

Тема 1. Вступ до комп'ютерної графіки

1.1. Основні поняття

Формування комп'ютерної графіки (надалі – КГ) як самостійного напрямку інформаційних технологій відноситься до 60-х років ХХ ст., коли Сазерлендом був створений спеціалізований пакет машинної графіки. Вперше подання інформаційних даних на екрані комп'ютера в графічному вигляді було продемонстровано на початку 50-х років спеціалістами Массачусетського технологічного інституту і згодом стало використовуватися в наукових і військових дослідженнях. За цей час комп'ютерна графіка пройшла шлях від окремих експериментів до одного з найважливіших інструментів сучасності. Розвиток комп'ютерної графіки проходить жваво: дещо швидко відживає, а водночас з'являється багато нового. Нині не можна собі уявити розвиток будь-якої галузі людської діяльності, пов'язаної з наукою, чи технікою без використання КГ. Вона є багатофункціональною складовою усіх інформаційних технологій і важливою компонентою для взаємодії людини з комп'ютером.

На першому етапі свого розвитку КГ була пасивною, однак це вже забезпечувало наочну форму сприйняття інформації, а, як відомо, більшу частину інформації (до 75%) про навколишній світ людина сприймає візуально, тобто за допомогою органів зору. З цього приводу можна згадати прислів'я: „краще раз побачити, ніж сто разів почути”, або його китайський аналог „одна картинка коштує 1000 слів”. Зображення не тільки місткий, але і доступний вид інформації, оскільки для сприйняття візуальної інформації від користувача вимагається менше зусиль. Інформація, що міститься у зображеннях, є найбільш концентрованою, найлегше сприймається та найшвидше обробляється.

При пасивній графіці ЕОМ формує і виводить зображення на графічний пристрій під управлінням прикладних програм. Користувач не може безпосередньо керувати формуванням зображення, перш ніж воно не з'явиться на екрані. Пасивний контроль не дає можливості втрутитися в процес проектування конструкції (система працює в пакетному режимі без діалогу). Для модифікації вихідного зображення необхідний повторний запуск пакета прикладних програм. Тому виникла необхідність у розвитку діалогових систем КГ, тобто систем інтерактивної графіки, щоб користувач оперативно міг вносити зміни в зображення безпосередньо в процесі його відтворення (в реальному масштабі часу). Нині всі сучасні графічні програми є системами інтерактивної КГ і вони можуть відтворювати всі особливості реальних зображень. Дамо ряд визначень.

Графіка – вид мистецтва, що включає малюнок і художнє зображення (походить від грецьк. слова графо, що означає „пишу, креслю, малюю”).

Комп'ютерна графіка – це галузь знань, що вивчає та розробляє методи і засоби синтезу, збереження й перетворення цифрових зображень за допомогою ЕОМ та інших технічних пристроїв.

Цифрове зображення – це модель реального або синтезованого (створеного штучно) зображення, що зберігається в пам'яті ЕОМ у вигляді сукупності цифрових кодів.

Режим, при якому користувач у реальному часі може впливати на весь процес формування зображення, тобто зміни в зображення можна вносити безпосередньо в процесі його відтворення (в режимі діалогу), називається **інтерактивним**.

Інтерактивною КГ називають тоді, коли до складу графічної системи входять технічні і програмні засоби, що дозволяють динамічно формувати зображення.

Історично першими інтерактивними системами вважаються системи автоматизованого проектування (САПР), які з'явилися в 60-х роках ХХ ст.

КГ – це область інформатики, у сферу інтересів якої входять всі аспекти формування зображення за допомогою комп'ютера. Цифрові зображення немислимі без комп'ютерної обробки графічної інформації, їх простіше зберігати, тиражувати, компоувати тощо. Цифрові зображення можна створити сканером, цифровим фотоапаратом, а потім відредагувати в програмі обробки зображень (наприклад, в Adobe Photoshop), а можна створити цифрові малюнки з нуля, застосувавши спеціальні програми (наприклад, у Corel Draw) або написавши відповідну програму на мові програмування (наприклад, Visual C++).

Основними задачами КГ є візуалізація інформації, тобто створення зображень різних об'єктів і сцен (у загальному випадку тривимірних) на деякому двовимірному екрані (наприклад, на екрані монітора або на аркуші паперу), виконання різних дій із зображеннями, зберігання та передавання графічної інформації.

Під **синтезованим зображенням** розуміють певне довільне візуальне подання інформації, яке отримується в комп'ютері на основі математичного опису (моделі) об'єкта згідно з директивами користувача.

