НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Акимишин Орест Ігорович

УДК 004.932; 004.04

Методи та засоби зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії

05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів-2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України

|  |  |
| --- | --- |
| Науковий керівник - | доктор технічних наук, професор  Мельник Анатолій Олексійович,  Національний університет  “Львівська політехніка”,  завідувач кафедри електронних обчислювальних машин |
| Офіційні опоненти - | доктор технічних наук, професор  Русин Богдан Павлович,  Фізико-механічний інститут  імені Г.В. Карпенка НАН України,  завідувач відділу методів і систем обробки, аналізу та ідентифікації зображень  доктор технічних наук, професор  Самотий Володимир Васильович,  Вища Школи Бізнесу в Домброві Гурнічій  Міністерства освіти і науки Польщі,  професор кафедри інформаційних технологій |

Захист відбудеться “ 11 ” липня 2008 р. о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С. Бандери,

12) З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, Львів, вул. Професорська,

1) Автореферат розісланий “ 10 ” червня 2008 р.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, д. т. н., проф. |  | Я.Т. Луцик |

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливим завданням у високотехнологічних галузях промисловості, зокрема авіаційній, космічній, атомній, машинобудуванні тощо є неруйнівний контроль та дефектоскопія. Дистанційне знаходження дефектів (порожнин, тріщин, неоднорідностей матеріалів) забезпечують методи, що ґрунтуються на комп’ютерній томографії. У неруйнівному контролі вони дозволяють визначити розміри, форму, місцеположення дефектів у суцільних середовищах та конструкційних матеріалах.

Із розвитком технології комп’ютерної томографії актуальною стає задача обробки об'ємних зображень, зокрема виділення та опис об’єктів, класифікація об’єктів, сегментація зображень. Для подання тривимірних об’єктів комп’ютерної томографії застосовується опис їхніх поверхонь тріангуляційними сітками. Як правило, такі описи забезпечують заданий рівень деталізації, проте часто містять мільйони трикутників, що для подання багатьох об’єктів є надлишковими.

За останні кілька років значно зросла роздільна здатність промислових комп’ютерних томографів, що, в свою чергу, зумовило стрімке збільшення кількості даних у вихідних тривимірних томограмах. При відтворенні об’єктів із воксельних зрізів (сканів) реальні моделі містять велику кількість даних. У зв’язку з цим виникають дві основні проблеми:

обробка моделей, об’єми даних для представлення яких не поміщаються в основній пам’яті комп’ютера, що суттєво сповільнює їх обробку;

забезпечення швидкого відображення моделі тривимірного об’єкту на дисплеї комп’ютера;

Друга проблема є складнішою, оскільки в багатьох випадках є вимога роботи в реальному масштабі часу. Тому актуальною є задача зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів перед їх обробкою та візуалізацією.

Крім того, час, за який необхідно забезпечити зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів, є обмежений специфікою використання комп’ютерного томографа. Незважаючи на стрімке зростання характеристик універсальної обчислювальної техніки, їх можливостей замало для розв’язання цієї задачі за прийнятний час. Тому актуальною є задача розроблення спеціалізованих прискорювачів зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Представлені в дисертації дослідження виконувалися згідно з планом наукових досліджень, що проводились кафедрою електронних обчислювальних машин Національного університету "Львівська політехніка" в рамках держбюджетної теми ДБ-АВАГ (номер держреєстрації 0104U002284)"Конфігуровані вимірювально-обчислювальні мережі інтелектуальних автономних агентів для вирішення задач моніторингу навколишнього середовища" 2004-2006 рр. та Державної програми "Інформаційні та телекомунікаційні технології в освіті і науці" на 2006-2010 роки (номер 0107U009397)"Розробка структури львівського ресурсно-операційного Grid центру та його ресурсів" №1 ІТ506-2007).

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є розроблення нових методів та спеціалізованих обчислювальних пристроїв зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії. Реалізація мети передбачає розв’язання таких завдань:

проаналізувати відомі методи зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів у тривимірному просторі та структури даних для представлення тривимірних об’єктів комп’ютерної томографії в пам'яті комп'ютера;

розробити методи обчислення відхилення між тріангуляційними сітками для забезпечення зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів, відтворених за даними комп’ютерної томографії, в межах заданого відхилення;

на основі запропонованих методів розробити програмне забезпечення для зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії та дослідити характеристики його роботи на реальних об'ємних зображеннях;

розробити алгоритми та структури пристроїв для виконання базових операцій зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об'єктів комп’ютерної томографії;

розробити апаратно-орієнтований метод зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів, а також для пришвидшення обробки даних розробити метод розбиття вхідних даних на окремі елементи опрацювання;

розробити базову структуру та моделі спеціалізованих обчислювальних пристроїв для зменшення обсягів даних та виконати їх синтез, використовуючи засоби автоматизованого проектування комп’ютерних систем.

