



REZUMAT

”Arhitecturi distribuite performante în modelarea, prelucrarea și vizualizarea datelor spațiale”

Autor: ing. Cristinel-Mihai Mocan, Conducător științific: Prof.dr.ing. Dorian Gorgan

Importanța și actualitatea temei

Teza de doctorat abordează tema arhitecturilor distribuite performante în modelarea, prelucrarea și vizualizarea datelor spațiale. Necesitatea unei noi teze în domeniul arhitecturilor distribuite este dată de nevoia acerbă de a modela și prelucra datele masive cât mai rapid și mai simplu folosind resurse de calcul limitate. Teza de doctorat include o varietate de soluții proprii pentru o diversitate de domenii interdisciplinare precum: geografie – modelarea spațiului virtual geografic, vizualizare științifică, servicii medicale informatizate, sisteme și aplicații mobile, sau indexări. Designerii și inginerii lucrează la momentul actual cu modele și simulări din ce în ce mai complexe. Necesitatea de performanțe din ce în ce mai mari, mai multe date și, fotorealismul crescut în vizualizare sunt cerințele semnificative la momentul actual, fie ca este vorba de un film animat, cu grad crescut de realitate, sau un compartiment motor al unui vehicul prototip.

Dezvoltarea rapidă din punct de vedere tehnic din ultimii ani și utilizarea unităților de procesare grafică și a sistemelor cu mai multe unități de procesare permit realizarea scenariilor 3D complexe. Cu toate acestea, costurile ridicate implicate în achiziția și mentenanța unei astfel de arhitecturi specializate reprezintă un dezavantaj major, împiedicând accesul cercetătorilor la acest tip de resurse pe scară largă. Atât trasarea grafică cât și vizualizarea de la distanță sunt tehnici care rezolvă această nevoie de a vizualiza date de mari dimensiuni. Autorul propune în această teză o soluție scalabilă pentru realizarea unei arhitecturi distribuite specializată pentru modelarea, procesarea și vizualizarea datelor spațiale.

Domeniul arhitecturilor distribuite performante prezintă un interes sporit pentru studiu și cercetare deoarece este un domeniu în care se întrepătrund tehnologii heterogene precum, servicii grid sau Web, aplicațiile și rețelele mobile, tehnici de interacțiune cu utilizatorul, modelare și simulare grafică, aplicații interactive distribuite, calculul distribuit, procesarea imaginilor satelitare, vizualizarea în grid, modelarea spațiului virtual geografic, servicii semantice Web și Grid, arhitecturi, standarde, algoritmi, componente hardware și software.

Utilizarea arhitecturilor distribuite în modelarea, prelucrarea și vizualizarea datelor spațiale oferă o serie de avantaje și anume:

- asigurarea scalabilității automate al aplicațiilor, în urma adăugării de calculatoare suplimentare în sistem,
- posibilitatea integrării de aplicații care rulează în medii diferite, pe platforme diferite sau pe diferite sisteme de operare,
- posibilitatea sincronizării și a comunicației în timp real între mai mulți clienți,



- posibilitatea de a sprijini sistemele de calcul slabe din punctul de vedere al caracteristicilor tehnice în vederea asigurării resurselor hardware necesare rulării aplicațiilor.

Unul dintre obiectivele acestei lucrări este folosirea puterii de procesare a mai multor unități grafice și a cluster-ului de vizualizare în vederea executării scenariilor 3D complexe, urmărind utilizarea la maxim a unităților de procesare grafică. De asemenea, teza scoate în evidență utilizarea tehnicilor avansate de programare pe hardware-ul grafic disponibil la momentul actual pentru a îmbunătăți performanța de trasare grafică de la distanță prin intermediul aplicațiilor interactive.

Arhitectura distribuită realizată permite scalabilitate și performanță, asigurând un mecanism flexibil de persistență. De asemenea, securitatea datelor este asigurată la cel mai înalt nivel, prin software care poate cripta și decripta datele, semna mesajele cu semnături digitale, verifica, identifică și certifică cheile distribuite pentru entitățile la distanță. Monitorizarea sistemului este realizată printr-un instrument special pentru monitorizarea și managementul atât al resurselor cât și al aplicațiilor distribuite în rețea.