Таке зауваження вилучає з предмета КГ задачі обробки та розпізнавання зображень, отриманих шляхом фотографування, оскільки в цьому випадку ми не маємо справи з побудовою графічних об'єктів за певними правилами.

При обробці зображень на основі початкового зображення одержують зображення, яке володіє іншими властивостями. Прикладом методів обробки зображень можуть бути підвищення контрасту, корекція кольорів, реставрація зображень.

При розпізнаванні образів ставиться задача за початковим зображенням знайти математичний опис об'єктів, наприклад розпізнати текст.

Тому обробка та розпізнавання зображень віднесені в самостійні напрями у сфері обробки графічної інформації.

Отже, питаннями роботи з зображеннями на ЕОМ займаються три напрями інформатики: комп'ютерна графіка, обробка зображень, розпізнавання образів. Ми розглядатимемо в основному лише задачі першого напрямку.

1.2. Простіші моделі графічних об'єктів

Графічний об'єкт – це певний малюнок, одержаний за допомогою комп'ютера. Сукупність графічних об'єктів називають *зображенням*. Графічні зображення часто мають ієрархічну структуру, яка виникає в результаті процесу побудови знизу-вверх.

Простіші базові графічні елементи, з яких будуються графічні об'єкти довільної складності, називаються *графічними примітивами*. Вони використовуються як будівельні блоки для об'єктів більш високого рівня. Графічні примітиви розглядаються як прості неподільні елементи зображення і генеруються однією окремою командою (підпрограмою). Вони можуть мати також апаратний та апаратно-програмний рівень формування. Як правило, множина примітивів містить такі елементи [19]:

- точку,
- відрізок,
- ламану лінію (замкнену і незамкнену),
- трикутник,
- трикутний стріп (рис. 1.1, *a*),
- трикутний фен (рис. 1.1, *б*),
- чотирикутник,
- чотирикутний стріп (рис. 1.1, *в*),
- опуклий багатокутник (полігон).

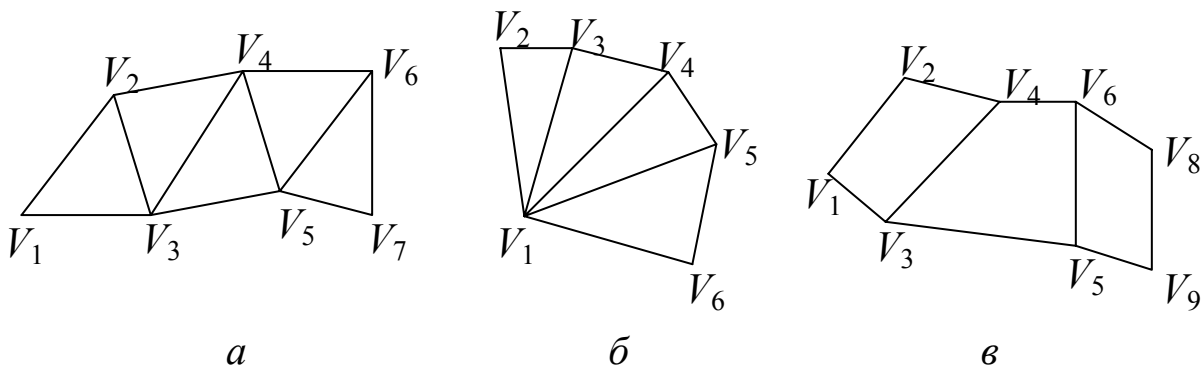


Рис. 1.1. Елементи множини примітивів: *a* – трикутний стріп, *б* – фен, *в* – чотирикутний стріп

Трикутний стріп – це множина трикутників $T = \{V_i V_{i+1} V_{i+2}\}$, що утворюється послідовністю вершин $V_1, V_2, V_3, \dots, V_{n+2}$. Перший трикутник стріпа $V_1 V_2 V_3$. Другий трикутник $V_2 V_3 V_4$ містить уже відоме ребро $V_2 V_3$ і тому для його задання необхідно вказати тільки одну вершину і т.д. Тому стріп із 5 трикутників (рис. 1.1, а) задається послідовністю V_1, V_2, \dots, V_7 із семи вершин (замість п'ятнадцяти у випадку задання кожного трикутника окремо). Оскільки обробка кожної вершини в графічній системі займає певний час, то зменшення кількості обчислювальних вершин прискорює візуалізацію примітива.

Трикутний фен (віяло) – це множина трикутників $T = \{V_1 V_{i+1} V_{i+2}\}$, утворених послідовністю вершин V_1, V_2, \dots, V_{n+2} (рис. 1.1, б), тобто трикутників, які задаються першою і кожною наступною парою вершин (пари не перетинаються). При заданні фену спочатку вказується загальна вершина, а потім решта вершин у порядку обходу спільних ребер.

