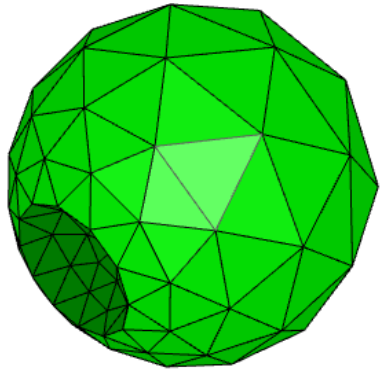
Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний університет

**С. І. Гоменюк, С. В. Чопоров,
Б. Г. М. Аль-Атамнех**

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ У ПАРАЛЕЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

Монографія



Херсон
Видавничий дім «Гельветика»
2019

УДК 004.925.8:004.942
Г641

Рекомендовано до друку Вченою радою
Запорізького національного університету
(протокол № 2 від 30.10.2018 р.)

Рецензенти:

В. М. Колодяжний – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри інформатики і прикладної математики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

С. О. Субботін – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою програмних засобів Запорізького національного технічного університету

Гоменюк С. І., Чопоров С. В., Аль-Атамнех Б. Г. Математичне
К 95 моделювання геометричних об'єктів у паралельних комп'ютерних системах: монографія. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2018. 112 с.

ISBN 978-966-916-714-9

Монографія присвячена математичному моделюванню описаних функціонально двовимірних і тривимірних геометричних областей складної форми у паралельних комп'ютерних системах. Запропоновані нові паралельні алгоритми для формалізації, побудови дискретних моделей та візуалізації геометричних областей. Описуються запропонована проблемно-орієнтована мова, що дозволяє моделювати геометричні області в паралельних системах, а також нові паралельні методи для обчислення значення неявної функції, що відповідає вихідній геометричних області. Наведено алгоритми генерації воксельних моделей для візуалізації функціонально заданих геометричних об'єктів.

Для наукових та інженерно-технічних співробітників, спеціалістів в області механіки, чисельних методів і програмного забезпечення, викладачів, аспірантів і студентів університетів.

This study is devoted to the problems of mathematical modelling of complex geometrical shapes using functional representation in parallel computing systems. New parallel algorithms have been developed for functional represented shapes evaluation in the meshing and visualization processes. A domain specific-language has been suggested for description of function represented solids in parallel computers. Parallel algorithms for automated voxel models generation have been developed.

The edition is suggested for researchers, post-graduate students and engineers who work in the areas of computer-aided engineering and numerical methods.

УДК 004.925.8:004.942

© С. І. Гоменюк, С. В. Чопоров, Б. Г. М. Аль-Атамнех, 2019
ISBN 978-966-916-714-9
© Запорізький національний університет, 2019

ЗМІСТ

Вступ..... 6

1 Огляд методів геометричного моделювання із застосуванням паралельних систем зі спільною пам'яттю 9

1.1 Типи паралельних обчислювальних систем 9

1.2 Модель паралельної машини при розробці паралельних методів 12

1.3 Паралельні методи геометричного моделювання 13
1.3.1 Паралельна техніка «Розділяй та володарюй» 13
1.3.2 Паралельна техніка «Будуй та шукай» 14
1.3.3 Паралельні техніки побудови опуклої оболонки 15
1.3.4 Паралельні техніки впорядкування та декомпозиції геометричних об'єктів 16
1.3.5 Паралельні техніки побудови обробки дискретних моделей 17

1.4 Методи математичного моделювання геометричних об'єктів 19
Висновки до розділу 1 21

2 Функціональне моделювання геометричних областей..... 23

2.1 Загальна математична модель геометричної області 23

2.2 Моделювання геометричних областей із застосуванням R-функцій.....25

2.3 Формалізація опису функціональної моделі геометричної області.....26
2.3.1 Основні символи мови RFL.....27
2.3.2 Типи даних та правила їх утворення 28
2.3.3 Вирази в мові RFL 29
2.3.4 Структура опису R-функцій на мові RFL.....30
2.3.5 Приклади опису геометричних областей із застосуванням мови RFL 31