Об’єкт дослідження: подання тривимірних об’єктів комп’ютерної томографії.

Предмет дослідження: методи та комп’ютерні засоби зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії.

Методи дослідження: У роботі використано методи аналітичної геометрії та обчислювальної математики, що дозволило синтезувати алгоритми обчислення геометричних функцій у тривимірному просторі та методи проектування комп’ютерних пристроїв, що дозволило синтезувати структури апаратних прискорювачів на основі розроблених у роботі методів. Для перевірки працездатності отриманих моделей та структур пристроїв, а також висвітлення отриманих результатів використано експериментальні дані і методи математичного та імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

Запропоновано метод зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії, що, на відміну від відомих, базується на використанні квадрату відстані від вершини до площини та суми квадратів відстаней від вершини до множини інцидентних площин. Це дозволило в 1,2 рази зменшити обсяги даних об’єктів порівняно із відомими методами.

Розроблено апаратно-орієнтовані алгоритми зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів, на основі яких побудовано відповідні моделі обчислювальних структур, що базуються на представленні алгоритму графом, та досліджено їхні характеристики. Це дало можливість розробити базову структуру пристроїв зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії.

Набув подальшого розвитку метод розбиття тріангуляційних сіток на окремі елементи, в частині розділення вхідних даних та незалежним виконанням операцій над цими даними, що дозволило пришвидшити обробку даних, шляхом їх конвеєрної обробки.

На підставі запропонованих у роботі методів розроблено базову структуру та принципи функціонування спеціалізованих апаратних прискорювачів для зменшення обсягів даних тріангуляційного опису тривимірних об’єктів комп’ютерної томографії, що дає можливість пришвидшити процедуру зменшення обсягів даних шляхом її апаратного виконання.

Практичне значення отриманих результатів. Використання розробленої моделі зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів, відтворених за даними комп’ютерної томографії, в складі математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення рентгенівського комп’ютерного томографа дозволяє зменшити об’єми даних для представлення тривимірних об’єктів на 50-90% залежно від геометричної форми об’єктів.

розроблена та досліджена VHDL-модель спеціалізованого апаратного прискорювача зменшення обсягів даних тріангуляційного опису тривимірних об’єктів дозволяє реалізацію на її основі спеціалізованих пристроїв зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії.

отримані в дисертаційній роботі наукові результати реалізовано у вигляді програмного забезпечення, яке використовується для зменшення обсягів даних тріангуляційного опису тривимірних об’єктів, відтворених за даними комп’ютерної томографії. Також результати роботи можуть бути застосовані для зменшення обсягів даних тріангуляційних моделей рельєфів, моделей, отриманих іншими засобами об'ємного сканування, зокрема лазерними сканерами, конвертування форматів даних при поданні тривимірних об’єктів та їх обробки комп’ютерними засобами.

Використання результатів. Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено при розробці системи автоматизованого пошуку дефектів у суцільних середовищах та конструкційних матеріалах за даними рентгенівської комп’ютерної томографії, що виконана на науково-виробничому підприємстві "Інтрон", а також при виконанні держбюджетних тем на кафедрі електронних обчислювальних машин Національного університету "Львівська політехніка";

Практичну цінність одержаних результатів підтверджують акти впровадження, отримані у Національному університеті "Львівська політехніка" та НВП "Інтрон".

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, висновки і дослідження, які представлено до захисту, одержані автором особисто. Роботи [3, 6, 7, 9, 10] опубліковані самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, автору належать: розробка загальної стратегії зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів [1], розробка та реалізація модуля оптимізації тривимірних моделей об’єктів у складі системи пошуку дефектів за даними комп’ютерної томографії [4, 5], розробка методу обчислення відхилення для контролю якості вихідного тріангуляційного опису об’єктів [2, 8].

Апробація результатів дисертації. Наукові та практичні результати роботи доповідались та обговорювались на:

І, ІІ Міжнародних конференціях молодих науковців "Комп’ютерні системи та інженерія" (м. Львів, 2006-2007р);

ІІІ International conference "Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application" ACSN-2007 (Lviv, 2007);

V Міжнародній науково-практичній конференції "Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів" КСАВП-2007 (м. Хмельницький, 2007);

ІІІ Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" СПРТП-2007 (м. Вінниця, 2007);

І, ІІ міжвузівських науково-технічних конференціях науково-педагогічних працівників "Проблеми та перспективи розвитку економіки і підприємництва та комп’ютерних технологій в Україні" (м. Львів, 2006-2007р).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 10 наукових праць, в тому числі 4 статті у фахових наукових виданнях із переліку, затвердженого ВАК України.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, викладених на 124 сторінках друкованого тексту, списку використаних джерел (106 найменувань). Робота містить 69 рисунків, 9 таблиць та 4 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, показано зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження та апробацію результатів роботи.

