplikácie

v tejto verzii. Po vytvorení minimálnej funkčnej aplikácie pre MR a jej snahe odskúšať ju v emulátore HoloLensu sme však narazili na problém, ktorý sme neboli schopní vyriešiť; aplikácia po spustení okamžite prestala pracovať. Z týchto dôvodov sme nakoniec zvolili cestu, ktorá by nám potenciálne mala priniesť najmenej problémov; použili sme rovnakú verziu Unreal Engine, aká bola spomenutá vo výukových materiáloch Microsoftu - 4.26.2.

Na to, aby sme mohli začať tvoriť aplikáciu pre MS HoloLens 2, bolo najprv potrebné okrem Unreal Engine nainštalovať nasledujúce závislosti:

- Windows 10 SDK 10.0.18362.0
- Visual Studio 2019 s ďalšími komponentmi:
  - Desktop development with C++
  - .NET desktop development
  - Universal Windows Platform development
  - C++ (v142) Universal Windows Platform tools
  - MSVC v142 – VS 2019 C++ ARM64 build tools

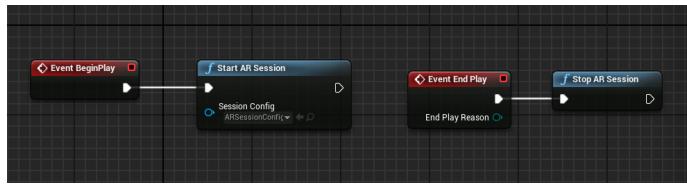
Taktiež bolo potrebné spustiť *Epic Games Launcher* a doinštalovať do Unreal Enginu plugin s názvom Microsoft OpenXR za účelom sprístupnenia funkcií špecifických pre MR platformu Microsoftu. Taktiež bolo nevyhnutné nainštalovať podporu pre cielovú platformu HoloLens 2.

Pokračovali sme vytvorením nového projektu zo šablóny *Blank* v kategórii *Games*. V nastaveniach nového projektu sme vybrali voľby:

- *C++ project* - vyžadované pri použití UX Tools, stále je možné používať aj Blueprints,
- *Scalable 2D or 3D a Mobile/Tablet* - prispôsobenie projektu z hľadiska výkonu zariadenia, na ktorom bude výsledná aplikácia spúšťaná, a
- *No Starter Content* - nepotrebujeme v projekte žiadne vzorové objekty.

Pre správnu funkčnosť v MR prostredí bolo potrebné do projektu pridať *data asset* s názvom **ARSessionConfig**. V *Level Blueprint* sme následne začiatok a koniec *AR Session* priradili k udalostiam *Begin Play*, resp. *End Play*, ako je znázornené na obrázku 12. Pokračovali sme vytvorením Blueprintu dedičeho od triedy **DefaultPawn**, ktorý v tomto prípade reprezentuje používateľa HoloLensu; nazvali sme ho **MRPawn**. Do tohto Blueprintu sme pridali nový komponent typu **Camera**, čo umožnilo naviazať pohľad používateľa v 3D

scéne na pohyb HoloLensu. Za normálnych okolností je možná kolízia Pawnu s inými objektami, v MR projekte to však nie je žiadúce. Z tohto dôvodu sme v rámci tohto Blueprintu na jeho komponentoch **CollisionComponent** a **MeshComponent** nastavili *Collision Presets* na hodnotu **NoCollision**.



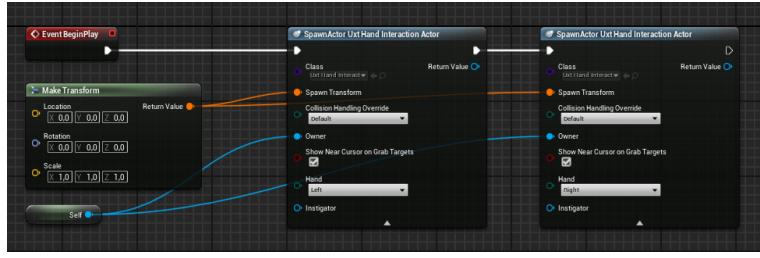
Obr. 12: Nastavenie ARSession v *Level Blueprint*

Ďalším krokom bolo pridanie nového Blueprintu typu **Game Mode Base** s názvom **MRGameMode**. Tento Blueprint nám umožňuje meniť rôzne nastavenia aplikácie; pre nás bola dôležitá možnosť nastaviť to, aký Pawn sa má použiť. To sme dosiahli zmenou nastavenia *Default Pawn Class* na hodnotu **MRPawn**. V nastaveniach projektu v sekcií *Maps & Modes* sme následne nastavili parameter *Default Game Mode* na hodnotu **MRGameMode**.

Interaktivitu scény nám zabezpečila inštalačia pluginu Mixed Reality Tookit UX Tools. Ten sme do Unreal Enginu doinštalovali pomocou Epic Games Launchera a následne sme ho povolili v nastaveniach projektu v sekcií Plugins. UX Tools nám poskytuje *Hand Interaction Actors*, vďaka ktorým môžeme ako používateľ interagovať rukami v MR prostredí s UX prvkami na malú aj veľkú vzdialenosť.

- Interakcia na malú vzdialenosť - uchopenie prvku medzi ukazovák a prostredník, alebo ťuknutie prstom.
- Interakcia na veľkú vzdialenosť - nasmerovanie virtuálneho lúča z ruky smerom na prvak a stlačenie palca a ukazováka.

Týchto actorov sme do projektu pridali tak, že sme si otvorili predtým vytvorený Blueprint **MRPawn** a v grafe udalostí (*Event Graph*) sme na udalosť **BeginPlay** naviazali dva nové uzly typu **Spawn Actor from Class**. Na jednom z nich sme nastavili parameter *Hand* na **Right**, na druhom na **Left**; na oboch sme zaškrtli *Show Near Cursor on Grab Targets*. S parametrom *Spawn Transform* na oboch uzloch sme prepojili nový uzol *Make Transform*. Na parameter *Owner* sme naviazali referenciu na samotný **MRPawn** pomocou objektovej referencie *Self*, viď obrázok č. 13.



Obr. 13: Nastavenie *Hand Interaction Actors*

### 5.2.2 Animácia prechodu častíc do nervového vlákna

Jednou z výziev pri tvorbe aplikácie bolo vytvorenie animácie prechodu častíc dovnútra nervového vlákna pri depolarizácii a ich následný návrat do okolia nervového vlákna pri repolarizácii. Pôvodne sme túto animáciu vytvorili v Blenderi použitím časticového systému *Keyed Particle System*, narazili sme však na problém pri prenose tejto animácie do Unreal Engine. Pracovali sme s predpokladom, že túto animáciu budeme schopní vyexportovať z Blenderu do formátu Alembic a následne ju importovať do Unreal Engine. Pri importe sme však nedokázali vysporiadať s chybami, ktoré nám Unreal Engine vracal. Nakoniec sme dospeli k záveru, že najvhodnejšie bude vrátiť sa o krok späť a naimportovať animáciu v Unreal Engine, čo nám v konečnom dôsledku prinieslo väčšiu flexibilitu pri ladení animácie a chodu aplikácie.

Na vytvorenie animácie sme teda využili časticový systém Niagara, ktorý je súčasťou Unreal Enginu.

