

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОМАНЮК ОЛЕКСАНДР НИКИФОРОВИЧ

УДК 004.925

**ВИСОКОПРОДУКТИВНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КІНЦЕВОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ
ТРИВИМІРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ У СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ**

Спеціальність 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Вінниця – 2009

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Пстух Анатолій Михайлович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри програмного забезпечення.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України в галузі
науки і техніки
Башков Євген Олександрович,
Донецький національний технічний університет,
проректор з наукової роботи,
завідувач кафедри прикладної математики та
інформатики;

доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Додонов Олександр Георгійович,
Інститут проблем реєстрації інформації НАН
України, м. Київ,
заступник директора з наукової роботи;

доктор технічних наук, професор
Квстний Роман Наумович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри автоматичної та інформаційно-
вимірної техніки.

Захист відбудеться ”___” _____ 2009 р. о _____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГУК.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГУК.

Автореферат розісланий ”___” _____ 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

У сучасних умовах комп'ютерна графіка стрімко розвивається, оскільки забезпечує високий рівень інформативності, відтворює найвагоміші аспекти процесу або явища. Найбільшу реалістичність забезпечує тривимірна графіка, основана на роботі з просторовими моделями об'єктів, що обумовлює її широке використання в багатьох галузях, пов'язаних з комп'ютерним моделюванням та проектуванням.

Значний внесок у розвиток теоретичних основ комп'ютерної графіки та обробки зображень зробили вчені України та країн СНГ – Авербух В. Л., Башков Є. О., Баяковський Ю. М., Боюн В. П., Васюхін М. І., Вельтмандер П. В., Вяткін С.І., Галактіонов В. А., Голованов Н. Н., Гусятін В. М., Долговесов Б. С., Калюттов А. В., Косніков Ю.Н., Михайленко В. Є., Петух А. М., Палташев Т. Т, Путятін Є.П, Русін Б.П, Тихоміров Ю. В., Шикін Є. В. Шлезінгер М.І. Серед науковців далекого зарубіжжя найвідомішими є роботи Бішопа Г., Бліна Д., Гілого Г., Гуро Г., Дафа Т., Роджерса Д., Каутса Ж., Хаста А., Фоли В., Фонга Б., Форсайта Д. та інших.

Значна обчислювальна складність процедур роботи з моделями тривимірних об'єктів та візуалізації сцен вимагає їх апаратної підтримки в системах комп'ютерної графіки. Загалом, на світовому ринку вказаних засобів щорічний обсяг продажів становить 250 млрд. доларів. За третій квартал 2008 року було реалізовано 111,3 млн. графічних процесорів. Спостерігається тенденція широкого використання засобів комп'ютерної графіки в мобільних пристроях. Протягом першої половини 2008 р. в Україні обсяг продажів мобільних систем кінцевим споживачам становив майже 600 тис. одиниць. Наведені дані свідчать про зростаючу роль комп'ютерної графіки та значну потребу у її засобах.

Формування зображень тривимірних сцен є багатоетапним обчислювальним процесом із використанням складних моделей і методів. Етап кінцевої візуалізації (рендеринг) є найтрудомісткішим етапом графічного конвеєра, оскільки для кожної точки сцени залежно від розташування джерел світла та спостерігача, оптичних властивостей поверхонь, характеристик джерел світла та кривизни поверхні визначаються інтенсивності складових кольору точок зображення та їх екранні координати. Процес візуалізації складних сцен із високою деталізацією поверхонь об'єктів може тривати десятки годин.

На сучасному етапі розвитку тривимірної графіки гостро ставиться питання про формування динамічних графічних зображень у реальному часі та в інтерактивному режимі, коли передбачається, що траєкторії руху об'єктів не задані заздалегідь, а визначаються діями користувача у процесі взаємодії із системою. Для таких режимів висуваються жорсткі вимоги до часу формування графічних сцен.

Підвищення реалістичності відтворення графічних сцен передбачає використання більш складних моделей об'єктів реального світу та методів рендерингу, збільшення рівня деталізації для коректної апроксимації поверхонь об'єктів реального світу, причому темпи зростання геометричної складності

тривимірних зображень перевищують темпи зростання продуктивності графічних засобів. Недостатня продуктивність графічних систем є також завадою до моделювання у сценах фізичних процесів і збільшення кількості динамічних об'єктів.

Сьогодні підвищення швидкодії формування графічних зображень досягається, в основному, за рахунок удосконалення елементної бази та технології виготовлення мікросхем, збільшення кількості процесорних блоків та їх тактової частоти. Проте приріст продуктивності графічних засобів за рахунок цих чинників суттєво відстає від зростання складності задач багатьох галузей застосування тривимірної графіки.

Мікропрограмний характер формування графічних зображень, притаманний піксельним процесорам сучасних відеокарт, обмежує їх продуктивність через послідовне виконання інструкцій. У зв'язку з цим нагальним є спрощення відповідних процедур із забезпеченням візуальної ідентичності зображень.

Особливо гостро проблема підвищення продуктивності стоїть для інтегрованих графічних ядер мобільних пристроїв, оскільки використання в них зовнішнього паралелізму та збільшення кількості піксельних процесорів є проблематичним через малі габаритні розміри, обмеження споживаної потужності та тепловидалення. Навіть найпродуктивніші інтегровані відеокarti не забезпечують комфортної для користувача швидкості формування кадрів зображення для сучасних ігор. Це має місце і для дискретних відеокарт у режимі високої якості. На думку фахівців фірми Intel, до 2010 року необхідно підвищення продуктивності інтегрованих графічних ядер на порядок, чого не можна досягти виключно технологічним шляхом.

Оскільки етап кінцевої візуалізації є найтрудомісткішим етапом формування тривимірних зображень і становить 60-80 % від загального обсягу обчислень, доцільним є розробка методів і засобів, які б забезпечили суттєве спрощення процедур рендерингу як на програмному, так і апаратному рівнях, що дасть змогу досягти потрібної динаміки реалістичних зображень у реальному часі та значно скоротити тривалість візуалізації складних проектів.

Підсумовуючи вищенаведене, прикладна науково-технічна проблема формулюється так: низька продуктивність засобів формування реалістичних тривимірних зображень, зокрема, динамічних, у зв'язку зі значною обчислювальною складністю етапів кінцевої візуалізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалися при реалізації ряду проектів: НДР “Розробка високоефективних методів формування та перетворення зображень” (номер державної реєстрації 0197U013140) відповідно до координаційного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти України (наказ № 37 від 13.02.1997 р.) за напрямком – “Перспективні інформаційні технології, прилади комплексної автоматизації, системи зв'язку”; НДР 06.04.04/094 “Розробка конкурентоспроможних високопродуктивних засобів дисплейної техніки на основі екологічно чистої ЕПТ підвищеної надійності та довговічності для систем відображення вимірювальної інформації” відповідно до Державної науково-технічної програми 6.4.4. “Відкриті

інформаційно-вимірювальні системи та автоматизація вимірювань”; НДР “Розробка принципів і засобів побудови конкурентоспроможних графічних пристроїв” (номер державної реєстрації 0195U025150); НДР “Дослідження принципів побудови спеціалізованого графічного контролера з розширеними функціональними можливостями” за договором № 5503 з ПО “Термінал” (номер державної реєстрації 0190U067091); НДР “Розробка принципів і засобів реалізації спеціалізованих малогабаритних дисплеїв” за договором № 5506 з підприємством “Термінал-спецтехніка”; НДР “Розробка ВІС лінійного інтерполятора для символно-графічного дисплея Т3300” за договором № 42-21 з ПО “Термінал”; НДР “Розробка принципів і засобів реалізації високопродуктивних графічних контролерів” за договором № 5509-П з НВО “Комос-наука” м. Київ ; НДР “Розробка високопродуктивних засобів дисплейної техніки” за договором № 5510 з НВО “Комос-наука” м. Київ ; НДР “Розробка вузлів спеціалізованого модуля індикації” за договором № 5514 з АТ “Інтромарин”; НДР “Розробка вузлів швидкодіючого графічного контролера на основі ПЛІС” за договором № 5516 з НВО “Комос-наука”; НДР “Розробка високопродуктивної графічної станції” за договором № 5512 з НВО “Комос-наука”; НДР “Співпраця між Україною та Румунією в галузі розподілених систем (CobURDiS)”, (номер державної реєстрації 0106U005307). У перших одинадцяти НДР дисертант був науковим керівником, в останній – виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення продуктивності засобів формування тривимірних зображень за рахунок зменшення обчислювальної складності та апаратної реалізації етапів кінцевої візуалізації, а також підвищення реалістичності графічних сцен шляхом коректного відтворення кольорів і антиаліайзингу контурів об’єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі задачі:

- провести аналіз існуючих методів і засобів формування тривимірних зображень для визначення основних напрямків підвищення їх продуктивності та реалістичності;
- розробити теоретичні основи високопродуктивного рендерингу тривимірних зображень, що містять концепцію структурно-адаптивного зафарбовування, методи визначення векторів, нові моделі відбивної здатності поверхні на основі дистрибутивних функцій та методи зафарбовування тривимірних графічних зображень;
- встановити відповідність кольору точок поверхні в об’єктній та екранній системах координат для підвищення реалістичності зображень;
- розробити високопродуктивні методи та засоби контурного формоутворення та антиаліайзингу;
- синтезувати структури пристроїв конкурентоспроможних систем кінцевої візуалізації.

Об’єкт дослідження – процес кінцевої візуалізації зображень тривимірних об’єктів у високопродуктивних системах комп’ютерної графіки.

Предмет дослідження – високопродуктивні методи та засоби кінцевої візуалізації тривимірних об’єктів.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувалися: теорія чисел і чисельних методів; теорія алгоритмів; теорія інтерполювання функцій; методи аналітичної геометрії, лінійної алгебри, сферичної геометрії, диференціального й інтегрального числення для розробки методів рендерингу та моделей освітлення; комп'ютерне моделювання для аналізу та перевірки достовірності отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку теорії кінцевої візуалізації тривимірних графічних об'єктів, що забезпечує вирішення проблеми підвищення продуктивності формування зображень та їх реалістичності у системах комп'ютерної графіки.

1. Запропоновано концепцію структурно-адаптивного зафарбовування, яка полягає в попередньому аналізі триангуляційної структури тривимірного об'єкта з подальшим адаптивним вибором моделей освітлення та методів зафарбовування, і забезпечує підвищення продуктивності цієї процедури в 1,5–2 рази за рахунок вилучення надлишкових обчислень.

2. Уперше розроблено теоретичні засади високопродуктивного рендерингу, що включають нові моделі та методи, які враховують особливості апаратної реалізації і забезпечують підвищення продуктивності як апаратних, так і програмних засобів формування тривимірних зображень.

3. Уперше запропоновано методи підвищення реалістичності зображень при зафарбовуванні тривимірних об'єктів шляхом встановлення відповідності кольору точок поверхонь в об'єктній та екранній системах координат, що забезпечує підвищення точності визначення інтенсивностей складових кольору точок поверхонь об'єктів до двох разів.

4. Запропоновано новий метод прискореного формування крокової траєкторії векторів і дуг кіл, що забезпечує підвищення швидкодії інтерполяції за рахунок сегментного формування траєкторії та враховує апріорний статистичний розподіл крокових приростів для вибору оцінювальної функції.

5. Удосконалено методи контурного антиаліазингу за рахунок суміщення процедур визначення координат точок траєкторії та інтенсивностей складових кольору, що забезпечує зменшення обчислювальних витрат, спрощення реалізації апаратних засобів і дозволяє згладжувати крокову траєкторію в темпі її формування.

6. Подальшого розвитку отримав метод зафарбовування з використанням сферично-кутової інтерполяції, за яким нормалізація векторів виконується без трудомісткої процедури визначення кутів між векторами, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати в середньому на 15 % та спростити апаратну реалізацію.

7. Запропоновано метод усунення артефактів при растеризації ребер суміжних полігонів на етапі формування зображення, який полягає в локалізації точок, не вибраних при растеризації, та довизначення їх параметрів, що виключає необхідність постоброблювання зображень.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних положень розроблено комплекс програмних і апаратних засобів, зокрема:

- спеціалізований програмний модуль для тестування методів рендерингу, який дозволяє отримати порівняльні оцінки за точністю й продуктивністю методів;
- високопродуктивні програмні та апаратні засоби для зафарбовування, текстурування, контурного формоутворення та антиаліазингу;
- структурні схеми пристроїв для формування тривимірних зображень, що є основою для виготовлення конкурентоспроможних зразків цієї продукції;
- швидкодіючі графічні акселератори для систем комп'ютерної графіки.

Сформульовано рекомендації щодо проектування засобів для систем кінцевої візуалізації тривимірних графічних зображень.