Teza de doctorat face referire la cele mai importante concepte, standarde, tehnologii și oferă soluții pentru: dezvoltarea unei arhitecturi distribuite performante, integrarea datelor și a aplicațiilor, modelarea datelor spațiale, prelucrarea și vizualizarea datelor masive. Autorul propune o arhitectură distribuită performantă care se bazează pe un cluster de calculatoare. Acest cluster furnizează o infrastructură de calcul de mare performanță reconfigurabilă dinamic, scalabilă și autonomă, furnizând acces independent de locație, permanent, securizat și eficient, cu scopul de a modela, prelucra și vizualiza datelor spațiale.

Arhitectura distribuită propusă are în vedere mai multe puncte de interes în tematica abordată: costul de procesare, scalabilitatea, complexitatea scenariilor grafice, distribuția modelului și flexibilitate. În primul rând s-a urmărit realizarea unei arhitecturi optime prin costuri mici. Din punct de vedere al algoritmilor s-au folosit algoritmi hibridi de trasare grafică optimizați în contextul cluster-ului grafic. Pe de altă parte un aspect deosebit de important se referă la scalabilitate. În utilizarea arhitecturii distribuite s-a ținut cont de numărul de utilizatori, de interactivitate și aici ne referim la interacțiunea pentru unul sau mai mulți utilizatori și nu în ultimul rând s-a luat în considerare diferite scenarii grafice având complexitate diferită. O altă țintă atinsă prin această temă de doctorat este modul de distribuție al modelului 3D. Arhitectura distribuită realizată în această teză de doctorat este proiectată în primul rând pe viteză și este foarte flexibilă din punct de vedere al tipurilor de aplicații și al utilizatorilor.

Obiectivele tezei realizate de autor sunt în concordanță cu titlul. Acestea dezvoltă și experimentează soluții originale ca și contribuții proprii în domeniul arhitecturilor distribuite. S-a realizat o sinteză clară asupra arhitecturilor și tehnologiilor, algoritmilor, protocoalelor, modelării, prelucrării și vizualizării datelor spațiale – care sunt utilizate de autor în soluțiile originale propuse sub formă de contribuții personale în domeniul arhitecturilor distribuite. Pe de altă parte sunt evidențiate tehnologii și platforme pentru dezvoltarea soluțiilor propuse de autor. Nu în ultimul rând, lucrarea deschide noi direcții de cercetare și dezvoltare în subdomeniile derivate din arhitecturi distribuite în spirit inovator. Trebuie să precizăm faptul că puterea de calcul sporită care a fost evidențiată în această teză de doctorat va asigura desfășurarea în condiții optime a unor cercetări privind atât sistemele distribuite, arhitecturile paralele cât și proiectarea algoritmilor paraleli.

Contribuția științifică și practică a acestei teze de doctorat în domeniul Calculatoarelor și Tehnologiei Informatiei este evidențiată într-un capitol aparte.



Teza abordează un spectru larg de subiecte din tematica arhitecturilor distribuite pentru modelarea, procesarea și vizualizarea datelor spațiale într-o manieră riguroasă teoretică și experimentală și este demonstrată de fapt prin întreaga activitate de cercetare și publicare științifică a autorului.

Conținutul tezei de doctorat

Teza conține o prezentare teoretică științifică foarte riguroasă și bine documentată, rezultate experimentale și analize specifice. Este foarte bine sistematizată și clar prezentată în peste 265 de pagini, structurată în 9 capitole și conține o listă bibliografică cu 240 referințe. Autorul are o contribuție științifică concretizată prin 5 publicații științifice la conferințe naționale și internaționale, în tematica tezei.

