

REZUMATUL TEZEI

METODE ȘI TEHNICI PENTRU ASIGURAREA INTEROPERABILITĂȚII ALGORITMILOR DE INTELIGENȚĂ ARTIFICIALĂ ÎN REȚELE BLOCKCHAIN DESCENTRALIZATE

Autor:

Andrei Iulian Tara

Coordonator științific:

Prof. Dr. Bala-Constantin
Zamfirescu



UNIVERSITATEA
LUCIAN BLAGA
— DIN SIBIU —

Știința Calculatoarelor și Tehnologia Informației
Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu

Introducere

Integrarea algoritmilor de Inteligență Artificială (AI) în rețelele blockchain descentralizate prezintă provocări semnificative legate de comunicare și interoperabilitate. Abordările existente adesea nu dispun de cadrele necesare pentru a asigura o interacțiune fără întreruperi între agenții AI în medii distribuite. Această teză abordează aceste provocări prin propunerea de metode și tehnici inovatoare care îmbunătățesc interoperabilitatea algoritmilor AI în ecosistemele blockchain descentralizate. Cercetarea explorează intersecția dintre AI și Tehnologia Registrului Distribuit (DLT), prezentând o abordare structurată pentru dezvoltarea protocoalelor de comunicare descentralizate care permit agenților AI să funcționeze eficient și colaborativ.

Elementul central al acestei cercetări este dezvoltarea unui sistem bazat pe ontologii, conceput pentru a îmbunătăți comunicarea și interoperabilitatea între agenții AI în rețelele descentralizate. Este introdus un model ontologic multi-stratificat care facilitează interacțiunea fără întreruperi și schimbul de date între entitățile AI eterogene.

Teza începe prin prezentarea unui rezumat al modelelor de gestionare a identității — suverane proprii, descentralizate și centralizate — și a implicațiilor lor de securitate, incluzând gestionarea descentralizată a cheilor, tehnicile de criptare și metodele de calcul securizat. Sunt evaluate protocoalele Oracle, precum TLSnotary, DECO și Chainlink, esențiale pentru interfațarea blockchain-urilor cu date externe. Studiul examinează, de asemenea, mediile de execuție virtualizate, precum KATA Containers, SCONE și Trusted Execution Environments, evaluând rolul acestora în facilitarea aplicațiilor AI scalabile și sigure. În plus, sunt explorate soluțiile de stocare descentralizată, inclusiv Swarm, IPFS și BigchainDB, și impactul acestora asupra integrității și accesibilității datelor. Este evidențiat rolul schimbului de date bazat pe ontologii, subliniind importanța acestuia în realizarea compatibilității semantice între agenții AI și în susținerea evoluției arhitecturilor blockchain către aplicații de întreprindere.

Teza propune un model descentralizat de versionare a ontologiilor pentru a sprijini schimbul de date între organizații multiple. Descrierile detaliate ale arhitecturii modelului, protocoalelor de gestionare a datelor, sistemului de votare și mecanismului de consens oferă un cadru robust pentru integrarea AI cu tehnologiile blockchain. Acest model îmbunătățește reprezentarea datelor, standardizează comunicarea între diverse sisteme AI și abordează provocări esențiale precum compatibilitatea algoritmică, consistența datelor

și operarea sigură a sarcinilor AI în nodurile descentralizate.

Performanța modelului propus este evaluată prin benchmark-uri și optimizări, demonstrând eficacitatea sa în îmbunătățirea interoperabilității agenților AI. Analiza comparativă evidențiază superioritatea modelului în diverse metrice, inclusiv compatibilitatea formatului de date, adaptabilitatea la mediu și eficiența interacțiunii agenților. Modelul nu doar că sporește funcționalitatea algoritmilor AI în ecosistemele blockchain, dar oferă și un cadru scalabil, adaptabil la diverse domenii de aplicare, conectând tehnologiile AI și blockchain și deschizând calea pentru aplicații descentralizate mai interoperabile, avansate și sigure.

Prin validare empirică și analiză teoretică, teza demonstrează eficiența abordării propuse, bazate pe ontologii, în promovarea unei comunicări coerente și eficiente între agenții AI. Rezultatele subliniază potențialul sistemelor ontologice de a avansa rețelele AI descentralizate, promovând sisteme AI mai adaptive și colaborative în diverse domenii. Cadrul ontologic permite agenților AI să navigheze și să utilizeze eficient mediile descentralizate.