У першому розділі "Аналіз та проблемні задачі зменшення обсягів даних при поданні об'єктів комп’ютерній томографії тріангуляційними сітками" проведено огляд та аналіз галузей застосування систем комп’ютерної томографії, обґрунтовано необхідність розв'язку прикладних задач, пов’язаних із специфікою використання систем комп’ютерної томографії, зокрема, задачу пошуку дефектів у суцільних середовищах та конструкційних матеріалах. Визначено, що для сегментації зображень комп’ютерної томографії, а також їх підтримки САПР, оптимальним способом подання тривимірних об’єктів є тріангуляційні сітки, які дозволяють описувати складні тривимірні поверхні з заданою точністю; мають простий математичний апарат та підтримку їх візуалізації апаратними засобами відеосистеми комп’ютера. Для виділення об’єктів на основі зображень комп’ютерної томографії та опису їх поверхонь тріангуляційними сітками на практиці виконується така послідовність дій (рис.1):

детектування поверхонь – виділення країв об’єктів на томограмах;

сегментація та опис поверхонь – виділення об’єктів та опис їх поверхонь тріангуляційними сітками;

На цьому етапі реальні моделі об’єктів містять велику кількість даних у їх описі, внаслідок чого виникають проблеми, пов’язані з обробкою моделей, обсяги даних для представлення яких перевищують обсяг основної пам’яті комп’ютера, що суттєво сповільнює їх обробку та забезпечення швидкого відображення об’єктів на дисплеї комп’ютера.

Крім того, первинний опис об’єктів є надлишковим, оскільки незалежно від форми об’єктів їх поверхні описуються рівномірною сіткою трикутників. Тому доцільним є зменшення (оптимізація) опису поверхонь – зменшення кількості елементів тріангуляції, що описують поверхні об’єктів так, як показано на рис.1.

Також у розділі проведено аналіз відомих методів зменшення обсягів даних опису тривимірних об’єктів, на основі якого встановлено:

процедура зменшення обсягів даних виконується або в межах наперед заданої кількості трикутників, або в межах заданого відхилення;

залежно від галузі застосування, критичним є час, що затрачається на виконання зменшення обсягів даних, чи збереження максимально можливої якості вихідної моделі;

в деяких випадках важливу роль відіграють атрибути моделі (колір, текстура), коли в інших випадках ними нехтують.

Більшість відомих методів орієнтовані на обробку зображень для комп’ютерної графіки, забезпечують зменшення обсягів даних у межах наперед заданої кількості трикутників та не гарантують повного збереження форми тривимірних об’єктів. Це є їхніми основними недоліками при застосуванні в автоматизованому відтворенні об’єктів за даним комп’ютерної томографії. Тому є необхідність розробки методів зменшення обсягів даних, що забезпечують збереження форми об’єктів в межах заданого відхилення.

У другому розділі "Розробка методу зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії" на основі особливостей подання об’єктів комп’ютерної томографії запропоновано метод зменшення обсягів даних, що забезпечує збереження форми об’єктів у межах заданого допустимого відхилення. Задачу зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів запропоновано подати таким чином.

Маючи початкову модель об’єкту М, задану тріангуляційною сіткою Т0, що містить N точок, отримати апроксимацію моделі М', тріангуляційною сіткою Тn, таку що:

вона має відхилення d від М не більше заданого значення ε

d(M, M') ≤ ε;

тріангуляційна сітка Тn має мінімальну кількість вузлів (точок) n,

n = min n(Ti).



Рис. 2. Графічне представлення

відхилення в тривимірному просторі

Відхиленням у тривимірному просторі для вершини тріангуляції vi, яка є кандидатом на видалення з моделі, прийнято відстань від цієї вершини до площини Pavg – апроксимуючої площини для точок, що лежать в околі vi (рис.2). При оцінці можливості видалення вершини з тріангуляції виконується перевірка рівності d ≤ ε, де d – відхилення, що виникає внаслідок видалення vi, та дорівнює відстані від точки до площини, ε – задане значення допустимого відхилення. Якщо ця рівність виконується, то вершина видаляється разом із суміжними їй трикутниками.

Для реалізації описаного методу запропоновано виконати таку послідовність кроків:

Обчислити одиничну нормаль апроксимуючої площини

, (1)



де - зважені нормалі до площин, інцидентних вершині vi трикутників, - абсолютна величина вектора .



Обчислити координати точки апроксимуючої площини

, (2)



де xi, yi, zi, - координати точок в околі, точки vi.

Обчислити відстань від вершини vi до апроксимуючої площини

. (3)



Для перевірки працездатності запропонованого методу розроблено програмне забезпечення зменшення обсягів даних та досліджено його роботу на тестових зображеннях. На рис.3 подано приклад зменшення обсягів даних опису моделі правильного куба (рис.3. а), що містить 56 вершин та 108 трикутників. Модель куба обрано для наочного сприймання одержаних результатів. Використавши запропонований метод, отримано модель куба, що містить 30 вершин та 56 трикутників (рис.3. б).