Capitolul 1, “Introducere” prezintă importanța și motivația tematicii abordate, definirea problemei și subiectele dificile care trebuie abordate și rezolvate, obiectivele și, descrierea celor 8 capitole următoare ale tezei de doctorat;

În **Capitolul 2**, “Arhitecturi distribuite” este prezentată o vedere generală a acestui domeniu de cercetare și este evidențiat de asemenea, cu rigurozitate stadiul actual în domeniul arhitecturilor distribuite. Tot în acest capitol sunt evidențiate cerințele și motivația pentru alegerea acestui domeniu de cercetare;

Capitolul 3, “Soluții de implementare pentru o arhitectură performantă bazată pe cluster grafic” introduce un sistem de management al resurselor grafice. Framework-ul realizat folosește la executarea pe cluster al aplicațiilor care folosesc unități grafice de procesare. Acest framework furnizează utilități pentru alocarea unităților grafice de procesare, executarea aplicațiilor grafice pe acestea și eliberarea lor atunci când nu mai există solicitări. Acest capitol prezintă modurile de operare și configurare a sistemului de management al resurselor grafice și o comparație a sistemului realizat cu alte sisteme de vizualizare. Nu în ultimul rând este evidențiat modul de administrare care se bazează pe gestionarea unui manager de stare, verificarea sistemului, găsirea informațiilor, terminarea job-urilor, prioritizarea nodurilor, alocarea unităților grafice de procesare și convenția de numerotare pentru acestea. Unul din obiectivele importante urmărite de autor în această lucrare este utilizarea la capacitate maximă al unităților grafice de procesare. Prin intermediul arhitecturii descrise în detaliu în acest capitol, sunt disponibile o serie de capabilități pentru vizualizarea scalabilă;

Capitolul 4, “O soluție scalabilă pentru trasarea grafică paralelă în cluster grafic” prezintă o nouă soluție scalabilă pentru trasarea grafică paralelă prin intermediul cluster-ului. Această soluție funcționează de asemenea și într-un sistem cu memorie partajată. Este vorba despre o nouă soluție flexibilă aplicabilă oricarei aplicații de vizualizare din domeniu științific care îmbunătățește performanța la scară largă, este flexibilă din punct de vedere al configurării și cel mai puțin invazivă cu privire la adaptarea aplicațiilor existente de vizualizare. Soluția oferă suport pentru o latență scăzută în sincronizarea frame-urilor distribuite și în compunerea imaginii. Pe de altă parte soluția oferă suport pentru descompunerea și executarea automată a sarcinilor de trasare grafică în conformitate cu sistemul de trasare grafică realizat. Acest capitol introduce și o componentă nouă în arhitectura distribuită. Este vorba despre un set de instrumente bazate pe OpenGL pentru trasarea grafică paralelă la scară largă, care oferă un nou API pentru realizarea aplicațiilor grafice scalabile pentru o gamă largă de sisteme grafice distribuite. În acest capitol autorul prezintă arhitectura sistemului API de bază și avantajele sale în comparație cu sistemele actuale. De asemenea acest capitol prezintă mai multe posibilități de configurare și scenarii de utilizare, precum și rezultatele semnificative din punct de vedere al scalabilității;



Capitolul 5, “Vizualizarea grafică de la distanță” introduce o nouă soluție pentru accesul în cluster grafic de la distanță folosind sistemele de operare Linux și Windows. Scopul acestei vizualizări la distanță este de a permite utilizatorului vizualizarea unor modele complexe pe o stație de lucru cu resurse grafice limitate și totodată de a interacționa rapid folosind interfața utilizator prin serviciul web. Toate aceste aspecte sunt posibile datorită sistemului de trasare grafică la distanță prin cluster grafic. Este prezentată și o metodă nouă pentru executarea pe cluster-ul grafic a mai multor aplicații grafice paralele realizate cu ajutorul unor biblioteci populare de actualitate. Această soluție este posibilă prin intermediul noului sistem de management realizat folosind implementarea mai multor exemple semnificative evidențiate de către autor. În acest capitol se prezintă o soluție interactivă pentru modelarea și vizualizare grafică de la distanță a spațiului virtual geographic. Modelarea și vizualizarea sistemelor de mediu implică costuri foarte mari (exemplu: ecosistemul). Modelul virtual de scenă implică împărțirea datelor și procesarea resurselor unei rețele mari de calculatoare. Datele pot fi menținute și furnizate cu ajutorul bazelor de date distribuite în locații geografice diferite. Mai mult de atât, modelul spațiului virtual geographic tinde să fie folosit în aplicații web și Grid fiind accesat de la distanță de utilizatori având la dispoziție mai puțină putere de calcul. Una dintre soluțiile promițătoare atât pentru procesarea și trasarea grafică cât și pentru împărțirea resurselor de calcul performante este cluster-ul grafic și Grid-ul. Experimentele evaluează impactul pe care-l au configurația cluster-ului, modelul de date, parametrii de vizualizare, tehnicile de interacțiune și arhitectura aplicației asupra calității vizualizării și binențeles a procesării. Modelarea și vizualizarea spațiului virtual geographic implică resurse cu putere mare de calcul și modele complexe. Din punct de vedere al analizei teoretice și practice este realizată o comparație față de ce se găsește în prezent în literatura de specialitate;