Достовірність результатів теоретичних досліджень та їх практичну цінність доведено в ході реалізації ряду розробок, зокрема, спроектовано та виготовлено: символно-графічний дисплей Т3300 за авторським свідоцтвом СРСР на винахід № 1539826, який серійно випущено ПО “Термінал” обсягом 31941 шт. з економічним ефектом від впровадження у народне господарство 10995513 крб.; ВІС лінійного інтерполятора на основі БМК 1515 ХМ1 (прошивка № 67, м. Зеленоград) за авторським свідоцтвом на винахід №31591010; спеціалізований модуль відображення графічної інформації для універсальної системи збору й реєстрації даних сейсмозвідки “Інромарин – 240”; відеоконтролер на основі процесора EP9315.V1 і шейдерні програми; високопродуктивну графічну станцію, для якої розроблено та виготовлено 8 ВІС на основі ПЛІС; спеціалізований контролер для формування графічної інформації для модуля індикації на основі екологічно чистої ЕПТ із прямонакальним катодом; ВІС генератора векторів для символно-графічного дисплея СМ 7238; графічні сопроцесори та шейдерні програми для дисплеїв МС7105, МС7106, МС7401, графічного дисплея А23QU12Х02 для банкоматів. Розроблені та захищені свідоцтвами на реєстрацію авторського права на твір у державному департаменті інтелектуальної власності України 12 програм для високопродуктивного рендерингу.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у ВАТ “Завод “Термінал” (м. Вінниця), компанії “Сатурн Дейта Интернешенл” (м. Київ), науково-виробничій фірмі “Крон” (м. Вінниця), НДІ авіації (м. Київ), Інституті прикладної математики і механіки НАН України (м. Донецьк), видавництві “Астон” (м. Тернопіль), ТОВ “ПКБ АСУ” (м. Кам’янець-Подільський), Інституті космічних досліджень НАН України (м. Київ), на державному підприємстві “Оризон-навігація” (м. Сміла), у науково-виробничому об’єднанні “Термоприлад” (м. Львів), науково-виробничій фірмі “ТЕТРИС плюс” (м. Чернівці), ВАТ “Інфракон” (м. Вінниця), ВАТ ТКБР “Стріла” (м. Тернопіль), Інституті автоматики та електрометрії СВ РАН (м. Новосибірськ), державному науково-виробничому підприємстві “Геосистема” (м. Вінниця), науково-виробничому підприємстві “ЮБК-спектр” (м. Севастополь). ТОВ “Інформаційно-виставковий центр “Діловий контакт” (м. Київ), державному підприємстві “Оризон-універсал” (м. Сміла).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати отримано здобувачем самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать: [35, 38, 39, 43, 48, 52, 54, 56, 57, 58] – методи кінцевої візуалізації; [34] – кругова модель пікселя; [41, 47] – моделі відбивної здатності поверхонь; [3] – метод зустрічної

лінійної інтерполяції, метод інтерполяції з використанням стохастичного розподілу крокових приростів, метод підвищення швидкодії реалізації лінійної інтерполяції, модифікація табличного методу лінійної інтерполяції; [1,2] – постановка задач, основні теоретичні результати, методи та моделі, аналіз результатів; [36] – методологія дослідження граничних ефектів, умови прояву артефактів растеризації при формуванні суміжних ребер полігонів; [49] – метод субпіксельного визначення площі покриття пікселя, [45] – метод сегментного зафарбовування; [18, 42, 46, 50] – ідеї методів та їх концептуальні положення; [55, 59, 60] – методи триангуляції; [64–71] – ідеї та структурні схеми пристроїв, [37] – узагальнення методу оцінювальної функції для кривих другого порядку; [40] – основні підходи до побудови нових моделей пікселів; [51, 53, 61] – методи розпаралелення рендерингу; [44] – основні математичні викладки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати досліджень доповідалися й обговорювалися на 62-х науково-технічних конференціях (НТК), симпозіумах, зокрема: Міжнародній конференції “Проблеми графічної технології» (м. Москва, 1991), III-й НТК “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва” (м. Хмельницький, 1995), Міжнародних НТК “Оптоелектронні інформаційно-енергетичні технології «Photonics-ODS»” (м. Вінниця, 2000, 2005, 2008), VII-IX НТК “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”, (м. Хмельницький, 2000 - 2003), XI міжнародній конференції з комп’ютерної геометрії та графіки “ГрафіКон 2001» (м. Москва, 2001), I-V міжнародних конференціях “ІНТЕРНЕТ – ОСВІТА – НАУКА ” (м. Вінниця, 1998÷ 2008), 6th, 7th, 9th International Conference on Development and Application Systems “DAS 2002”, “DAS 2004”, “DAS 2008), (Suceava – Romania, 2002, 2004), міжнародних конференціях з математичного моделювання “МКММ”, (м. Херсон, 2002, 2003, 2005, 2006), п’ятій міжнародній НТК “Интернет-среда за нови технологии в информационното общество ”(Болгарія , Велико Търново, 2002), XI÷XII, Міжнародних конференціях «Приладобудування» (Вінниця-Алупка, 2002; Вінниця, 2003; Ялта, 2004), міжнародній НТК “Інформаційні технології та моделювання” (м. Кременчук, 2003), III міжнародній НТК “Комп’ютерні технології в науці, освіті та промисловості” (м Дніпропетровськ, 2004), International Conference of Science and Technology SCALNET 2004 (м. Кременчук, 2004), Міжнародній конференції «Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing systems: Technology and Applications «IDAACS 2005» (Bulgaria, 2005), XII Міжнародній конференції з автоматичного управління (Автоматика 2006) (м. Вінниця, 2006), Міжнародній НТК «Комп’ютерне моделювання» (м. Санкт-Петербург, 2007), XI Міжнародній НТК «Комп’ютерна математика в освіті та наукових дослідженнях «КМ 2007» (м. Тамбов, 2007), IEEE International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2007» (м. Томськ, 2007), IX Міжнародній НТК «Системний аналіз та інформаційні технології» (м. Київ, 2007), V Міжнародній конференції «Математичне моделювання в освіті, науці та виробництві», (м. Тирасполь 2007), 2-й Міжнародній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології САИТ-2007, (м. Обнінськ, 2007), восьмій міжнародній НПК «Сучасні інформаційні та

електронні технології», (м. Одеса, 2007), I-III НТК «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (м. Вінниця, 2005, 2006, 2007 р.), Міжнародній НПК «Інформаційні технології та інформаційна безпека в науці, техніці та освіті «ІНФОТЕК-2007 (м. Севастополь, 2007), Міжнародній конференції «Комп'ютерна математика в освіті та наукових дослідженнях» (м. Херсон, 2007), другій міжнародній НТК "Моделювання та комп'ютерна графіка" (м. Донецьк, 2007), II Міжнародної НПК «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій у науці, освіті та економіці» (м. Луганськ, 2008), III Міжнародній НПК «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» (м. Кременчук, 2008), IX Міжнародній НПК «Сучасні інформаційні та електронні технології» «СІЕТ-2008 (м. Одеса, 2008), IX міжнародній НТК «Контроль і управління у складних системах (КУСС-2008)» (м. Вінниця, 2008), науковому семінарі в інституті кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України (м. Київ, 2008).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 114 наукових праць, з яких 3 монографії, 56 статей (52 статті опубліковано у виданнях, що входять до переліку фахових видань, затверджених ВАК України, з них 26 одноосібних), 16 авторських свідоцтв СРСР, 9 патентів України, 12 свідоцтв на реєстрації авторських прав на комп'ютерні програми у Державному департаменті інтелектуальної власності України, 18 тез доповідей.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, списку використаних джерел і додатків, загальний обсяг роботи – 446 сторінок, з яких основний зміст викладено на 342 сторінках друкованого тексту, містить 137 рисунків і 10 таблиць (на 49 сторінках розміщено рисунки і таблиці, які повністю займають площу сторінки). Список використаних джерел складається з 327 найменувань. Додатки містять результати експериментальних досліджень і акти впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проаналізовано сучасний стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми, окреслено її джерельну базу, сформульовано мету, основні задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення основних результатів, наведено відомості про їхню апробацію та реалізацію.

У першому розділі розглянуто особливості формування тривимірних графічних зображень. Проаналізовано основні етапи графічного конвеєра, за виконання яких відповідає окрема підсистема. Виділено етап кінцевої візуалізації і показано його роль у формуванні тривимірних зображень як найбільш трудомісткого етапу.

Проаналізовано основні процедури визначення інтенсивностей кольору: обчислення і нормалізація векторів, визначення дистрибутивних функцій відбивної здатності (ДФВЗ) поверхні, розрахунок фонові, дифузної та спекулярної складових кольору, контурний антиаліазинг. Запропоновано класифікацію ДФВЗ.

Проведено аналіз методів зафарбовування тривимірних графічних зображень, який показав, що в системах комп'ютерної графіки апаратно реалізовано тільки метод однотонного зафарбовування та метод, оснований на лінійному

інтерполюванні інтенсивностей кольору. Проаналізовано методи контурного формоутворення та антиаліайзингу зображень контурів об'єктів.

Розглянуто особливості функціонально-архітектурної побудови систем формування тривимірних зображень. Проаналізовано найпоширеніші архітектури графічних систем, основні підходи до розпаралелення та рівні паралелізму.

Показано, що можливості існуючих методів і засобів візуалізації не задовольняють вимогам багатьох галузей застосування тривимірної комп'ютерної графіки, особливо при формуванні динамічних реалістичних сцен у реальному часі.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та задачі досліджень.

У другому розділі розроблено теоретичні засади високопродуктивного рендерингу тривимірних зображень у системах комп'ютерної графіки.

Запропоновано концепцію структурно-адаптивного зафарбовування, яка передбачає перед визначенням складових інтенсивностей кольору точок поверхонь попередній аналіз триангуляційної структури тривимірного об'єкта з метою подальшого адаптивного вибору моделей освітлення та методів зафарбовування.

Під час формування реалістичних зображень здебільшого використовують моделі зафарбовування, що враховують фонову, дифузну та спекулярну складові кольору, що може бути надлишковим і позначається на часі формування тривимірних зображень. Це пояснюється тим, що відблиски на поверхні об'єкта складають у середньому близько 10 % від його загальної площі, а тому використання складних з обчислювальної точки зору моделей для всього об'єкта недоцільно, оскільки за зонами відблиску використання простих і складних моделей освітлення дає ідентичний результат. Якщо на ділянці поверхні відблиск відсутній, то достатньо використання моделей для відтворення дифузної та фонові складових кольору. При ідентифікації відблиску або його частини в межах трикутника необхідно використовувати моделі освітлення, які враховують спекулярну складову кольору.

Для трикутників із незначною відносною зміною векторів нормалей у вершинах візуальний прояв дифузної та спекулярної складових істотно зменшується, тому використання методів зафарбовування з розрахунком спекулярної або дифузної складових кольору може бути надлишковим. Особливо це характерно для випадків, коли джерело світла та спостерігач знаходяться на відносно великій відстані від об'єкта. Для трикутників із малою кривизною поверхні можна використовувати методи зафарбовування з лінійним інтерполюванням інтенсивностей кольору або взагалі заповнення.

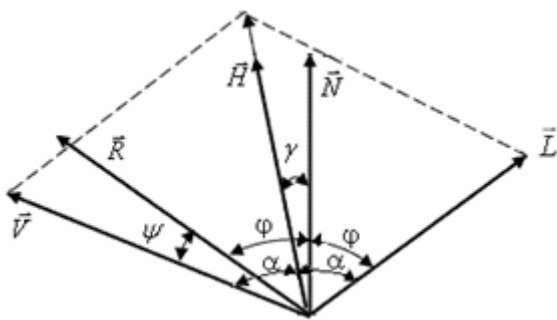
Пропонується використовувати різні моделі освітлення залежно від матеріалу поверхні, її ізотропних та анізотропних властивостей, значення коефіцієнта спекулярності. Так, наприклад, залежно від значень коефіцієнта спекулярності можна використовувати ДФВЗ різного степеня, залежно від типів матеріалів – спеціальні дистрибутивні функції і т. п.

Уведено поняття порогового значення спекулярної складової кольору, починаючи з якого зона відблиску візуально не ідентифікується. Якщо за порогове значення ДФВЗ вибрати $\cos^n \gamma_g$, то розрахунок спекулярної складової кольору

виконують до тих пір, поки в зоні затухання (блужінгу) відблиску $\cos^n \gamma \geq \cos^n \gamma_g$.

Концепція структурно-адаптивного зафарбовування дозволяє в 1,5–2 рази підвищити продуктивність рендерингу тривимірних зображень за рахунок вилучення надлишкових обчислень, які не впливають на реалістичність відтворення 3-D об'єктів.

Зафарбовування тривимірних зображень передбачає розрахунок фонові, дифузної і спекулярної складових кольору. Підготовчими для цього є процедури визначення відповідних нормалізованих векторів, а на їх основі – значень ДФВЗ, що визначає, яку частку випромінювання, що надійшло в задану точку поверхні від джерела світла, буде відбито в напрямку спостерігача. В системах комп'ютерної графіки найчастіше використовують ДФВЗ типу $\cos^n \gamma$, де $n \in [1; 1000]$ – коефіцієнт спекулярності поверхні. Для найпоширеніших у засобах комп'ютерної графіки моделей Фонга та Бліна $\cos \gamma$ дорівнює, відповідно, $\vec{V} \cdot \vec{R}$, $\vec{N} \cdot \vec{H}$. На рис. 1 \vec{L} , \vec{V} – нормовані вектори у напрямку, відповідно, до джерела світла та спостерігача, \vec{N} –



вектор нормалі до поверхні, $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$.

Розрахунок ДФВЗ є однією з найтрудомісткіших складових процедур зафарбовування. Запропоновано

апроксимувати ДФВЗ $\cos^n \gamma$ поліномом другого степеня $a \cdot \cos^2 \gamma + b \cdot \cos \gamma + c$.

Рис. 1. Вектори до точки поверхні

Ураховуючи, що $\cos^n \gamma = 1$ при $\gamma = 0$; $\cos^n \gamma = 0$ при $\cos \gamma = 0$, а також прирівнявши

значення ДФВЗ і поліному на ординатному рівні q , знаходимо, що, $c = 0$, $b = 1 - a$,

$a = (\cos^{n-1}(e^{\frac{\ln(q)}{n}} - 1)) / (\cos(\arctg(e^{\frac{\ln(q)}{n}} - 1)))$. Якщо q – точка перегину ДФВЗ, то максимальна відносна похибка апроксимації ДФВЗ в зоні епіцентру відблиску не перевищує 3,14 %. Показано, що через різке спадання функції при наближенні її до нульового рівня відблиск має візуально помітну межу, що характерно для матеріалів із високим коефіцієнтом спекулярності.

Запропоновано підходи для апроксимації ДФВЗ кубічним поліномом $a_1 \cdot \cos(\gamma)^3 + b_1 \cdot \cos(\gamma)^2 + c_1 \cdot \cos(\gamma) + d_1$. Перший із них полягає в тому, що прирівнювалися значення ДФВЗ і полінома в точці $\gamma = 0$ і точці t , де $\cos(t)^n = Q$, а також значення їх похідних у точці t . Це дає можливість визначити із системи чотирьох рівнянь невідомі a_1, b_1, c_1, d_1 , причому $d_1 = 0$. Отримано вирази для обчислення a_1, b_1, c_1 для загального випадку. Показано, що для $Q = 0,5$ формули для знаходження a_1, b_1, c_1 значно спрощуються. У цьому випадку максимальна відносна похибка апроксимації ДФВЗ у зоні епіцентра відблиску не перевищує 0,67%, що у 17 разів менше порівняно з поширеною ДФВЗ Шліка.

Другий підхід ураховує те, що обмеження $\cos \gamma = 0$ можливо тільки за умови,

що $d_1=0$, а тому достатньо визначити тільки невідомі a_1, b_1, c_1 . Для цього задаються дві точки на межах епіцентра відблиску, а третю вибирають для реалістичного відтворення блюмінгу, наприклад, $\cos^n(\gamma)=G$, де $G \rightarrow 0$. Отримано формули для розрахунку невідомих коефіцієнтів. Показано, що при $Q=0,5$ і $G=1/18$ максимальна відносна похибка апроксимації ДФВЗ у зоні епіцентра відблиску не перевищує 3%. Отримана ДФВЗ додатна й у зоні блюмінгу монотонно спадає до рівня G .