2.3.6 Дослідження повноти і несуперечності мови RFL 34

2.4 Функціональні моделі базових геометричних примітивів..... 35
2.4.1 Двовимірні геометричні примітиви 35
2.4.2 Тривимірні геометричні примітиви 37
2.4.3 Базові перетворення координат геометричних примітивів..... 38
Висновки до розділу 2..... 42

3 Моделювання геометричних областей у паралельних системах зі спільною пам'яттю..... 43

3.1 Загальний алгоритм побудови дискретних моделей функціонально заданих геометричних областей 44

3.2 Алгоритм побудови байт-коду, що виконується для функціональної моделі, яку описано на мові RFL 51
3.2.1 Основні етапи транслятору мови RFL 51
3.2.2 Синтаксичний розбір і лексичний аналіз виразів мови RFL 53
3.2.3 Алгоритм визначення типу лексеми 55
3.2.4 Алгоритм обробки оператору присвоювання 56

3.3 Модель паралельного обчислення значення абстрактного синтаксичного дерева..... 60

3.4 Алгоритм побудови дискретної моделі геометричної області 66
Висновки до розділу 3..... 73

4 Візуалізація геометричних об'єктів у паралельних системах зі спільною пам'яттю..... 74

4.1 Обчислювальний експеримент..... 74
4.1.1 Функціональна модель кубика з трьома отворами 75
4.1.2 Циліндр з насічками 76
4.1.3 Модель тор-подібного тіла..... 78

4.2 Експериментальне дослідження паралельного алгоритму побудови воксельних моделей 81
4.2.1 Експериментальна оцінка часу побудови воксельної моделі геометричної області 81
4.2.2 Експериментальна оцінка точності побудови воксельної моделі..... 84

4.3 Програмний засіб для моделювання геометричних областей у паралельних системах.....87
Висновки до розділу 4.....89

Післямова 90

Літературні джерела 92

Додатки 109

ВСТУП

Моделювання й дослідження складних науково-технічних систем в наш час практично не виконуються без широкого застосування обчислювальної техніки, оскільки створення та аналіз комп'ютерних моделей є значно ефективнішим за дослідження реальних об'єктів (особливо, враховуючи собівартість витрачених ресурсів і часу).

Аналіз міцності, довговічності, а також експлуатаційних характеристик складних реальних технічних систем потребує автоматизації розв'язання крайових задач, що виникають, наприклад, в математичній фізиці, механіці деформівного твердого тіла, термодинаміці, електродинаміці, теорії поля тощо. Комп'ютерний аналіз таких задач неможливий без наявності дискретних моделей дво- і тривимірних геометричних областей складної форми. На сьогодні створено велику кількість різноманітних програм, що призначені для автоматизації побудови геометричних (в тому числі дискретних) моделей реальних інженерних і технічних об'єктів. Серед найбільш відомих серед них можна виділити такі: 3ds Max [43], AutoCAD [104], ArchiCAD [62], Dolphin [122], FreeCAD [128], Gmsg [133], GRUMMP [145], Netgen [164, 182], КОМПАС-3D [30] та інші [44, 45, 159]. Крім того, автоматизовані системи геометричного моделювання є складовими (препроцесорами) багатьох сучасних систем автоматизації проектування та комп'ютерного аналізу, таких, наприклад, як ANSYS [7], LS-DYNA [160], Nastran [163], Patran [170], SolidWorks [158], ЛІРА [47], МОНОМАХ [48] та інші [39].

