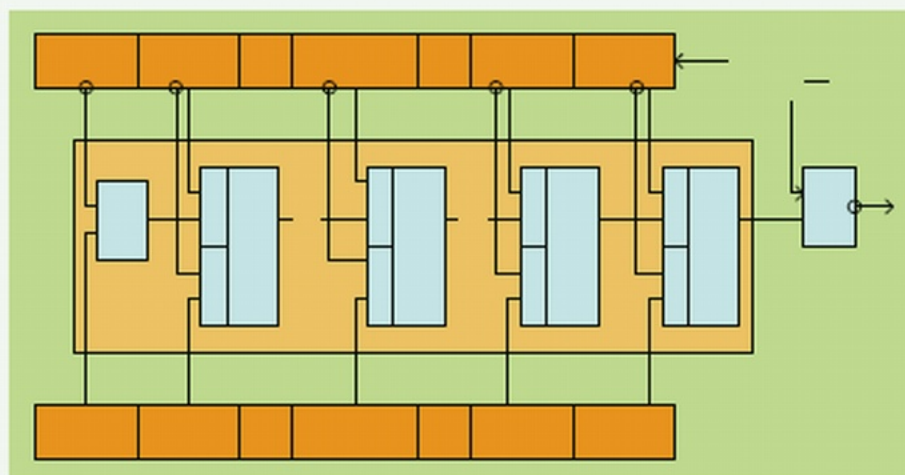
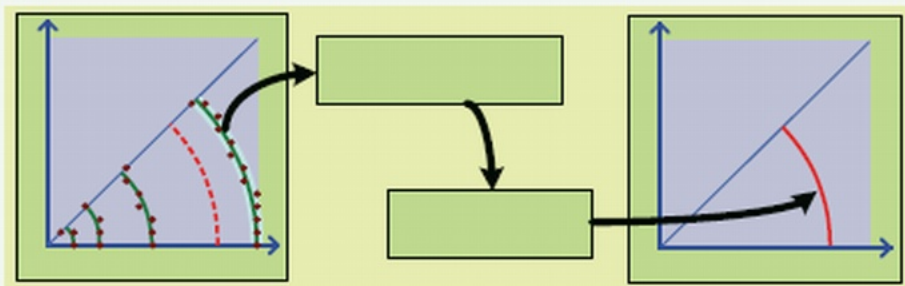


ШВИДКОДІЙНІ ЦИФРОВІ
ФУНКЦІОНАЛЬНІ
ГЕНЕРАТОРИ ГРАФІЧНИХ
ПРИМІТИВІВ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

А. М. Петух, В. О. Денисюк, Д. Т. Обідник

**ШВИДКОДІЙНІ ЦИФРОВІ
ФУНКЦІОНАЛЬНІ
ГЕНЕРАТОРИ ГРАФІЧНИХ
ПРИМІТИВІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 004.31
ББК 32.973.2-04
П 31

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 1.10.2009 р.)

Рецензенти:

Р. Н. Квстний, доктор технічних наук, професор
В. М. Лисогор, доктор технічних наук, професор
І. С. Ткаченко, доктор економічних наук, професор

Петух, А. М.

П 31 Швидкодійні цифрові функціональні генератори графічних примітивів : монографія / А. М. Петух, В. О. Денисюк, Д. Т. Обідник. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 148 с.

ISBN 978-966-641-343-0

Розглянуто методи та засоби побудови швидкодійних цифрових функціональних генераторів графічних примітивів для пристроїв відображення інформації. Запропоновано метод відтворення кривих, що дозволяє підвищити швидкодію відтворення та зменшити апаратні витрати. Визначено похибку існуючих і запропонованих структур, що реалізують лінійні графічні примітиви. Запропоновано метод згладжування нерівномірнісних характеристик цифрових інтеграторів послідовного переносу, який поліпшує вигляд і зменшує похибку відтворення кривих. Проведено логічне і схемотехнічне моделювання запропонованих структур для лінійної та кругової інтерполяції.