Апаратна реалізація ДФВЗ на основі поліномів другого та третього степеня передбачає використання блоків множення, додавання, а також блоків постійної пам'яті для зберігання коефіцієнтів.

Запропоновано кусково-нелінійну апроксимацію ДФВЗ у зоні епіцентра відблиску поліномом третього степеня, а в зоні блюмінгу – функцією $\cos(\gamma)/(\alpha - \beta \cdot \cos(\gamma))$ за умови, що $\cos^n(\gamma) < 0,5$. Коефіцієнти α, β , які знайдено з системи рівнянь, прирівнявши значення апроксимувальних функцій та їх похідних у точці $\gamma = \arccos(\sqrt[n]{0,5})$, дорівнюють $\alpha = 2 \cdot n \cdot \sqrt[n]{0,5}$, $\beta = 2 \cdot (n - 1)$. Аналіз показав, що максимальна відносна похибка апроксимації ДФВЗ не перевищує 4 %.

Подання ДФВЗ у вигляді $\cos^n \gamma = 2^{n \cdot \log_2(\cos \gamma)}$ дозволяє визначити її апаратним шляхом, оскільки функцію $\log_2(\cos \gamma)$ можна задати таблично, а функцію 2^x – апроксимувати. Доведено, що для зони формування відблиску $\cos^n \gamma = 2^{n \cdot \log_2(\cos \gamma)} \approx 1 - (\log_2(1 - n \cdot \log_2 \cos \gamma)) / 2$, причому в зоні його епіцентра максимальна відносна похибка апроксимації ДФВЗ не перевищує 0,29 % і має місце при $\gamma = \arccos(e^\kappa)$, де $\kappa = (1 + \ln 2 \cdot W(\frac{-1}{4 \cdot \ln 2})) / n \cdot W(\frac{-1}{4 \cdot \ln 2})$, $W(\)$ – функція Ламберта.

Запропоновано апроксимацію ДФВЗ $\cos^n \gamma$ косинус-квадратичною функцією $(\zeta \cdot (\cos \gamma - 1) + 1)^2$ за умови, що $0 \leq \gamma \leq \pi / 2$. Вибір такої функції обумовлено тим, що: а) для обох функцій як твірна використовується функція косинуса; б) при $\gamma = 0$ $\cos^n \gamma = (\zeta \cdot (\cos \gamma - 1) + 1)^2 = 1$, що відповідає граничній умові; в) обидві функції при $0 \leq \gamma \leq \pi / 2$ є додатними; г) функція $(\zeta \cdot (\cos \gamma - 1) + 1)^2$ монотонно спадає і досягає нульового значення, що необхідно для формування блюмінга; д) коефіцієнт ζ дає можливість змінювати розмір відблиску.

При використанні ДФВЗ типу $(7 \cdot n \cdot (\cos \gamma - 1) / 16 + 1)^2$ максимальна відносна похибка апроксимації у зоні епіцентра відблиску не перевищує 2% для $25 \leq n \leq 1000$, для інших значень – 3%. Це майже в п'ять разів менше порівняно з ДФВЗ Шліка. Крива досягає нульового рівня при $\gamma = \arccos(1 - 16 / 7 \cdot n)$. Радіус кривизни кривої у цій точці дорівнює $r = 4 / (7 \cdot n - 8)$. Порівняно з ДФВЗ Шліка усунуто артефакт неприродного освітлення графічного об'єкта в зоні формування блюмінга.

Для методів зафарбовування, які оперують не зі значенням $\cos \gamma$, а з кутом γ ,

запропоновано апроксимувати функцію $\cos^n \gamma$ функцією $\cos^k(\eta \cdot \gamma)$ за умови, що

$k \ll n$, $k = \text{const}$. Доведено, що $\eta = \arccos\left(\frac{n}{n-1}\right)^{\frac{n}{2k}} / \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{n-1}}$. Визначено

максимальні відносні похибки апроксимації ДФВЗ для різних значень k . Так, наприклад, при $k=2$ максимальна відносна похибка апроксимації ДФВЗ для епіцентра відблиску не перевищує 1,1%, при $k=3$ – 0,7%. При апаратній реалізації ДФВЗ значення η і $\cos^k(\eta \cdot \gamma)$ зберігають у таблицях. На відміну від класичної табличної реалізації достатньо зберігати значення косинуса кута не для всіх n , а тільки для одного степеня, що на три порядки зменшує обсяги табличних даних.

Для моделювання відбивної здатності поверхонь у кожній її точці розраховують вектори нормалі, напрямку до спостерігача, до джерела світла, а також вектори на їх основі залежно від вибраної моделі освітлення. У зв'язку з цим визначення векторів та їх нормалізація є достатньо трудомісткою процедурою. Запропоновано метод визначення нормалізованих векторів із використанням принципу дихотомії. Метод оснований на послідовному поділі кута (рис. 2) між

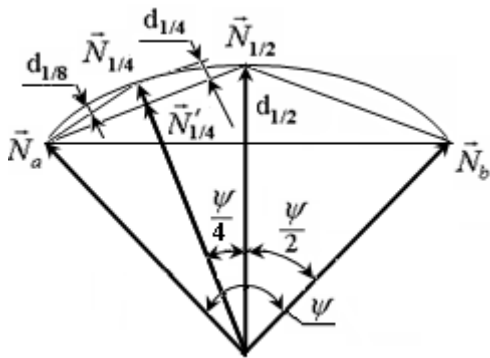


Рис.2. Визначення векторів нормалей

векторами \vec{N}_a і \vec{N}_b до кінцевих точок рядка растеризації трикутника (РРТ). Так, наприклад,

$$\vec{N}_{(1/2)} = \frac{\vec{N}_a + \vec{N}_b}{\sqrt{2 \cdot (1 + \cos \psi)}}. \text{ Вектор } \vec{N}_{(1/2^j)}, \text{ отриманий на}$$

$$j\text{-ій ітерації, дорівнює } \vec{N}_{(1/2^j)} = \frac{\vec{N}_a + \vec{N}_{(1/2^{j-1})}}{\sqrt{2 + z_{2^{j-1}}}}, \text{ де}$$

$$z_{2^j} = \sqrt{2 \cdot (1 + \cos \frac{\psi}{2^{j-1}})}. \text{ Доведено, що } z_{2^{j+1}} = \sqrt{2 + z_{2^j}}.$$

Із використанням поліномів Чебишова було отримано такі апроксимаційні формули: $1/\sqrt{2 + z_{2^j}} \approx -0,07 \cdot z_{2^j} + 0,64$, $1/\sqrt{2 + z_{2^j}} \approx 0,014 \cdot z_{2^j}^2 - 0,119 \cdot z_{2^j} + 0,681$. При використанні першої формули максимальна відносна похибка апроксимації не перевищує 0,12 %, а другої – 0,004 %. Аналіз показав, що при використанні останньої апроксимаційної формули час розрахунку вектора $\vec{N}_{(1/2^j)}$ зменшується у 1,83 рази порівняно з класичною реалізацією.

Запропоновано метод адаптивної нормалізації векторів у РРТ, що передбачає нормалізацію векторів на межах цифрових сегментів, на які послідовно розбивається РРТ, з подальшим обчисленням значень проміжних нормалей із використанням лінійного інтерполювання за умови, що їх відхилення від одиничного розміру буде менше встановленого значення. Доведено, що на $(j+1)$ -

ій ітерації поділу рядка растеризації $d_{(1/2^{j+1})} = 1 - \sqrt{2 + z_{(1/2^j)}} / 2$, причому

$d_{(1/2^{j+1})} = 1 - \sqrt{1 - d_{(1/2^j)}} / 2$. Показано, що $d_{(1/2^j)} / d_{(1/2^{j+1})} \approx 4$. При використанні

запропонованого методу визначення векторів максимальні відносні похибки при визначенні дифузної й спекулярної складових кольору дорівнюють відповідно $1 - z_{(1/2^j)} / 2$, $1 - z_{(1/2^j)}^n / 2^n$. При послідовному поділі РРТ кінцеві точки отриманих сегментів можуть не лежати у вузлах координатної решітки. Цього можна уникнути, якщо збільшити розмір РРТ до найближчого степеня двійки й до визначити нормалізований вектор у новій кінцевій точці. У подальшому поділі навпіл такого РРТ усі його сегменти будуть кратні степеням двійки. За значенням нев'язки залежно від необхідної точності розрахунку дифузної й спекулярної складових кольору приймають рішення про призупинення трудомісткої процедури нормалізації та визначення векторів шляхом лінійного інтерполювання. Для об'єктів із середнім ступенем деталізації досягається підвищення продуктивності процедури визначення векторів на 20-30 %.

Запропоновано для знаходження нормалізованих векторів використати квадратичну інтерполяцію між початковим $\vec{N}_{i,l}$ та кінцевим $\vec{N}_{i,p}$ векторами РРТ, для чого до визначають нормалізований вектор $\vec{N}_{i,c}$ у середній точці рядка растеризації. Проміжні значення векторів знаходять за формулою $\vec{N}_{i,g} = \vec{G}_i \cdot g^2 + \vec{P}_i \cdot g + \vec{Q}_i$, де $\vec{G}_i = 2 \cdot (\vec{N}_{i,p} - 2 \cdot \vec{N}_{i,c} + \vec{N}_{i,l})$, $\vec{P}_i = \vec{N}_{i,p} - \vec{N}_{i,l} - \vec{G}_i$, $\vec{Q}_i = \vec{N}_{i,l}$, g – параметрична змінна, яка визначає позицію точки в РРТ.

Отримано рекурентні співвідношення для обчислення поточного вектора. Доведено, що $\vec{N}_{i,g+\Delta g} = \vec{N}_{i,g} + \Delta g \cdot W_{i,g}$, де $W_{i,g} = \Delta g \cdot (\vec{G}_i \cdot (2 \cdot g + \Delta g) + \vec{P}_i)$. Показано, що $W_{i,g+\Delta g} = W_{i,g} + 2 \cdot \vec{G}_i \cdot \Delta g^2$. Оскільки $2 \cdot \vec{G}_i \cdot \Delta g^2$ є сталим для РРТ, то в циклі розрахунку векторів використовуються виключно мікрооперації нагромаджувального додавання. Аналіз показав, що при програмній реалізації час розрахунку векторів для середньостатистичного трикутника зменшується в 2,56 рази порівняно з класичною реалізацією.

При інтерполяції векторів по оболонці сфери одиничного розміру трудомісткий процес нормалізації векторів вилучається з обчислювального процесу. Доведено, що одиничні вектори уздовж рядка растеризації трикутника можна знайти за формулою $\vec{N}(t) = \vec{N}_a \cdot \cos(t \cdot \varphi) + \vec{N}_k \cdot \sin(t \cdot \varphi)$, де t – позиція пікселя в рядку растеризації трикутника, $\varphi = \psi / m$, m – кількість пікселів у рядку растеризації, $\psi = \arccos(\vec{N}_a \cdot \vec{N}_b)$. Вектор $\vec{N}_k = (\vec{N}_b - \vec{N}_a \cdot (\vec{N}_b \cdot \vec{N}_a)) / \sqrt{1 - (\vec{N}_b \cdot \vec{N}_a)^2}$ є нормалізованим вектором $\vec{N}_b - \vec{N}_a \cdot (\vec{N}_b \cdot \vec{N}_a)$, який ортогональний до вектора \vec{N}_a . Отримано рекурентне співвідношення для розрахунку поточного вектора в рядку растеризації трикутника $\vec{N}(t+1) = 2\vec{N}(t) \cdot \cos \varphi - \vec{N}(t-1)$, яка має просту апаратну реалізацію. З метою розпаралелення обчислювального процесу отримано такі співвідношення:

$\vec{N}(t+2) = \vec{N}(t) \cdot (2\cos 2\varphi + 1) - 2\vec{N}(t-1)\cos \varphi$, $\vec{N}(t+3) = \cos 2\varphi \cdot (4\vec{N}(t) \cdot \cos \varphi - \vec{N}(t-1)) - 3\vec{N}(t-1)$, особливість яких полягає в незалежному визначенні векторів у ще двох

точках РРТ. Доведено, що для $0 \leq \psi \leq \pi/2$ $\cos(\psi/m) \approx (\cos\psi - 1)/m^2 + 1$ з максимальною відносною похибкою апроксимації, меншою 1% для $m \geq 4$. Отримана формула дає можливість вилучити трудомістку операцію визначення кутів між векторами. З урахуванням останньої формули отримуємо, що $\vec{N}(t+1) = 2\vec{N}(t) \cdot ((\cos\psi - 1)/m^2 + 1) - \vec{N}(t-1)$.

Розглянуто особливості організації обчислювального процесу з визначення вихідних параметрів для зафарбовування Гуро. Доведено, що при лінійному інтерполюванні інтенсивностей кольору вздовж ребер і рядків растеризації трикутника приріст інтенсивності кольору вздовж горизонтальних (вертикальних) рядків растеризації є постійною величиною. Використання цієї властивості дозволяє суттєво зменшити обсяги обчислень при реалізації зафарбовування, оскільки приріст інтенсивності кольору визначається для всього трикутника, а не для кожного рядка растеризації. Це дозволяє виконати ці обчислення в циклі підготовки та виключити “довгі” операції з циклу зафарбовування. Властивість про сталість приросту інтенсивності кольору використано для розробки методів розпаралелення зафарбовування.

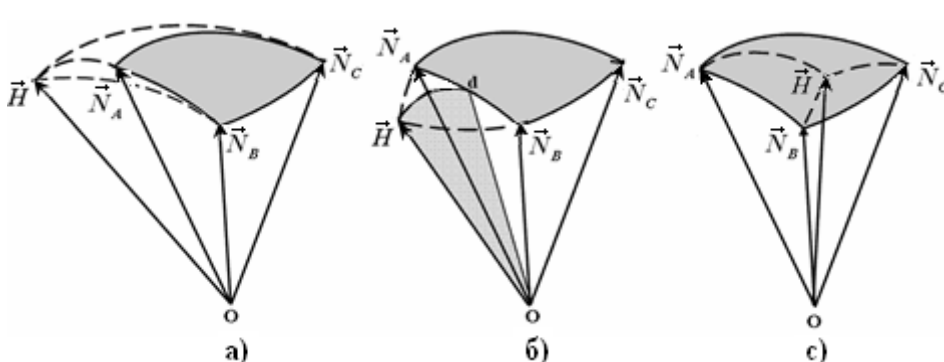
Доведено, що прирости ортогональних координатних складових векторів уздовж горизонтальних (вертикальних) рядків растеризації трикутників мають сталі значення. На основі методу кінцевих різниць і доведеної властивості розроблено метод прискореного розрахунку нормалізованих векторів, у якому вилучено операції множення при визначенні модуля вектора.

