

Riadenie rakety využitím neuro-evolúcie s rozširujúcou topológiou

Oliver Halaš¹

¹Ústav vedy a výskumu, FEI STU v Bratislave

²Ústav Robotiky a kybernetiky

xhalaso@stuba.sk

Abstrakt – Tento súbor slúži ako vzor pre písanie článku ŠVOČ. Súbor obsahuje aj pokyny na písanie článku. Texty v tomto súbore prepíšte za vlastné a ostatné vymažte. Neupravujte typ ani veľkosť písma. Abstrakt vystihuje prácu, uvádza hlavné myšlienky článku. Odporúča sa maximálne 12 riadkov.

1 Úvod

Cieľom tejto práce je navrhnúť algoritmy riadenia pre raketu zem-vzduch, ktorá má zasiahnuť letiaci cieľ využitím neuro-evolúcie s rozširujúcou topológiou (ang. Neuroevolution of augmenting topologies - NEAT). Raketa sa pohybuje v 3D priestore, vníma cieľ a snaží sa ho zasiahnuť. Riadenie je realizované umelou neurónovou sieťou a učenie siete je uskutočňované evolučným algoritmom. Táto problematika je dôležitá z hľadiska zlepšenia presnosti strelby, znižovania kolaterálnych škôd a zefektívnenia protivzdušnej obrany.

V práci sa zamýšľame venovať štúdiu air-defence system (ADS) a jeho rôznych fáz, ako aj základným prvkov protirakety. Potom sa budeme venovať algoritmom NEAT, jeho popisu, jedinečným vlastnostiam, porovnaniu s konvenčnou neuroevolúciou a dôvodov prečo je vhodné použiť NEAT na riešenie tohto problému.

Realizácia projektu bude zahŕňať vývoj simulačného prostredia v Unity game engine, implementáciu 6 stupňov voľnosti pre raketu a antiraketu a využitie UnitySharpNEAT pre tréning neurónových sietí [1].

2 Proti-raketový obranný systém

Riadená raketa (ang. missile) je vojenský projektíl navrhnutý tak, aby zasiahlo cieľ na zemi, vo vzduchu alebo na mori s vysokou presnosťou a účinnosťou. Riadené rakety sú vybavené systémom riadenia, ktorý zahŕňa navigáciu, riadenie pohybu a sledovanie cieľa, čo umožňuje rakete prispôbiť svoj let podľa potreby [2]. Riadené rakety môžu byť klasifikované podľa ich dosahu, rýchlosti, typu pohonu a účelu použitia.

Anti-riadená raketa (ang. anti-missile) je druh obranného systému, ktorý je navrhnutý na zničenie alebo odchylenie útočných riadených rakiet pred tým, ako zasiahnu svoj cieľ. Anti-riadené rakety pracujú na základe detekcie, sledovania a

zasiahnutia útočných rakiet pomocou rôznych technológií, ako sú radary, infračervené senzory a elektromagnetické systémy. Obranné systémy zahŕňajú pozemné a námorné zariadenia, ako aj systémy založené vo vzduchu a vo vesmíre [3].

Obe technológie, riadené rakety a anti-riadené rakety, sú výsledkom pokroku vo výskume a vývoji v oblasti aerodynamiky, navigácie, senzorov, riadenia a pohonu. Tieto systémy sú dôležité zložky súčasných vojenských stratégií a ich vývoj pokračuje s cieľom zlepšiť ich schopnosti a zabezpečiť efektívnejšiu obranu proti novým hrozbám [4].