УДК 004.31
ББК 32.973.2-04

ISBN 978-966-641-343-0

© А. Петух, В. Денисюк, Д. Обідник, 2010

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
1. ОГЛЯД МЕТОДІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ГРАФІЧНИХ ПРИМІТИВІВ.....	8
1.1. Особливості процесу відтворення графічної інформації в пристроях відображення інформації.....	8
1.2. Вимоги до пристроїв відображення інформації з погляду людино-машинного інтерфейсу	10
1.3. Місце та роль цифрових функціональних генераторів графічних примітивів у пристроях відображення інформації.....	15
1.4. Методи і способи, покладені в основу цифрових функціональних генераторів графічних примітивів	18
1.5. Засоби реалізації цифрових функціональних генераторів графічних примітивів	21
1.6. Основні напрямки розробки швидкодійних цифрових функціональних генераторів графічних примітивів	22
2. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ГРАФІЧНИХ ПРИМІТИВІВ.....	23
2.1. Оцінка ефективності цифрових функціональних генераторів графічних примітивів	23
2.2. Метод відтворення нелінійних функцій.....	27
2.3. Структурні властивості кривих другого порядку	32
2.4. Базова структура цифрового інтегратора послідовного переносу.....	48
2.5. Базова структура цифрового функціонального генератора графічних примітивів	58
2.6. Похибка двовимірної та тривимірної лінійної інтерполяції за методом цифрового диференціального аналізатора	62
3. ШВИДКОДІЙНИЙ ЦИФРОВИЙ ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ГЕНЕРАТОР ГРАФІЧНИХ ПРИМІТИВІВ ДЛЯ ЛІНІЙНОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ.....	82

3.1. Метод згладжування нерівномірностей цифрового інтегратора послідовного переносу для двовимірної та тривимірної лінійної інтерполяції	82
3.2. Структура швидкодійного цифрового функціонального генератора графічних примітивів.....	88
3.3. Базовий блок цифрового функціонального генератора графічних примітивів.....	92
3.4. Метод прогнозу кроку інтерполяції.....	99
3.5. Апаратна реалізація режиму лінійної інтерполяції в цифровому функціональному генераторі графічних примітивів.....	104
3.6. Моделювання роботи цифрового функціонального генератора графічних примітивів	107
4. ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ГРАФІЧНИХ ПРИМІТИВІВ	109
4.1. Цифровий функціональний генератор графічних примітивів із застосуванням базового матричного кристалу великого ступеня інтеграції	109
4.2. Реалізація одноплатного цифрового функціонального генератора графічних примітивів із застосуванням інтегральних схем середнього та великого ступеня інтеграції	116
4.3. Оцінка ефективності цифрових функціональних генераторів графічних примітивів	121
ВИСНОВКИ.....	122
ЛІТЕРАТУРА	123
Додаток А Похибка цифрового інтегратора послідовного переносу	134
Додаток Б Похибка двовимірного лінійного інтерполятора на цифрових інтеграторах послідовного переносу.....	136
Додаток В Похибка тривимірного лінійного інтерполятора на цифрових інтеграторах послідовного переносу.....	138
Додаток Г Реалізація цифрового функціонального генератора графічних примітивів, який працює у режимі лінійної інтерполяції.....	140

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

2D – двовимірний
3D – тривимірний
БМК – базовий матричний кристал
ВК – вага кроку інтерполяції
ГЗ – генератор знаків
ГП – графічний процесор
ГСА – граф-схема алгоритму
ДП – двійковий помножувач
ДКПВ – дискретний координатний простір відображення
ІС, ВІС, НВІС – інтегральна схема, інтегральна схема з великим ступенем інтеграції, інтегральна схема з надвеликим ступенем інтеграції
КІ – кроки інтерполяції
КТ – кінцева точка
ЛІ, ЛКІ, КІ – лінійна, лінійно-кругова, кругова інтерполяція
ЛСП (LSM) – логічна схема помножувача
ОФ – оціночна функція
ПВІ – пристрій відображення інформації
ПТ – початкова точка
СТКІ – лічильник кроків інтерполяції
ТД – точка діагоналі
ЦДА – цифровий диференціальний аналізатор
ЦПП – цифровий інтегратор послідовного переносу
ЦФГП – цифровий функціональний генератор графічних примітивів

ВСТУП

Важливим завданням обчислювальної техніки є інформаційне обслуговування життєдіяльності людини, що виражається, зокрема, у використанні ним пристроїв відображення інформації, які є невід'ємною частиною різних обчислювальних комплексів, систем і мереж.

Безліч багатовимірних параметрів реальних об'єктів вимагає збільшення числа вимірювань, підвищення швидкості виведення інформації і точності відтворення інформації пристроями відображення.

Найбільш інформативним та наочним способом подання інформації є графічний, що пов'язано з фізіологічними, біологічними та психологічними особливостями сприйняття інформації людиною, як активною ланкою різних обчислювальних систем [33, 37, 51, 71, 114, 116, 136].

Крім того, намітилася тенденція зростання частки подання інформації в графічній двовимірній (2D) і в тривимірній (3D) формах у реальному масштабі часу в системах вимірювання інформації, науково-дослідній сфері, промисловості та ін. [33, 34, 51, 117, 118, 139, 151]. Все це робить актуальним питання синтезу пристроїв відображення графічної інформації, які забезпечують максимально досягну швидкодію при мінімумі апаратних витрат на їх реалізацію.