Pomocou časticového systému (*Particle system*) je možné simulať rôzne javy, ako napr. oheň, hmla, dym, pričom objekty reprezentujúce tieto javy sú tvorené zhľukmi častíc; správanie týchto častíc je riadené množinou pravidiel ovplyvňujúcich ich pohyb, vzhľad a životný cyklus.

Pozíciu častíc v priestore sme pôvodne chceli ovládať rovnakým spôsobom, ako je to umožnené v systéme *Keyed Particle System* v Blenderi - častice by kopírovali objem zvoleného meshu; v čase by sa časticovému systému menil parameter, ktorý odkazuje na mesh, podľa ktorého sa majú častice preusporiadať. Vstavaná funkcia Niagara umožňuje časticiam kopírovať len povrch meshu, nie jeho objem, preto bolo potrebné pripraviť si vlastné riešenie; v ďalšom teste budeme popisovať len najdôležitejšie kroky pri tvorbe tohto riešenia.

Našim zámerom bolo vytvoriť taký časticový systém, ktorý by umožňoval na základe plynulej zmeny vstupného parametra v rozsahu 0 až 1 plynulú tranzíciu medzi troma rôznymi objemami, ktoré by častice vyplňali. Vyplňanie presne definovaných objemov sme

nahradili tak, že sme využili schopnosť Niagary kopírovať časticami povrch meshu, a ku každej súradnici kazždej častice sme pridali náhodne vygenerovanú hodnotu v parametrom definovanom rozsahu pre každý mesh zvlášt. Tým sme dosiahli uspokojivý rozptyl častíc.

Pre tento účel sme si vytvorili nový *Niagara Module Script*; nazvali sme ho NMS. Do sekcie *Module Inputs* sme pridali parametre typu **Static Mesh** nazvané **StaticMeshA**, **StaticMeshB** a **StaticMeshC** reprezentujúce meshe, podla ktorých sa bude meniť poloha častíc v priestore, a parametre typu **int32** nazvané **MorphingScatterA**, **MorphingScatterB** a **MorphingScatterC**, ktorých hodnota bude určovať rozptyl častíc v okolí povrchov jednotlivých meshov. Následne sme do sekcie *Particle Attributes* pridali parametre typu **Vector** nazvané **MorphingPositionA**, **MorphingPositionB** a **MorphingPositionC**, ktoré reprezentujú výstupné hodnoty tohto skriptu - polohy častíc.

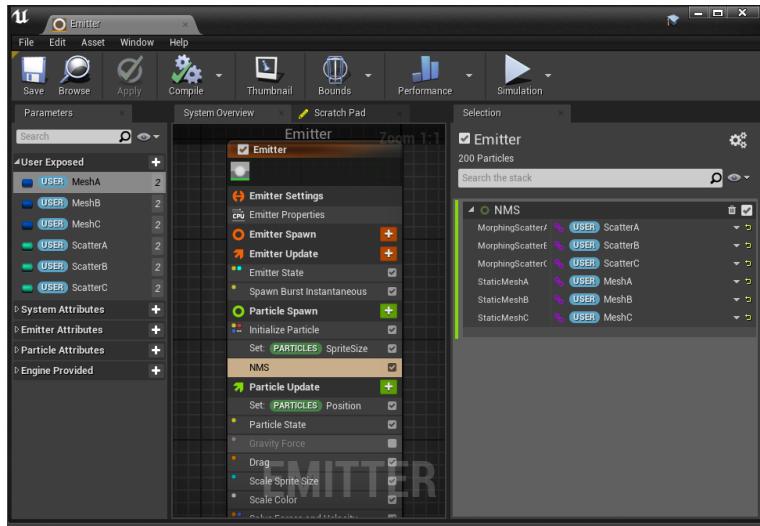
Pre každý mesh sme vytvorili skript, ktorý z hodnoty príslušnej premennej **StaticMesh** zobrajal náhodný bod z povrchu meshu, pomocou uzla **Break Vector** sme jeho súradnice rozdelili na tri separátne hodnoty, ku ktorým sme následne pripočítali náhodnú hodnotu v rozsahu  $\left\langle -\frac{\text{MorphingScatter}}{2}, \frac{\text{MorphingScatter}}{2} \right\rangle$ . Upravené hodnoty súradníc sme následne spojili pomocou uzla **Make Vector** a výslednú hodnotu sme nastavili do príslušného parametra **MorphingPosition**. Celý Blueprint je vyobrazený v prílohe č. 1.

Plynulý prechod medzi dvoma vstupnými hodnotami zabezpečuje uzol **Lerp**<sup>7</sup>, ktorý má parameter **A**, **B** a **C**; Hodnota parametra **C** určuje štádium prechodu medzi hodnotami **A** a **B**, pričom hodnota **C** = 0 znamená, že na výstupe bude **A** a pri hodnote **C** = 1 bude na výstupe **B**. Na prechod medzi troma vstupnými hodnotami sme si vytvorili vlastný *Niagara Dynamic Input Script* s názvom **Niagara\_3Lerp**. Na jeho vstup sú tri parametre typu **Vector** s názvami **V1**, **V2** a **V3**, medzi ktorými sa má vykonať interpolácia, a parameter typu **float** s názvom **Alpha** udávajúci štádium prechodu medzi meshmi. Základom tohto skriptu sú dva uzly **Lerp** prepojené takým spôsobom, že vstupy **A** a **B** prvého Lerpu sú **V1** a **V2**, a vstupy **A** a **B** druhého Lerpu sú tvorené výstupom prvého Lerpu a hodnotou **V3**. Na oboch Lerpoch sú hodnoty **C** prepočítané na základe parametra **Alpha** tak, že na výstupe skriptu je hodnota **V1** ak **Alpha** = 0, **V2** ak **Alpha** = 0,5 a **V3** ak **Alpha** = 1. Blueprint tohto skriptu sa nachádza v príliohe č. 2.

Následne sme si vytvorili nový emitter, ktorý slúži ako zdroj častíc. Emitteru sme v sekcií *User Exposed* pridali tri parametre typu **StaticMesh** s názvami **MeshA**, **MeshB** a **MeshC** a tri parametre typu **int32** s názvami **ScatterA**, **ScatterB** a **ScatterC**. Do sekcie *Particle Spawn* sme pridali náš predtým vytvorený modul NMS. V jeho nastaveniach sme nastavili parametre pre jednotlivé meshe a rozptylenia častíc tak, ako vidno na obrázku 14.

---

<sup>7</sup>Skratka pre *Linear interpolation*.



Obr. 14: Nastavenia modulu NMS

V sekcií *Particle Update* sme pridali modul **Set Position**, ktorému sme ako hodnotu nastavili **Niagara\_3Lerp**; zobrazili sa nám nastavenia pre parametre V1, V2, V3 a **Alpha**. Do prvých troch parametrov sme nastavili referenciu na výstupné parametre **NMS**, ktoré nám boli prístupné v sekcií *Parameter Attributes* - **MorphingPositionA**, **MorphingPositionB** a **MorphingPositionC**.