Systém proti-raketovej obrany (ang. Missile defense system - MDS) je systém, ktorý je navrhnutý na ochranu územia pred raketami, ktoré sú vyslané konvenčnými zbraňami. Tento systém sa skladá z radaru, komunikačných systémov, kontrolných centier a odpaľovacích zariadení, ktoré sú navrhnuté na zachytenie a zničenie rakiet [5]. Existujú rôzne druhy systémov proti-raketovej obrany, ktoré sa používajú na zachytenie rôznych druhov rakiet v rôznych fázach letu. Napríklad, existujú systémy, ktoré sú navrhnuté na zachytenie rakiet v počiatočnej fáze letu, keď sa raketa ešte len odpaľuje od nosného raketového motora. Existujú aj systémy, ktoré sú navrhnuté na zachytenie rakiet v konečnej fáze letu, keď sa raketa približuje k cieľu. [6]

V závislosti od konkrétneho systému, rôzne metódy sa používajú na zachytenie a zničenie rakiet. Napríklad, niektoré systémy používajú kinetické strely, ktoré narazia do rakety a zničia ju silou nárazu [7]. Iné systémy používajú laserové zbrane na zničenie rakety [8].

Systém proti-raketovej obrany typu Anti-balistic missile (ABM) je špecifická podskupina protiraketových obranných systémov (MDS) zameraná na zničenie balistických rakiet [6]. Balistické rakety sú rakety, ktoré majú predvídateľný dráhový let po vypustení a sú často používané na dlhé vzdialenosti, niekedy aj pre jadrové zbrane [5]. ABM systémy sú navrhnuté tak, aby detegovali, sledovali a zničili tieto balistické rakety v počiatočnom štádiu letu ešte predtým, ako by mohli dosiahnuť svoj cieľ.

Hlavný rozdiel medzi systémom protiraketovej obrany (MDS) a anti-balistic missile (ABM) spočíva v ich zamere. Kým MDS je širší pojem, ktorý zahŕňa rôzne druhy systémov na obranu proti rôznym typom riadených rakiet, vrátane krátkého, stredného a dlhého dosahu, ABM sa špecificky zameriava na obranu proti balistickým raketám [6]. Tým pádom sú ABM systémy jedným z typov MDS systémov a zahŕňajú technológie

špecificky navrhnuté na riešenie hrozieb balistických rakiet.

Funkcia systému zahŕňa nasledujúce kroky Obr.??:

1. Vystrelenie nepriateľskej rakety: Systém musí byť schopný detegovať a identifikovať nepriateľskú raketu v počiatočnom štádiu letu.
2. Detekcia rakety radarom: Systém používa radary na detekciu a sledovanie nepriateľskej rakety.
3. Predbežná trajektória: Systém vytvára predbežnú trajektóriu nepriateľskej rakety pomocou informácií získaných radarom.
4. Vystrelenie anti-rakety: Systém vystrelí anti-raketu, ktorá sa bude snažiť stretnúť nepriateľskú raketu.
5. Priblíženie anti-rakety k nepriateľskej rakete: Anti-raketa sa približuje k nepriateľskej rakete, aby ju mohla neutralizovať. [5, 6, 9]

Existuje niekoľko rôznych metód na neutralizáciu rakety, vrátane výbuchu, ktorý rozbije raketu na kusy, alebo použitia mračna šrapnelu, ktoré rozptýli raketu tak, že sa stáva neškodnou. Dostatočná vzdialenosť priblíženia protirakety k cieľu by sa líšila v závislosti od konkrétnej metódy neutralizácie a typu rakety. Existuje niekoľko rôznych druhov anti-rakiet, ktoré sa používajú na neutralizáciu nepriateľských rakiet. Jeden druh sú kinetické anti-riadené rakety, ktoré sa približia k nepriateľskej rakete a zasiahnu ju kinetickou energiou - teda priamym nárazom, bez potreby ďalšej detonácie.

2.1 Fázy Anti-riadenej rakety

Fázy Anti-riadenej rakety zahŕňajú tri hlavné etapy: Fáza výstrelu (Boost), Stredná fáza (Midcourse) a Fáza konečného útoku (Terminal).