Рис.3. Зменшення обсягів даних опису моделі правильного куба.

На ребрах куба (рис.3. б) позначено вершини, що є надлишковими для його представлення. Збільшення значення допустимого відхилення зумовлює спотворення форми куба (рис.3. в). Для видалення надлишкових вершин запропоновано використати суму квадратів відстаней від вершини до множини інцидентних їй площин:

на основі рівняння площини Ax+By+Cz+D=0, квадрат відстані від вершини v [xv,yv,zv] до цієї площини визначається як:

dist2(v) =(Axv+Byv+Czv+D) 2; (4)

парі вершин (v1, v2), що утворюють ребро тріангуляційної сітки, поставлено у відповідність множину площин, інцидентних обом вершинам трикутників. Тоді сума квадратів відстаней від вершини v до цієї множини площин дорівнює:

; (5)



відстань від вершини до відповідної їй множини суміжних площин дорівнює нулю:

, (6)



оскільки вершина належить кожній з цих площин. Використавши вирази (5), (6) та підставивши координати вершини v1, отримано:

. (7)



Рівність (7) виконується тоді і тільки тоді, коли інцидентні вершині v1 площини співпадають з площинами, інцидентними вершині v2. В цьому випадку вершина v2 може бути видалена з моделі. Якщо рівність (7) не виконується для вершини v1, то перевіряється її виконання для вершини v2. Якщо рівність (7) не виконується ні для вершини v1, ні для v2, то жодна з вершин v1, v2 не може бути видалена з моделі. Результат роботи методу наведено на рис.3. г. Отримана модель куба містить 8 вершин та 12 трикутників, що є мінімальною кількістю елементів тріангуляції для подання куба та доводить ефективність розробленого методу.

Також у розділі обґрунтовано вибір типу локальної модифікації для зменшення обсягів даних та структури даних для представлення об’єктів у пам'яті комп’ютера. Проведено дослідження та порівняння розробленого методу з відомими аналогами за такими параметрами: числова оцінка відхилення (рис.4); візуальна оцінка відхилення; ефективність зменшення обсягів даних при нульовому допустимому відхиленні; час виконання. Як аналоги, використано два методи – метод прорідження тріангуляційних моделей (ПТ) (графік 1) та метод зменшення обсягів даних на основі квадратичної метрики похибок (КМП) (графік 2). На рис.4 видно, що середнє відхилення, що виникає при зменшенні обсягів даних розробленим методом, (графік 3) є суттєво меншим, ніж для методу ПТ, та майже рівним відхиленню для методу КМП.

Наступним кроком виконано зменшення обсягів даних об’єктів до заданої кількості трикутників і виконано візуалізацію початкової (рис.5. а) та вихідних моделей на дисплеї комп’ютера.

Це дало змогу візуально оцінити якість зменшення обсягів даних. При порівнянні отриманих моделей зроблено висновки: модель найгіршої якості отримана методом ПТ (рис.5. б), а між моделями, отриманими методом КМП (рис.5. в) та розробленим методом (рис.5. г), важко знайти візуальні відмінності, щоб їх оцінити.

Рис.5. Візуалізація об’єктів до та після зменшення обсягів даних їх опису

Оскільки метод КМП не забезпечує зменшення обсягів даних у межах заданого відхилення, для оцінки ефективності розробленого методу при нульовому відхиленні, проведено його порівняння із методом ПТ. Середнє значення ефективності для тривимірних об’єктів різної геометричної форми, отримане розробленим методом, становить 79%, що є на 16% вищим від методу ПТ.

Для визначення швидкодії обробки тривимірних об'єктів визначено час роботи кожного із методів при зменшенні обсягів даних об’єктів до однакової кількості трикутників.

Таблиця 1. Час обробки об’єктів

|  |  |
| --- | --- |
| Метод зменшення даних | Час виконання, сек. |
| Прорідження тріангуляції | 134,332 |
| Квадратична метрика похибок | 326,078 |
| Розроблений метод | 174,093 |

Аналіз отриманих результатів свідчить, що розроблений метод забезпечує вищу ефективність зменшення обсягів даних при нульовому рівні допустимого відхилення та дозволяє генерувати спрощені моделі об’єктів, обсяги даних для представлення яких на 15-20% менші порівняно із методом ПТ. Час, що затрачається на зменшення обсягів даних розробленим методом, в 1,9 рази меншим порівняно із методом, що базується на квадратичній метриці похибок та в 1,3 більшим порівняно із методом прорідження тріангуляції.

У третьому розділі "Розробка алгоритмів та структур пристроїв зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії" на підставі аналізу методів зменшення обсягів даних розроблено графи алгоритмів виконання основних обчислювальних операцій для цих методів. Запропоновано структури пристроїв зменшення обсягів даних та досліджено їхні характеристики.