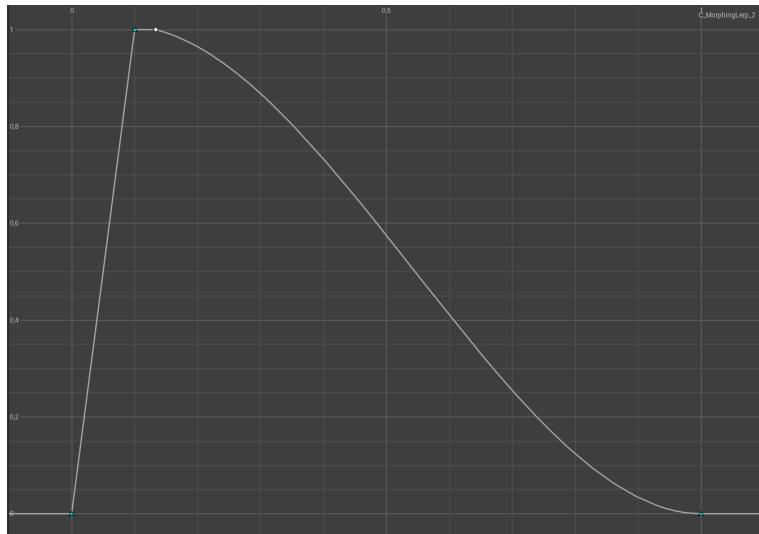
Ďalej bolo potrebné vytvoriť nový *Niagara System*, do ktorého sme pridali predtým vytvorený emitter. Do sekcie *User Exposed* sme pridali premennú typu **float** s názvom **Morhpinglerp** a jej referenciu sme nastavili ako hodnotu parametra **Alpha** modulu emittera **Set Position**.

V Blenderi sme si pripravili tri meshe, ktoré budú slúžiť ako parametre pre vyššie popísaný časticový systém, v tvaroch väčšieho a menšieho torusu a malého valca. Väčší torus reprezentuje častice v okolí neurónu, menší torus reprezentuje častice blížiace sa k membráne v okolí Ranzierovho zárezu a malý valec reprezentuje častice vnútri nervového vlákna.

Ďalším krokom bolo vytvorenie *Blueprint Class* typu **Actor** s názvom **BP\_Morphing**. Jeho účelom je zaobalit animáciu pohybu častíc. Do Blueprintu sme pridali nás Niagara System, ktorému sme do parametrov **MeshA**, **MeshB** a **MeshC** nastavili predtým vytvorené meshe. Parametre **ScatterA**, **ScatterB** a **ScatterC** sme nastavili na hodnoty 100, 100 a 30. Vytvorili sme novú premennú typu **float** s názvom **LoopSpeed**, pomocou ktorej budeme ovládať rýchlosť prehrávania časovej osi.

V grafe udalostí sme pridali novú časovú os (*Timeline*); tejto časovej osi sme pridali novú krivku, podľa ktorej sa v čase bude meniť hodnota parametra **MorphingLerp** nášho

Niagara Systemu. Krivka je vyobrazená na obrázku 15; stúpajúca časť reprezentuje fázu depolarizácie a klesajúca časť fázu repolarizácie. Ďalej sme vytvorili novú udalosť s názvom **Animate**, ktorú sme prepojili s akciou *Play from Start* na časovej osi. Na udalosť **BeginPlay** spre pripojili uzol **Set Play Rate**; na parameter **New Rate** sme pripojili referenciu na premennú **LoopSpeed** a na parameter **Target** zasa referenciu na časovú os.



Obr. 15: Krivka časovej osi pre zmenu parametra MorphingLerp

### 5.2.3 Animácia skoku nervového vzruchu

Prítomnosť nervového vzruchu sme sa rozhodli reprezentovať pomocou meshu guľového tvaru, ktorý bude vyžarovať svetlo a bude viditeľný v momente svojho presunu. Najskôr sme vytvorili nový *Blueprint Class* s názvom **BP\_Impulse**, do ktorého sme pridali komponenty **Sphere** a **PointLight**. Materiálu objektu **Sphere** sme nastavili **Lighting Mode** na hodnotu **Surface Translucency Volume** a parameter **Opacity** na hodnotu 0.7; tým sme dosiahli určitú úroveň priesvitnosti. Parameter **Emissive Color**, ktorý reprezentuje farbu, ktorú bude objekt vyžarovať, sme nastavili na bledomodrú. V grafe udalostí sme si vytvorili časovú os, ktorá svojim výstupom v čase bude ovládať intenzitu svetla **PointLight** a priehľadnosť materiálu aplikovanom na objekte **Sphere** tak, aby na začiatku a konci časovej osi objekt nebolo viditeľný a nebolo vyžarované žiadne svetlo. Prehrávanie časovej osi je spúštané udalosťou **AnimateLighting**.

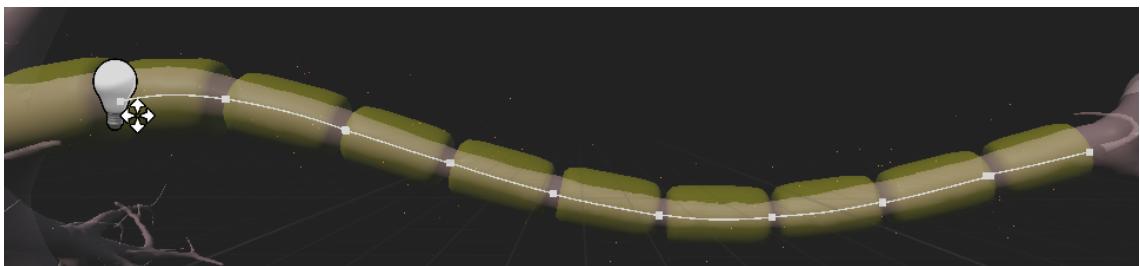
Následne sme vytvorili *Blueprint Class* typu **Actor** s názvom **BP\_SplineMovement**. Funkciou tohto Blueprintu bude posun zvoleného objektu po danej krvke; tým budeme simulať skok nervového vzruchu popod myelínovú pošvu. Vytvorili sme novú premennú typu **Actor** s názvom **Actor**, premennú **Speed** typu **float**. a premennú typu **Spline**

Component s názvom **Spline**. Actor reprezentuje objekt, ktorý bude posúvaný po krivke **Spline**, **Speed** bude určovať rýchlosť posunu. V grafe udalostí sme si vytvorili novú časovú os, ktorej prehrávanie je spúštané udalosťou **Play Timeline**; výstupná hodnota je následne použitá na nastavenie polohy a rotácie Actora prostredníctvom uzlov **SetActorLocation** a **SetActorRotation**. Následne sme si vytvorili udalosť **Reset Position**, ktorá umiestní Actora na začiatok krivky Spline.

#### 5.2.4 Vytvorenie výsledného Blueprintu

Všetky doteraz vytvorené časti aplikácie bolo potrebné spojiť do jedného Blueprintu, v rámci ktorého by sa riadilo spúštanie čiastkových animácií v správnom smerde. Vytvorili sme si nový *Blueprint Class* s názvom **BP\_Neuron**, do ktorého sme umiestnili predtým vytvorený model neurónu. Pre tento objekt sme vytvorili dva nové materiály - oba s určitou úrovňou priehľadnosti; materiálu pre telo neurónu sme nastavili ružovú farbu a materiálu pre myelínovú pošvu sme nastavili žltú farbu.