- Fáza výstrelu (Boost) je prvá fáza letu anti-riadenej rakety, ktorá sa začína vypustením rakety a nasmerovaním na útočnú raketu.
- Stredná fáza (Midcourse) nasleduje po fáze výstrelu a predstavuje väčšinu letu anti-riadenej rakety. V tejto fáze sú proti-raketové systémy zamerané na sledovanie rakety pomocou radarov a satelitov, aby získali informácie o jej dráhe a identifikovali optimálne miesto pre zásah.
- Fáza konečného útoku (Terminal) je posledná fáza letu antirakety. V tejto fáze sa anti-riadená raketa prispôsobí pozícií cieľa a útočí na nepriateľskú raketu priamym stretnutím. Tento bod je kritický pre anti-riadené rakety, pretože musia neutralizovať útočnú raketu v tejto fáze letu. Neutralizácia je potom realizovaná pri kinetických strelách, priamym kinetickým nárazom do útočnej rakety, ktorá sa nachádza v strednej fáze letu.

V konečnej fáze útoku je kľúčové rýchle reagovanie, pretože zostáva len málo času na zničenie útočnej rakety pred dosiahnutím jej cieľa. [6]

3 NEAT

Neuro-evolúcia je evolučný algoritmus, používaný v oblasti strojového učenia na tréning neurónových sietí. Skladá sa z kombinácie neurónovej siete a genetického algoritmu. Genetický algoritmus využíva princípy evolúcie a genetiky, na hľadanie optimálneho riešenia v podobe váh a biasov, pre jednotlivé neuróny v neurónovej sieti [10]. Táto metóda umožňuje efektívne nájsť optimálne hodnoty váh a biasov pre neurónovú sieť, čo vedie k lepšiemu výsledku tréningu [10]. Neuro-evolúcia je často používaná v aplikáciách, ako sú roboti, hry a problémy v oblasti triedenia dát [11].

Poznáme dve základné metódy, a to konvenčnú neuro-evolúciu a neuro-evolúciu s rozširujúcou topológiou siete. Konvenčná neuro-evolúcia (CNE) používa fixnú topológiu neurónovej siete, pre evolúciu parametrov siete [12]. Narozdiel od toho neuro-evolúcia s rozširujúcou topológiou siete (NEAT) generuje aj topológiu siete súčasne s váhami a biasmi [13].

Obidve metódy sa používajú pre rôzne úlohy. Konvenčná neuro-evolúcia sa často používa pre jednoduchšie úlohy alebo pre úlohy, kde je dôležitá rýchlosť výpočtu. NEAT sa často používa pre zložitejšie úlohy alebo pre úlohy, kde je dôležitá presnosť výsledku. Výhody konvenčnej neuro-evolúcie teda spočívajú v jednoduchosti a rýchlosti, pretože sa nemusí generovať topológia siete. Nevýhodou je, že môže byť ťažké nájsť optimálnu topológiu pre danú úlohu, hlavne ak sa jedná o zložitejší problém. [14]

NEAT má výhodu v tom, že môže prispôbovať topológiu siete úlohe, čo môže viesť k lepším výsledkom. Nevýhodou je, že môže byť pomalší a komplexnejší ako konvenčná neuro-evolúcia. Ďalej, NEAT môže byť využitý pre úlohy, kde sú potrebné adaptívne zmeny topológie počas učenia, pre dosiahnutie vyššieho výkonu. NEAT tiež môže byť vhodný pre úlohy, kde sa počas učenia vyžaduje pridávanie alebo odstraňovanie neurónov, pre dosiahnutie vyššieho výkonu. [4] Môže tiež byť vhodný pre úlohy, kde je potrebné vytvoriť topológiu siete, ktorá je optimalizovaná pre konkrétnu úlohu, napríklad pre úlohy klasifikácie obrázkov, kde by mohlo byť potrebné vytvoriť sieť s viacerými konvolyčnými vrstvami, pre dosiahnutie lepších výsledkov [15].