Великі потоки інформації для пристроїв відображення інформації (ПВІ) вимагають стиснення, що дозволяє оптимізувати роботу ПВІ [67]. Відновлення інформації здійснюється на основі алгоритмів інтерполяції, як правило лінійної та кругової [28, 29, 66, 71, 78, 93, 96].

Основними вимогами до пристроїв відтворення інформації є виконання певного набору функцій, точність подання інформації, швидкодія, апаратні витрати на реалізацію пристрою, алгоритмічна складність.

У системах відображення інформації головним критерієм виступає швидкодія із прийнятною точністю та апаратними витратами [33, 51, 71, 114, 136].

Проблеми лінійної й кругової інтерполяції розглядаються в роботах А. А. Воронова, В. П. Данчєєва, Ю. И. Тормишева, В. В. Кариського, В. Л. Кошкіна, Джеймса Е. Брезенхема, Джеймса Дж. Фолі,

А. вен Дема та інших авторів. Проте, залишається актуальним питання синтезу пристроїв реалізації примітивів графічної інформації, тобто цифрових функціональних генераторів графічних примітивів (ЦФГП), у пристроях відображення інформації з максимальною для цієї елементної бази швидкодією.

За графічний примітив пристрою береться найпростіший об'єкт, який дозволяє відтворити апаратно-програмні засоби цього пристрою (точка, відрізок прямої лінії, полімаркер, текст, матриця комірок, а також коло і дуги різних нелінійностей, як підмножини узагальненого примітиву виведення, що є апаратно-залежним від конкретної системи) [39, 105, 113, 115, 116, 118, 132].

У монографії розглядаються апаратно-алгоритмічні аспекти швидкодійних цифрових функціональних генераторів графічних примітивів, що задовольняють вимоги максимальної швидкодії, яку можливо досягти в базисі реалізації при мінімумі апаратних витрат на реалізацію цих ЦФГП у порівнянні з існуючими, для використання ЦФГП в ПВІ.

1. ОГЛЯД МЕТОДІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ГРАФІЧНИХ ПРИМІТИВІВ

Відповідно до особливостей процесу відтворення графічної інформації та людино-машинної взаємодії [21, 25, 26, 35, 52, 57, 71, 81, 90, 91, 145] необхідно провести аналіз параметрів процесу відтворення графічної інформації, а також параметрів пристроїв відображення інформації, визначити місце й роль ЦФГП у пристроях відображення інформації з метою вибору напрямків розробки ЦФГП для пристроїв відображення інформації з метою збільшення швидкодії ЦФГП і зниження апаратних витрат на їх реалізацію.

1.1. Особливості процесу відтворення графічної інформації в пристроях відображення інформації

Оператор будь-якої обчислювальної системи працює з певними інформаційними моделями, які представляються на індикаторі ПВІ [132]. Обчислювальні системи обслуговують великі потоки інформації, тому з метою розвантаження каналів зв'язку і економії пам'яті обчислювальної системи використовується стиснення інформації з наступним відновленням на основі інтерполяційних алгоритмів [71, 114], реалізацію яких виконують цифрові функціональні генератори примітивів. Тенденції розвитку ПВІ і обчислювальної техніки визначають зростання частки графічної інформації та її значне ускладнення при відображенні [28-31, 67, 72, 94, 99]. Оскільки важливою ланкою обчислювального комплексу є людина, то найбільш наочну і у той же час насичену за обсягом інформацію можна представити, використовуючи можливості 3D комп'ютерної графіки [114, 132].

Сам процес відтворення інформації є по суті процесом моделювання реального об'єкта [20, 22, 114, 125]. Таке моделювання описується концептуальною моделлю виведення 3D графічної інформації [18, 26, 47-49, 114-116, 119]. Якщо за реальний об'єкт узяти довільну систему у світових координатах, то завдання відсікання по об'єму видової операції та операції нормування виконуються обчислювальним комплексом поза ПВІ. Завдання остаточного відсікання і виведення інформації на пристрій відображення виконується у ПВІ. При виве-

денні 2D графічної інформації завдання спрощується до задання вікна в 2D світовому координатному просторі та задання поля виведення на двовимірній нормованій видовій поверхні [33, 114]. З концептуальної моделі виведення 3D графічної інформації впливає місце і роль ЦФГП у процесі відтворення графічної інформації, як пристрою реалізації елементів графічного зображення, наприклад, за вузловими точками.