Чотирикутний стріп – це множина чотирикутників $Q = \{V_{2i-1} V_{2i} V_{2i+1} V_{2i+2}\}$, утворених послідовністю вершин $V_1, V_2, \dots, V_{2n+2}$. Як видно з рис. 1.1, в, при заданні чотирикутного стріпа послідовність перерахування вершин інша, ніж при заданні незв'язаних чотирикутників.

Полігоном називається замкнена крива на площині, утворена відрізками прямих ліній. Відрізки прямих називаються ребрами або сторонами, кінцеві точки – вершинами. Дві вершини, що належать одному й тому ж ребру, називають *суміжними*. Відрізок прямої лінії, що лежить між двома несуміжними вершинами, називається *діагоналлю*.

Полігон називається **простим**, якщо він не має самоперетинів ребер. Простий полігон однозначно охоплює неперервну частину площини, яка є внутрішньою частиною полігона.

Для тривимірних додатків головною характеристикою полігона є не кількість вершин, а їх тип. Вершини полігона поділяються на опуклі і неопуклі (ввігнуті). Вершина називається **опуклою**, якщо внутрішній кут при вершині менше 180° , в протилежному випадку вершина **неопукла**.

Нагадаємо, що область на площині називається **опуклою**, якщо для будь-яких двох точок області відрізок, що їх з'єднує, повністю лежить всередині цієї області. Будь-яка вершина в опуклому полігоні є опуклою (в неопуклому полігоні принаймні одна вершина неопукла). З цього випливає той факт, що при обході границі опуклого полігону в напрямку за годинниковою стрілкою в кожній вершині наступне ребро або продовжується по прямій лінії, або повертається вправо. В комп'ютерній графіці полігони особливо важливі як засоби задання поверхонь.

В сучасних системах комп'ютерної графіки інформація про графічні об'єкти поділяється на дві категорії: параметри та атрибути. Примітиви

теж характеризуються параметрами та атрибутами. **Параметри** примітивів характеризують форму, розміри, місце розташування примітива. **Атрибути** примітивів – це властивості, які визначають їх вигляд при візуалізації, тобто спосіб зображення заданого примітиву.

Для кожного типу об'єктів визначають свій набір атрибутів:

- для точки – розмір та колір;
- для лінії – колір, товщина і тип (лінія, яка використовується для малювання відрізків може бути суцільною або штриховою);
- для многокутників – режим контуру чи заповнення. Цей параметр вказує спосіб задання многокутників. Можна малювати тільки вершини або ребра, а можна зображати зафарбовані многокутники, при цьому контур може малюватись одним кольором, а внутрішня область заливатись іншим.

У просторі простішими графічними примітивами є поліедри. **Поліедри** – це замкнені просторові об'єкти, що обмежені площинами. Серед об'ємних тіл поліедри займають таке ж важливе місце, як і полігони серед плоских фігур. Один полігон задає одну грань об'ємного об'єкта. Декілька граней у просторі складають об'ємний об'єкт у вигляді замкненої полігональної поверхні (многогранника), або незамкненої поверхні (полігональної сітки).

Модель поліедра $H = \{P, G\}$ складається з двох масивів:

- координатного списку вершин $P = \{P_1, \dots, P_n\}$ пронумерованих у довільному порядку;
- масиву списків граней $G = \{G_1, \dots, G_m\}$. Елемент $G_i = \{g_{i1}, \dots, g_{in_i}, g_{i1}\}$ масиву G є списком номерів вершин полігона i -тої грані, перерахованих у порядку обходу їх по замкненому контуру.

Полігональні моделі найбільш широко розповсюджені в сучасних системах тривимірної графіки, хоча вони мають і ряд недоліків, наприклад, приводять до складних алгоритмів візуалізації реалістичних зображень. Завдяки планарності всіх граничних поверхонь поліедра істотно спрощується розрахунок його перетинів із різними геометричними примітивами. Крім цього, часто криволінійні граничні поверхні об'єктів апроксимуються системою полігональних граней, що перетворює ці об'єкти на поліедри.

У природі існує цілий ряд поліедральних об'єктів. Серед них правильні многогранники, призми, піраміди тощо.

Правильні многогранники (платонові тіла) – це опуклі многогранники, всі грані яких є правильними многокутниками і всі многогранні кути при вершинах рівні між собою.