Розроблені теоретичні засади рендерингу тривимірних зображень надають можливість створення високопродуктивних програмних і апаратних засобів для систем комп'ютерної графіки.

Розрахунок векторів нормалей і ДФВЗ є підготовчими етапами. Кінцевим етапом зафарбовування є безпосереднє визначення адрес і кольору пікселів із використанням інформації про позицію спостерігача, розміщення джерел світла, їх інтенсивностей, відстані від поверхні, типу матеріалу та розподілу спекулярної, дифузної й розсіяної складових кольору.

У третьому розділі розроблено методи прискореного зафарбовування тривимірних графічних об'єктів.

Для реалізації структурно-адаптивної концепції зафарбовування запропоновано методи ідентифікації відблисків. Стратегія адаптивного зафарбовування визначається варіантом розміщення векторів нормалей до вершин трикутника та векторами \vec{H} і \vec{L} . На рис. 3 зображено вектори, початкові точки яких суміщені. Для випадку а) визначають значення спекулярної складової кольору у відповідній вершині трикутника, а для випадку б), с) – на ребрі трикутника, де кут між поточним вектором нормалі до поверхні та вектором \vec{H} найменший. Отримані значення порівнюють з пороговим значенням, яке визначає границю



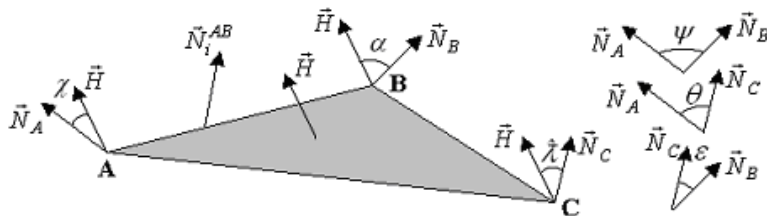
блюмінгу, з якої відблиск не ідентифікується візуально. За умови

розміщення частини відблиску в межах трикутника використовують метод зафарбовування та модель освітлення, які враховують спекулярну складову кольору. У протилежному випадку використовують значно простіші методи і моделі для розрахунку дифузної складової кольору. Для аналізу дифузної складової кольору замість вектора \vec{H} використовують вектор \vec{L} . Якщо дифузна складова кольору менша за порогове значення або її градієнтна зміна несуттєва, використовують більш простий метод зафарбовування, наприклад, метод Гуро або однотонного зафарбовування.

Запропоновано метод ідентифікації варіантів взаємного розміщення векторів (рис. 3) шляхом аналізу квадратів відстаней між їх кінцевими точками.

Доведено, що відблиск перетинає ребро AB трикутника та має візуальний прояв за умови, що скалярні добутки нормалізованих векторів $(\vec{N}_A - \vec{N}_B)$, $(\vec{H} - \vec{N}_B)$ або $(\vec{N}_B - \vec{N}_A)$, $(\vec{H} - \vec{N}_B)$: а) мають протилежні знаки та більші за порогове значення ДФВЗ; б) мають однакові знаки та значення $((\vec{N}_A \times \vec{N}_B) \times \vec{H}) / (\vec{N}_A \times \vec{N}_B)$ більше за порогове значення ДФВЗ. Випадок розміщення всього відблиску в межах трикутника малоймовірний і може мати місце для низькополігональної графіки. Для цього випадку розроблено точний метод ідентифікації, але, враховуючи достатньо великий обсяг обчислень, запропоновано виконувати розрахунок спекулярної складової кольору взагалі при виявленні ризику розміщення відблиску в межах трикутника.

Доведено, що максимальні інтенсивності спекулярної складової кольору на ребрах AB, BC, AC трикутника ABC (рис.4). досягається, відповідно, при



$$t_1 = \frac{\cos \chi \cdot \cos \psi - \cos \alpha}{(\cos \psi - 1)(\cos \alpha + \cos \chi)},$$

$$t_2 = \frac{\cos \chi \cdot \cos \theta - \cos \lambda}{(\cos \theta - 1)(\cos \lambda + \cos \chi)},$$

$$t_3 = \frac{\cos \alpha \cdot \cos \varepsilon - \cos \lambda}{(\cos \varepsilon - 1)(\cos \lambda + \cos \alpha)}.$$

Рис. 4. Вектори нормалей до вершин трикутника

За значенням t_i знаходять вектори та максимальне значення спекулярної складової кольору. Аналогічні дії виконуються і для дифузної складової кольору, з використанням замість вектора \vec{H} вектора напрямку до джерела світла \vec{L} . Залежно від наявності відблиску, значень дифузної і спекулярної складових кольору вибирають метод і модель освітлення. Можливо розбиття вихідного трикутника на складові за умови різкої зміни спекулярної (дифузної) складової кольору на ребрах трикутника.

Запропоновано підхід до комбінованого використання різних методів зафарбовування, який полягає в тому, що з урахуванням кривизни поверхні, її матеріалу, позицій джерел світла та спостерігача, співвідношення складових кольору визначаються інтенсивності складових кольору у виділених точках

поверхні, а проміжні значення між ними розраховуються з використанням інтерполювання. При адаптивному виборі розмірів цифрових сегментів забезпечується керований компроміс між швидкістю формування графічного зображення та його якістю. Якщо розміри цифрових сегментів вибрати рівними степеню двійки, то обчислення спрощуються за рахунок заміни операцій ділення й множення на зсув. Якщо для визначення інтенсивностей кольору у внутрішніх точках сегментів використано лінійне інтерполювання, то максимальна відносна похибка визначення дифузної та спекулярної складових кольору дорівнює, відповідно, $\delta_{max} = 1 - \cos(\xi / 2)$, $\delta_{max} = 1 - \cos^n(\xi / 2)$, де ξ – кут між векторами нормалей \vec{N}_{l_i} , \vec{N}_{p_i} до лівої та правої точок сегменту РРТ.

РРТ можна умовно продовжити до розміру, що дорівнює степеню двійки. Якщо сегмент, на який розбито рядок растеризації, має розмір 2^k , то при його поділі навпіл отримуємо сегмент довжиною 2^{k-1} , середню точку якого розташовано у вузлі координатної решітки екрана. Отримані сегменти знову мають розмір, кратний степеню двійки, тому при бінарному поділі всі точки отриманих сегментів буде розміщено у вузлах координатної решітки. Це дає можливість ефективно використати для зафарбовування принцип дихотомії. При такому підході вектори у початковій і кінцевій точках сегмента знаходять за класичним підходом, а в усіх інших – із використанням принципу дихотомії. У цьому випадку мова йде комбіноване використання різних методів обчислення.

Вибір розміру цифрового сегмента визначається щільністю триангуляційної мережі поверхні, роздільною здатністю екранного простору, а також вимогами до реалістичності та продуктивності формування графічних сцен.

Запропоновано метод зафарбовування, особливість якого полягає у використанні квадратичної інтерполяції для визначення складових інтенсивностей кольору точок РРТ. Для цього розраховують інтенсивності кольору $I_{i,l}$, $I_{i,c}$, $I_{i,p}$ відповідно в лівій, середній та правій точках рядка растеризації, а в усіх інших – за формулою $I_{i,t} = 2(I_{i,p} - 2 \cdot I_{i,c} + I_{i,l}) \cdot t^2 + (4 \cdot I_{i,c} - I_{i,p} - 3 \cdot I_{i,l}) \cdot t + I_{i,l}$, де t – змінна, яка визначає позицію пікселя в РРТ. Використання методу кінцевих різниць для визначення інтенсивностей складових кольору точок рядка растеризації дозволило використати в циклі зафарбовування прості з апаратної точки зору операції – нагромаджувального додавання та лічби. Порівняно з методом Фонга час зафарбовування середньостатистичного трикутника зменшився в 6 разів.

Інтенсивності складової кольору можна задати поверхнею виду

$$I(x, y) = A \cdot x^2 + B \cdot y^2 + C \cdot x \cdot y + D \cdot x + E \cdot y + F, \quad (1)$$

де x , y – координати точки поверхні, $I(x, y)$ – інтенсивність складової кольору.

Визначення шести невідомих A , B , C , D , E , F передбачає формування й розв'язання системи з шести рівнянь. Оскільки для трикутника задаються інтенсивності кольору тільки в трьох його вершинах, то найпростіше довизначити інтенсивності кольору I_{12} , I_{23} , I_{13} в середніх точках на ребрах трикутника, що дасть можливість скласти систему з шести рівнянь. Суттєво спростити задачу можна за рахунок визначення поверхні інтенсивностей кольору для ортонормованного

трикутника і трансформації отриманих результатів на вихідний трикутник.

Для ортонормованого трикутника $I = a_n \cdot \tau^2 + b_n \cdot \varepsilon^2 + c_n \cdot \tau \cdot \varepsilon + d_n \cdot \tau + e_n \cdot \varepsilon + f_n$, де τ, ε – координати точки поверхні нормованого трикутника. Невідомі коефіцієнти можна знайти за формулами

$$a_n = 2 \cdot (I_1 - I_2 - 2I_{12}), \quad b_n = 2 \cdot (I_3 - I_1 - 2 \cdot I_{13}), \quad c_n = 4 \cdot (I_1 + I_{23} - I_{13} - I_{12}),$$

$$d_n = I_2 - I_1 - a, \quad e_n = I_3 - I_1 - b_n, \quad f_n = I_1.$$

У випадку, коли на ребрах трикутника довшначають максимальні значення інтенсивностей кольору, то $a_n = ((I_1 - I_2) \cdot t_1 + I_{12} - I_1) / (t_1 \cdot (t_1 - 1))$, $d_n = I_2 - I_1 - a_n$,
 $b_n = ((I_1 - I_3) \cdot t_2 + I_{13} - I_1) / t_2 \cdot (t_1 - 1)$, $f_n = I_1$, $d_n = I_2 - I_1 - a_n$, $e_n = I_2 - I_1 - a_n$
 $c_n = ((a_n + b_n) \cdot t_3^2 + (a_n + b_n + I_2 - I_3) \cdot t_3 + I_3 - I_{23}) / (t_3 \cdot (1 - t_3))$.

При використанні виразу (1) і растеризації трикутника в напрямку від верхньої його вершини до нижньої

$$I(x+1, y) = I(x, y) + P_{\sigma}, \quad I(x-1, y) = I(x, y) + P_{-x}, \quad I(x, y+1) = I(x, y) + P_y,$$

$$I(x+1, y+1) = I(x, y) + P_x + P_y + C, \quad I(x-1, y+1) = I(x, y) + P_{-x} + P_y - C,$$

де $P_{x+1} = P_x + 2 \cdot A$, $P_{y+1} = P_{\sigma} + 2 \cdot B$, $P_{-x-1} = P_{-x} + 2 \cdot A$.

Початкові значення параметрів P_x, P_{y+1}, P_{-x} : $P_x = A + D$, $P_y = B + E$, $P_{-x} = A - D$.

При апаратній реалізації вказаного методу базовою мікрооперацією буде нагромаджувальне додавання за умови, що невідомі коефіцієнти у формулі (1) розраховані на програмному рівні.

Вираз (1), який визначає залежність інтенсивності кольору від координат внутрішніх точок трикутника, дає можливість розпаралелити процедуру зафарбовування, оскільки дозволяє розрахувати інтенсивності складових кольорів кількома пікселними процесорами. При програмній реалізації метод дозволяє до 12 разів підвищити продуктивність зафарбовування порівняно з класичною реалізацією методу Фонга при нормованій середньоквадратичній похибці (NMSE), яка не перевищує 0,00025, що є прийнятним для реалістичної графіки.

Запропоновано підхід до прискореного визначення дифузної та спекулярної складових кольору при зафарбовуванні тривимірних графічних фігур, особливість якого полягає в одночасному й незалежному визначенні інтенсивностей складових кольору відразу двох точок рядка растеризації. Якщо в кінцевих точках РРТ задано відповідно вектори нормалей \vec{N}_l і \vec{N}_p , то дифузну складову кольору в поточній точці x рядка растеризації трикутника знайдемо за виразом $k_d \cdot I \cdot (\vec{N}_x \cdot \vec{L}) / |\vec{N}_x|$, де

$\vec{N}_x = \vec{N}_l + \frac{\vec{N}_p - \vec{N}_l}{m} \cdot x$, а m – довжина рядка растеризації трикутника, k_d – коефіцієнт дифузного відбиття, I – інтенсивність складової джерела світла. Множник $(\vec{N}_x \cdot \vec{L}) / |\vec{N}_x|$ задамо в формі

$$\vec{N}_x \cdot \vec{L} / |\vec{N}_x| = (w \cdot x + r) / \sqrt{c \cdot x^2 + s \cdot x + I} = (w \cdot x + r) / \sqrt{M_x + I} = p_x / \sqrt{q_x},$$

де $s = 2 \cdot \frac{\vec{N}_p - \vec{N}_l}{m} \cdot \vec{N}_l$, $c = (\frac{\vec{N}_p - \vec{N}_l}{m})^2$, $r = \vec{N}_l \cdot \vec{L}$, $w = \frac{\vec{N}_p - \vec{N}_l}{m} \cdot \vec{L}$. Доведено, що $M_{x+1} = M_x + 2 \cdot c \cdot x + (c + s)$, $p_{x+1} = p_x + w$. Показано, що $q(i) = q \cdot (m - i)$, де i – точка лівої половини рядка растеризації. Остання властивість дозволяє розрахувати $\sqrt{q_x}$ тільки для першої половини рядка растеризації трикутника і використати отримані результати для його другої половини. З використанням поліномів Чебишова отримано таку апроксимаційну формулу для інтервалу зміни M

$$\frac{1}{\sqrt{M+1}} \approx 1 - \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{32}\right) \cdot M + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{16}\right) \cdot M^2.$$

Установлено, що максимальна відносна похибка апроксимації при цьому не перевищує 0,51 %. При зворотному напрямку растеризації $p_x = \vec{L} \cdot \vec{N}_p - w \cdot x$.