Abordând provocarea critică a integrării agenților AI diverși, această cercetare propune un model de date robust exprimat într-o formă matematică abstractă, standardizând reprezentarea datelor și îmbunătățind eficiența și fiabilitatea interacțiunilor AI în rețele descentralizate. Teza nu doar identifică provocările și oportunitățile esențiale la intersecția dintre AI și tehnologiile registrelor distribuite, ci oferă și o soluție practică și scalabilă cu implicații semnificative pentru avansarea domeniului. Prin investigații teoretice și experimentale cuprinzătoare, aceasta stabilește o bază pentru cercetările și dezvoltările viitoare în sistemele AI descentralizate.

Publicații

Lucrarea prezentată este susținută de contribuțiile în domeniu, reflectate printr-o serie de publicații științifice. Aceste publicații evidențiază dezvoltarea modelelor bazate pe ontologii, a sistemelor descentralizate și a tehnologiilor blockchain, după cum urmează:

Articole în reviste

1. **Tara, A.**, Turesson, H. K., Natea, N., & Kim, H. (2023). *O evaluare a alternativelor de stocare pentru interfețele de servicii care susțin o piață AI descentralizată*. IEEE Access. IEEE.
2. **Tara, A.**, Turesson, H. K., & Natea, N. (2024). *Optimizarea stocării dinamice pentru comunicarea între agenții AI*. Future Internet, 16(8), 274. MDPI.

Lucrări în volumele conferințelor

1. **Tara, A.**, Ivkushkin, K., Butean, A., & Turesson, H. (2019). *Evoluția arhitecturii mașinii virtuale blockchain către o perspectivă de utilizare în întreprinderi*. În Software Engineering Methods in Intelligent Algorithms: Proceedings of the 8th Computer Science On-line Conference 2019, Vol. 1 (pp. 370–379). Springer.
2. **Tara, A.**, Butean, A., Zamfirescu, C., & Learney, R. (2020). *Un model ontologic pentru interoperabilitate și schimb de date multi-organizațional*. În Computer Science On-line Conference (pp. 284–296). Springer.
3. Butean, A., Pournaras, E., **Tara, A.**, Turesson, H., & Ivkushkin, K. (2020). *Consensul Dinamic: Creșterea adaptabilității blockchain-ului la aplicațiile de întreprindere*. În Computer Science On-line Conference (pp. 433–442). Springer.
4. **Tara, A.**, Taban, N., VasIU, C., & Zamfirescu, C. (2021). *Un model descentralizat de versionare a ontologiilor proiectat pentru interoperabilitate și schimb de date multi-organizațional*. În Computer Science On-line Conference (pp. 617–628). Springer.
5. **Tara, A.**, Taban, N., & Turesson, H. (2022). *Analiza performanței unui model ontologic care permite interoperabilitatea agenților de inteligență artificială*. În Computer Science On-line Conference (pp. 395–406). Springer.

Obiectivele Cercetării

Obiectivele principale ale acestei cercetări sunt:

- **Explorarea unor metode și tehnici noi pentru îmbunătățirea interoperabilității algoritmilor AI în ecosistemele blockchain descentralizate:** Acest obiectiv abordează provocările cheie în comunicare și interoperabilitate prin dezvoltarea unor protocoale de comunicare descentralizate care permit agenților AI să colaboreze eficient în multiple straturi blockchain.
- **Investigarea unui sistem bazat pe ontologii pentru îmbunătățirea interacțiunii agenților AI în rețele descentralizate:** Cercetarea își propune să creeze un model ontologic multi-stratificat care facilitează comunicarea și schimbul de date fără întreruperi între entitățile AI diverse în rețelele descentralizate.
- **Examinarea protocoalelor de securitate descentralizate și a mediilor de execuție virtualizate:** Studiul investighează gestionarea descentralizată a cheilor, criptarea omomorfă, metodele de calcul securizat și mediile virtualizate precum KATA Containers, SCONE și Trusted Execution Environments pentru a îmbunătăți scalabilitatea și securitatea aplicațiilor AI.
- **Cercetarea unui model descentralizat de versionare a ontologiilor pentru schimbul de date între organizații multiple:** Acest obiectiv detaliază arhitectura, gestionarea datelor, sistemul de votare și mecanismul de consens al unui model ontologic descentralizat conceput pentru a sprijini interoperabilitatea algoritmilor AI în cadrul sistemelor de tehnologie a registrelor distribuite.
- **Evaluarea performanței modelului propus:** Cercetarea evaluează eficiența modelului prin benchmark-uri și analize comparative, concentrându-se pe compatibilitatea formatului de date, eficiența interacțiunii agenților și adaptabilitatea la mediu, demonstrând eficacitatea modelului în susținerea sarcinilor AI în rețelele descentralizate.