Існує 5 правильних многогранників (це довів ще Евклід): тетраедр,

гексаедр (куб), октаедр, додекаедр, ікосаедр. Префікс перед грецьким коренем 'едр' означає кількість граней поліедра.

Для повного опису правильних многогранників унаслідок їхньої опуклості достатньо вказати спосіб знаходження всіх його вершин. Розглянемо деякі способи їх побудови.

Вершинами тетраедра є чотири вершини куба, попарно несуміжні з жодним із його ребер (рис. 1.2, *a*).

Вершини октаедра знаходяться в центрах граней куба (рис. 1.2, *б*).

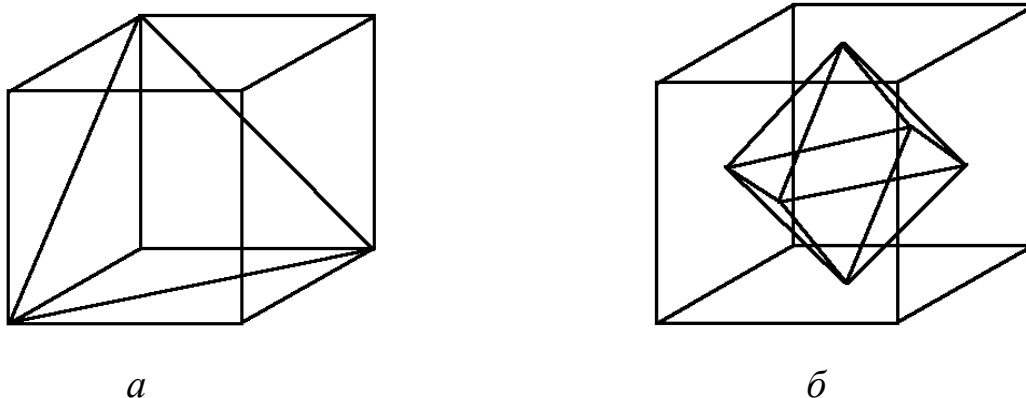


Рис. 1.2. Приклади простіших поліедрів: *a* – тетраедр, *б* – октаедр

Опишемо спосіб конструювання ікосаедра. Побудуємо циліндр одиничного радіуса, вісь якого збігається з віссю апікат z , а основи лежать у площинах $z = 0,5$ і $z = -0,5$. Розбиваємо кожне з кіл, що лежать в основах циліндра, на 5 рівних частин, як це зображено на рис. 1.3.

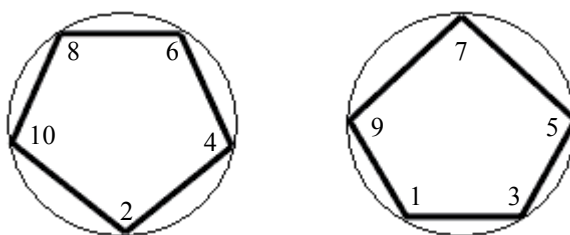


Рис. 1.3. Послідовність з'єднання вершин

Далі нумеруємо ці точки проти годинникової стрілки парними та непарними числами і потім послідовно, відповідно до нумерації, з'єднуємо ці точки відповідними відрізками (рис. 1.4). Одержуємо десять середніх трикутних граней ікосаедра.

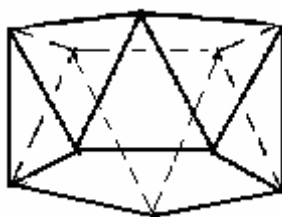


Рис. 1.4. Середні грані ікосаедра

Для завершення побудови ікосаедра вибираємо на осі z дві точки так, щоб довжини бокових ребер у п'ятикутних пірамідах із вершинами в цих точках і основами, що співпадають з побудованими п'ятикутниками, дорівнювали довжинам сторін побудованих правильних трикутників. Такими точками є точки з аплікатами $\pm \sqrt{5}/2$.

У результаті описаних побудов одержуємо 12 точок (вершин), а опуклий многогранник із вершинами в цих точках буде мати 20 граней, кожна з яких є правильним трикутником (рис. 1.5, *a*). Декартові координати вершин побудованого ікосаедра легко обчислюються.