Ďalej sme do Blueprintu vložili po deväť<sup>8</sup> inštancií **BP\_Morphing**, **BP\_SplineMovement** a **BP\_Impulse**, a deväť nových objektov typu **Spline Component**. Každý z objektov **Spline** sme rozmiestnili a prispôsobili tak, aby na seba postupne nadväzovali, ako vidno na obrázku 16. Tým sú definované dráhy, po ktorých sa budú pohybovať jednotlivé inštancie **BP\_Impulse**. Všetky inštancie **BP\_Morphing** sme umiestnili do jednotlivých Ravnierovych zárezov; tie budú v počiatočnom stave reprezentovať katióny v okolí nervového vlákna.



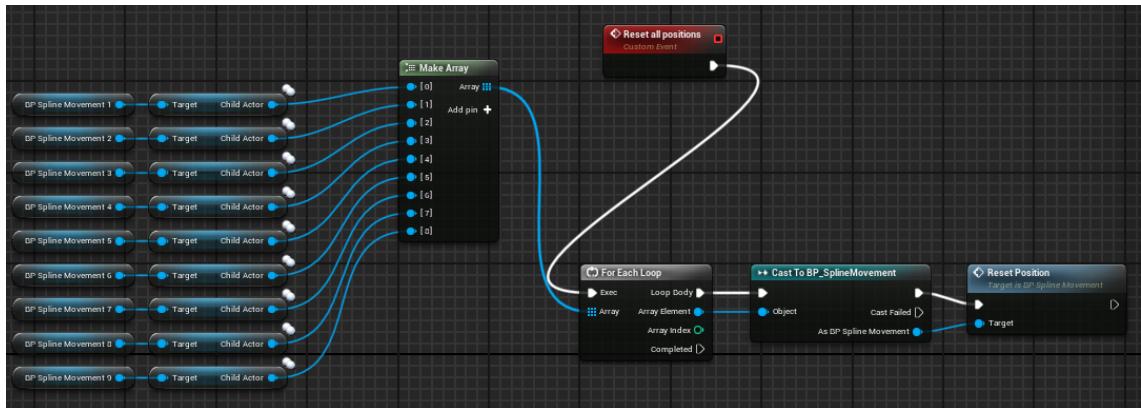
Obr. 16: Rozmiestnenie objektov typu **Spline Component**

Ďalej sme postupovali tak, že sme si v rámci tohto Blueprintu vytvorili novú funkciu s názvom **Animate Function** s tromi parametrami typu **Child Actor Component Object Reference**; na vstupe sa očakáva jedna inštancia **BP\_SplineMovement**, jedna inštancia **BP\_Morphing** a jedna inštancia **BP\_Impulse**. Účelom tejto funkcie je v rovnakom momente spustiť animáciu na týchto troch objektoch - tým je realizovaná čiastková animácia v okolí jedného Ravnierovho zárezu. V rámci tejto animácie najprv častice z okolia nervového

<sup>8</sup>Náš model obsahuje deväť Ravnierovych zárezov.

vlákna v oblasti tohto zárezu prejdú dovnútra vlákna; v tom momente sa objaví nervový vzruch, ktorý sa presunie k ďalšiemu Ranvierovmu zárezu a zmizne; medzičasom sa častice postupne presunú naspäť do okolia nervového vlákna. Správne načasovanie animácií jednotlivých objektov je zabezpečené vhodne navrhnutými krivkami ich časových osí.

Následne sme vytvorili novú udalosť s názvom `Reset all positions`, ktorej účelom je na každej inštancii `BP_SplineMovement` spustiť udalosť `Reset Position`; skript je vyobrazený na obrázku č. 17.

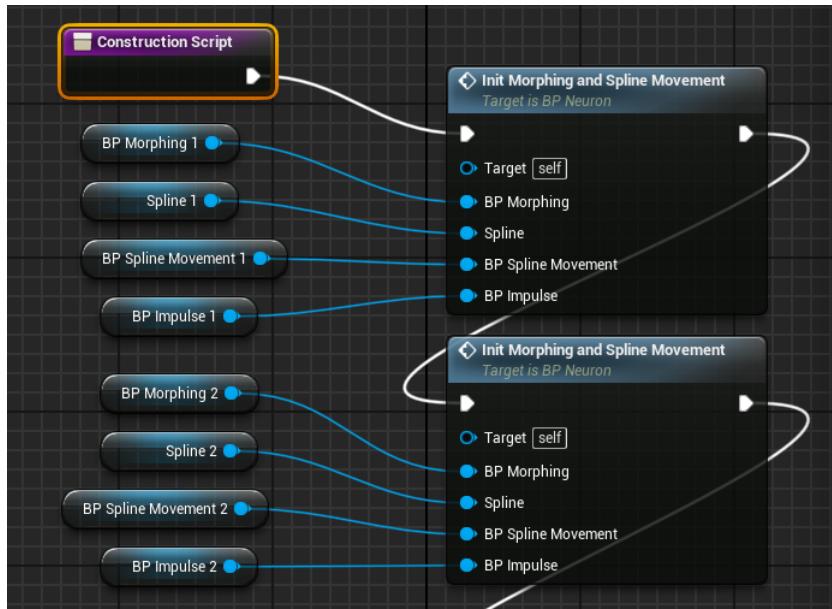


Obr. 17: Skript udalosti `Reset all positions`

Medzi premenné Blueprintu sme pridali novú premennú typu `float` s názvom `AnimationSpeed`, ktorá bude slúžiť na zmenu rýchlosťi celej animácie. Potom sme vytvorili novú funkciu s názvom `InitMorphingAndSplineMovement`, ktorá má tri parametre typu `Child Actor Component Object Reference` pre inštancie `BP_SplineMovement`, `BP_Morphing` a `BP_Impulse`, a jeden parameter typu `Spline Component Object Reference`. Účelom tejto funkcie je nastaviť správne hodnoty parametrov `Actor` a `Spline` na inštancii `BP_SplineMovement` a nastaviť rýchlosť prehrávania animácií v inštanciach `BP_SplineMovement`, `BP_Morphing` a `BP_Impulse` na základe premennej `AnimationSpeed`. Potom sme využili `Construction Script` na to, aby sme túto funkciu zavolali pre príslušné inštancie - celkovo devätkrát; časť skriptu vidno na obrázku č. 18.

V grafe udalostí sme si vytvorili novú časovú os; v nej sme si vytvorili deväť stôp typu `Event Track` a do každej sme sme pridali práve jeden klúč (*Key*) takým spôsobom, aby sa všetkých deväť udalostí generovaných týmito stopami spúšťalo postupne v rovnakom intervale. Táto časová os teda devätkrát spúšťa funkciu `AnimateFunction`, vždy s inými parametrami; tento skript je vyobrazený v prílohe č. 3. Tým sme dosiahli, že animácie v jednotlivých Ranvierovych zárezoch sa prehrávajú postupne, reprezentujúc celkovú zamýšľanú podobu reprezentácie mechanizmu prenosu nervového vzruchu.

Animácia časovej osi tohto Blueprintu je spúštaná udalosťou `Play Timeline`, ktorá



Obr. 18: *Construction Script* Blueprintu *BP\_Neuron*

okrem toho aj nastavuje jej rýchlosť prehrávania na základe skôr definovanej premennej *AnimationSpeed*.

### 5.2.5 Ovládacie prvky

Kľúčovým krokom pre umožnenie interakcie používateľa s aplikáciou bolo vytvorenie nasledujúcich ovládacích prvkov:

- tlačidlo na spustenie animácie,
- tlačidlo na ukončenie aplikácie a
- slider na ovládanie rýchlosťi animácie.