Capitolul 6, “O soluție performantă pentru trasarea grafică la distanță” prezintă contribuțiile care privesc îmbunătățirea performanței de trasare grafică de la distanță. Acestea se bazează pe utilizarea tehnicilor de programare avansate pe hardware-ul unităților grafice de procesare. De asemenea, este prezentată o imagine de ansamblu asupra sistemelor existente pentru trasarea grafică la distanță și sunt evidențiate problemele generale care apar în cazul vizualizării la distanță. Ulterior se prezintă evoluțiile actuale din punct de vedere al hardware-ului și software-ului grafic și se descrie modul în care acestea pot să fie folosite în vederea creșterii performanței sistemelor grafice la distanță. S-a implementat un plugin care citește contextul OpenGL într-un obiect tampon care se trimite componentei de compresie. Metodele de compresie și readback reprezintă părțile cele mai semnificative ale arhitecturii distribuite pentru trasarea grafică de înaltă performanță. S-a implementat un algoritm simplu de compresie și codificare folosind tehnici standard de programare pentru a avea o bază de comparație. În cele din urmă sunt prezentate câteva rezultate și valorile de referință care confirmă validitatea acestor cercetari;

Capitolul 7, “Modelarea și vizualizarea interactivă a datelor spațiale pe cluster grafic” introduce o nouă abordare prin care se evidențiază soluția optimă pentru modelarea și vizualizarea interactivă a datelor spațiale pe cluster grafic. S-a realizat o metodă nouă pentru integrarea aplicațiilor grafice în arhitectura distribuită bazată pe cluster grafic. Folosind o bibliotecă de trasare grafică orientată obiect utilizatorii sistemului au posibilitatea să realizeze scenarii 3D complexe care pot fi executate ulterior pe arhitectura distribuită bazată pe cluster-ul grafic. Realizarea acestei metode de integrare are ca scop testarea și evaluarea performanțelor tuturor componentelor din cadrul arhitecturii distribuite. Se prezintă foarte riguros arhitectura conceptuală propusă și studiată în detaliu pentru fiecare din componentele sale. Arhitectura propusă pentru sistemul cluster-ului de vizualizare folosește modelul client-server pentru partea de trasare grafică. Principalele componente ale acestei arhitecturi sunt: serverele de vizualizare, nodurile client pentru trasarea grafică și managerul de resurse. În continuare în acest capitol se prezintă în detaliu fiecare componentă a