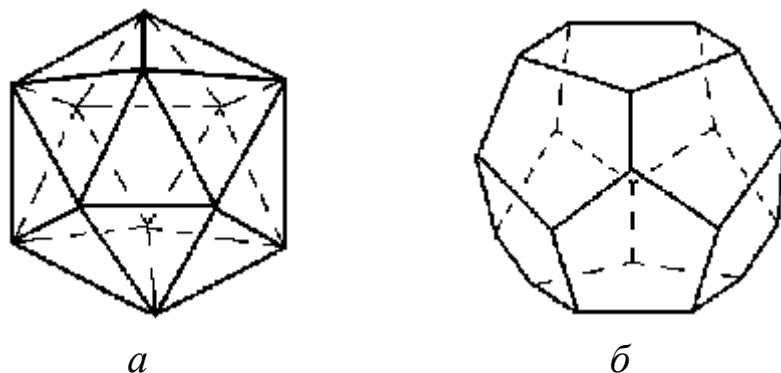


Рис. 1.5. Складніші поліедри: *a* – ікосаедр, *б* – додекаедр

Залишається побудувати додекаедр (кількість граней – 12) – найбільш складне платонове тіло. Вершини додекаедра є центрами трикутних граней ікосаедра. Отже, координати кожної вершини додекаедра можна знайти шляхом обчислення середнього арифметичного координат вершин ікосаедра. Далі необхідно з'єднати центри суміжних граней ребрами (рис. 1.5, *б*).

Множина видимих на екрані об'єктів, упорядкованих згідно з просторовими відношеннями (наприклад, за відношенням даліше – ближче, лівіше – правіше), разом з атрибутами елементів поверхонь (колір, текстура, оптичні властивості матеріалів) і з атрибутами оточення (рівень освітлення, туман, димка тощо) утворюють **сцену**.

Графічні об'єкти, з яких складається сцена, називаються **елементами сцени**. Для повного опису сцени необхідна, як мінімум, така інформація:

- морфологічна інформація – це зведення про форму, структуру кожного елемента незалежно від його розміщення та розмірів і місцезнаходження спостерігача. Методи моделювання змін форми об'єкта, тобто поступового перетворення одного образу в інший (анімація форми) називаються **морфінгом** (від грецьк. *morphe* – форма). Зазвичай перетворення форми об'єкта визначається за допомогою множини опорних точок і подальшої інтерполяції;
- геометрична інформація, яка включає характеристики розмірів еле-

- ментів сцени, параметри взаємного розміщення елементів (віддаль між ними, кути), розміщення елементів відносно спостерігача і т.д.;
- інформація про джерела світла, про їх розміщення, про властивості матеріалу об'єктів.

1.3. Математичні моделі об'єктів графічних сцен

Для систем машинної графіки джерелом вхідної інформації є не самі фізичні процеси та об'єкти, а математичні моделі. *Математична модель* – це сукупність математичних співвідношень, за допомогою яких описуються основні характеристики реального об'єкта. При побудові об'єктів і сцен різної природи у комп'ютерній графіці найчастіше використовують геометричну версію математичного моделювання, тобто кожний елемент сцени розглядається як геометричний об'єкт із певними властивостями, а сцена складається з множини геометричних об'єктів.

За способом представлення геометричних об'єктів можна виділити дві найчастіше використовувані моделі елементів графічних сцен:

- графічні примітиви;
- математичні моделі просторових об'єктів, які задаються рівняннями ліній і поверхонь.

У першій моделі вважається, що сцена формується з відомих геометричних фігур (примітивів): двовимірних (ліній, многокутників тощо) і тривимірних (кубів, пірамід, куль, циліндрів тощо). Примітиви розглядаються як прості неподільні елементи зображення. Тому програмна реалізація побудови сцени полягає в підборі відповідних фігур, які вибираються з бібліотеки примітивів. При використанні бібліотеки примітивів маємо справу з двома рівнями примітивів: двовимірними та тривимірними.

Щоб побудувати елемент сцени, який відсутній в бібліотеці примітивів, потрібно сконструювати його з тих примітивів, які наявні в бібліотеці, використовуючи різні операції та композиції елементів. Це добре відомі операції, які застосовуються до суцільних тіл: повороти різного роду, зсув, перетворення подібності, симетричне відображення, розтяг, сегментація об'єкта (виділення тієї частини об'єкта, над якою буде проводитися перетворення), об'єднання (сума) об'єктів – $Pr1 \cup Pr2$ (графічний об'єкт, кожна точка якого належить хоча б одному з примітивів), перетин (добуток) примітивів $Pr1 \cap Pr2$ (тіло, кожна точка якого належить одночасно двом примітивам), різниця двох примітивів $Pr1 \setminus Pr2$ (тіло, яке складається з точок $Pr1$, що не належать до $Pr2$).