Існує чотири основних типи графічних моделей, пов'язаних з особливостями реальних об'єктів, їх призначенням та природою [33, 51, 71, 78, 106, 109, 114, 136]:

- двовимірна модель (площинна, 2D);
- каркасна модель («дротова», 3D);
- поверхнева модель (3D);
- об'ємна модель (модель суцільного тіла, 3D).

Використання ЦФГП в 2D моделях є найпростішим випадком у порівнянні з використанням в 3D моделях. Сам процес 2D моделювання полягає у відтворенні певних функціональних залежностей за вузловими точками (базовими відліками та ін.). Питання про вибір методу візуалізації результатів вимірювання вирішується разом з вибором методів кодування і дискретизації на етапі проектування ПВІ [1, 114].

Складність 3D моделей полягає в тому, що поверхня відображення існуючих індикаторних пристроїв не має графічного третього виміру [116]. Невідповідність між просторовими об'єктами та плоскими зображеннями усувається шляхом введення проєкцій, які відображають тривимірні об'єкти на двовимірній проєкційній картинній площині [39, 114].

Каркасна модель хоча й тривимірна, але має мало можливостей [116]. У ній картина об'єкта, що моделюється, представлена ребрами по геометричних координатах вершин [49, 114]. Найчастіше каркасна модель використовується як проміжний етап в одержанні поверхневої моделі [39, 80, 114].

Поверхнева модель представляє процеси або об'єкти, які моделюються поверхнями та має максимальну наочність [114, 123]. В якості поверхонь використовуються параметричні кубічні поверхні (параметричні сплайни) [80, 114]. Поверхневі моделі вимагають най-

більших обсягів обчислень із усіх чотирьох типів моделей [92, 93, 114]. Звичайно при використанні поверхневих моделей відбувається декомпозиція сплайнів на полігони (трикутники) до або у процесі відображення [105, 114].

Об'ємна модель формується об'єднанням, перетинанням, накладанням простих об'ємних примітивів, таких як сфери, куби, циліндри і т. ін. [51]. Найбільшу популярність об'ємне моделювання одержало в машинобудуванні [51, 105, 114].

Таким чином, у зв'язку з особливостями того або іншого ПВІ та його застосуванням, можна рекомендувати одну із вищенаведених моделей. Найбільш прийнятними для пристроїв відображення інформації, що орієнтовані на максимальну швидкодію, є площинна 2D і поверхнева 3D моделі, як моделі з максимальною наочністю [49, 114]. Крім того, процес побудови усіх моделей здійснюється шляхом аналізу, а потім синтезу зображення, що виражається в розбитті зображення на елементарні складові частини (примітиви) з наступною декомпозицією їх в остаточному зображенні.

1.2. Вимоги до пристроїв відображення інформації з погляду людино-машинного інтерфейсу

Оскільки людина є невід'ємною частиною обчислювального комплексу, до складу якого входять пристрої відображення інформації, то головні вимоги до ПВІ обумовлюються їх областю застосування та особливостями людино-машинної взаємодії [114, 132, 145].

Пристрої відображення інформації використовуються при розв'язанні багатьох задач:

- відображення динамічних ситуацій у реальному масштабі часу при керуванні технологічними процесами, військовими об'єктами [37, 114];
- відображення результатів та ходу наукових досліджень і експериментів [124, 136];
- автоматизація проектування технологічних процесів, програмного забезпечення, архітектури, дизайну, проектування ВІС, розрахунку топології друкованих плат та ін. [93, 109, 110];

- статистична обробка даних (побудова гістограм, використання плавних кривих та ін.) [37, 114, 136, 145];
- обробка топографічної й картографічної інформації [37, 136];
- обробка ділової і управлінської графічної інформації (кругові, стовпчикові та інші діаграми) [114, 136];
- обробка зображень штучних супутників Землі для вивчення земної поверхні, біомедичних зображень (комп'ютерна томографія) [37, 136];
- моделювання реальних об'єктів в архітектурі, різних тренажерах та імітаторах (віртуальна реальність) [34, 37, 114];
- завдання користувача людино-машинного інтерфейсу (меню, піктограми та ін.) [114];
- комп'ютерне кіно, анімація, реклама, ігри, мистецтво [37, 42, 46, 57, 114, 144].

Кожне із застосувань накладає свої вимоги на функціональні параметри пристрою відображення графічної інформації за:

- роздільною здатністю дискретного координатного простору відображення;
- колірною роздільною здатністю;
- набором примітивів, які використовуються;
- точністю відтворення зображень за кольором та формою;
- швидкістю побудови зображень.

У процесі синтезу ПВІ вирішується питання про прийнятний компроміс між вищенаведеними параметрами та витратами на їх реалізацію (програмними і апаратними), що в остаточному підсумку визначає функціональні параметри реальної системи, яка створюється, та її вартість.