При реалізації більшості відомих методів використовуються такі операції: обчислення нормалі до площини, обчислення коефіцієнтів для запису рівняння площини та обчислення відстані від вершини до площини.

Для обчислення нормалі до площини, яка задана трьома точками v1, v2 та v3, необхідно знайти два вектори а і b:

(8)



, (9)



та обчислити їх векторний добуток:

. (10)



Аналітичне представлення операції обчислення нормалі запропоновано подати у вигляді графу, що наведений на Рис.6.

Відстань від вершини до площини можна записати як:

, (11)



де – ненормована нормаль, dist – відстань від точки до площини.



Щоб уникнути операції ділення в лівій частині виразу (11), праву та ліву його частини помножено на :



. (12)



Рис.6. Граф виконання алгоритму обчислення нормалі до площини

Щоб уникнути операції добування кореня квадратного з виразу , праву та ліву частини (12) піднесено до квадрату:



(13)



Згідно з (13) для обчислення квадрату відстані від вершини до площини необхідним є визначення 10 коефіцієнтів, граф алгоритму якого наведено на рис.7.

Обчислення квадрату відстані від вершини до площини виконується на основі (13), тобто підстановки координат заданої вершини в рівняння площини. Граф розробленого алгоритму зображено на рис.8. Вхідними даними є координати вершини (x,y,z) та коефіцієнти {a2, ab, ac, ad, b2, bc, bd, c2, cd, d2}. Для виконання алгоритму використовуються операції множення, додавання та зсув на один розряд вліво, які позначені '\*', '+' та '<<' відповідно. Результатом є квадрат відстані від заданої вершини до площини, помножений на значення (a2+b2+c2).

Відомо, що одним із оптимальних підходів побудови цифрових пристроїв є їх реалізація на базі надвеликих інтегральних схем (НВІС), що дозволяє проектувати комп’ютерні засоби у вигляді окремих вузлів та забезпечувати їх взаємодію з обчислювальним середовищем по заданому інтерфейсу.

Рис.8. Граф алгоритму обчислення квадрату відстані від вершини до площини

Відповідно до вказаного підходу запропоновано структуру пристроїв для зменшення обсягів даних (рис.9), що складається з таких основних вузлів: інтерфейс вводу/виводу (для взаємодії з обчислювальним середовищем), програмований процесор (для керування операційним пристроєм та внутрішньою пам’яттю даних), операційний пристрій (вузол обчислення відхилення, що виникає внаслідок видалення елемента тріангуляції).

Аналіз розроблених пристроїв показав, що на продуктивність обробки даних, найбільший вплив має затримка вузла обчислення відхилення. Крім того, зв’язність суміжних елементів тріангуляції зумовлює затримку подання на вхід пристрою нових даних доти, доки не завершено опрацювання поточного блоку даних. Встановлено, що для пришвидшення обробки тріангуляції доцільними є модифікація вхідних даних для забезпечення їх незалежної обробки та реалізація потокових апаратних прискорювачів зменшення обсягів даних.

Рис.9. Структура пристроїв зменшення обсягів даних для реалізації на НВІС

У четвертому розділі "Розробка базової структури апаратних прискорювачів зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії" розроблено метод розбиття тріангуляційних сіток на окремі елементи опрацювання та запропоновано базову структуру апаратних прискорювачів зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів. Елементи тріангуляційних сіток, якими описуються поверхні об’єктів, є взаємозалежними, оскільки виконання локальної модифікації над елементом тріангуляції зумовлює зміну геометрії в його околі (рис.10).

На рис.10 виділено вершини тріангуляції, в околі яких змінюється геометрія початкової сітки. Для подальшої обробки виділених вершин необхідно модифікувати список їх суміжних трикутників та перерахувати ціну їх видалення з моделі.

Для забезпечення незалежної обробки елементів тріангуляції розроблено метод розбиття вхідних даних на окремі елементи. Одиницею розбиття прийнято ребро тріангуляції із суміжними йому трикутниками. Суть методу полягає у вибірці окремих елементів вхідної сітки для їх подальшої обробки (рис.11). Виділені на рис.11 області тріангуляції є незалежними між собою, тому що зміна геометрії області 1 не спричиняє модифікацію геометрії області 2, і навпаки. Для виділення окремих елементів опрацювання запропоновано таку послідовність кроків:

1. Помітити всі вершини вхідної послідовності, як невикористані.

2. Для кожного ребра тріангуляції виконувати:

2.1 Перевірити вершини, які утворюють ребро. Якщо вони помічені, як невикористані, то перевірити вершини в їх околі.

2.1.1 Якщо всі вершини в околі ребра є помічені, як невикористані, то утворити окремий елемент опрацювання тріангуляції та помітити вказані вершини, як використані.

2.1.2 Вершини, помічені, як використані, пропускаються.