Згідно із запропонованим підходом здійснюється зустрічне інтерполювання РРТ, причому p_x визначається незалежно для кожної з двох поточних точок, а $\sqrt{q_x}$ відразу для двох точок. Обчислювальний процес не містить у циклі визначення дифузної (спекулярної) складової кольору операцій ділення та знаходження квадратного кореня, які мають місце при класичній реалізації зафарбовування. Моделювання показало, що при програмній реалізації час визначення дифузної і спекулярної складових кольору зменшився відповідно, в 1,83 і 1,71 раза.

Розроблено метод зафарбовування тривимірних графічних об'єктів, оснований на кодовій інтерполяції кутів між векторами нормалей до поверхні у кінцевих точок РРТ і між векторами нормалей до поверхні у вершинах трикутника.

Запропоновані концепція та методи прискореного зафарбовування тривимірних графічних об'єктів дають можливість суттєво зменшити час формування тривимірних сцен і, як наслідок, розширити спектр задач динамічної графіки.

У четвертому розділі розроблено методи коректного відтворення кольорів при перспективному проєкціюванні для підвищення реалістичності графічних сцен. У комп'ютерній графіці розглядаються проєкції тривимірних об'єктів на двовимірну картинну площину. Існуючі методи зафарбовування не забезпечують коректне відтворення кольорів при зафарбовуванні тривимірних графічних об'єктів, оскільки не враховують z -координату, а тому порушується відповідність кольору точок поверхонь у об'єктній (світovій) та екранній системах координат. Доведено, що для перспективно-коректного відтворення кольорів методом, який оснований на лінійному інтерполюванні інтенсивностей кольору вздовж ребер трикутника, а потім його рядків растеризації, необхідно перейти від лінійного до

нелінійного інтерполювання за формулою $I_u = I_A + \frac{u \cdot z_A}{z_B - u \cdot (z_B - z_A)} (I_B - I_A)$, яка враховує зміну z -координати від точки A до точки B РРТ, де u – параметрична змінна, яка визначає положення точки в рядку растеризації. Показано, що неврахування z -координати призводить до різниці складових інтенсивностей кольору відповідних його точок у об'єктній та екранній системах координат,

максимальне значення якої дорівнює $(I_B - I_A) \frac{\sqrt{\mu}(\sqrt{\mu} - 1)^2}{\sqrt{\mu} - 1}$, де $\mu = \frac{z_B}{z_A}$.

При використанні методів зафарбовування, які враховують локальну кривизну поверхні, для коректного відтворення перспективи необхідно встановити відповідність між векторами нормалей в об'єктній та екранній системах координат. При цьому враховуються етапи геометричних перетворень, які визначено стандартами комп'ютерної графіки. Доведено, що для коректного відтворення кольорів поточні вектори нормалей у рядку rasterизації AB трикутника в екранній системі координат необхідно визначати за формулою $\vec{N}_u = \vec{N}_A + (\vec{N}_B - \vec{N}_A) \cdot u / (\mu - u \cdot (1 - \mu))$. Отримано вирази для квадратичної та кубічної апроксимацій останнього виразу.

Для коректного відтворення кольорів при використанні сферично-кутової інтерполяції необхідно визначати вектори нормалей за формулою $\vec{N}_u = (\vec{N}_A \cdot \sigma + \vec{N}_k) / \sqrt{1 + (\sigma)^2}$, де $\sigma = \text{ctg} \psi + (\text{ctg}(u \cdot \psi) - \text{ctg} \psi) \cdot \mu$. Показано, що проміжні вектори нормалей мають одиничні розміри.

Запропоновано метод перспективно-коректного накладання текстур, у якому використано властивість сталості ангармонічного відношення чотирьох колінеарних точок, яке залишається інваріантним при перспективних перетвореннях. Отримано рекурентні співвідношення для розрахунку текстурних координат. Порівняно з методом Хесберга вдвічі зменшено кількість операцій ділення, що дозволило підвищити продуктивність текстурування середньостатистичного трикутника на 20 %.

Показано, що зменшення обчислювальної складності при перспективно-коректному текстуруванні можна досягти шляхом rasterизації площини, обмеженої трикутником в об'єктній системі координат за умови, що РРТ розміщено на фіксованій відстані від спостерігача. Якщо трикутник в об'єктній системі координат лежить у площині $A_w X_w + B_w Y_w + C_w Z_w = D_w$, то коефіцієнт нахилу відрізка прямої в екранній системі координат зі сталим для рядка значенням координати z дорівнює $k = -A_w / B_w$. У цьому випадку rasterизацію трикутника в екранній системі координат необхідно виконувати неортогонально. Між текстурними X_T, Y_T та екранними X_v, Y_v координатними просторами існують такі залежності $X_T = (a_v \cdot X_v + b_v \cdot Y_v + c_v) \cdot \mathfrak{R}$, $Y_T = (d_v \cdot X_v + e_v \cdot Y_v + f_v) \cdot \mathfrak{R}$, де $\mathfrak{R} = 1 / (A \cdot X_v + B \cdot Y_v + C)$ де, $a_v, b_v, c_v, d_v, e_v, f_v$ – коефіцієнти афінного перетворення між екранними та текстурними координатами. При неортогональній rasterизації \mathfrak{R} розраховується для рядка rasterизації, а не для кожної його точки. Показано, що при зміні координати X_v на одиницю $X_{T_{v+1}} = X_{T_v} + \mathfrak{R} \cdot (a_v + b_v \cdot k)$. Для початкової точки рядка rasterизації $X_{T_0} = \mathfrak{R} \cdot (b_v \cdot B + c_v)$. Аналогічні формули мають місце і для координати $Y_{T_{v+1}}$.

Неортогональна rasterизація при текстуруванні дозволяє вилучити $(P-U)$ операцій ділення для трикутника, що містить P внутрішніх точок і U РРТ. Через зміщення початкових точок РРТ можлива поява точок, які не були охоплені

растеризацією, або їх дублювання. Уникнути цих артефактів можна шляхом адаптивного фазування послідовності крокових приростів РРТ, що передбачає встановлення при інтерполюванні різних початкових значень оцінювальної функції, або за рахунок растеризації прямокутника, в який віртуально вписано трикутник.

Показано, що при використанні неортогональної растеризації для анізотропної фільтрації спрощується розрахунок проєкцій пікселів на текстурну поверхню. У цьому випадку для растеризації текстурної поверхні часто використовують прямокутне вікно зображення, яке в загальному випадку повернуто відносно осей координат. Розроблено метод формування прямокутного вікна під довільним кутом, особливість якого полягає в тому, що під час формування i -го рядка растеризації вікна запам'ятовується i -те крокове переміщення, яке використовується для переходу до іншого рядка растеризації. Це дозволяє спростити апаратну реалізацію за рахунок використання замість двох одного лінійного інтерполятора.

Запропоновані методи забезпечують коректне відтворення кольорів і підвищують ілюзію об'ємності тривимірних об'єктів на двовимірному екрані.

У п'ятому розділі запропоновано методи контурного формоутворення та антиаліайзingu крокових траєкторій.

Метод прискореного формування крокової траєкторії двомірних примітивів враховує апріорний статистичний розподіл сполучень крокових приростів для вибору й розрахунку оцінювальної функції і забезпечує підвищення швидкодії інтерполювання за рахунок сегментного формування траєкторії. Розглянуто особливості використання цього методу для реалізації лінійної та кругової інтерполяцій. Передбачається розбиття координатного простору на ділянки, межі яких легко відслідковувати шляхом порівняння. Для кожної ділянки визначають можливі комбінації сполучень крокових приростів і шляхом комп'ютерного моделювання визначають ймовірність їх появи. Обчислювальний процес у межах кожної ділянки налаштовують на розрахунок найімовірнішої комбінації крокових приростів. Визначають тип комбінацій крокових приростів і, при необхідності, його уточнюють серед можливих кандидатів.

Метод дозволяє підвищити продуктивність формування крокової траєкторії за рахунок прискореного визначення найбільш ймовірних для поточної ділянки координатного простору комбінацій приростів.

Запропоновано метод формування відрізків прямих, особливість якого полягає в зустрічному формуванні крокової траєкторії з використанням однієї оцінювальної функції (OF), що дало можливість до двох раз підвищити продуктивність лінійного інтерполювання при забезпеченні максимально можливої точності. При цьому використано властивість симетричності послідовності крокових приростів у напрямку неперевірної координати при інтерполяції відрізка прямої з максимальною точністю. Показано, що незалежно від парності більшого (BP) та меншого (MP) приростів необхідно виконати $\lfloor BP/2 \rfloor$ інтерполяційних тактів.

За методами крайового антиаліайзingu для кожної точки траєкторії

визначається інтенсивність кольору таким чином, щоб згладити ступінчатий ефект, обумовлений недостатньою роздільною здатністю екрана. При цьому колір піксела обчислюється з урахуванням ділянки, що його оточує.

Площа частини піксела, яка відтинається траєкторією примітива та належить графічному об'єкту, називається площею фрагмента піксела.

Запропоновано для підвищення якості згладжування крокової траєкторії визначати інтенсивності кольору всіх пікселів, які мають перетин із траєкторією. Для цього знайдено взаємозв'язок OF із площами фрагментів пікселів, які мають перетин з траєкторією відрізка прямої. Розроблено алгоритм антиаліазингу з використанням отриманих формул, особливість якого полягає у врахуванні не тільки кольору переднього плану, але й кольору фону. При цьому використовують операції додавання, зсуву та лічби, що спрощує реалізацію апаратних засобів.

При антиаліазингу крокових траєкторій інкрементні переміщення та інтенсивності складових кольору пікселів розраховуються різними процедурами, що зумовлює неоднорідність обчислювального процесу, відносно великі витрати часу та складність апаратної реалізації. Запропоновано підходи суміщення цих процедур.

Установлено зв'язок між абсолютною похибкою лінійного інтерполювання та OF . Цю залежність використано в методі антиаліазингу крокової траєкторії відрізків прямих, особливість якого полягає в переході від лінійного інтерполювання не за значеннями приростів координат відрізка прямих, а за значеннями інтенсивностей складових кольору. Це дозволило звести антиаліазинг крокової траєкторії до лінійного інтерполювання.

Доведено, що площа фрагмента піксела визначається значенням оцінювальної функції. Встановлено взаємозв'язок максимального значення OF і координатних приростів відрізків прямих. Запропоновано суміщати процедури визначення точок траєкторії та інтенсивностей їх кольору шляхом установлення інтенсивностей значеннями квантованим рівням $max(O\Phi_i)$. Це дало можливість реалізувати антиаліазинг на основі лінійної інтерполяції відрізка прямої з використанням мікрооперацій порівняння і, як наслідок, досягти простої апаратної реалізації.

Запропоновано кругову модель піксела, яка дозволяє порівняно з квадратною моделлю підвищити точність визначення інтенсивності складових кольору в 1,27 раза. Показано, що для антиаліазингу крокової траєкторії інтенсивність складової кольору поточного піксела можна визначити за формулою $I_i = (h_i + 17 / 32) \cdot I_M$, де I_M – вихідна інтенсивність складової кольору, h_i – відстань від центра піксела до відрізка прямої. Доведено, що $h_i = (BP/2 - O\Phi_i) / \sqrt{BP^2 + MP^2}$. Розроблено алгоритм антиаліазингу крокової траєкторії відрізка прямої, який у циклі інтерполювання не містить “довгих” операцій.

Запропоновано для конусної моделі піксела апроксимаційні формули для визначення об'єму V_i частини конуса, який відтинається від нього площиною, перпендикулярною до його основи і проведеною вздовж примітива. Показано, що при використанні формул $V_i \approx -0,571 \cdot h_i^2 + 1,076 \cdot h_i - 6,774 \cdot 10^{-3}$, $V(h_i) \approx h_i(1 - 0,5h_i)$ максимальні абсолютні похибки визначення об'єму не перевищать, відповідно 0,0025 і 0,015.

Доведено, що для точок, які розташовано симетрично відносно центра

відрізка прямої, $I(БП - x, МП - y) = I(x, y)$. Використання цієї властивості дає можливість майже удвічі збільшити продуктивність антиаліайзингу.

Встановлено, що при використанні кругової моделі піксела для антиаліайзингу крокової траєкторії кола $I_i = \frac{17 \cdot I_M}{32} - \frac{I_M}{2R} O\Phi_i$. Оскільки $\frac{I_M}{2R}$, $\frac{17 \cdot I_M}{32}$ є сталими для кола, то їх значення можна розрахувати один раз на етапі підготування. Для того, щоб вилучити в циклі інтерполювання операції ділення та множення, інтенсивність кольору пікселів можна приймати рівними дискретним рівням, кількість яких вибирають залежно від необхідної точності згладжування траєкторії.

Показана можливість реалізації антиаліайзингу крокової траєкторії кола з використанням конусної моделі піксела без виконання “довгих” операцій та арифметики з плаваючою комою. Для цього використано нову оцінювальну функцію, значення якої визначає відстань від центра піксела до траєкторії.

Узагальнено метод оцінювальної функції з додатковою субпікселізацією траєкторії для антиаліайзингу кривих другого порядку, заданих рівнянням у загальній формі $f(x, y) = a_{11} \cdot x^2 + a_{22} \cdot y^2 + 2 \cdot a_{12} \cdot x \cdot y + 2 \cdot a_{13} \cdot x + 2 \cdot a_{23} \cdot y + a_{33} = 0$. Суть методу полягає в розрахунку $O\Phi$ у допоміжних точках усередині піксела. Додатні знаки оцінювальних функцій визначають положення субпікселів, які розташовані вище траєкторії, а від’ємні – нижче. За кількістю оцінювальних функцій одного знака легко визначити площі фрагментів пікселів, які розділено траєкторією, а також інтенсивності складових кольору піксела. Кількість субпікселів вибирають залежно від необхідної точності визначення інтенсивностей складових кольору.

Показано, що розрахунок значень оцінювальних функцій у додаткових точках для антиаліайзингу траєкторії $f(x, y)$ можна виконувати незалежно, що забезпечує високий ступінь паралелізму обчислень і дозволяє значно підвищити швидкодію формування зображень у багатопроекторних системах.

При антиаліайзингу границь 3D-зображень необхідно враховувати, що інтенсивність кольору може змінюється від точки до точки.

При лінійному інтерполюванні інтенсивностей складових кольору вздовж ребер полігона в одному обчислювальному процесі суміщено визначення координат точок траєкторії та її антиаліайзингу. При цьому враховано, що зміна інтенсивностей складових кольору відбувається одночасно для двох процедур – напівтонового зафарбовування і антиаліайзингу. Запропоновано новий підхід до організації А-буфера, оснований на використанні логічних операцій для прискореного визначення видимості полігонів на рівні піксела, що спрощує апаратну реалізацію.