sistemului și rolul său în cadrul arhitecturii distribuite bazată pe cluster grafic. Funcționarea sistemului este exemplificată cu ajutorul unor scenarii de utilizare. În vederea experimentelor pe scară largă s-a dezvoltat o aplicație conținând scenarii cu obiecte 3D având complexitate diferită. Utilizatorul are posibilitatea să ruleze aplicația 3D și să seteze parametrii din interfața utilizator în funcție de gradul de complexitate al scenei care dorește să fie trasată grafic. După selectarea scenariului dorit și a parametrilor introduși de utilizator interactiv, sistemul va crea un format dedicat pentru execuția pe arhitectura cluster-ui grafic. Rezultatele procesului de trasare al scenei poate fi vizualizat imediat după parcurgerea acestui pas. Pentru realizarea și evaluarea experimentelor s-au construit diverse scenarii având complexitate diferită. În acest capitol este evidențiată de asemenea performanța de vizualizare a clusterului grafic folosind diverse strategii de load-balancing. Folosind mai multe strategii de load-balancing optimizate s-au realizat soluții noi pentru analizarea sarcinii pe segmente și alocarea resurselor pentru performanțe optime la fiecare cadru. După efectuarea experimentelor s-au enumerat avantajele relevante în utilizarea load-balancing-ului și s-a comparat numărul cadrelor pe secundă în funcție de algoritmi de trasare grafică, complexitatea scenariului și rezoluția sa. Capitolul se încheie cu un rezumat al rezultatelor obținute în experimente și cu enumerarea direcțiilor viitoare specifice acestui capitol;

Capitolul 8, “Experimente pe scară largă” prezintă experimentele pe scară largă realizate utilizând arhitectura distribuită performantă realizată în această lucrare. S-au evidențiat rezultatele mai multor experimente care demonstrează fezabilitatea întregului sistem distribuit de înaltă performanță. În ceea ce privește studiile de scalabilitate pe cluster-ul de vizualizare trebuie remarcat faptul că s-au folosit diferite configurații hardware performante atât din țară cât și din străinătate. În acest sens s-au luat în considerare atât codul de trasare grafică pentru fiecare aplicație grafică cât și setările hardware. S-a realizat un sistem flexibil prin adăugarea mai multor caracteristici având ca scop executarea pe cluster a cât mai multor tipuri de aplicații grafice. Cea mai mare provocare cu privire la acest aspect este de a utiliza cluster-ul de vizualizare pentru cât mai multe scenarii de utilizare. Din acest punct de vedere sistemul de management realizat are capacitatea de a rula mai multe tipuri de scenarii în același timp, cum ar fi: aplicații de trasare grafică paralelă pentru unul sau mai mulți utilizatori, sesiuni de vizualizare de la distanță pentru unul sau mai mulți utilizatori folosind sau nefolosind unitățile de procesare grafică în comun, aplicațiile de vizualizare care rulează pe mai multe monitoare sau “pereți” de afișare pentru unul sau mai mulți utilizatori. În toate aceste privințe este vorba despre alocarea resurselor grafice flexibil în funcție de cerințele aplicațiilor. În urma efectuării testelor și experimentelor pe scară largă, s-a realizat o prezentare riguroasă asupra avantajelor și dezavantajelor relevante pentru acest tip de arhitectură distribuită;

Capitolul 9, “Concluzii” este ultimul capitol al tezei. În acest capitol se prezintă mai multe concluzii generale și încă o dată pe scurt tematica și contribuțiile tezei.

Contribuțiile tezei de doctorat

În Capitolul 9 sunt evidențiate contribuțiile originale și performanțele soluțiilor propuse. Dintre contribuțiile originale trebuie menționate următoarele:

- Analiza sistematică a problematicei și a soluțiilor existente în domeniul arhitecturilor distribuite;
- O nouă arhitectură distribuită testată la scară largă care cuprinde componente și algoritmi noi pentru modelarea, procesarea și vizualizarea datelor spațiale;