3. Вивести список окремих елементів опрацювання.

Моделювання методу виконано на основі його програмної реалізації мовою С++. На рис.12 зображено результати виділення окремих елементів опрацювання на тестовому зображенні.

Рис.12. Виділення окремих елементів опрацювання. а – початкова модель,

б – окремі елементи опрацювання початкової тріангуляції

Потокове опрацювання отриманих блоків запропоновано виконувати наступним чином:

Крок 1. Вичитати блок даних та розмістити його у вхідній пам'яті;

Крок 2. Обчислити відхилення, що виникає внаслідок виконання локальної модифікації над текучим блоком даних;

Крок 3. Порівняти обчислене відхилення із заданою величиною допустимого відхилення;

Крок 4. Якщо обчислене відхилення менше або дорівнює величині заданого відхилення, то виконати локальну модифікацію над текучим блоком даних;

Крок 5. Вивести опрацьований блок даних у вихідну пам'ять.

Базову структуру апаратних прискорювачів зменшення обсягів даних, що забезпечує потокову обробку даних, з можливістю розділення кроків алгоритму конвеєрними регістрами наведено на рис.13.

Рис.13. Базова структура апаратних прискорювачів зменшення обсягів даних

Також у розділі розроблено структури вузлів апаратних прискорювачів зменшення обсягів даних, зокрема вузла обчислення відхилення (ОВ), блоків вхідної і вихідної пам'яті та вузла виконання локальних модифікацій (ЛМ).

Задачами вузла ОВ є обчислення відхилення, яке виникне внаслідок виконання локальної модифікації, порівняння його із значенням заданого відхилення та формування ознак про можливість виконання ЛМ над біжучим фрагментом тріангуляції. Основними елементами вузла ОВ (рис.14) є обчислення нормалі до площини, обчислення коефіцієнтів для знаходження квадрату відстані від вершини до площини та обчислення відстані від вершини до площини.

При такій реалізації вузол ОВ має 6 входів та 2 виходи. На входи вузла подаються координати вершин, що задають суміжні ребру, над яким виконується локальна модифікація, трикутники, координати вершин, що утворюють це ребро та задане значення допустимого відхилення. На виході формуються ознаки, виконання локальної модифікації над опрацьованим блоком даних.

Вузол ОВ є конвеєрним, оскільки потік даних розбитий регістрами на 5 ярусів. Частота роботи вузла ОВ визначається, як:

f=1/Tmax, (16)

де Tmax – максимальна затримка спрацювання внутрішніх елементів вузла ОВ.

Аналіз розроблених графів алгоритмів виконання базових операцій свідчить, що максимальну затримку обробки даних має вузол обчислення квадрату відстані від вершини до площини. На основі (16) частота роботи вузла ОВ буде визначатися часом обчислення квадрату відстані від вершини до площини.

Вимогами до пам'яті є забезпечення швидкого надходження даних на всі вхідні порти ВОВ. Тому доцільно використати багатопортову пам'ять з можливістю її постійного завантаження вхідними даними. Огляд відомих типів пам'яті дозволив взяти за основу багатопортову сортувальну пам'ять та на її основі розробити структури, що є ефективними для розв’язання поставленої задачі. Інтерфейс та діаграми функціонування розробленої пам'яті наведено на рис.15. Вона має множини вхідних та вихідних портів, входи для задання із блоком даних номеру вихідного порту, по якому слід здійснити видачу цього блоку даних та номер даних у вихідному масиві. На діаграмі виділено послідовне потактове завантаження блоків даних та їх одночасну видачу по трьох вихідних портах.

Рис.15. Інтерфейс та результати моделювання роботи вхідної пам'яті

Блоком даних, над яким виконується локальна модифікація, є ребро та суміжні до нього трикутники. Залежно від відхилення, що виникає внаслідок виконання ЛМ, можливими є три варіанти виконання ЛМ, що графічно зображені на рис.16, зокрема виконання колапсу ребра (е1, е2) у вершину е1 (рис.16. а); виконання колапсу ребра (е1, е2) у вершину е2 (рис.16. в) та залишення початкового блоку даних без змін, якщо відхилення, що виникає внаслідок виконання ЛМ, перевищує задане значення (рис.16. б).

Найпростішим є випадок, зображений на рис.16. б. Для його реалізації достатньо отримати весь фрагмент даних із входу та вивести його у тій самій послідовності. Для реалізації випадків рис.16. а та рис.16. б необхідно виконати такі дії: на основі ознак, що генеруються вузлом обчислення відхилення, визначити вершину, що буде видалена з моделі, та замінити її в описі усіх суміжних з нею трикутників на протилежну. Трикутники, що є спільними для обох вершин, видалити з моделі.

Розроблені внутрішні вузли та пристрої зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії реалізовано шляхом їх опису на мові VHDL, проведено їх поведінкове моделювання та досліджено характеристики. VHDL-коди та функціональні діаграми розроблених вузлів наведено в додатках до дисертації.