Запропоновано метод усунення артефактів при формуванні ребер суміжних полігонів, який полягає в локалізації точок, не вибраних при растеризації, що виключає необхідність постоброблювання зображень для процедур зафарбовування. Такі артефакти можливі за рахунок похибок округлення при формуванні та трансформації каркасної моделі об’єкта, різної послідовності крокових приростів спільних ребер при їх формуванні в зустрічних напрямках, додаткової триангуляції у дискретному просторі.

Показано, що артефакт растеризації ребер суміжних полігонів може з'явитися за умови, коли відстань між точками крокової траєкторії ребер у напрямку їх меншого координатного приросту дорівнює або перевищує дві дискрети.

Визначено умови появи артефактів при формуванні спільних ребер полігонів, координатні прирости яких відрізняються не більше, ніж на одну дискрету за умови формування їх у прямому та зустрічному напрямках.

За значеннями приростів координат ребер, їх положенням одне відносно одного, а також напрямків формування перевіряються умови прояву артефактів. Якщо наявність артефакту встановлено, то до визначаються інтенсивності кольору в точках, які не були охоплені растеризацією.

Запропоновані методи контурного формоутворення, антиаліайзингу крокових траєкторій та усунення артефактів забезпечують як підвищення продуктивності формування графічних сцен, так і їх реалістичності.

У шостому розділі дисертаційної роботи розглянуто практичну реалізацію розроблених високопродуктивних методів кінцевої візуалізації тривимірних зображень у системах комп'ютерної графіки. Розроблено та захищено свідоцтвом № 21320 у департаменті інтелектуальної власності України комп'ютерну програму для моделювання й тестування методів рендерингу, яка дозволяє у статичному та динамічному режимах за вибраними методами зафарбовування і моделями освітлення формувати тривимірні зображення. При цьому встановлюється візуальна відмінність між сформованими та еталонними зображеннями за нормованою середньоквадратичною похибкою $NMSE$, а також час рендерингу об'єктів. З використанням розробленого програмного засобу перевірено достовірність запропонованих методів і засобів рендерингу та отримано порівняльні оцінки.

Результати моделювання засвідчують, що при використанні розроблених ДФВЗ має місце візуальна ідентичність сформованих фігур по відношенню до класичної реалізації. Винятком є тільки ДФВЗ на основі полінома другого степеня, для якої $NMSE$ знаходиться в діапазоні $[0,00025 \div 0,001]$, а тому відносно еталонного зображення мають місце незначні візуальні відмінності.

На основі результатів моделювання проведено порівняльний аналіз розроблених ДФВЗ і сформульовані рекомендації по їх застосуванню. Показано, що при програмній реалізації найдоцільніше використовувати розроблену косинус-квадратичну ДФВЗ $(7 \cdot n \cdot (\cos \gamma - 1) / 16 + 1)^2$, яка порівняно з поширеною в пакетах прикладних програм функцією Шліка обчислюється в 1,7 раза швидше, має в п'ять разів меншу максимальну відносну похибку апроксимації епіцентра відблиску та реалістично відтворює його блюмінг.

Показано, що при програмній реалізації процедури визначення векторів з використанням квадратичної інтерполяції для середньостатистичного трикутника досягається підвищення продуктивності в середньому в 1,7 раза порівняно з класичною реалізацією, а при використанні методу кінцевих різниць у 2,6 раза.

За результатами експерименту встановлено, що використання для зафарбовування сферично-кутової інтерполяції векторів дозволяє зменшити час розрахунків в середньому в 1,5 раза.

Концепція структурно-адаптивного зафарбовування передбачає попередній

аналіз триангуляційної структури тривимірного об'єкта, а тому має місце збільшення циклу підготовки. Формування тестових фігур з різною щільністю триангуляційної мережі показало, що використання структурно-адаптивного підходу дозволяє до двох разів підвищити продуктивність зафарбовування сцени порівняно з класичною реалізацією. Обмеження становлять поверхні з невисоким значенням коефіцієнта спекулярності ($n < 30$), для яких відблиск займає велику площу поверхні об'єкта.

Метод зафарбовування з використанням поверхні другого порядку, точки якої визначають інтенсивність кольору, дозволяє при програмній реалізації підвищити продуктивність до 12 разів порівняно з методом Фонга при NMSE, яка не перевищує 0,00025 для тестових фігур із середнім ступенем деталізації. Для об'єктів із високою щільністю триангуляційної мережі NMSE зменшується до меж, які визначають візуальну ідентичність між тестовими і сформованими фігурами.

Експериментальні дослідження запропонованих методів антиаліазингу показали, що забезпечується підвищення швидкодії процедури згладжування відрізків прямих у $2,2 \div 4,4$ рази порівняно з методом Гупти-Спроула.

Оцінено прояв смуг Маха залежно від кольору поверхні. На основі аналізу результатів експерименту зроблено висновок про доцільність додаткової триангуляції поверхонь, зафарбованих у білий, жовтий та фіолетовий кольори, для яких візуальний прояв смуг Маха найбільший.

При комплексному використанні розроблених процедур досягається підвищення продуктивності програмної реалізації зафарбовування в 3–5 разів порівняно з методом Фонга при збереженні візуальної ідентичності до тестових зображень. На рис. 5 наведено приклади зображень тривимірних об'єктів, для формування яких використано розроблену ДФВЗ на основі косинус-квадратичної функції, сферично-кутову інтерполяцію векторів та адаптивну концепцію зафарбовування.

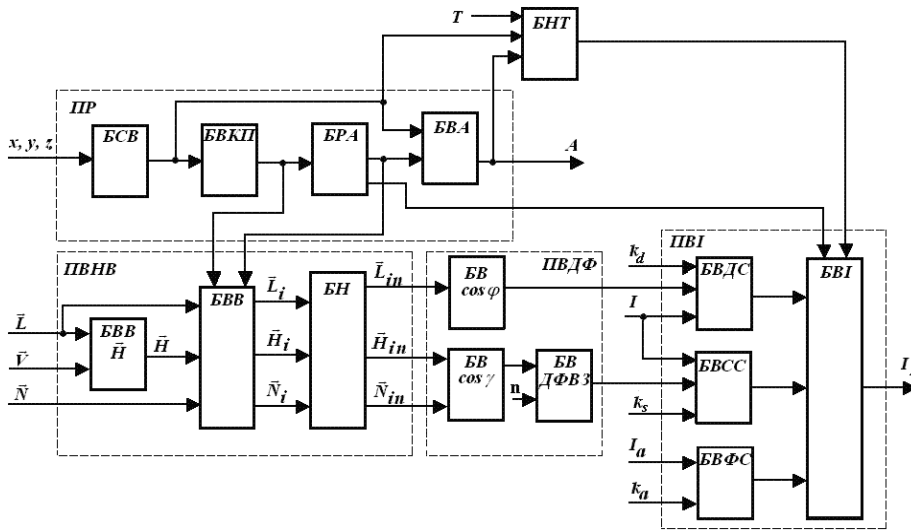


Рис. 5. Приклади сформованих зображень

Розглянуто питання апаратної реалізації пристроїв для систем кінцевої візуалізації. Розроблено структури для апаратної реалізації ДФВЗ на основі полінома другого степеня, логарифмічної функції та синусно-квадратичного перетворення, функції $\cos^k(\eta \cdot \gamma)$. Розглянуто особливості апаратної реалізації та розроблено структурні схеми блоків для нормалізації векторів на основі принципу дихотомії, сферично-кутової інтерполяції і адаптивної нормалізації. Запропоновано апаратні засоби для визначення дифузної та спекулярної складових кольору.

Розроблено структурні схеми адресного блока та блока визначення інтенсивностей кольору для методу, який використовує поверхню другого порядку. Запропоновано структури для крайового антиаліазингу двовимірних і тривимірних об'єктів, а також неортогональної растеризації.

Система кінцевої візуалізації (рис.6), у якій реалізовано базові етапи рендерингу, включає блоки:



сортування вершин трикутника БСВ, визначення приростів БВКП, растеризації та антиаліазингу БРА, визначення адрес відеопам'яті БВА, накладання текстур БНТ, визначення вектора \vec{N} БВВ \vec{N} , визначення векторів БВВ, нормалізації БН, визначення $\cos \gamma$ – БВ $\cos \gamma$, визначення

Рис. 6. Структура системи кінцевої візуалізації

$\cos \phi$ – БВ $\cos \phi$, визначення ДФВЗ БВДФВЗ, визначення розсіяної складової кольору БВФС, визначення дифузної складової кольору БВДС, визначення спекулярної складової кольору БВСС, блок визначення інтенсивності кольору БВІ.

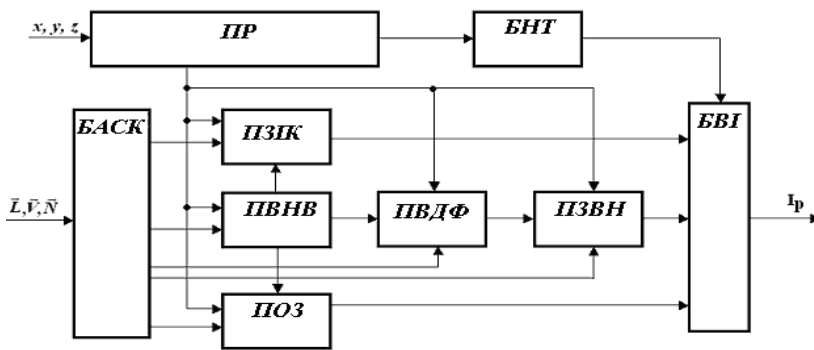


Рис. 7. Структура системи кінцевої візуалізації з структурно-адаптивним зафарбовуванням

Система кінцевої візуалізації (рис. 7), у якій реалізовано структурно-адаптивне зафарбовування, включає підсистему растеризації, блок БНТ, підсистему зафарбовування з використанням інтерполювання інтенсивності кольору ПЗІК, підсистему визначення нормованих векторів ПНВН, підсистему

визначення дистрибутивних функцій ПВДФ, підсистему зафарбовування з використанням інтерполювання векторів, підсистему однотонного зафарбовування, блок аналізу складових кольору БАСК, блок визначення інтенсивності кольору БВІ. Залежно від результату аналізу, який виконується БАСК, вибирається метод зафарбовування і модель освітлення.

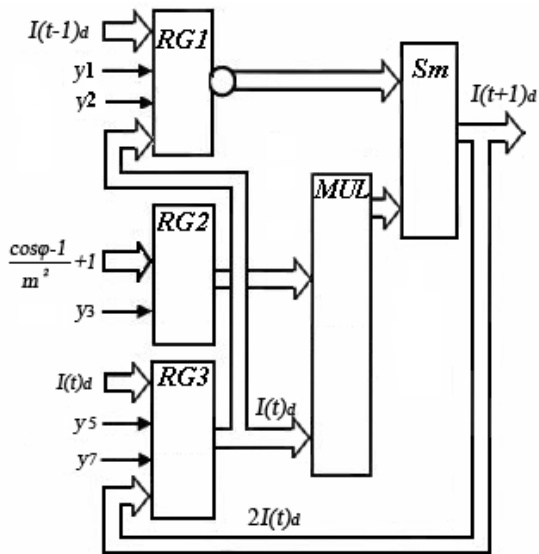


Рис. 8. Структурна схема блока для визначення дифузної складової кольору

блок інверторів. Особливості структур полягають: у зберіганні в *PROM* тільки одного коефіцієнта, за значенням якого визначаються всі інші коефіцієнти (рис. 9,а); у використанні одного операційного пристрою для двох етапів перетворення (рис. 9,б); у відсутності блоків постійної пам'яті.

Розроблені програми для рендерингу захищено 12-ма свідоцтвами на реєстрацію авторських прав на комп'ютерні програми в Державному департаменті інтелектуальної власності, а структури апаратних засобів – 9-ма патентами України. Це поряд із результатами експериментальних досліджень та впроваджених у виробництво пристроїв підтверджує достовірність теоретичних положень.

Використання рекурентних співвідношень для визначення векторів на основі сферично-кутової інтерполяції забезпечує простоту апаратної реалізації та високу швидкість пристрою для визначення дифузної і спекулярної складових кольору. На рис. 8 наведено структурну схему блока для визначення інтенсивності дифузної складової кольору.

Розроблено структурні схеми блоків (рис. 9) розрахунку спекулярної складової кольору (ССК) з використанням ДФВЗ на основі полінома другого степеня (рис. 9,а), логарифмічної функції (рис. 9,б), косинус-квадратичної функції (рис. 9,в). На схемах

Sm – комбінаційний суматор, *MUL* – блок множення, *PROM* – блок постійної пам'яті, *RG* – регістр, *MX* – мультиплексор, *VI* –