V kontexte anti-raketového systému s pomocou neuro-evolúcie existuje niekoľko dôvodov, prečo je vhodné použiť NEAT namiesto konvenčnej neuro-evolúcie [14]:

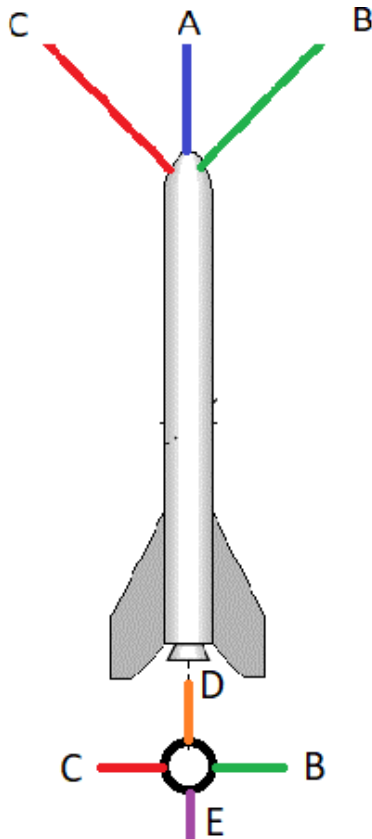
- **Adaptabilita:** NEAT dokáže prispôbiť topológiu neurónovej siete podľa zložitosti problému, čo umožňuje vytvoriť optimalizované riešenia pre rôzne scenáre a úlohy v riadení rakety.
- **Škálovateľnosť:** Vďaka svojej schopnosti evolúovať komplexné topológie z jednoduchých štruktúr je NEAT škálovateľný pre rôzne veľkosti a typy problémov.
- **Robustnosť:** Druhová v NEAT zabezpečuje ochranu inovátnych topológií pomocou rozdelenia do druhov sietí (ang. species), čo umožňuje evolúciu rôznorodých riešení. Táto robustnosť môže byť výhodná v dynamickom prostredí riadenia rakety, kde sa môžu meniť podmienky alebo ciele.

- Efektivita: NEAT sa snaží nájsť riešenia s minimálnym počtom neurónov a spojení, čo vedie k menším a rýchlejšim neurónovým sieťam, ideálne pre real-time aplikácie, ako je riadenie rakety.

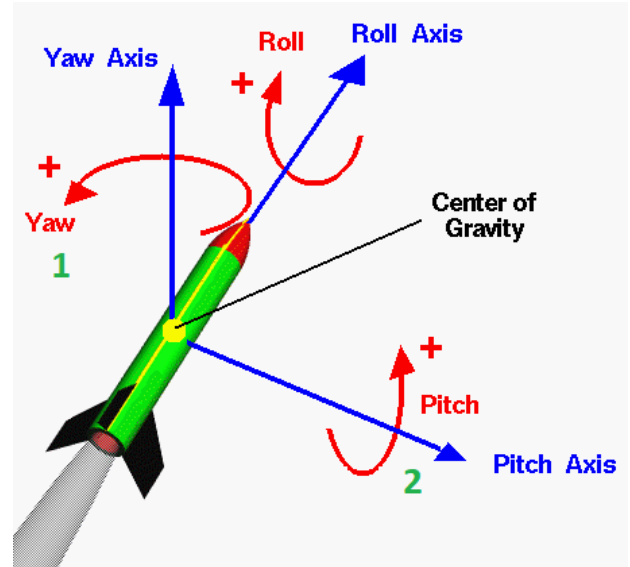
V prípade tréningu anti-raketového systému s pomocou neuro-evolúcie, by sa mohol javiť ako vhodnejší NEAT[13]. Dôvodom je to, že úloha anti-raketovej obrany je veľmi komplexná a adaptívna, vyžaduje rýchle reakcie na neznáme situácie a môže sa meniť v čase[14]. NEAT by bolo vhodné použiť, pretože umožňuje optimalizáciu topológie siete počas učenia.