Розглянемо діапазони функціональних параметрів пристроїв відображення інформації, які у свою чергу визначають параметри ЦФГП.

Органи зору людини (при 100 % гостроті зору) здатні розрізняти чорну точку діаметром 0,1 мм на білому фоні з відстані 20–30 см від очей і дві сусідні смужки з відтінками, довжини хвиль яких відрізняються на 10 Å (при 100 % кольоровому зорі) [37, 81]. Щоб без втрати інформації відобразити об'єкти реального світу, необхідно мати дискретний координатний простір відображення (ДКПВ), який відповідає

реальному зображенню, у межах 4096×6144 пікселів (більше 24 млн. пікселів на зображення) і колірну роздільну здатність у 256 градацій яскравості по кожній із трьох складових кольору R, G, B (усього 16777216≈17 млн. кольорів, по 8 двійкових розрядів на кожен складову кольору) [37, 54, 60]. Для задач активної 3D графіки необхідно мати ДКПВ до 165 Гпікселів (≈ 256 К×640 К) та до 48 розрядів на складові кольору [145].

Мінімальна частота, з якою повинна змінюватися динамічна картинка на екрані, щоб не виникав ефект дискретності руху, становить 24–25 кадрів за секунду [34, 37, 114], а для деяких випадків в ігрових імітаторах – 30 або навіть 60 кадрів за секунду [54].

Вище відзначалося, що лінійні та кругові примітиви, тобто примітиви кривих не вище другого порядку, покривають практично всі завдання побудови зображень.

Якщо говорити про точність відтворення контурів і кольорів графічних зображень, то з погляду реальних завдань головним є одержання візуально-прийнятних результатів [18, 34, 97, 113]. Більше того, існує ряд методів, які розмивають контури та кольори контурів об'єктів з метою згладжування сходинок ефекту [37, 114]. Існуючі ж методи та способи колірною розфарбування зображень за своєю суттю є емпіричними і не відповідають закону збереження енергії [32, 93, 114, 132, 133, 142], тобто також обираються (найчастіше в інтерактивному режимі) із міркувань прийнятності результатів [37, 114, 134].

Якість картинки на пристрої відображення залежить від:

- розмірів поля виведення пристрою відображення, як у дискретному координатному просторі відображення, так і у фізичних одиницях вимірювання;
- розміру пікселя;
- відстані між пікселями;
- відстані, з якої відбувається спостереження за пристроєм відображення (звичайно не менше, ніж 20÷30 см).

У реально існуючих та перспективних кольорових пристроях відображення розміри ДКПВ перебувають у межах від 960×540 пікселів до 2560×1600 пікселів з діагоналлю екрана від 17» до 30» (приблизно від 43 см до 76 см) [45, 56], також цікаві технології «цифрового дому» з використанням плазмових панелей до 150» (приблизно 3,81 м) з ро-

змірністю ДКПВ 4096×2160 [64]. Діаметр пікселя становить величину від 0,28 мм до 0,26 мм. Відстань між пікселями становить величину від 0,26 мм до 0,31 мм. Тобто, показники реально існуючих і перспективних пристроїв відображення за наведеними параметрами не досягають меж, які здатен розрізнити людський зір, але дають прийнятні результати відображення.

Для відображення машинобудівної деталі середньої складності необхідно близько 10000 полігонів, кожний по 100 пікселів. Таким чином, достатньо мати екран розміром 1280×1024 пікселів [51, 105]. У самому простому випадку зображення може бути монохромним.

Для кінематографа зображення об'єктів можуть складатися з більшої кількості полігонів – від 15000 до 75000 [34, 37], тобто для відображення необхідні екрани з дискретною роздільною здатністю від 1280×1280 пікселів до більш ніж 8192×8192 пікселів. Кількість розрядів для подання кольорів може змінюватися в межах від 24 до 36, хоча достатньо і 24 розрядів, що відповідає 16777216 кольорів по 8 двійкових розрядів на кожному зі складових кольору R, G, B [34, 37].

Динамічні параметри з оживлення зображення можуть перебувати в межах від $4 \div 10$ кадрів/с до 24 кадрів/с [21, 37, 87]. Нижня межа частоти зміни картинки, що не викликає почуття дискомфорту у оператора ПВІ – $4 \div 10$ кадрів за секунду, а 24 кадри за секунду – максимальна частота зміни картинки, на яку реагують органи зору людини. Але для засобів ігрових симуляцій актуальними є частоти зміни картинки у 30 кадрів/с, або навіть до 60 кадрів/с [54].