Obe tlačidlá sme si pripravili podobným spôsobom - pre každé tlačidlo sme vytvorili nový *Blueprint Class*, pričom ako rodičovská trieda (*parent class*) bola zvolená trieda *UxtPressableButtonActor*, ktorá nám bola prístupná vďaka UX Tools. Blueprint sme nazvali *StartButton*, resp. *ExitButton*.

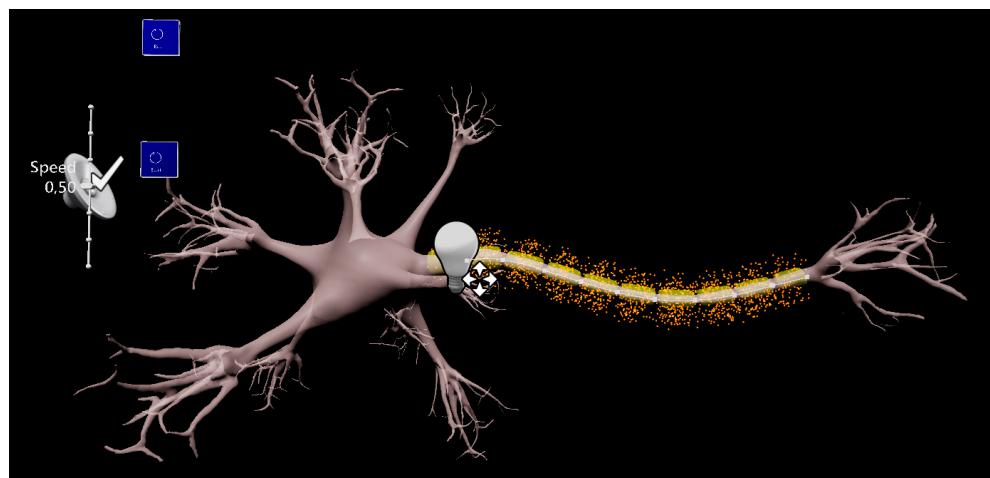
Do *StartButton* sme pridali novú premennú typu *BP\_Neuron*; na udalosť *On Button Pressed* spustením udalosti *Play Timeline* na takto sprístupnenej inštancii *BP\_Neuron*. *ExitButton* reaguje na udalosť *On Button Pressed* spustením funkcie *Quit Game*.

Pre slider na ovládanie rýchlosťi sme vytvorili nový *Blueprint Class* z rodičovskej triedy *UxtPinchSliderActor*. Pridali sme novú premennú typu *BP\_Neuron*; jeho udalosť

`On Update Value` má návratovú hodnotu `New Value`, ktorú sme využili na nastavenie parametra `AnimationSpeed` na inštancii `BP_Neuron`.

### 5.2.6 Tvorba scény

Proces vývoja aplikácie sme zakončili tým, že sme do scény rozmiestnili všetky potrebné objekty. Súčasťou scény sa teda prirodzene stala inštancia `BP_Neuron` pretransformovaná tak, aby bola celá v zornom poli používateľa. Ďalej sme do scény pridali predtým pripravené ovládacie prvky. Výsledná scéna je vyobrazená na obrázku č. 19



Obr. 19: Výsledná scéna v Unreal Engine

### 5.2.7 Nahratie aplikácie do headsetu

Pred nahratím aplikácie do headsetu bolo potrebné upraviť niektoré nastavenia projektu. V nastaveniach projektu sme `Project Name` nastavili na `Neuron`, `Company Distinguished Name` na CN=Drabik a zaškrtli sme možnosť `Start in VR`. V sekcií `Platforms - HoloLens` sme zaškrtli `Build for HoloLens Device` a vygenerovali sme nový certifikát.

Prostredníctvom voľby `File → Package Project → HoloLens` v menu sme projekt skompilovali a následne nahrali do headsetu pomocou `Windows Device Portal`.

# 6 Pedagogický výskum

## 6.1 Metodológia výskumu

Za účelom overenia vhodnosti nami vytvorenej aplikácie pre vyučovací proces sme vykonali krátke pedagogické výskumy. Výskum bol realizovaný prostredníctvom exploračnej metódy - dotazníka [24]; ten bol administrovaný študentom strednej školy. Výskumná vzorka bola rozdelená na kontrolnú a experimentálnu skupinu, ktoré boli zvolené tak, aby boli z pohľadu vedomostí čo najviac homogénne. Na určenie homogenity poslúžili predchádzajúce výchovno-vzdelávacie výsledky študentov v predmete biológia. Kontrolnej skupine bola stavba neurónu a koncept prenosu nervového vzruchu sprístupnený konvenčnými didaktickými postupmi, predovšetkým výkladom a dvojdimenzionálnymi reprezentáciami. Experimentálnej skupine bola téma sprístupnená pomocou našej aplikácie.

Výskumnú vzorku tvorilo šestnásť študentov septimy a oktavy Školy pre mimoriadne nadané deti a gymnázia v Bratislave. Z pohľadu nacionálií vzorku tvorilo osem mužov a osem žien, všetci pochádzali z Bratislavského samosprávneho kraja, boli vo veku 17-18 rokov a navštievovali seminár z biologie. Všetkých respondentov možno charakterizať ako intelektovo nadaných, čo je potvrdené aj pravidelnými štandardizovanými testami.

### 6.1.1 Charakter výskumného nástroja

Ako výskumný nástroj bol použitý dotazník, ktorý pozostával z piatich položiek rozdelených do dvoch dimenzií. Prvá dimenzia (tri položky) merala vedomosti študentov o prenose nervového vzruchu a stavbe neurónu, zameriavajúc sa pri tom na identifikáciu najčastejších miskoncepcíí, ako sú uvedené v príslušnej odbornej literatúre [18, 19, 25]. Druhá dimenzia poskytla študentom priestor na spätnú väzbu ohľadom testovanej aplikácie (podrobnejšie v tabuľke č. 1 a prílohe č. ). Položky druhej dimenzie boli administrované len experimentálnej skupine. príloha

Kvôli eliminácii efektov, ktoré by mohli spôsobiť chybu prvého typu (*false positive*), konkrétnie tzv. wow-efekt a efekt novosti [26, 27], sme dotazník administrovali s týždenným odstupom od sprístupnenia témy.

### 6.1.2 Spracovanie kvantitatívnych dát

Na spracovanie dát bol použitý softvér IBM SPSS Statistics 27. Dáta boli vyhodnotené ako celkové skóre v prvej dimenzii, ako aj pre jednotlivé položky. Dáta v prvej dimenzii boli spracované najprv deskriptívno-štatistickými metódami, ktorých výsledkom boli

Tabuľka 1: Charakteristika položiek dotazníka

| Číslo | Položka  | Opis   |
|-------|--|--|
| 1     | Zvolit obrázok, ktorý najlepšie reprezentuje neurón      | Klúčom je reprezentácia, ktorá rešpektuje trojdimenzionalitu neurónu, ako aj rozmiestnenie dendritov; distraktormi sú reprezentácie neurónu, ktoré niektorú z uvedených charakteristik nezobrazujú správne |
| 2     | Identifikovať, čo je podstatou prenosu nervového vzruchu | Klúčmi sú správne charakteristiky saltatórnej kondukcie, teda prestop iónov cez membránu a zmena elektrochemického potenciálu; distraktormi sú často identifikované miskoncepcie                           |
| 3     | Identifikovať smer, ktorým sa prenáša nervový vzruch     | Klúčom je obrázok so správne vyznačeným smerom prenosu nervového vzruchu; distraktorom je opak.  |
| 4     | Vyjadriť postoj k aplikácii                              | Študenti vyberajú, či by táto aplikácia zatraktívnila vyučovací proces   |
| 5     | Poskytnúť spätnú väzbu                                   | Otvorená položka s priestorom na poskytnutie dlhšej spätej väzby   |

miery: aritmetický priemer, štandardná odchýlka, medián a rozptyl. V rámci induktívnej štatistiky boli údaje podrobenej testu normality podľa Shapira a Wilka [28, 29, 30]. Na základe výsledku Shapirovho-Wilkovho testu sme následne vybrali nástroje pre identifikáciu signifikantnej zmeny medzi kontrolnou a experimentálnou skupinou. V sadách údajov bez normálneho rozdelenia sme zvolili neparametrický test (Mann-Whitney); v sadách s normálnym rozdelením sme zvolili Studentov *t*-test pre dva nezávislé výbery.