4 Realizácia

Pri realizácii praktickej časti nášho výskumu sme využili herný engine s názvom Unity. Tento softvér sme zvolili z dôvodu, že sme mali potrebu vytvoriť flexibilné simulačné prostredie, ktoré je schopné zvládať zmeny a prispôbovanie sa našim požiadavkám, a je optimalizované pre výpočet viacerých objektov v pohybe v 6 stupňoch voľnosti (DOF-6). Keďže sme potrebovali modifikovať scenáre alebo vlastnosti fyzikálnych parametrov, bolo nevyhnutné mať k dispozícii agilné a prispôsobiteľné prostredie. Jelikož Unity nie je priamo navrhnutý pre tréning umelej inteligencie, bolo potrebné pridať rôzne funkcionality, ktoré by umožnili takýto proces. Ako základ kódu pre neuroevolúciu sme použili voľne dostupný balík SharpNEAT. ...



Obr. 1: Rozloženie IR sensorov na anti-rakete (5-vstupov)



Obr. 2: Výstup NEAT - rotácia v Y a Z osi rakety (yaw,pitch) [16]

```
inputSignalArray[0] = transform.position.x;
inputSignalArray[1] = transform.position.y;
inputSignalArray[2] = transform.position.z; } Anti-Missile position

inputSignalArray[3] = targetR.transform.position.x;
inputSignalArray[4] = targetR.transform.position.y;
inputSignalArray[5] = targetR.transform.position.z; } Missile position

inputSignalArray[6] = transform.eulerAngles.x;
inputSignalArray[7] = transform.eulerAngles.y;
inputSignalArray[8] = transform.eulerAngles.z; } Anti-Missile angles

inputSignalArray[9] = targetR.transform.eulerAngles.x;
inputSignalArray[10] = targetR.transform.eulerAngles.y;
inputSignalArray[11] = targetR.transform.eulerAngles.z; } Missile angles

Vector3 dir = transform.position - targetR.transform.position;
inputSignalArray[12] = Mathf.Atan2(dir.y, dir.x);
inputSignalArray[13] = Mathf.Atan2(dir.y, dir.z);
inputSignalArray[14] = Mathf.Atan2(dir.z, dir.x); } (directed) angle AM -> M
angle between obj&obj2

inputSignalArray[15] = Vector3.Distance(transform.position, targetR.transform.position); Distance AM & M
inputSignalArray[16] = (transform.position - lastPosition).magnitude; "Velocity" AM

inputSignalArray[17] = aSensor;
inputSignalArray[18] = bSensor;
inputSignalArray[19] = cSensor;
inputSignalArray[20] = dSensor;
inputSignalArray[21] = eSensor; } Anti-Missile Laser/IR sensors
```

Obr. 3: Vstupy NEAT-u

Na vstupe sme použili viacero dát, ktoré by neuro-evolúcia mohla potrebovať, napríklad pozíciu obrannej rakety a nepriateľskej útočnej rakety (pozri Obrázok 1). Výstup riadiaceho procesu bol reprezentovaný rotáciou rakety v osiach Y a Z (azimut, elevácia) - Obrázok 2.

Ako aktivačné funkcie boli použité rôzne násobky funkcie hyperbolického tangensu (Tanh).

V rámci projektu sme sa zamerali na problém natréningu anti-rakety, ktorá by bola schopná zasiahnuť útočnú raketu za pomoci NEAT. Experiment sme rozdelili do dvoch scenárov. V prvom scenári sme sledovali samostatné tréningovanie anti-rakety tak, aby dokázala presne zasiahnuť útočnú raketu. Tréningovanie prebiehalo vo vnútrobluku obytných bytoviek, čo pridávalo ďalšiu úroveň komplexity.

V druhom scenári sme zvýšili zložitosť úlohy pre NEAT a medzi rakety sme pridali prekážky, ktorým sa mala naša anti-raketa vyhýbať, zároveň stále s cieľom zasiahnuť útočnú raketu. Toto rozšírenie scenára umožnilo preskúmať schopnosť NEAT

adaptovať sa na zložitejšie podmienky a testovať účinnosť tréningu umelej inteligencie v simulovanom prostredí. Počas tohto druhého scenára sme analyzovali, ako dobre sa NEAT dokáže prispôbiť zmenám v prostredí a či dokáže nájsť optimálne riešenie pre zasiahnutie útočnej rakety, zatiaľ čo zároveň zohľadňuje prítomnosť prekážok.