Усреднюючи вимоги до пристроїв відображення, можна сказати, що широкий клас задач по відтворенню графічної інформації може бути вирішений на пристроях відображення з розмірами ДКПВ від 1024×1024 пікселів до 4096×4096 пікселів з колірною роздільною здатністю по 24-х кольорових площинах (по 8 двійкових розрядів на кожному складову кольору – R, G, B) і частотою відновлення всього зображення від 4 до 30 кадрів за секунду.

Проведемо оцінку вимог до ЦФГП за часом побудови одного пікселя, виходячи з вимог до ПВІ. Введемо позначення:

N_x – роздільна здатність ПВІ по горизонталі;

N_y – роздільна здатність ПВІ по вертикалі;

F_d – динамічна частота зображення на екрані;

K_e – коефіцієнт заповнення екрану;

t_p – час обробки одного пікселя.

Необхідна продуктивність ПВІ для побудови зображення становить:

$$P_0 = N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e. \quad (1.1)$$

Реальна продуктивність ПВІ може бути визначена з такого співвідношення

$$P_r = \frac{K_v}{t_p}, \quad (1.2)$$

де K_v – коефіцієнт доступу до відеопам'яті за кадр, який характеризує ступінь доступності відеопам'яті (як правило, для однопортової відеопам'яті $K_v = 0,25 \div 0,35$, для двопортової – $K_v \approx 0,7$ [114, 125]).

Привівнявши (1.1) і (1.2), одержуємо вираз, за яким обчислюється час, необхідний для обробки одного пікселя

$$t_p = \frac{K_v}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e}. \quad (1.3)$$

Аналіз (1.3) дозволяє визначити шляхи збільшення t_p з метою зменшення апаратних витрат і здешевлення систем ПВІ:

1) зменшення роздільної здатності по горизонталі й вертикалі (N_x та N_y);

2) зменшення динамічної частоти зображення на екрані (F_d);

3) зменшення коефіцієнта заповнення екрана K_e – зменшення розміру зображень;

4) збільшення часу доступу до відеопам'яті під час кадру з боку ЦФГП, що можливо досягти, наприклад, за рахунок використання багатопортової відеопам'яті.

Так, наприклад, розглянемо три варіанти обчислення значення t_p для різних задач.

1. Для задач активної 3D графіки ($F_d = 60$ кадрів/с), з виконанням умови повної прозорості відеопам'яті ПВІ ($K_v = 1$), використання усього ДКПВ (165 Гпкселів) для ПВІ ($K_e = 1$):

$$t_p = \frac{K_V}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e} = \frac{1}{165 \cdot 2^{30} \cdot 60 \cdot 1} = 9,4072987 \cdot 10^{-14} (с) \approx 94,1 (фс).$$

2. Для досягнення повної динаміки ($F_d = 24$ кадри/с) у режимі реального часу в завданнях комп'ютерної анімації або кінематографії, за умови повної прозорості відеопам'яті ПВІ ($K_v = 1$) і використання усього ДКПВ для ПВІ (8192×8192) під зображення ($K_e = 1$):

$$t_p = \frac{K_V}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e} = \frac{1}{2^{13} \cdot 2^{13} \cdot 24 \cdot 1} = 6,2088171 \cdot 10^{-10} (с) \approx 0,62 (нс).$$

3. Для завдань машинобудування без динаміки зображення ($F_d = 1$, $K_v = 1$ та $K_e = 0,2$ у просторі 1280×1024):

$$t_p = \frac{K_V}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e} = \frac{1}{1280 \cdot 1024 \cdot 1 \cdot 0,2} = 3,814 \cdot 10^{-6} (с) \approx 3,81 (мкс).$$

1.3. Місце та роль цифрових функціональних генераторів графічних примітивів у пристроях відображення інформації

Пристрої відображення інформації – це сукупність технічних і програмних засобів для подання у зручній для сприйняття оператором формі сигналів про стан об'єкта впливу на нього і способів керування ним [23, 37, 51, 132]. У загальному контурі функціонування ПВІ

обов'язкова присутність людини-оператора, це пов'язано із призначенням ПВІ в цілому та й особливостями процесів інтерактивного людино-машинного діалогу [60, 105, 114]. Надійна й ефективна робота оператора можлива тоді, коли він одержує від ПВІ достатню кількість інформації для ухвалення рішення.