У другому типі моделей геометричні елементи сцени розглядаються як функціональні залежності яскравості точок сцени від координат цих точок, тобто сцену можна побудувати за допомогою аналітичних рівнянь,

які описують лінії та поверхні, що задають тіла сцени. Аналітичні моделі широко застосовуються при проектуванні геометричних об'єктів складної форми, при підготовці програм управління для станків з ЧПУ, при розкроюванні матеріалу тощо. Наведемо рівняння деяких ліній і поверхонь.

Пряма лінія на площині задається неявним рівнянням $ax + by + c = 0$, або явним рівнянням $y = kx + b$. Відрізок, що визначається двома точками r_0, r_1 , задається векторно-параметричним рівнянням вигляду $r = r_0(1 - t) + r_1t$, де $r = (x, y)$, $t \in [0, 1]$.

Загальна явна форма задання кривої на площині має вигляд $y = f(x)$, неявна форма $-f(x, y) = 0$. Явний вигляд кривої $y = f(x)$ має ряд недоліків. По-перше, не можна описати замкнені криві одним виразом. Такі криві необхідно розбивати на ряд сегментів і шукати аналітичне задання для кожного з них. По-друге, такий опис кривих не володіє інваріантністю відносно перетворення повороту. Щоб задати повернуту криву, необхідно виконати певну обчислювальну роботу. По-третє, при обчисленнях значень $f(x)$ виникають істотні обчислювальні складності, наприклад для кривих із великими кутами нахилу. Задання кривої в неявній формі $f(x, y) = 0$ теж викликає ряд проблем.

Параметрична форма задання кривої $x = x(t), y = y(t), t \in [\alpha, \beta]$ усуває недоліки функціонального і неявного способів задання кривої.

Параметрична форма рівнянь є найбільш універсальною і найбільш розповсюдженою для опису і побудови геометричних об'єктів завдяки різноманітності вибору функцій, що задають рух точки вздовж напрямів степенів вільності. Параметрична форма дозволяє задати замкнені й багатозначні криві.

Поверхні можна задати явним рівнянням $z = f(x, y)$, або неявним $-F(x, y, z) = 0$, чи в параметричній формі: $x = x(\tau, t), y = y(\tau, t), z = z(\tau, t), (\tau, t) \in D$.

Поверхні першого порядку (площини), що задаються рівнянням $ax + by + cz = d$, та поверхні другого порядку, наприклад еліпсоїд $x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 = 1$ – найбільш широко використовувані поверхні в КГ, оскільки площина є основою наближення поверхні довільної форми, а квадратичні поверхні в багатьох випадках добре передають візуальні образи криволінійних поверхонь.

Зазначимо, що серед поверхонь 2-го порядку тільки еліпсоїд (сфера як частковий випадок) локалізований у просторі, всі інші простягаються в нескінченність, тому вимагають для свого задання обмежуючих площин.

Параметричне рівняння сфери має вигляд

$$x(\tau, t) = R \sin t, y(\tau, t) = R \cos t \sin \tau, z(\tau, t) = R \cos t \cos \tau, \quad t \in [0, \pi], \tau \in [0, 2\pi].$$

Для побудови моделі сфери використовують побудований раніше ікосаедр. Зауважимо, що ікосаедр уже є моделлю сфери (всі вершини

ікосаедра лежать на сфері), єдиний недолік – мала кількість граней для зображення поверхні сфери. Для підвищення реальності зображення сфери діють так:

- кожна грань ікосаедра розбивається на чотири частини (трикутники). Додаткові вершини нових трикутників беруться на серединах сторін грані, як це показано на рис 1.6;
- нові вершини проектується на поверхню сфери. Для цього з центра сфери через вершини проводяться промені і відшукуються точки перетину променів із поверхнею сфери. На цих точках будуються нові грані які краще апроксимують сферу;
- указані дії повторюються доти, поки не буде досягнуто задовільного зображення сфери.

Аналогічним чином можна побудувати моделі циліндра, тора тощо.

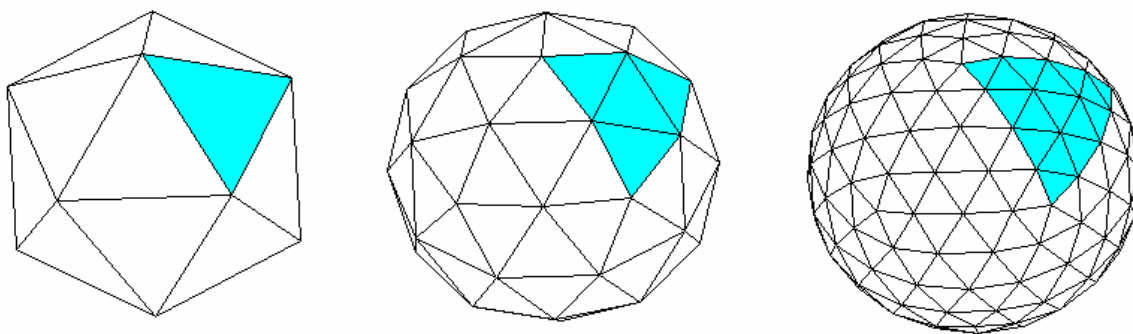


Рис 1.6. Побудова зображення сфери

Фрагмент білінійної поверхні, розташованої між чотирма точками P_0, P_1, P_2, P_3 , описується векторно-параметричним рівнянням