Проблему створення геометричної моделі можна умовно поділити на дві основних задачі: а) побудову формального опису вихідної геометричної області у вигляді, прийнятному для подальшої комп'ютерної обробки; б) автоматизацію високопродуктивної побудови і візуалізації комп'ютерної моделі за раніше отриманим формальним описом. Класичні підходи до опису геометричних моделей (каркасне, граничне та твердотільне

геометричне моделювання) не завжди дають можливість зручно описувати моделі складних геометричних областей [15, 105, 106]. Тому останнім часом все більшої популярності набувають некласичні підходи до формального опису геометричних моделей, серед яких одним з найбільш перспективних є функціональний підхід, який базується на застосуванні математичного апарату неявних функцій Рвачова В. Л., які приймають невід'ємні значення усередині геометричної області і від'ємні – за її межами [20, 21, 33–38, 49–56, 59, 169, 183]. Такий підхід є дуже ефективним за рахунок можливості використання всієї потужності математичного апарату для опису геометричних областей довільної форми, але за рахунок неявності функціональної моделі, навіть візуалізація геометричних моделей є нетривіальної і тривалою у часі задачею [13, 20–22, 42, 63–71, 76–80].

Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності розрахунків неявних функцій та побудови заданих із їх допомогою геометричних моделей є застосування паралельних обчислень [31, 32, 80–83, 85–94]. Таким чином, автоматизація побудови моделей геометричних областей складної форми із застосуванням функціонального підходу і паралельних методів розрахунку є досить складною і актуальною в наш час задачею.

У першому розділі монографії проведено аналіз сучасного стану проблеми геометричного моделювання складних технічних систем із застосуванням паралельних обчислювальних систем зі спільною пам'яттю. А розділі наведено короткий огляд і класифікацію найбільш поширених методів геометричного моделювання дво- і тривимірних геометричних областей складної форми. Виконано аналіз їх основних характеристик, наявні переваги та недоліки, сфера застосування, обмеження тощо. Також було розглянуто основні тенденції їх розвитку.

У другому розділі наведено опис запропонованої функціональної моделі геометричної області, що представлена у вигляді неявної функції, яка приймає невід'ємні значення всередині області і від'ємні – за її межами. Розглянуто основні підходи до побудови таких математичних моделей (у тому числі за допомогою R-функцій). Оскільки використання комп'ютерної техніки для генерації моделей геометричних областей передбачає наявність

формальних засобів їх опису, то для автоматизації цього процесу, в першу чергу, необхідна розробка спеціалізованих проблемно-орієнтованих мов DSL [110], які дозволяють однозначно описувати функціональні моделі будь-якої складності. В другому розділі наведено формальний опис з використанням розширеної нотації Бекуса-Наура [192] розробленої мови RFL [2], яка дозволяє описувати моделі дво- і тривимірних геометричних областей довільної форми з підтримкою в подальшому паралельної обробки. Крім того, в розділі наведені найбільш поширені функціональні моделі найбільш вживаних на практиці геометричних примітивів, таких як стандартні плоскі та просторові фігури, а також базові операції по їх трансформації: поворот, зсув, масштабування, поступальний рух тощо.

У третьому розділі наводяться основні запропоновані алгоритми моделювання геометричних областей у паралельних системах зі спільною пам'яттю. В першу чергу для автоматизації обробки функціональних моделей геометричних областей, які описані із застосуванням мови RFL, необхідно розробити транслятор цієї мови у внутрішній байт-код, що виконується. В третьому розділі наведені алгоритми побудови асинхронного синтаксичного дерева AST [165], яке є ефективним способом вирішення проблеми автоматизації трансляції формального опису геометричної моделі в комп'ютерних системах зі спільною пам'яттю для обчислення математичних виразів, що описують геометричний об'єкт, з їх паралельним розбором при визначенні значення функції у точці. Також в розділі наведено опис запропонованого паралельного алгоритму побудови дискретної воксельної моделі геометричної області, яку описано функціональною моделлю на мові RFL.

У четвертому розділі наведено опис програмної реалізації інтелектуального програмного засобу QVoxel аналітичного конструювання геометричних моделей дво- і тривимірних областей складної форми з використанням паралельних обчислень. Наведено приклади її роботи для побудови дискретних воксельних моделей, описано виконані обчислювальні експерименти з оцінки швидкодії та точності запропонованих алгоритмів.