Metodologie

Această cercetare utilizează o abordare sistematică pentru a aborda provocările interoperabilității AI în rețelele blockchain descentralizate. Metodologia

este structurată în mai multe etape, fiecare contribuind esențial la dezvoltarea și validarea soluțiilor propuse:

- **Revizuirea Literaturii:** Cercetarea începe cu o analiză detaliată a metodelor existente de integrare a AI în rețele descentralizate, concentrându-se pe limitările sistemelor actuale de gestionare a identității, tehnicilor de calcul securizat și soluțiilor de stocare descentralizată. Această revizuire evidențiază lacunele critice și oferă baza pentru dezvoltarea unor abordări inovatoare care să abordeze provocările de interoperabilitate.
- **Dezvoltarea Modelului Bazat pe Ontologii:** Elementul central al cercetării îl reprezintă proiectarea unui model ontologic multi-stratificat, menit să standardizeze formatele de schimb de date și să faciliteze comunicarea fără întreruperi între agenții AI din diverse medii blockchain. Sistemul ontologic este proiectat cu atenție pentru a asigura compatibilitatea semantică și pentru a promova un schimb de date eficient între entitățile AI eterogene.
- **Modelul Descentralizat de Versionare a Ontologiilor:** Pentru a sprijini schimbul de date între organizații multiple, cercetarea dezvoltă un model descentralizat de versionare a ontologiilor, care integrează un sistem de votare și un protocol de consens. Acest model gestionează controlul versiunilor, asigurând că agenții AI operează în mod coordonat în cadrul ecosistemelor descentralizate.
- **Evaluarea Mediilor de Execuție Virtualizate:** Studiul evaluează mediile de execuție virtualizate, precum KATA Containers, SCONE și Trusted Execution Environments, pentru a analiza impactul acestora asupra scalabilității și securității aplicațiilor AI în rețele descentralizate.
- **Benchmarking-ul Performanței:** Modelul propus este supus unei evaluări riguroase a performanței, prin benchmark-uri care analizează metrice cheie, precum interoperabilitatea, compatibilitatea formatelor de date și eficiența interacțiunii. Aceste benchmark-uri oferă validare empirică a eficacității modelului în îmbunătățirea performanței operaționale a agenților AI în ecosistemele descentralizate.

Metodologia îmbină analiza teoretică cu validarea empirică pentru a dezvolta o soluție robustă și scalabilă pentru interoperabilitatea AI în rețele blockchain descentralizate. Prin abordarea sistematică a provocărilor identificate, cercetarea creează o punte între tehnologiile AI și blockchain, contribuind la dezvoltarea unor aplicații descentralizate mai adaptive și colaborative.

Modelul Propus

Această cercetare introduce un protocol de schimb de date bazat pe ontologii, conceput pentru a asigura o comunicare uniformă între agenții software distribuiți într-un mediu multi-organizațional. Protocolul integrează modele ontologice interoperabile care descriu intrările și ieșirile agenților, funcționând ca un mecanism de armonizare a semanticii, contextelor și interpretărilor datelor în cadrul diferitelor organizații, promovând astfel colaborarea atât la nivel intern, cât și extern.

În contrast cu abordările tradiționale care au utilizat scheme ontologice monolitice și inflexibile, modelul propus implementează o arhitectură multi-stratificată, menită să sporească flexibilitatea și să descentralizeze structurile de stocare. Fiecare strat al arhitecturii este format din structuri de date semantice, citibile de mașină, care furnizează context pentru dimensiuni specifice ale ontologiei, facilitând utilizarea, implementarea și actualizarea descentralizată a datelor.