Під пристроєм відображення інформації розуміється пов'язаний з основною ЕОМ обчислювальний пристрій з підключеними до нього як технічних засобів візуалізації, так і інших зовнішніх пристроїв [114–116, 124]. Основні завдання ЦФГП у пристроях відображення інформації полягають у звільненні обчислювального пристрою від вузькоспеціалізованих функцій з побудови зображення [28–31, 47, 71, 83]. Узагальнена структура пристрою відображення інформації наведена на рис. 1.1. ЦФГП виконують важливе завдання з побудови зображення у відеопам'яті пристрою виведення графічної інформації. Крім того, сама назва ЦФГП має на увазі можливість побудови ними різних функціональних залежностей, що інтерполюють графічні елементи зображення [28–31, 71].

Відзначимо, що поняття ЦФГП, на погляд авторів, ширше поняття «інтерполятор» конкретної функціональної залежності в ДКПВ, оскільки має на увазі максимальну продуктивність пристрою, що відповідає видачі крокових приростів на кожному такті синхрочастоти, та можливість апаратного відтворення широкого класу функціональних залежностей, а не тільки роботу пристрою в одному або декількох апаратнозалежних режимах.

Один із варіантів використання ЦФГП – це використання їх у якості інтерполяторів відповідних функціональних залежностей для інтегрованих у загальну структуру графічних процесорів [2, 13, 14, 44, 83, 118].

У зв'язку з особливостями подання інформації на екрані ПВІ та традиціями математичної практики, надалі у якості системи 2D координат обирається декартова прямокутна система координат, в якій вісь X спрямована зліва направо, а вісь Y – знизу вгору. Для 3D координат вводиться додаткова (уявна тривимірна вісь), спрямована від спостерігача убік об'єкта спостереження, тобто 3D-система координат утворить ліву трійку [33, 39] осей тривимірної декартової прямокутної системи координат.



Рис. 1.1. Узагальнена структура пристрою відображення інформації

1.4. Методи і способи, покладені в основу цифрових функціональних генераторів графічних примітивів

Найпоширенішими примітивами 2D зображень в ПВІ є відрізки прямих та дуги кіл [3, 6, 28, 29, 47, 50, 65, 66, 70, 71, 93, 96, 104, 114, 117, 120, 132]. Для 3D зображень досить забезпечити відтворення плоских полігонів, трикутників і відрізків прямих ліній [17, 22, 37, 51, 71, 87, 97, 105, 114]. Оскільки завдання відтворення полігонів і трикутників (як заповнених кольором, так і контурних [65, 93, 114, 117]) в 3D моделях можна розбити на ряд завдань з відтворення відрізків прямих ліній, то основним примітивом 3D зображень також можна вважати відрізок прямої лінії.

Реалізувати відтворення графічних примітивів можна двома основними способами – програмно або апаратно.

Програмна реалізація навіть найпростішого графічного примітива – відрізка прямої лінії – не задовольняє вимогу необхідної швидкодії більшості завдань із динамічним перетворенням зображення для задач активної 3D графіки [43, 54, 84, 130, 145]. Це доводить необхідність апаратної реалізації ЦФГП. Розглянемо апаратні методи та засоби реалізації двовимірної лінійної і кругової інтерполяції.

Серед методів лінійної інтерполяції (ЛІ) найбільше поширення одержали методи, основані на використанні цифрових інтеграторів послідовного переносу (ЦПП) [9, 19, 24, 40, 71, 92, 115], і цифрових інтеграторів паралельного переносу [40, 71, 92, 106, 107] або з обчисленням оціночної функції (ОФ) [33, 48, 71, 80, 82, 114, 143].

Пристрої ЛІ, основані на розв'язанні системи диференціальних рівнянь прямої у параметричному вигляді з використанням цифрових інтеграторів паралельного переносу [19, 71], містять два регістри приростів і два накопичувальних суматорів. Модуль перерахування суматорів дорівнює 2^n , де n – розрядність суматорів. Як одиничні прирости по координатах виступають сигнали переповнення накопичувальних суматорів.

Лінійний інтерполятор, оснований на розв'язанні системи диференціальних рівнянь прямої у параметричному вигляді із застосуванням цифрових інтеграторів послідовного переносу [19, 40, 71, 102], містить два регістри приростів, дві логічні схеми множника (ЛСМ) і загальний для обох інтеграторів лічильник. Сигнали

виходів схем множників є сигналами одиничних приростів по координатах.

Застосування інтеграторів послідовного переносу вносить додаткову похибку через нерівномірність проходження імпульсів на виході інтегратора, яку можна зменшити, наприклад, використовуючи комбіновані цифрові інтегратори [71].

Вищенаведені методи інтерполюють довільний відрізок прямої за 2^n тактів, де n – розрядність пристрою. Щоб збільшити швидкодію лінійної інтерполяції, змінюють ємність лічильника двійкового помножувача залежно від величин координатних приростів [4, 5] або здійснюють спільне збільшення координатних приростів до нормалізації одного з них [40, 71] (здійснюють зсув обох координатних приростів убік старших розрядів, щоб старший розряд одного з координатних приростів збігся зі старшим розрядом пристрою).