$$r = P_0(1 - u)(1 - v) + P_1u(1 - v) + P_2(1 - u)v + P_3uv, \quad r = (x, y, z), \quad u, v \in [0, 1].$$

За допомогою білінійних поверхонь описують складні 3D-поверхні.

Лінійчаста поверхня загального вигляду, що утворюється внаслідок руху прямолінійної твірної вздовж двох напрямних ліній $r_1(v)$ та $r_2(v)$ задається рівнянням $r = r_1(v)(1 - u) + r_2(v)u$.

Лінія в просторі є або перетином двох поверхонь, або слідом руху деякої точки, тому маємо дві форми моделі просторової кривої: неявна форма $\{F_1(p) = 0\} \cap \{F_2(p) = 0\}$, параметрична форма $x = x(t), y = y(t), z = z(t)$.

Прикладом параметричної просторової кривої є циліндрична гвинтова лінія (рис. 1.7), що задається рівнянням $x(t) = r \cos t, y(t) = r \sin t, z(t) = ht, r, h > 0, t \in [0, \infty)$. Ця крива лежить на поверхні циліндра радіусом r . При зміні параметра t на 2π змінні x та y повертаються до свого попереднього значення, а z збільшується на $2\pi h$. Ця величина називається кроком спіралі.

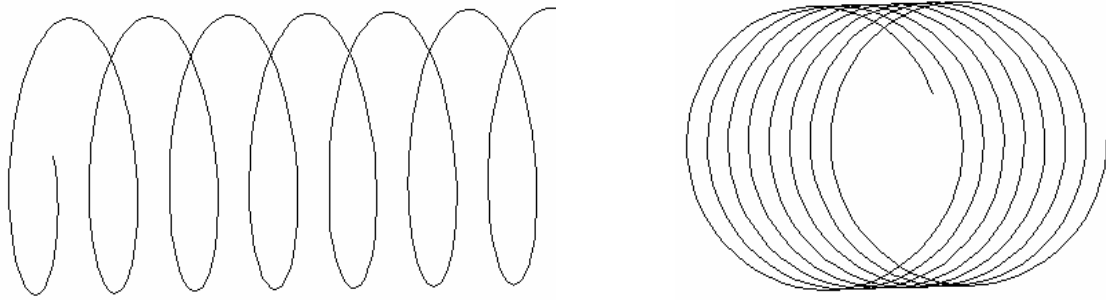


Рис. 1.7. Циліндрична гвинтова лінія

Іншим прикладом параметричних кривих є *циклічні криві*. Простіші циклічні криві на площині утворюються додаванням відносного руху точки по колу з переносним рухом центра кола по кривій $p_u(t)$ і описуються рівняннями

$$p(t) = p_u(t) + rc(wt), \text{ де } p = (x, y), \text{ } c(wt) = (\sin wt, \cos wt).$$

Випишемо рівняння деяких циклічних кривих на площині.

Циклоїда – це траєкторія руху точки кола радіусом r , яке котиться по прямій $y = 0$ (рис. 1.8). Координати (рівняння) циклоїди мають вигляд

$$x(t) = r(t - \sin t), \quad y(t) = r(1 - \cos t), \quad t \geq 0.$$

Епіциклоїда – це траєкторія руху точки кола радіусом r , якщо воно котиться зовні кола радіусом r_0 (рис. 1.9, *а*). Її параметричне рівняння:

$$p(t) = (r_0 + r)(\sin t, \cos t) - r(\sin wt, \cos wt), \quad w = (r_0/r + 1).$$

Гіпоциклоїда – це траєкторія руху точки кола радіусом r , яке котиться всередині кола радіусом r_0 (рис. 1.9, *б*). Рівняння гіпоциклоїди має вигляд:

$$p(t) = (r_0 - r)(\sin t, \cos t) + r(-\sin wt, \cos wt), \quad w = (r_0/r - 1).$$