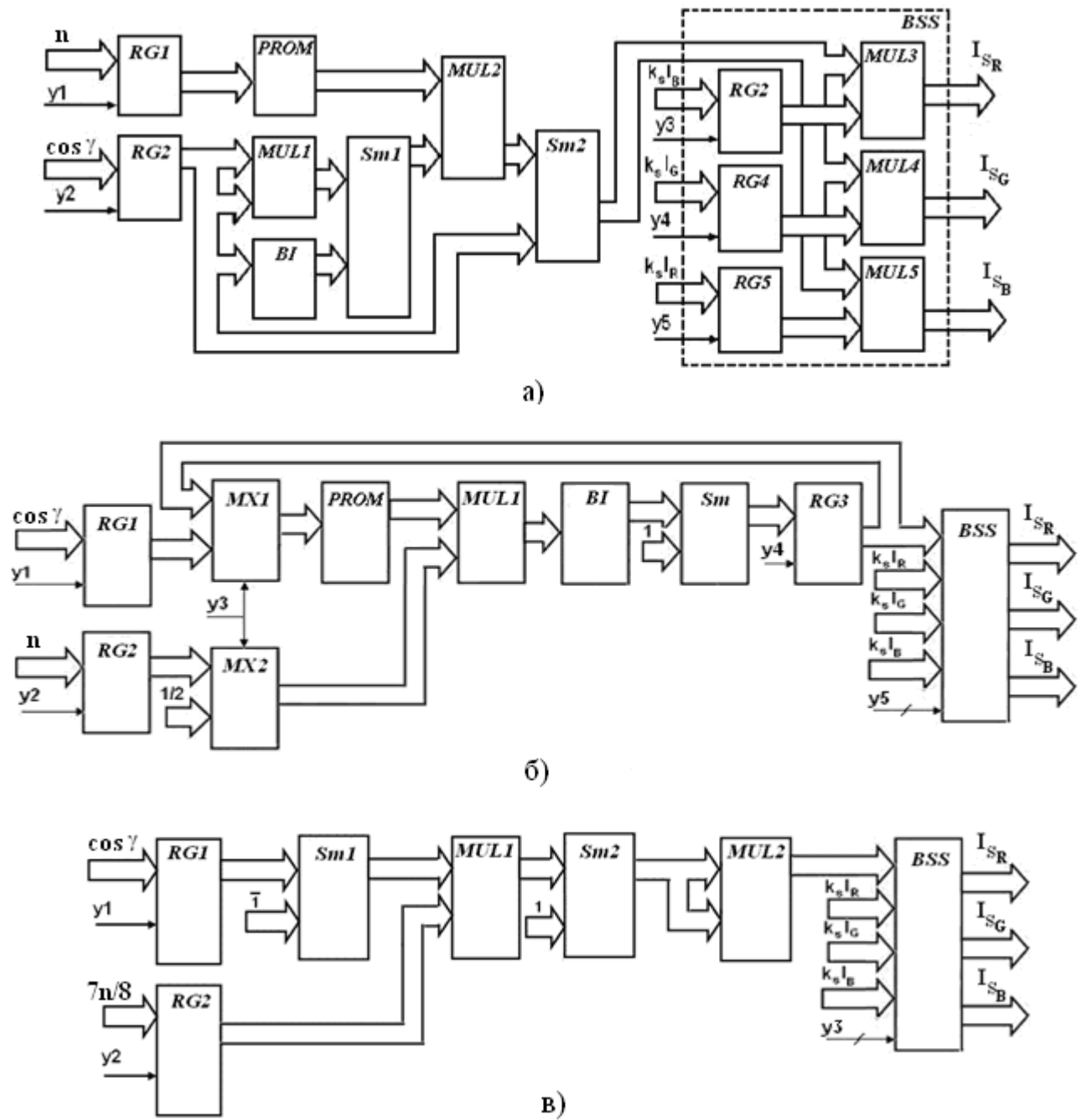


Рис. 9. Структурні схема блоків для розрахунку ССК з використанням розроблених ДФВЗ

На рис. 10 зображено макет графічного акселератора, для якого розроблено та виготовлено вісім ВІС.

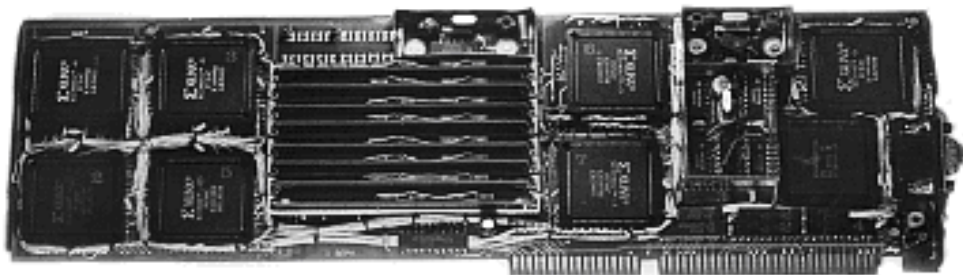


Рис. 10. Макет графічного акселератора

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розвинуто теорію кінцевої візуалізації тривимірних графічних об'єктів, що дозволило вирішити проблему підвищення продуктивності формування зображень та їх реалістичності у системах комп'ютерної графіки з використанням нових моделей освітлення, методів і засобів зафарбовування, формоутворення та антиаліазингу. У ході досліджень було отримано такі результати.

1. Розроблено концепцію структурно-адаптивного зафарбовування, яка полягає в попередньому аналізі триангуляційної структури тривимірного об'єкта з подальшим адаптивним вибором моделей освітлення та методів зафарбовування, і забезпечує підвищення продуктивності до двох разів за рахунок вилучення надлишкових обчислень при візуальній ідентичності відтворення тривимірних графічних об'єктів. Запропоновано сукупність методів для ідентифікації відблисків на поверхні тривимірних об'єктів, що дозволяє виключити з обчислювального процесу трудомісткий розрахунок спекулярної складової кольору, коли вона не має візуального прояву і, як наслідок, зменшити час зафарбовування.

2. Розроблено теоретичні засади високопродуктивного зафарбовування тривимірних об'єктів, що включають методи прискореного визначення нормалізованих векторів, нові моделі для відтворення рефлекторних властивостей поверхонь, нові методи визначення дифузної та спекулярної складових кольору. Запропоновані методи та моделі використовують прості з обчислювальної точки зору функції і операції, що дає можливість прискорити формування зображень як на програмному, так і на апаратному рівнях.

3. Уперше запропоновано методи коректного відтворення кольорів при зафарбовуванні тривимірних графічних об'єктів, основані на лінійному інтерполюванні інтенсивностей складових кольору, лінійній та сферично-кутовій інтерполяції векторів і враховують перспективне проєкціювання, що дозволяє підвищити реалістичність формування графічних сцен за рахунок установа відповідності кольору точок поверхонь в об'єктній та екранній системах координат.

4. Отримано нові співвідношення для перспективно-коректного накладання текстури, які враховують властивість ангармонійного відношення чотирьох колінарних точок, що дає можливість прискорити на 20 % текстурування за рахунок зменшення кількості операцій ділення та множення.

Для перспективно-коректного нанесення текстури пропонується використовувати неортогональний напрямок растеризації ділянки, обмеженої полігоном, за умови, що рядки растеризації в об'єктній системі координат розміщено на фіксованій відстані від спостерігача. Це дає можливість спростити текстурування рядків растеризації трикутника за рахунок вилучення з обчислювального процесу операції ділення та множення. Зокрема, врахування крокового переміщення з поточного рядка растеризації для переходу до наступного при формуванні прямокутного вікна зображення, розміщеного під довільним кутом відносно осей координат, дозволяє вдвічі зменшити апаратні витрати.

5. Розроблено два нових методи прискореного контурного формоутворення, особливість яких полягає у визначенні не однієї, а відразу декількох точок

траєкторії. Особливість першого з них полягає в зустрічному формуванні крокової траєкторії, що дає можливість до двох раз підвищити продуктивність лінійного інтерполювання. Другий метод забезпечує підвищення швидкодії інтерполяції за рахунок сегментного формування траєкторії та враховує апріорний статистичний розподіл крокових приростів для вибору оцінювальної функції.

6. Удосконалено методи контурного антиаліайзингу за рахунок суміщення процедур визначення координат точок траєкторії та їх інтенсивностей складових кольору, що забезпечує зменшення обчислювальних витрат, спрощення апаратної реалізації та дозволяє згладжувати крокову траєкторію у темпі її формування:

- встановлено взаємозв'язок між абсолютною похибкою лінійного інтерполювання та значенням оцінювальної функції, що дозволило перейти від лінійного інтерполювання за значеннями приростів координат відрізка прямої до лінійного інтерполювання за значеннями інтенсивностей складових кольору;
- встановлено взаємозв'язок площі фрагмента пікселя зі значенням оцінювальної функції, що дає можливість визначити інтенсивності складових кольору за її квантованими рівнями та реалізувати антиаліайзинг на основі лінійної інтерполяції відрізка прямої з використанням мікрооперацій порівняння без ускладнення циклу підготовки;
- доведено можливість суміщення при формуванні контурів 3D-зображень процедур напівтонового зафарбовування та антиаліайзингу, для яких має місце одночасна зміна інтенсивностей складових кольору.

7. Узагальнено метод додаткових оцінювальних функцій для антиаліайзингу кривих другого порядку, заданих загальним рівнянням. Суть методу полягає у введенні субпікселізації для контурів графічних об'єктів і визначенні складових кольору пікселя з використанням оцінювальних функцій, розрахованих у допоміжних точках усередині пікселя. Метод не містить «довгих» операцій у циклі інтерполювання, має просту апаратну реалізацію, не потребує збільшення розмірів кадрового буфера та фільтрації на стадії постоброблення.

8. Запропоновано метод усунення артефактів при растеризації ребер суміжних полігонів, який полягає в локалізації на етапі формування зображення точок, не вибраних при растеризації, що виключає необхідність постоброблювання зображень при реалізації алгоритмів зафарбовування.

9. Створено діючі високопродуктивні програмні та апаратні засоби для рендерингу тривимірних зображень у системах комп'ютерної графіки. Розроблено структурні схеми пристроїв для систем формування тривимірних зображень, що є основою для виготовлення конкурентоспроможних зразків цієї продукції. Сформульовано рекомендації щодо проектування засобів для систем кінцевої візуалізації тривимірних графічних зображень. Розроблено програмні засоби для моделювання та тестування методів рендерингу, які дозволяють отримати порівняльні оцінки за точністю та продуктивністю.

10. Результати дисертаційної роботи впроваджено на ряді підприємств, а також у навчальному процесі у Вінницькому національному технічному університеті.

Отримані характеристики та параметри розроблених апаратних і програмних засобів підтверджують коректність наукових положень та адекватність

запропонованих моделей.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Романюк О. Н. Методи та засоби антиаліайзингу контурів об'єктів у системах комп'ютерної графіки. Монографія / О. Н. Романюк, М. С. Курінний. — Вінниця: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006. — 163 с.
2. Романюк О. Н. Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів. Монографія. / О. Н. Романюк, А. В. Чорний. —Вінниця: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006. — 190 с.
3. Петух А. М. Інтерполяція в задачах контурного формоутворення. Монографія. / А. М. Петух, Д. Т. Обідник, О. Н. Романюк. — Вінниця: ВНТУ, 2007. — 103 с.
4. Романюк О. Н. Адаптивне використання різних методів зафарбовування при формуванні тривимірних графічних фігур / О. Н. Романюк // Нові технології. — 2005. — № 3 (9). — С. 78—86.
5. Романюк О. Н. Використання квадратичної інтерполяції для зафарбовування тривимірних графічних об'єктів / О. Н. Романюк // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2006. — Т. 8. — № 4. — С. 31—37.
6. Романюк О. Н. Альтернативна реалізація дистрибутивної двопроменевої функції для моделей освітлення Бліна та Фонга / О. Н. Романюк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». — 2006. — Випуск 106. — С. 219—228.
7. Романюк О. Н. Апаратна підтримка зафарбовування тривимірних графічних об'єктів із використанням сферично-кутової інтерполяції / О. Н. Романюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2007. — № 3 (10). — С. 193—198.
8. Романюк О. Н. Ефективна модель для відтворення спекулярної складової кольору / О. Н. Романюк // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць. — 2007. — Випуск 2 (20). — С. 115—120.
9. Романюк О. Н. Метод прискореного зафарбовування тривимірних поверхонь з урахуванням їх локальної кривизни / О. Н. Романюк // Вісник Східноукраїнського національного університету. — 2008. — № 12 (130). — С. 166—172.
10. Романюк О. Н. Прискорене визначення дифузної складової кольору при зафарбовуванні тривимірних графічних фігур / О. Н. Романюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2006. — № 2 (12). — С. 71—76.
11. Романюк О. Н. Програмно-апаратна реалізація рендерингу тривимірних зображень у системах комп'ютерної графіки / О. Н. Романюк // Труды Одесского политехнического университета. — Одесса, 2007. — Випуск 2(28). — С. 158—162.
12. Романюк О. Н. Новий підхід до згладжування контурів тривимірних зображень // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2006. — № 1. — С. — 98—103.
13. Романюк О. Н. Коректне зафарбовування тривимірних зображень при використанні сферично-кутової інтерполяції векторів нормалей / О. Н. Романюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2007. — № 2(9). — С. 186—191.
14. Романюк О. Н. Метод антиаліайзингу границі кола з адаптивною схемою розташування додаткових точок / О. Н. Романюк // Наукові праці Донецького

- національного технічного університету. — Серія «Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка». — 2007. — Випуск 8 (120). — С. 219—228.
15. Романюк О. Н. Підвищення ефективності шейдерних моделей графічних відеокарт за рахунок попереднього аналізу спекулярної складової кольору / О. Н. Романюк // Нові технології. — 2008. — № 2(20). — С. 295—230.
16. Романюк О. Н. Паралельна структура для реалізації зафарбовування в системах комп'ютерної графіки / О. Н. Романюк // Труды Одесского политехнического университета.— Одесса, 2007. — Випуск 1(27). — С. 142—146.
17. Романюк О. Н. Новий підхід до підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних об'єктів за методом Гуро / О. Н. Романюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2005. — № 2. — С. 106—109.
18. Романюк О. Н. Розробка методу антиаліазингу траєкторій гіпербол / О. Н. Романюк // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2007. — № 28. — С. 302—307.
19. Романюк О. Н. Спрощення процедури накладання текстур на тривимірні графічні об'єкти / О. Н. Романюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2006. — № 2. — С. 114—118.
20. Романюк О. Н. Дослідження дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхонь / О. Н. Романюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2007. — № 1(13). — С. 45—49.
21. Романюк О. Н. Основные процедуры 3D-конвейеризации / О. Н. Романюк // Труды филиала МВТУ им. Н. Э. Баумана в г. Калуге. Специальный выпуск: материалы международного симпозиума «Наука и предпринимательство», 2000. — С. 471—476.
22. Романюк О. Н. Урахування перспективи тривимірних об'єктів для покращення якості зафарбовування / О. Н. Романюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2006. — № 3 (7). — С. 134—137.
23. Романюк О. Н. Усунення артефактної зміни інтенсивності кольору при зафарбовуванні тривимірних графічних фігур за методом Гуро / О. Н. Романюк // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2005. — № 2. — С. 274—278.
24. Романюк О. Н. Формування векторів чотирирозрядними приростами / О. Н. Романюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2007. — № 2. — С. 98—101.
25. Романюк О. Н. Антиаліазинг контурів графічних об'єктів при використанні для зафарбовування методу Гуро / О. Н. Романюк // Нові технології. — 2006. — № 1 (11). — С. 107—110.
26. Романюк О. Н. Комбіноване використання бінарної та кодової лінійної інтерполяції для нормалізації векторів нормалей при зафарбовуванні тривимірних об'єктів / О. Н. Романюк // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2006. — № 25. — С. 408—411.
27. Романюк О. Н. Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні / О. Н. Романюк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — Серія «Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка». — 2008. — Випуск 9 (132). — С. 145—151.
28. Романюк О. Н. Один із шляхів спрощення обчислювального процесу при за-