## ВИСНОВКИ

Проведено огляд методів зменшення обсягів даних опису об’єктів тріангуляційними сітками, виділено їхні особливості, через які вони є неефективними для застосування в галузі неруйнівного контролю за даними комп’ютерної томографії. Обґрунтовано потреби розробки нових методів та вдосконалення існуючих шляхом збільшення ефективності їх роботи.

Розроблено метод зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії, що забезпечує збереження форми об’єктів у межах заданого відхилення. Розроблений метод забезпечує вищу ефективність зменшення обсягів даних при однаковому рівні заданого відхилення (обсяги даних для представлення спрощених моделей є на 15-20% менші порівняно з методом прорідження тріангуляції), час виконання в 1,9 раза менший порівняно з методом на основі квадратичної метрики похибок.

Розроблене програмне забезпечення, що базується на запропонованих у роботі методах, апробовано на реальних даних та використовується на практиці, як складова системи неруйнівного контролю на основі рентгенівської комп’ютерної томографії.

Встановлено, що доцільною є апаратна реалізація розробленого методу, оскільки процедура зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об'єктів, відтворених за даними комп’ютерної томографії високої роздільної здатності з використанням універсальних комп’ютерів, виконується за неприйнятний час.

Вдосконалено метод розбиття тріангуляційних сіток на окремі елементи опрацювання, що дає можливість прискорення обробки даних шляхом їх конвеєрної чи паралельної обробки. Виконано програмну реалізацію розробленого методу та перевірено його працездатність на тестових даних.

Розроблено апаратно-орієнтовані алгоритми виконання основних операцій зменшення обсягів даних, зокрема обчислення нормалі до площини, обчислення коефіцієнтів для запису рівняння площини і обчислення відстані від вершини до площини в тривимірному просторі та відповідні їм структури спеціалізованих пристроїв.

Розроблено базову структуру, принципи функціонування та VHDL-модель реконфігурованого апаратного прискорювача зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об'єктів, засновану на розроблених методах, а також проведено її функціональне моделювання. Розроблена структура дає можливість синтезу комп’ютерних пристроїв для зменшення обсягів даних, використовуючи засоби сучасних технологій.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мельник А.О., Акимишин О.І. Прорідження тріангуляційних сіток тривимірних об’єктів комп’ютерної томографії // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2006. - № 573. – С.131–137.
2. Акимишин О.І., Мороз І.В. Методика обчислення відхилення між тріангуляційними сітками для виконання контролю спрощення // Збірник наукових праць ІМПЕ НАНУ. - № 39. – Київ, 2007. – С.103–109.
3. Акимишин О.І. Алгоритми виконання базових операцій спрощення тріангуляції // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький: ХНУ, 2007. - №2, Т.2. – С.9–12.
4. А. Мельник, В. Ємець, В. Мархивка, І. Мороз., О. Акимишин. Система автоматизованого пошуку дефектів в суцільних середовищах та конструкційних матеріалах за воксельними даними комп’ютерної томографії // Науково-соціальний часопис "Технічні вісті". – Львів, 2007. – С.46–48.
5. А. Melnyk, V. Emets, V. Markhyvka, I. Moroz, O. Akymyshyn. Flaw detection according to computed tomography volume data // Proceedings of the 3-rd International conference Advanced computer systems and networks. ACSN-2007. – Lviv, 2007 – P.170–171.
6. Акимишин О.І. Обробка зображень за даними комп’ютерної томографії // Матеріали 1-ї Міжнародної конференції молодих науковців CSE-2006. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – С.44–45.
7. Акимишин О.І. Оптимізація тріангуляційного опису тривимірних моделей реальних об’єктів із заданою точністю // Збірник матеріалів міжвузівської науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників. – Львів: Ліга-Прес, 2006 – С.184–185.
8. Акимишин О.І. Виділення незалежних елементів опрацювання тріангуляційних сіток в тривимірному просторі // Матеріали ІІІ Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" СПРТП-2007. – Вінниця, 2007. – С.117–118.
9. Акимишин О.І., Мархивка В.С. Контроль допустимого відхилення для задач спрощення тріангуляції в 3-d просторі. // Збірник матеріалів ІІ міжвузівської науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників. – Львів: Ліга-Прес, 2007 – С. 206–207.
10. Акимишин О.І. Структури пристроїв спрощення тривимірних моделей об’єктів // Матеріали 2-ї Міжнародної конференції молодих науковців CSE-2007. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007. – С.74–75.

## АНОТАЦІЇ

Акимишин О.І. Методи та засоби зменшення обсягів даних тріангуляційного опису об’єктів комп’ютерної томографії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти. – Національний університет "Львівська політехніка", Львів, 2008.