### 6.1.3 Spracovanie kvalitatívnych dát

Kvalitatívne sa spracovávali výsledky z položiek 2 a 5 (viď tabuľka č. 1). V položke 2 sme sa sústredili na prítomnosť konkrétnych miskoncepcíí v kontrolnej a experimentálnej skupine, v položke 5 sme vyhodnocovali otvorenú spätnú väzbu.

## 6.2 Výsledky pedagogického výskumu

### 6.2.1 Kvantitatívny výskum

Výsledky kvantitatívneho pedagogického výskumu sú zhrnuté v tabuľke č. 2. Výsledky deskriptívnej štatistiky (predovšetkým aritmetický priemer) implikujú lepšie výsledky experimentálnej skupiny oproti kontrolnej vo všetkých sadách údajov. Dáta pre jednotlivé dimenzie nemali normálne rozdelenie, to sme identifikovali len pri celkovom skóre. V testoch určujúcich signifikanciu rozdielu medzi kontrolnou a experimentálnou skupinou sa nám nepodarilo identifikovať signifikantný rozdiel ani v jednej sade údajov pre hladinu významnosti  $\alpha = 0,05$ .

Tabuľka 2: Súborné štatistické spracovanie (deskriptívna a induktívna štatistická analýza) kvantitatívneho pedagogického výskumu

| Skupina             | Reprezentácia neurónu |            | Princíp prenosu vzruchu |            | Smer prenosu vzruchu |            | Celkové skóre             |            |
|---------------------|-----------------------|------------|-------------------------|------------|----------------------|------------|---------------------------|------------|
|                     | Kontrola              | Experiment | Kontrola                | Experiment | Kontrola             | Experiment | Kontrola                  | Experiment |
| Aritmetický priemer | 0,67                  | 0,86       | 2,67                    | 3,00       | 0,67                 | 1,00       | 4,00                      | 4,86       |
| Štandardná odchýlka | 0,50                  | 0,38       | 1,41                    | 1,29       | 0,50                 | 0,00       | 1,66                      | 1,46       |
| Medián              | 1,00                  | 1,00       | 2,00                    | 2,00       | 1,00                 | 1,00       | 4,00                      | 4,00       |
| Rozptyl             | 0,25                  | 0,14       | 2,00                    | 1,67       | 0,25                 | 0,00       | 2,75                      | 2,14       |
| Normálne rozdelenie | Nie                   | Nie        | Áno                     | Nie        | Nie                  | Nie        | Áno                       | Áno        |
| Test                | Mann-Whitney          |            | Mann-Whitney            |            | Mann-Whitney         |            | Independent sample t-test |            |
| Výsledok            | 0,54                  |            | 0,61                    |            | 0,30                 |            | 0,29                      |            |
| Signifikancia       | nie                   |            | nie                     |            | nie                  |            | nie                       |            |

### 6.2.2 Kvalitatívny výskum

Položku 2 sme vyhodnotili aj kvalitatívne, sledujúc prítomnosť jednotlivých miskoncepcii v kontrolnej a experimentálnej skupine. V kontrolnej skupine sme sledovali u študentov všetky tri merané miskoncepcie (pohyb iónov vláknom neurónu, elektrický prúd, pohyb bunkových organel). Naproti tomu, v experimentálnej skupine sa podarilo jednu z týchto miskoncepcii eliminovať.

V položke 4 dotazníka, ktorá bola administrovaná iba experimentálnej skupine, sme identifikovali jednoznačnú zhodu na pozitívnom postoji študentov k testovanej aplikácii. Ani jeden zo študentov nevyužil možnosť poskytnúť spätnú väzbu v otvorenej položke 5.

## 6.3 Diskusia

### 6.4 Limitujúce faktory výskumu

Napriek našej najlepšej vôle boli výsledky výskumu ovplyvnené nasledujúcimi limitujúcimi faktormi:

1. *Velkosť výskumnej vzorky*: výskum bol vykonaný na malej vzorke študentov, čo mohlo mať vplyv predovšetkým na výsledky štatistickej analýzy. V malých vzorkách je posilnený efekt extrémnych hodnôt, čo môže viesť k štatistickým chybám prvého, ako aj druhého typu [29].
2. *Sampling bias*: výskumná vzorka pozostávala zo študentov s intelektovým nadaním, pochádzajúcich len z jedného regiónu Slovenskej republiky. Nedostatočná reprezentatívnosť vzorky vzhľadom k celej populácii môže viesť k tomu, že výsledky nebude možné bez ďalšieho výskumu generalizovať.
3. *Self-reporting*: údaje vo výskume boli zozbierané pomocou metódy dotazníka, ktorá

sa zakladá na subjektívnych odpovediach respondentov, ktoré sú subjektom potenciálneho individuálneho skreslenia vychádzajúceho zo sociálnych noriem alebo neochoty vyplňať dlhšie otvorené položky.

# Záver

Zaver bude tu.

# Použitá literatúra

1. SUTHERLAND, Ivan E. The Ultimate Display. In: *Proceedings of the Congress of the International Federation of Information Processing (IFIP)*. 1965, zv. 2, s. 506–508. Dostupné tiež z: <https://my.eng.utah.edu/~cs6360/Readings/UltimateDisplay.pdf>.
2. SCHMALSTIEG, D. a HÖLLERER, Tobias. *Augmented Reality: Principles and Practice*. Boston: Addison-Wesley, 2016. Addison-Wesley Usability and HCI Series. ISBN 978-0-321-88357-5.
3. SUTHERLAND, Ivan E. A Head-Mounted Three Dimensional Display. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I on - AFIPS '68 (Fall, Part I)* [online]. San Francisco, California: ACM Press, 1968, s. 757 [cit. 2023-01-10]. Dostupné z DOI: [10.1145/1476589.1476686](https://doi.org/10.1145/1476589.1476686).
4. KRUEGER, Myron W., GIONFRIDDO, Thomas and HINRICHSEN, Katrin. VIDEO-PLACE - an Artificial Reality. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '85* [online]. San Francisco, California, United States: ACM Press, 1985, s. 35–40 [cit. 2023-01-11]. ISBN 978-0-89791-149-8. Dostupné z DOI: [10.1145/317456.317463](https://doi.org/10.1145/317456.317463).
5. BRIGHAM, Tara J. Reality Check: Basics of Augmented, Virtual, and Mixed Reality. *Medical Reference Services Quarterly* [online]. 2017, vol. 36, no. 2, s. 171–178 [cit. 2023-01-10]. ISSN 0276-3869, ISSN 1540-9597. Dostupné z DOI: [10.1080/02763869.2017.1293987](https://doi.org/10.1080/02763869.2017.1293987).
6. ANGELOV, Vladislav, PETKOV, Emiliyan, SHIPKOVENSKI, Georgi a KALUSH-KOV, Teodor. Modern Virtual Reality Headsets. In: *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* [online]. Ankara, Turkey: IEEE, 2020, s. 1–5 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-72819-352-6. Dostupné z DOI: [10.1109/HORA49412.2020.9152604](https://doi.org/10.1109/HORA49412.2020.9152604).
7. SPEICHER, Maximilian, HALL, Brian D. and NEBELING, Michael. What Is Mixed Reality? In: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* [online]. Glasgow Scotland Uk: ACM, 2019, s. 1–15 [cit. 2023-01-10]. ISBN 978-1-4503-5970-2. Dostupné z DOI: [10.1145/3290605.3300767](https://doi.org/10.1145/3290605.3300767).