Arhitectura este compusă din următoarele straturi:

- *Stratul Structural* - Definește specificațiile formale ale ontologiei, incluzând clasificări, concepte, proprietăți și relații.
- *Stratul de Conexiune* - Administrează informațiile referitoare la locațiile conceptelor și mapările între diferite versiuni ale ontologiilor, fie acestea interne sau externe.
- *Stratul de Codificare* - Specifică formatele de codificare utilizate, precum UTF-8 sau ISO.
- *Stratul de Valori Implicite* - Oferă valori implicite pentru proprietăți specifice ale ontologiei.
- *Stratul de Validare* - Definește reguli formale de validare pentru proprietățile schemelor.
- *Stratul de Restricții* - Conține restricții contextuale bazate pe proprietățile schemelor.
- *Stratul de Denumire* - Atribue identificatori lizibili pentru utilizatori elementelor din schemă.
- *Stratul de Instrucțiuni* - Furnizează orientări cu privire la specificarea datelor de intrare de către utilizatori.
- *Stratul de Versionare* - Include propuneri comunitare și detalii despre modificările structurii schemelor și evoluția viitoare.
- *Stratul de Șabloane* - Permite segmentarea contextuală a elementelor schemelor.

Straturile principale se concentrează pe stocarea informațiilor semantice destinate procesării automate, esențiale pentru funcționarea eficientă a sistemului, în timp ce straturile opționale oferă informații suplimentare, destinate interacțiunilor om-mașină. Ontologia este considerată completă atunci când oferă toate detaliile necesare pentru operarea precisă a mașinilor.

Dintr-o perspectivă infrastructurală, schema ontologică este replicată în întreaga rețea descentralizată, asigurând acces rapid și disponibilitate pentru toți agenții AI care operează în cadrul ecosistemului multi-organizațional. Arhitectura multi-stratificată facilitează evoluția continuă a ontologiei printr-un mecanism avansat de versionare. Organizațiile pot propune ajustări la orice strat al ontologiei, facilitând adaptarea conceptelor, clasificărilor și structurii schemelor.

Administrarea solicitărilor de modificare este gestionată prin tehnologia blockchain, care oferă garanții de încredere, securitate și transparență în stocarea și gestionarea datelor ontologice. Un sistem descentralizat de votare permite părților interesate să decidă colectiv asupra modificărilor, iar propunerile conflictuale sunt soluționate prin consens comunitar, determinând evoluția viitoare a ontologiei. Această abordare asigură adaptabilitatea, fiabilitatea și capacitatea ontologiei de a răspunde dinamic nevoilor unui mediu AI descentralizat și multi-organizațional.

Compoziția Algoritmilor

Modelul propus nu doar îmbunătățește interoperabilitatea între organizații prin definirea unor structuri de date ontologice standardizate, ci asigură și consistența și uniformitatea în cadrul sistemelor descentralizate. Prin tratarea algoritmilor AI ca entități modulare și independente, modelul facilitează integrarea acestora în soluții complexe prin contracte de date bine definite la granițele algoritmilor. Utilizând protocolul gRPC, modelul permite execuția la distanță și comunicarea fără întreruperi între sistemele AI, permițând interacțiuni eficiente în diferite contexte organizaționale.

Această arhitectură permite combinarea mai multor algoritmi AI—precum cei destinați pentru traducerea lingvistică și gestionarea sarcinilor—pentru a aborda colaborativ sarcini complexe, cum ar fi alocarea resurselor în companii multinaționale. Prin valorificarea acestor componente AI modulare, modelul sporește eficiența operațională și susține soluții colaborative bazate pe AI în medii descentralizate.

Consens Dinamic

Această cercetare prezintă modelul Consens Dinamic, care integrează multiple algoritmi de consens pe o platformă unificată, oferind companiilor posibilitatea de a ajusta mecanismele de consens în funcție de cerințele specifice. Spre deosebire de modelele statice tradiționale, precum PoW, pBFT și PoS, Consensul Dinamic introduce flexibilitate, permițând implementarea simultană a diferitelor reguli de consens pentru a optimiza performanța în cadrul consorțiilor de companii la scară largă.

Modelul utilizează funcții de indexare pentru a clasifica tranzacțiile și a le direcționa către mecanismul de consens cel mai potrivit, pe baza unor parametri definiți anterior, sporind astfel scalabilitatea și eficiența procesării. Structura ierarhică a acestui model permite gestionarea eficientă a tranzacțiilor locale, facilitând în același timp consensul extins între entități, aspect crucial pentru aplicațiile complexe multi-organizaționale.