Дисертація присвячена питанням зменшення обсягів даних при поданні об’єктів комп’ютерної томографії тріангуляційними сітками. Запропонований метод забезпечує зменшення обсягів даних та збереження геометричної форми об’єктів у межах заданого відхилення. Розроблено графи алгоритмів та структури пристроїв для виконання основних операцій зменшення обсягів даних. На підставі аналізу тріангуляційного опису об’єктів запропоновано метод розбиття тріангуляції на окремі елементи, що дозволило пришвидшити обробку даних та на основі запропонованого в роботі методу розробити базову структуру апаратних прискорювачів зменшення обсягів даних. Результати експериментів із використанням запропонованого методу зменшення даних показали високу ефективність на реальних зображеннях комп’ютерної томографії.

Ключові слова: комп’ютерна томографія, тріангуляційні сітки, виділення об’єктів зображень, графи алгоритмів, реконфігуровані апаратні прискорювачі.

Акимишин О.И. Методы и средства уменьшения объемов данных триангуляционного описания объектов компьютерной томографии. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. Национальный университет "Львовская политехника", Львов, 2008.

Диссертация посвящена вопросам уменьшения объемов данных для представления объектов компьютерной томографии триангуляционными сетями. Предложенный метод позволяет уменьшение объемов данных и сохранение геометрической формы объектов в пределах заданного отклонения. Разработано графы алгоритмов и структуры устройств для выполнения основных операций уменьшения объемов данных. На основании анализа триангуляционного описания объектов предложено метод разделения триангуляции на отдельные элементы, что дало возможность ускорить обработку данных и на основе предложенного в работе метода разработать базовую структуру аппаратных ускорителей уменьшения объемов данных. Результаты экспериментов с использованием предложенного метода уменьшения объемов данных показали высокую эффективность на реальных изображениях компьютерной томографии.

Ключевые слова: компьютерная томография, триангуляционные сети, выделение объектов изображений, графы алгоритмов, реконфигурируемые аппаратные ускорители.

O.I. Akymyshyn Methods and facilities of data reduction of triangular mesh description of computed tomography objects. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in technical sciences in speciality 05.13.05 – Computer systems and components. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2008.

The thesis is dedicated to task solving of reduction amount of data in computed tomography object representation. Computed tomography provides non destructive, three-dimensional characterization and visualization of features within the interior of solid objects. Typically for visualization and post-processing a computed tomography 3D objects are represented by triangular meshes, which often are too huge to be effectively processed. Moreover the object description by regular triangular mesh is redundant, because simple flat region of object surfaces are described by hundreds of thousands of triangles, when they can be represented by a few triangles without the loss of the object geometrical shape quality. Therefore the data reduction of computed tomography 3D object triangular description before their analysis and processing is a important task.

The review of known data reduction methods of triangular mesh and their comparative analysis is carried out. It has been found out that most of the methods provide the reduction of data up to the user's specified number of triangles instead of the user's defined deviation, as computed tomography objects must be represented.

The method that provides the amount of data reduction of a computed tomography object representation with a guaranteed error tolerance of the object geometrical shape has been proposed. The software based on the proposed method is developed and its efficiency on real 3D computed tomography objects is investigated. The results of the method have been compared with the state-of-the-art data reduction methods, including the Mesh Decimation method (MD) and method based on Quadric Error Metric (QEM) numerically, visually and in terms of execution times to strengthen the efficiency and quality of the method. The developed method allows 1.2 times greater reduction amount of data than the MD method with a zero deviation of object geometrical shapes, allows to generate high quality approximation of objects and it is 1.9 times faster than the QEM method.

The basic processing operations of data reduction methods, including normal computation, plane coefficients definition and vertex-plane distance computation, have been singled out and their hardware-oriented algorithms have been developed. It allows to define the structures of the computational devices for data reduction of triangular mesh representation based on the proposed methods. Based on the analysis of data processing performance it has been determined that the stream data processing is the most suitable.

The method of triangulation partitioning into separated processing elements is developed. The separated elements are independent blocks of data, when geometrical changes in one block do not require changing in the other. The proposed method is verified on test objects. It allows partitioning the input triangulation into separated blocks of data to their stream, parallel or pipeline processing. The algorithm of stream data processing based on proposed method has been developed.

The basic structures and functioning principles of the reconfigurable hardware accelerators of data reduction of object triangular representation have been developed. The VHDL-model of the accelerators has been designed and their characteristics have been examined.

The results of numerical experiments of the proposed data reduction method of computed tomography object triangle representation have shown the effectiveness of the method. The results were used in SME “Intron” for the development of the data reduction unit of the Non-Destructive Testing Software System for X-Ray 3D Computed Tomography (NDTS System) for flaw detection in solid objects according to computed tomography data. The results allow 50-90% amount of data reduction depending on object geometrical shapes.

Key words: computed tomography, triangular mesh, object detection, graph of algorithm, reconfigurable hardware accelerators.