- Proiectarea detaliată a unui nou framework pentru sistemul de management al cluster-ului grafic, prin intermediul căruia se execută aplicații grafice;
- Un nou API pentru alocarea și setarea unităților de procesare grafică în funcție de necesitățile utilizatorilor;
- O soluție nouă pentru executarea pe cluster-ul grafic a mai multor aplicații grafice paralele prin intermediul noului sistemului de management folosind implementarea mai multor exemple semnificative evidențiate de către autor;
- O metodă nouă pentru accesul de la distanță în clusterul grafic folosind sistemele de operare Linux și Windows;
- O nouă soluție scalabilă pentru trasarea grafică paralelă prin intermediul cluster-ului care funcționează de asemenea și într-un sistem cu memorie partajată;
- Un set de instrumente bazate pe OpenGL pentru trasarea grafică paralelă la scară largă, care oferă un nou API pentru realizarea aplicațiilor grafice scalabile pentru o gamă largă de sisteme grafice distribuite;
- O nouă soluție flexibilă aplicabilă oricărei aplicații de vizualizare din domeniu științific care îmbunătățește performanța la scară largă, este flexibilă din punct de vedere al configurării și cel mai puțin invazivă cu privire la adaptarea aplicațiilor existente de vizualizare. Soluția oferă suport pentru o latență scăzută în sincronizarea cadrelor distribuite folosite în compunerea imaginii. Pe de altă parte soluția oferă suport pentru descompunerea și executarea automată a sarcinilor de trasare grafică în conformitate cu sistemul de trasare grafică configurat;
- Un concept nou pentru configurarea flexibilă a sistemului de resurse grafice;
- O nouă metodă la nivelul de rețea care ajută la trimiterea mesajelor și crearea obiectelor distribuite;
- Descrierea în detaliu a pașilor necesari pentru dezvoltarea unei aplicații distribuite, folosind sistemul de management al resursele hardware grafice, dezvoltat în teză;
- O soluție interactivă pentru modelarea și vizualizarea grafică de la distanță a spațiului virtual geografic;
- Contribuțiile privind îmbunătățirea performanței de trasare grafică de la distanță se bazează pe utilizarea tehnicilor de programare avansate a unităților grafice. S-a implementat o colecție modulară a algoritmilor de compresie schimbați arbitrar în funcție de contextul grafic OpenGL. Se permite astfel o combinație flexibilă a diferitelor metode în vederea obținerii unei rate de compresie cât mai mare;
- Experimentarea unui algoritm simplu de compresie și codificare folosind tehnici standard de programare, în vederea unui studiu comparativ;
- O nouă metodă de integrare a aplicațiilor grafice complexe în vederea executării acestora pe cluster-ul grafic;
- O metodă nouă pentru accesul protejat al utilizatorilor la resursele grafice alocate și utilizate eficient de către sistem;



- O nouă metodă pentru eliberarea memoriei de pe unitățile de procesare grafică la trecea de la un utilizator la altul, eliminând în acest mod vulnerabilitatea de securitate;
- Dezvoltarea unor algoritmi hibridi noi pentru optimizarea încărcării unităților de procesare grafică. Clasificarea acestor algoritmi;
- Studiul și experimentarea unor tehnici de scalabilitate a arhitecturii distribuite pe diferite configurații hardware.

Autorul a efectuat în anul 2011 un stagiul de mobilitate în Olanda pe parcursul a 6 luni. În acest stadiu, autorul tezei a utilizat, prin intermediul Free University din Amsterdam, infrastructura distribuită bazată pe super-computerele performante din rețeaua de cercetare olandeză, unde a experimentat și evaluat la scară largă propria soluție de arhitectură distribuită performantă pentru modelarea, procesarea și vizualizarea datelor spațiale.

Autorul dovedește prin lucrarea sa, maturitate științifică într-un domeniu și o temă de strictă actualitate. Sunt elaborate soluții științifice și tehnice noi și originale, urmate de experimente pentru demonstrarea și evaluarea performanței arhitecturii distribuite și algoritmilor propuși în această teză.

Concluzii

În lucrare au fost tratate teme complexe de interes real și actual, au fost propuse soluții noi și s-au obținut rezultate teoretice și implementări practice. Activitatea de cercetare în domeniul abordat de această teză poate fi continuată atât prin extinderea metodelor și abordărilor propuse cât și prin completarea acestora cu metode noi. Rezultatele teoretice și experimentale ale cercetărilor dezvoltate în prezenta teză de doctorat deschid noi orizonturi de cercetare în domeniul arhitecturilor distribuite.

Lucrările științifice publicate sunt o argumentare certă a valorii tezei și o validare a rezultatelor activității de cercetare în domeniul arhitecturilor distribuite.