Особливістю методу лінійної інтерполяції з оціночною функцією є виключення операції множення у виразі функціональної залежності X і Y за рахунок використання покрокових алгоритмів, що замінюють операцію множення у функції $y=f(x)$ на покрокові операції додавання або обчислення [93, 114, 117]. Інтерполяція за цим методом дає ординатну похибку, яка не перевищує кроку дискретизації. Відомі методи з оціночною функцією, які реалізують не тільки координатні кроки [71, 90], а й діагональні кроки [71, 92, 93, 114, 143]. Також існують методи з початковою установкою оціночної функції [53, 71, 73, 128], що дають мінімальну ординатну похибку інтерполяції (не більше 0,5 кроку дискретизації) [71, 93, 114]. Знайшов застосування метод з обчисленням двох оціночних функцій і кроком у бік меншої за модулем [71, 131]. Відомі також методи, що реалізують два координатних кроки [66, 71, 77, 96].

Реалізація кола, як кривої другого порядку, є більш складним завданням у порівнянні з відтворенням прямої.

Один із методів оснований на розв'язанні диференціальних і різницьових рівнянь із застосуванням цифрових інтеграторів [19, 40, 71, 92]. У структурі пристрою реалізації кола присутні два цифрових інтегратори, реєстри коду курування, які по суті є лічильниками, а самі інтегратори перебувають у взаємному від'ємному зворотному зв'язку.

Існує метод кусково-лінійної апроксимації, що використовує постійну пам'ять, у якій зберігаються значення синусів і косинусів для

кроків інтерполяції [8, 35, 71, 80]. При цьому дуга кола заповнюється ламаною лінією.

Відомий метод, оснований на визначенні координат точок перетину реальної траєкторії з ідеальною, який потребує обчислення квадратного кореня на кожному кроці інтерполяції [10].

Найбільше поширення одержав метод кругової інтерполяції (КІ) з використанням ОФ [6, 40, 66, 71, 92, 93, 106, 114, 143] або з використанням двох ОФ у двох точках з наступним кроком убік точки з меншим абсолютним значенням оціночної функції [71, 131]. При використанні методів з ОФ обчислення здійснюються за рекурентними співвідношеннями. Відтворення функціональної залежності ведеться інтерполяційними кроками, які формуються в кожний тактовий момент часу. Тривалість інтерполяційного кроку визначається часом рахування в суматорі ОФ. За методами, основаними на розв'язанні систем диференціальних рівнянь із використанням цифрових інтеграторів паралельного переносу, швидкодія також обмежується мікрооперацією підсумовування. Оцінимо, наскільки використання суматорів задовольняє вимоги динаміки зображення ($F_d=60$ кадрів/с) у ситуаціях кінематографа (ДКПВ–8192×8192) з елементами активної графіки (ігрові стимулятори), а коефіцієнти K_v і K_e приблизно однакові для більшості ПВІ ($K_v \approx K_e \approx 1$). Тоді величина часу на один піксель становить відповідно до (1.3): $t_p = 1/(2^{13} \times 2^{13} \times 60) \approx 0,24$ (нс). Для сучасної елементної бази час поширення переносу між розрядами – 0,4÷1,0 нс [2, 61, 62, 121]. Причому, апаратна складність суматорів значно перевищує апаратну складність ЦПП. Таким чином, методи з використанням суматорів не задовольняють вимоги динаміки складних зображень при мінімумі апаратних витрат. Це доводить необхідність використання інших методів функціонування ЦФГП, а саме методів ЦДА, де швидкодія визначається мікрооперацією лічби в молодшому розряді лічильника. Причому, застосування методів ЦДА орієнтовано на реалізацію ЦФГП у вигляді спеціалізованих ВІС або НВІС.

Отже, за основні примітиви ЦФГП обираються відрізки прямих ліній і криві другого порядку або їх дуги, а як методи побудови примітивів – методи із використанням ЦПП.

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-343-0>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-343-0>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-343-0>

Наукове видання

**Петух Анатолій Михайлович
Денисюк Валерій Олександрович
Обідник Дем'ян Тихонович**

**ШВИДКОДІЙНІ ЦИФРОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ
ГЕНЕРАТОРИ ГРАФІЧНИХ ПРИМІТИВІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Д. Обідником

Підписано до друку 25.02.2010 р.
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний Ум. др. арк. 8,55
Наклад 100 прим. Зам № 2010-033

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.