- фарбовуванні тривимірних графічних об'єктів за методом Гуро / О. Н. Романюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2004. — № 2. — С. 72—75.
29. Романюк О. Н. Метод підвищення реалістичності відтворення тривимірних графічних об'єктів / О. Н. Романюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2007. — № 1 (8). — С. 192—196.
30. Романюк О. Н. Контроль реалізації функцій лінійного інтерполювання / О. Н. Романюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1996. — № 4. — С. 28—32.
31. Романюк О. Н. Эффективные алгоритмы распараллеливания процедуры рендеринга при формировании реалистических изображений / О. Н. Романюк // Труды 11-й международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению Графикон 2001. — 2001. — С. 80—81.
32. Romanuyk O. Approximation of Bidirectional Reflectance Distribution Function with 3-Degree Polynomial // IEEE Workshop on Control and Communications, 2007. SIBCON apos; 07. Siberian Conference on Volume, Issue, 20—21 April 2007 Page(s) : 158—164.
33. Романюк О. Н. Класифікація графічних відеоадаптерів / О. Н. Романюк // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці: всеукраїнська наук.-практ. конф., 8–10 квітня, 2008 : тези доповідей —2008. — С. 88—90.
34. Романюк О. Н. Математичні моделі пікселів для задач антиаліайзингу / О. Н. Романюк, М. С. Курінний // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. — 2002. — № 3. — С. 35—47.
35. Романюк О. Н. Антиаліайзинг границі кола з використанням модифікованої оцінювальної функції / О. Н. Романюк, М. С. Курінний // Вісник Херсонського державного технічного університету. — 2003. — Вип. 3(19). — С. 206—208.
36. Романюк О. Н. Дослідження граничних ефектів при триангуляції областей, обмежених полігонами / О. Н. Романюк, А. В Чорний, Т. А Замковий // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2002. — № 3. — С. 78—86.
37. Романюк О. Н. Антиаліайзинг зображення кривих другого порядку, заданих загальним рівнянням / О. Н. Романюк, М. С. Курінний // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць. — 2007. — Т. 8. — № 3. — С. 11—19.
38. Романюк О. Н. Нові підходи до реалізації функцій колової інтерполяції / О. Н. Романюк, І. М. Якубішин, О. В. Сіденко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2000. — № 3. — С. 85—88.
39. Романюк О. Н. Адаптивна нормалізація векторів при визначенні дифузної та спекулярної складових кольору / О. Н. Романюк, О. М. Мельников // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2006. — Т. 8. — № 3. — С. 11—19.
40. Романюк О. Н. Використання конусної моделі піксела для антиаліайзингу відрізків прямих / О. Н. Романюк, М. С. Курінний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 4. — С. 76—81.
41. Романюк О. Н. Квадратична апроксимація BRDF / О. Н. Романюк, Ю. Л. Ляшенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 1. — С. 67—69.
42. Романюк О. Н. Метод зафарбовування тривимірних графічних об'єктів без

нормалізації векторів нормалей / О. Н. Романюк, А. А. Шаманський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2006. — № 2 (6). — С. 111—115.

43. Романюк О. Н. Апаратно-орієнтований метод антиаліазингу крокової траєкторії відрізків прямих / О. Н. Романюк, М. С. Курінний, В. О. Денисюк // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць: Випуск 1(23). — 2008. — С. 249—254.

44. Романюк О. Н. Новий підхід до антиаліазингу границь кіл із використанням табличного методу / О. Н. Романюк, М. С. Курінний // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2005. № 1. — С. 146—150.

45. Романюк О. Н. Розподілення обчислювального процесу при реалізації процедур рендерингу / О. Н. Романюк, А. В. Чорний. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — 2003. — № 4. — С. 14—18.

46. Романюк О. Н. Метод накладання текстури на поверхню тривимірного об'єкта / О. Н. Романюк, М. В. Неживенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2008. — № 1. — С. 147—151.

47. Романюк О. Н. Новий підхід до визначення спекулярної складової кольору / О. Н. Романюк, А. В. Чорний // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2004. — № 2. — С. 58—70.

48. Романюк О. Н. Реалізація рендерингу Фонга з використанням сферично-кутової інтерполяції / О. Н. Романюк, А. В. Чорний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 3. — С. 66—71.

49. Романюк О. Н. Усунення ефекту аліазингу границі кола / О. Н. Романюк, М. С. Курінний, А. А. Сахно // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2001. — № 2. — С. 86—89.

50. Романюк О. Н. Адаптивний метод зафарбовування поверхонь / О. Н. Романюк, А. В. Чорний, А. В. Пугачова // Сборник научных трудов Национального горного университета. — 2004. — № 19, том 2. — С. 208—218.

51. Романюк О. Н. Ефективний алгоритм антиаліазингу векторних границь багатокутника / О. Н. Романюк, М. С. Курінний // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Збірник наукових праць. — 2002. — С. 105—109.

52. Романюк О. Н. Усунення ефекту аліазингу границь еліпсів / О. Н. Романюк, М. С. Курінний // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2004. — № 2(8). — С. 40—47.

53. Романюк О. Н. Розпаралелення процесу зафарбовування шляхом формування парних і непарних точок рядка растеризації / О. Н. Романюк, А. В. Чорний, Л. П. Гусак // Вестник Херсонского государственного технического университета. — 2002. — Вып. 2(15). — С. 150—154.

54. Романюк О. Н. Новий підхід до реалізації лінійного інтерполювання / О. Н. Романюк, Ю. П. Гульчак, А. В. Чорний // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1999. — № 4. — С. 94—96.

55. Романюк О. Н., Реалізація розпаралелення рендерингу з використанням медіанного перетину для триангуляції / О. Н. Романюк, Ю. П. Гульчак, А. В. Чорний // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2000. — № 1. — С. 75—77.

56. Romanyuk O., Hast A. A method for accelerated computation of color intensities for shading of three-dimensional graphics objects // *Współczesne problemy informatyki. Algorytmy i modelowanie*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Menedżerskiej, Legnica 2007, — pp. 213—227.
57. Romanuyk O. / Methods for Specular Color Component Accelerate Calculation/ O. Romanuyk., A. Chernij // *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing systems: Technology and Applications*. Sofia. — 2005. — С. 615—619.
58. Romanyuk O.N., Chornij A.V. Using the different lighting models during realistic image creation // *Proceedings of the 7th international conference on Development and Application System “DAS ‘2004”*. — Suceava. — 2004.— pp. 504—507.
59. Romanyuk O., Chornij A. Effective algorithms of rendering procedure parallelization for realistic image forming // *Proceedings of the 6th international conference on Development and Application System “DAS ‘2002”*. — Suceava. — 2002. — pp. 357—362.
60. Романюк О. Н. Алгоритми триангуляції полігональних областей для використання в засобах комп’ютерної графіки // О. Н. Романюк, Ю. В. Седлецька // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. — 2003. — № 1. — С. 104—107.
61. Романюк О. Н. Метод розпаралелення процедури зафарбовування поверхонь при формуванні реалістичних зображень / О. Н. Романюк, А. В. Чорний // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. — 2001. — № 1. — С. 99—109.
62. Дек. патент № 33248 А, МПК7 G 09 G 1/16, G 09 K 9/36. Спосіб повороту вікна зображення та пристрій для його реалізації / О. Н. Романюк. — № 99010439; заяв. 27.01.1999; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1.
63. Патент на корисну модель № 22802, (51) МПК(2006) G 06 T 15/50. Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору / О. Н. Романюк. — № 2006 13737; заяв. 25.12.2006; опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5.
64. Дек. патент № 40931 А, МПК7 G 06 F 19/353. Лінійний інтерполятор / О. Н. Романюк, М. С. Курінний. — № 200116433; заяв. 14.11.2000; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7.
65. Патент на корисну модель № 30041, (51) МПК(2006) G 06 T 15/50. Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору / О. Н. Романюк, Ю. Л. Ляшенко— № 2006 10786; заяв. 01.10.2007; опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3.
66. Дек. патент № 60427 А, МПК7 G 06 F 17/00. Лінійний інтерполятор / О. Н. Романюк, М. С. Курінний. — № 2002054287; заяв. 24.05.2002; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10.
67. Дек. патент № 50547 А, МПК7 G 05 B 19/4155, G 06 F 15/00. Цифровий лінійний інтерполятор / О. Н. Романюк, Я. А. Дзись, А. В. Чорний, Г. А. Рудомін. — № 20022021035; заяв. 08.02.2002; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.
68. Дек. патент № 71489 А, МПК7 G 05 B 19/4155, G 06 F 15/00. Пристрій для визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору / О. Н. Романюк, А. В. Чорний. — № 20031215276; заяв. 31.12.2003; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 10.
69. Патент на корисну модель № 18419, (51) МПК(2006) G 06 T 15/50. Пристрій для визначення нормованих векторів / О. Н. Романюк, А. В. Чорний, М. В. Неживенко, О. М. Мельников. — № 2006 04103; заяв. 13.04.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.
70. Патент на корисну модель № 20998, (51) МПК(2006) G 06 T 15/50. Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору / О. Н. Романюк,

Ю. Л. Ляшенко, О. М. Мельников. – № 2006 09954; заяв. 18.09.2006; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

71. Романюк О.Н. Розподілення обчислювального процесу зафарбовування між вершинними, піксельними і геометричними шейдерами в графічному процесорі / О. Н. Романюк // Праці дев'ятої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології», Одеса, 19–23 травня 2008. — С. 23.

АНОТАЦІЇ

Романюк О.Н. Високопродуктивні методи та засоби кінцевої візуалізації тривимірних зображень у системах комп'ютерної графіки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2009.

У дисертаційній роботі розвинуто теорію кінцевої візуалізації тривимірних графічних об'єктів, що дозволило вирішити науково-прикладну проблему підвищення продуктивності та реалістичності формування зображень у системах комп'ютерної графіки з використанням концепції структурно-адаптивного зафарбовування, нових моделей освітлення, методів зафарбовування, формоутворення та антиаліазингу. На основі отриманих теоретичних положень розроблено високопродуктивні програмні та апаратні засоби для систем формування тривимірних графічних зображень.

Комп'ютерне моделювання, експериментальні дослідження та впровадження розроблених засобів у системах комп'ютерної графіки підтвердили адекватність розроблених теоретичних засад і ефективність запропонованих методів.

Ключові слова: системи кінцевої візуалізації, рендеринг, графічні процесори, реалістичні зображення, растеризація, графічні акселератори, дистрибутивна функція відбивної здатності поверхні.

Романюк А.Н. Высокопроизводительные методы и средства конечной визуализации трёхмерных изображений в системах компьютерной графики. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2009.

Диссертационная работа посвящена развитию теории конечной визуализации трёхмерных изображений в системах компьютерной графики с целью повышения производительности и реалистичности формирования изображений.

Предложена концепция структурно-адаптивной закраски, которая состоит в предварительном анализе триангуляционной структуры трёхмерного объекта с целью последующего адаптивного выбора моделей освещения и методов закраски, что обеспечивает повышение производительности за счёт исключения избыточных вычислений. Разработаны методы идентификации отблесков на поверхности

трехмерных объектов для исключения из вычислительного процесса трудоемкого расчета спекулярной составляющей цвета, когда она не имеет визуального проявления и, как следствие, уменьшить время закраски. Предложены разновидности адаптивного использования разных методов закраски.

Разработаны теоретические основы высокопроизводительной закраски трёхмерных объектов, которые включают методы ускоренного определения нормализованных векторов, новые модели для воспроизведения рефлекторных свойств поверхностей, новые методы определения диффузной и спекулярной составляющих цвета. Предложенные методы и модели используют простые, с вычислительной точки зрения, функции и операции, что позволяет ускорить закраску как на программном, так и аппаратном уровнях.

Предложен метод повышения реалистичности изображений трехмерных изображений, в котором достигнуто соответствие цвета точек поверхностей в объектной и экранной системах координат.

Дальнейшее развитие получил метод закраски с использованием сферически угловой интерполяции, в котором исключена трудоемкая процедура определения углов между векторами.

Предложен метод ускоренного формирования шаговой траектории векторов и дуг окружностей, который учитывает априорное статистическое распределение комбинаций шаговых приращений для выбора и расчета оценочной функции, что обеспечивает повышение быстродействия интерполяции за счет сегментного формирования траектории.

Разработан метод формирования отрезков прямых, особенность которого состоит во встречном формировании шаговой траектории с использованием одной оценочной функции, что позволило повысить производительность линейного интерполирования до двух раз при обеспечении максимально возможной точности.

Усовершенствованы методы контурного антиалиаизинга, в которых совмещены процедуры определения координат точек траектории и интенсивностей составляющих цвета, что обеспечивает уменьшение вычислительных затрат, упрощение аппаратной реализации и позволяет сглаживать шаговую траекторию в темпе её формирования.

Предложен метод устранения артефактов при растеризации ребер смежных полигонов на этапе формирования изображения, который заключается в локализации точек, не выбранных при растеризации, и доопределении их параметров, что исключает необходимость постобработки изображений на стадии закраски.

Разработаны специализированный программный модуль для моделирования и тестирования методов рендеринга, который позволяют получить сравнительные оценки по точности и производительности.

На основе полученных теоретических положений разработаны действующие высокопроизводительные программные и аппаратные средства для формирования трехмерных изображений в системах компьютерной графики.

Компьютерное моделирование, экспериментальные исследования и внедрение разработанных средств в системах компьютерной графики подтвердили

достоверность основных теоретических положений и эффективность предложенных методов.

Ключевые слова: системы конечной визуализации, рендеринг, графические процессоры, реалистичные изображения, растеризация, графические акселераторы, дистрибутивная функция отражательной способности поверхности.

Romanjuk O. N. High efficient methods and facilities for three-dimensional images final visualisation in the computer graphic systems. – Manuscript.

Thesis for Doctor degree in engineering sciences on the specialty 05.13.05 – computer systems and components. – Vinnytsya National Technical University, Vinnytsya, 2009.

The Thesis presents the developed theory of three-dimensional graphic objects final visualization, which enabled to solve the scientific and applied task of productivity increase and realness of the images formation in the computer graphics systems with use of the structurally adaptive shading concept, new models of illumination, shading methods, forms creation and anti-aliasing.

On the basis of the received theoretical background there had been developed the high efficient soft and hard ware for formation the three-dimensional graphic representation.

Computer simulation, experimental researches and implementation of the developed soft and hard ware in the systems of computer graphics had proved the reliability of the main theoretical principles and efficiency of the suggested methods.

Keywords: systems of the final visualisation, rendering, graphic processors, realistic images, rasterization, graphic accelerators, bidirectional reflectance distribution function

Підписано до друку 11.02.2009 р. Формат 29.7×42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2009-038.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59