5 Záver

Výsledky našej práce ukázali, že v oboch scenároch sme dosiahli úspešné natrénovanie anti-rakety na zasiahnutie útočnej rakety. V prípade druhého scenára sme zaznamenali, že NEAT dokázal nájsť riešenia aj pre zložitejšie situácie, čo zvýšilo robustnosť a adaptabilitu nášho modelu.

Záverom, naše výskumné úsilie v oblasti neuroevolúcie a využitia herného enginu Unity pre tréning umelej inteligencie pre anti-raketový systém sa ukázalo ako úspešný prístup. Výsledky naznačujú, že NEAT môže byť efektívne použitý pre adaptívne riadenie v komplexných prostrediach, ako sú vnútro-bloky obytných bytoviek, a v budúcnosti by mohlo nájsť uplatnenie v reálnych protiraketových obranných systémoch.

Pod'akovanie

Táto časť je nepovinná. Slúži na pod'akovanie napríklad ľuďom, ktorí prispeli k článku ale nie sú autormi a tiež na pod'akovanie sponzorom.

Literatúra

- [1] F. Wolf. UnitySharpNEAT: A Unity3D plugin for neuro-evolution using the NEAT algorithm. *GitHub Repository*. Retrieved from <https://github.com/flo-wolf/UnitySharpNEAT>, n.d.
- [2] G.M. Siouris. *Missile Guidance and Control Systems*. Springer, 2004. ISBN 978-1-4757-3681-7.
- [3] J. Cirincione, J.B. Wolfsthal, and M. Rajkumar. *Deadly Arsenals: Nuclear, Biological, and Chemical Threats*. Carnegie Endowment for International Peace, 2005. ISBN 978-0-87003-216-5.
- [4] M. Almkhatar. *Guided Missiles and Countermeasures: Evolving Technologies and Defense Strategies*. Military Science Publishers, 2019. ISBN 978-1-63217-056-2.
- [5] S.A. Hildreth. *Missile Defense: The Current Debate*. Congressional Research Service, ISBN 978-1-4379-2052-4, 2009.
- [6] K.A. Payne. *Missile Defense in the 21st Century: Protection Against Limited Threats Including Lessons from the Gulf War*. Institute for Foreign Policy Analysis, ISBN 978-0-89206-464-9, 2012.
- [7] T.A. Postol. Countermeasures: A Technical Evaluation of the Operational Effectiveness of the Planned US National Missile Defense System. *Union of Concerned Scientists*. Retrieved from <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/legacy/assets/documents/nw> 2003.
- [8] R. Dawkins and S. Lambakis. *Directed Energy Weapons: Promise and Prospects*. Center for Strategic and Budgetary Assessments, ISBN 978-1-94251-299-4, 2017.
- [9] BBC News. Israel: Iron Dome missile defence system in action. *BBC News*, November 17, 2012. Retrieved from <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-20385306>.
- [10] K. O. Stanley and R. Miikkulainen. Evolving neural networks through augmenting topologies. *Evolutionary Computation*, 10(2):99–127, 2002.
- [11] D. Floreano and C. Mattiussi. *Bio-inspired artificial intelligence: Theories, methods, and technologies*. MIT Press, 2008.
- [12] X. Yao. Evolving artificial neural networks. *Proceedings of the IEEE*, 87(9):1423–1447, 1999.
- [13] K. O. Stanley and R. Miikkulainen. Competitive coevolution through evolutionary complexification. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 21:63–100, 2004.
- [14] S. Risi and J. Togelius. Neuroevolution in games: State of the art and open challenges. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 7(1):1–16, 2015.
- [15] J. Schmidhuber. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61:85–117, 2015.
- [16] NASA Glenn Research Center. Rocket Rotations. Retrieved from <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/rotations.html>. Accessed on April 11, 2023.