Consensul Dinamic remediază limitările algoritmilor statici prin introducerea unor reguli adaptabile, creșterea paralelismului și separarea între consensul tehnologic și cel operațional, facilitând astfel scalabilitatea și promovând colaborarea inter-organizațională în rețele blockchain de mari dimensiuni.

Evaluarea Modelului

Sistemul propus a fost evaluat riguros printr-o serie de benchmark-uri și analize de performanță. Rezultatele evidențiază contribuții și progrese semnificative:

- **Interoperabilitate Îmbunătățită:** Modelul ontologic multi-stratificat a îmbunătățit semnificativ eficiența comunicării între agenții AI în diverse protocoale de blockchain testate. Compatibilitatea ridicată a formatelor de date și alinierea semantică precisă au facilitat un schimb de date eficient între sisteme, sporind considerabil interoperabilitatea generală.
- **Adaptabilitate și Scalabilitate:** Sistemul a demonstrat o adaptabilitate robustă în diverse medii descentralizate, menținând performanța și acuratețea pe multiple protocoale blockchain. Acesta s-a scalat eficient odată cu creșterea dimensiunii rețelei și a interacțiunilor între agenți, prezentând latență minimă și utilizare optimizată a resurselor.

- **Formate de Date Flexibile și Interacțiunea Agenților:** Formatul de date flexibil al modelului susține o gamă largă de tipuri de date, facilitând comunicarea fără întreruperi între agenții AI. Protocoalele de interacțiune optimizate au îmbunătățit flexibilitatea și scalabilitatea, permițând interacțiuni fluide ale agenților în medii complexe.
- **Robustețe în Diverse Medii de Operare:** Evaluările performanței în diferite medii computaționale au confirmat adaptabilitatea modelului la diverse latențe de rețea și condiții de resurse, consolidând fiabilitatea sa în sisteme descentralizate.
- **Algoritmi Optimizați și Medii de Execuție:** Arhitectura și algoritmi au fost concepuți pentru modularitate, viteză și acuratețe, sprijinind operațiuni concurente între mai mulți agenți. Mediile de execuție optimizate au sporit și mai mult fiabilitatea și performanța sistemului.
- **Tehnologii de Stocare Descentralizată:** Evaluarea soluțiilor de stocare descentralizată, inclusiv rețele P2P și blockchain-uri publice și private, a demonstrat eficacitatea lor în gestionarea seturilor mari de date pentru agenții AI, sporind eficiența și securitatea modelului.

Evaluarea confirmă că modelul propus, bazat pe ontologii, îmbunătățește semnificativ interoperabilitatea, scalabilitatea și securitatea algoritmilor AI în rețelele blockchain descentralizate. Prin valorificarea formatelor de date structurate, a protocoalelor de comunicare adaptative și a gestionării sigure a datelor, modelul promovează dezvoltarea aplicațiilor colaborative bazate pe AI, marcând un pas esențial în avansarea sistemelor AI descentralizate.

Concluzii

Această cercetare abordează provocările critice ale integrării algoritmilor AI în rețelele blockchain descentralizate prin introducerea unui sistem multi-stratificat bazat pe ontologii, care îmbunătățește interoperabilitatea și comunicarea între agenții AI. Modelul propus standardizează reprezentarea datelor, permițând o comunicare fără întreruperi între sisteme eterogene și oferind o fundație robustă pentru dezvoltarea aplicațiilor descentralizate avansate.

Contribuțiile cheie ale acestei lucrări includ dezvoltarea unei ontologii multi-stratificate care facilitează comunicarea eficientă între agenții AI, îmbunătățind semnificativ interoperabilitatea în medii descentralizate. Scalabilitatea modelului a fost testată riguros, demonstrând capacitatea de a

susține un număr mare de agenți AI fără a compromite performanța. În plus, adaptabilitatea cadrului la condiții de mediu variabile permite agenților AI să își ajusteze dinamic operațiunile, asigurând stabilitatea și eficiența în sistemele descentralizate.

Implicațiile acestei cercetări sunt deosebit de semnificative, în special în sectoare precum finanțele și sănătatea, unde integrarea AI cu tehnologiile blockchain poate spori securitatea, simplifica operațiunile și îmbunătăți eficiența generală a sistemului. Prin conectarea tehnologiilor AI și blockchain, acest studiu nu doar avansează domeniul rețelelor AI descentralizate, ci oferă și un cadru scalabil și adaptabil pentru inovațiile viitoare în aplicații sigure și colaborative bazate pe AI.