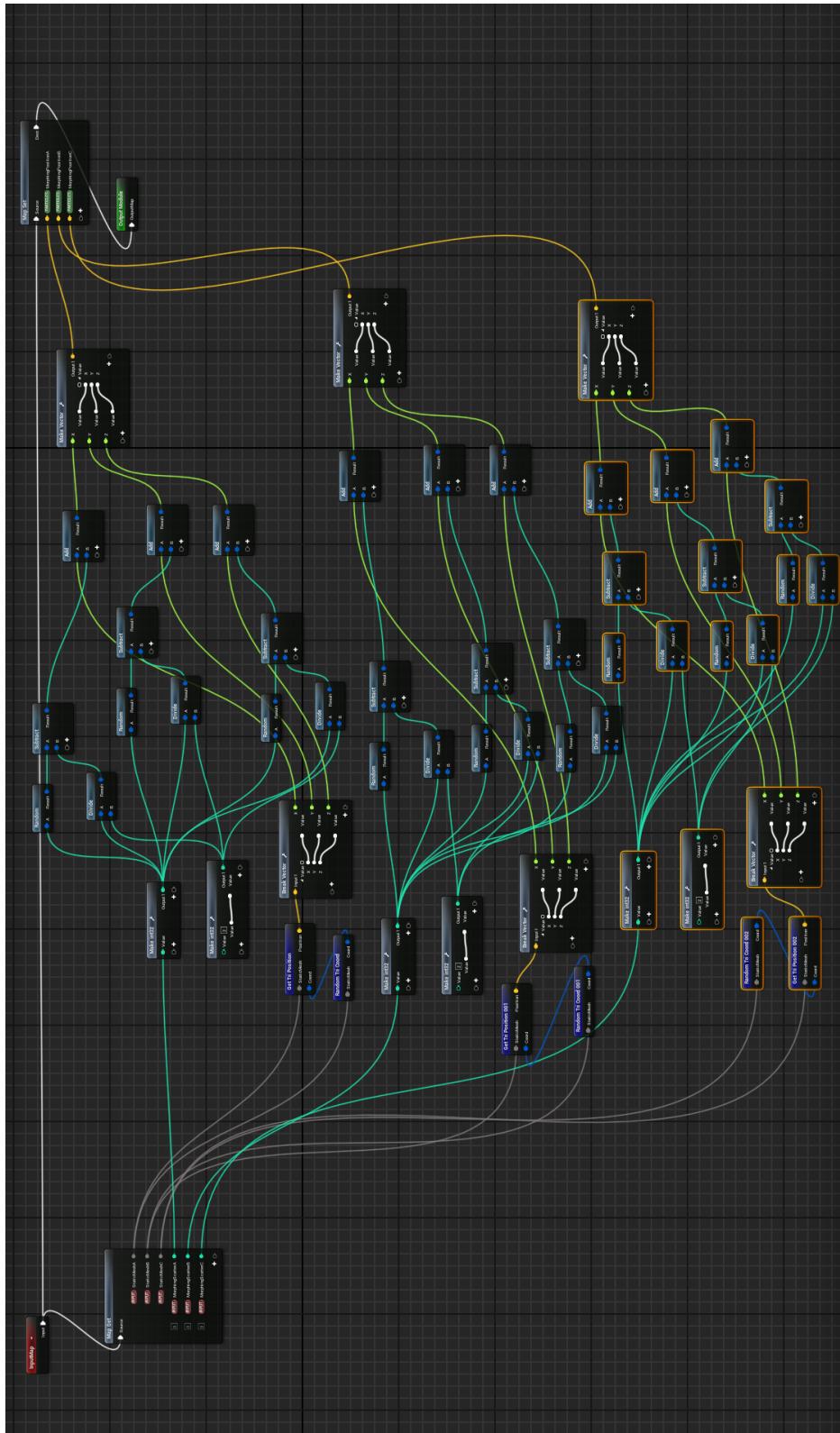
8. CHEN, Ke and XUE, Fan. The Renaissance of Augmented Reality in Construction: History, Present Status and Future Directions. *Smart and Sustainable Built Environment* [online]. 2022, vol. 11, no. 3, s. 575–592 [cit. 2023-01-15]. ISSN 2046-6099. Dostupné z DOI: 10.1108/SASBE-08-2020-0124.
9. MILGRAM, Paul, TAKEMURA, Haruo, UTSUMI, Akira a KISHINO, Fumio. Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. In: DAS, Hari (ed.) [online]. Boston, MA, 1995, s. 282–292 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z DOI: 10.1117/12.197321.
10. *Microsoft HoloLens 2: Full Specification* [online]. [cit. 2023-01-29]. Dostupné z : <https://vr-compare.com/headset/microsofthololens2>.
11. *Advancing the MR Experience with HoloLens 2 Research Mode* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z : [https://www.valoremreply.com/post/hololens\\_research\\_mode/](https://www.valoremreply.com/post/hololens_research_mode/).
12. *Eye Tracking on HoloLens 2* [online]. [cit. 2023-01-29]. Dostupné z : <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/eye-tracking>.
13. REPLY, Valorem. *3 Ways Microsoft Mixed Reality Tool Kit Saves Time and Money* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z : <https://www.valoremreply.com/post/mrtk/>.
14. MICROSOFT. *What Is Mixed Reality Toolkit 2?* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z : <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk2/?view=mrtkunity-2022-05>.
15. MICROSOFT. *Using the HoloLens Emulator* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z : <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/develop/advanced-concepts/using-the-hololens-emulator>.
16. TURHAN, Berk a GÜMÜŞ, Zeynep H. A Brave New World: Virtual Reality and Augmented Reality in Systems Biology. *Frontiers in Bioinformatics* [online]. 2022, roč. 2, s. 873478 [cit. 2023-01-10]. ISSN 2673-7647. Dostupné z DOI: 10.3389/fbinf.2022.873478.
17. MALONE, Sarah, GARZÓN, Juan a KUHN, Jochen. *Three Decades of Augmented Reality in Education: A Second-Order Meta-Analysis and Research Synthesis* [online]. 2023-07-04. [cit. 2023-12-09]. preprint. Open Science Framework. Dostupné z DOI: 10.31219/osf.io/amw4t.

18. VIJAPURKAR, Jyotsna, KAWALKAR, Aisha and NAMBIAR, Priya. What Do Cells Really Look Like? An Inquiry into Students' Difficulties in Visualising a 3-D Biological Cell and Lessons for Pedagogy. *Research in Science Education* [online]. 2014, vol. 44, no. 2, s. 307–333 [cit. 2023-12-09]. ISSN 0157-244X, ISSN 1573-1898. Dostupné z DOI: 10.1007/s11165-013-9379-5.
19. ODOM, Arthur Louis. Action Potentials & Biology Textbooks: Accurate, Misconceptions or Avoidance? *The American Biology Teacher* [online]. 1993, vol. 55, no. 8, s. 468–472 [cit. 2023-12-08]. ISSN 0002-7685. Dostupné z DOI: 10.2307/4449717.
20. HOLECOVÁ, Milada, SCHLARMANNOVÁ, Janka, ORSZÁGHOVÁ, Zlatica a MATĚJOVIČOVÁ, Barbora. *Anatómia a Morfológia Živočíchov*. Bratislava: Univerzita Komenského, 2016. ISBN 978-80-223-4029-8.
21. PETROVIČOVÁ, Ida, KRŠKOVÁ, Lucia, STREJČEK, František, ŠVARCOVÁ, Olga a LAURINČÍK, Jozef. *Fyziológia Živočíchov a Človeka*. Nitra, 2006. ISBN 80-8094-055-X.
22. JAVORKA, Kamil. *Lekárska Fyziológia. Učebnica Pre Lekárske Fakulty*. Martin: Osveta, 2001. ISBN 80-8063-023-2.
23. BÉDER, Igor, BABINSKÁ, Katarína, BÉDEROVÁ, Alžbeta, BUKOVSKÝ, Igor, GABAŠOVÁ, Eva, HÁJEK, Július, KITTOVÁ, Margita, KURTANSKÝ, Alexander, MICHALÍK, Dušan, OKKELOVÁ, Janette, OSTATNÍKOVÁ, Daniela, SLEZÁKOVÁ, Olga a VAŽAN, Rastislav. *Fyziológia Človeka*. 1. vyd. Bratislava: Vydavatelstvo UK, 2005. ISBN 80-223-2028-5.
24. ŠVEC, Štefan. *Metodologie věd o výchově: kvantitatívno-scientické a kvalitatívno-humanitní přístupy v edukačním výzkumu*. České rozšírené vydanie. Brno: Paido, 2009. ISBN 978-80-7315-192-8.
25. NAGYOVÁ, Soňa. Miskonceptie žiakov z oblasti biológie. In: *Východiská prípravy prírodrovedného kurikula pre základnú školu 2020: k aktuálnemu stavu prírodrovedného vzdelávania*. 1. vyd. Trnava: Pedagogická fakulta Trnavskej univerzity v Trnave, 2016, zv. 1, s. 106–135. ISBN 978-80-8082-993-3.
26. TUREK, Ivan. *Didaktika*. 3., preprac., dopl. vyd. Bratislava: Edícia Škola, 2014. ISBN 978-80-8168-004-5.
27. PETLÁK, Erich. *Všeobecná didaktika*. 3. vyd. [s.l.]: IRIS, 2016. ISBN 978-80-8153-064-7.

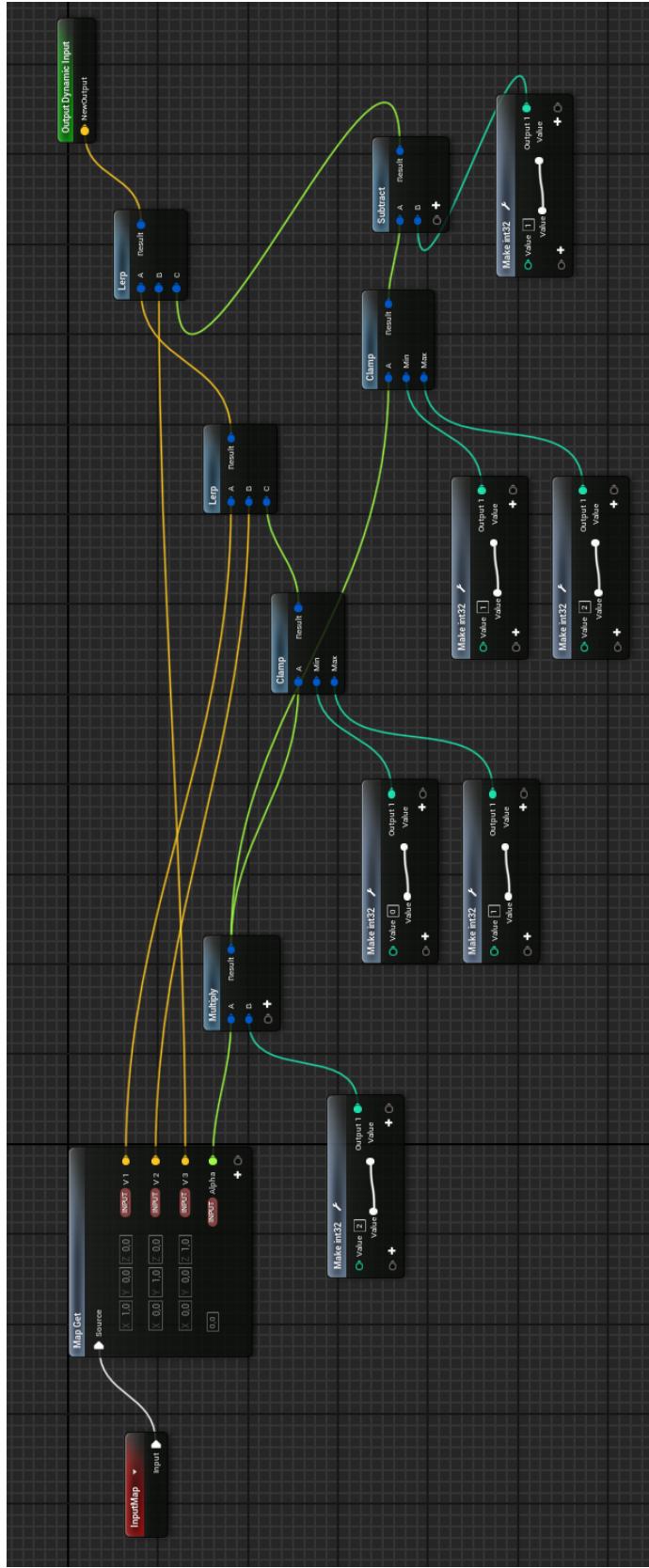
28. MOHD RAZALI, Nornadiah a YAP, Bee. Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. *J. Stat. Model. Analytics.* 2011, roč. 2.
29. KOMENDA, Stanislav a KLEMENTA, Josef. *Analýza Náhodného v Pedagogickém Experimentu a Praxi*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1981. Učebnice pro Vysoké Školy.
30. SHAPIRO, S. S. and WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika* [online]. 1965, vol. 52, no. 3-4, s. 591–611 [cit. 2023-12-29]. ISSN 0006-3444, ISSN 1464-3510. Dostupné z DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.

# Prílohy

## 1. Niagara Module Script



## 2. Blueprint Niagara\_3Lerp



### 3. Skript s časovou osou v Blueprintu BP\_Neuron