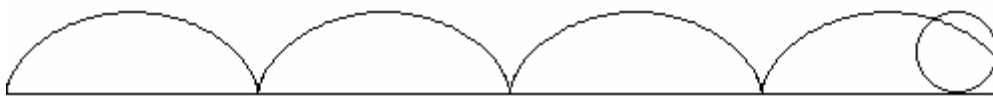


Рис. 1.8. Циклоїда

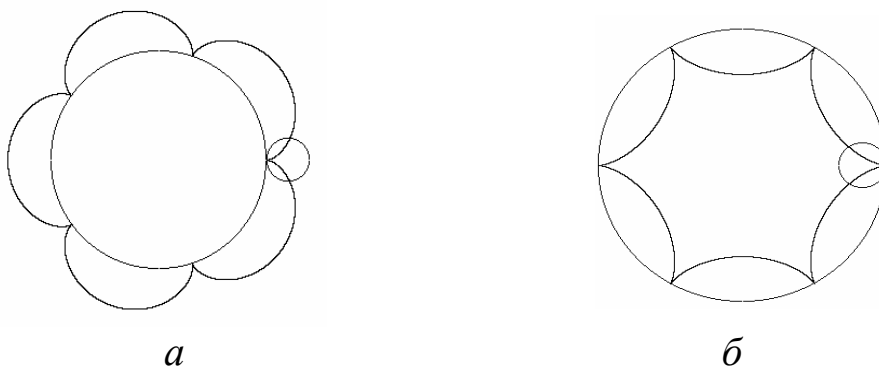


Рис. 1.9. Циклічні криві: *а* – епіциклоїда, *б* – гіпоциклоїда

1.4. Застосування комп'ютерної графіки

У наш час комп'ютерна графіка застовується майже в усіх галузях людської діяльності. Нині графічний інтерфейс користувача став основним засобом спілкування людини з ЕОМ, усі сучасні операційні системи використовують графічні елементи управління. Комп'ютерна графіка має найрізноманітніші застосування в:

- 1) системах автоматизації проектування та конструювання (інженерна графіка);
- 2) автоматизованих системах наукових досліджень;
- 3) інформаційних системах;
- 4) системах ілюстративної та ділової графіки;
- 5) системах машинної геометрії;
- 6) анімаційних задачах;
- 7) комп'ютерних іграх;
- 8) відеотренажерах (для тренування льотчиків, диспетчерів, військових, шоферів);
- 9) мистецтві, видавничій та рекламній діяльності, засобах масової інформації, криміналістиці, медицині та в інших галузях людської діяльності.

1. *Інженерна графіка* – це створення і корегування графічної документації (креслень) в електронній формі. *Сучасна інженерна графіка* – це складний програмний комплекс, що дозволяє вести наскрізне проектування, від постановки задачі та математичного моделювання до випуску всієї необхідної виробничо-технологічної документації, й використовується в усіх галузях зв'язаних із проектуванням. Основними об'єктами інженерної комп'ютерної графіки є складні структури: інтегральні схеми; промислове і побутове обладнання; хімічні, енергетичні та космічні установки; кузови автомобілів; фюзеляжі літаків; корпуси суден; складні механізми; будівлі та інженерні споруди; комунікації та мережі тощо. Головне практичне втілення інженерної комп'ютерної графіки – це системи автоматизованого проектування (САПР). Системи типу САПР, активно використовуються в багатьох галузях (наприклад, у машинобудуванні, електроніці, будівництві, архітектурі). Одними із перших були створені САПР для проектування літаків, автомобілів, електронних інтегральних схем. Такі системи спершу функціонували на великих машинах, згодом із ростом продуктивності персональних комп'ютерів САПР почали використовувати дешеві комп'ютери, а це привело до широкого розповсюдження САПР. Застосування САПР дало незаперечні переваги. Вони дозволили накопичувати й передавати знання та досвід конструкторів, що зумовлює скорочення часу розробки і підвищення

якості виробів. Без САПР неможливо виробляти сучасну складну техніку. Рівень розвитку САПР, кількість робочих місць САПР визначають рівень розвитку суспільства та стратегічний потенціал нації. В системах САПР конструктор сприймає на екрані зображення деякого об'єкта і може інтерактивно вносити зміни в зображення цього об'єкта. Такими змінами можуть бути введення і редагування окремих елементів, а також задання числових значень деяких параметрів для елементів бази даних. СУБД дають можливість одержувати тривимірне зображення будь-якої деталі, її проекції з усуненням невидимих ліній, проводити повний аналіз цих деталей. Провідні інженерні компанії прагнуть до повного цифрового представлення різноманітних конструкцій.

Використання КГ у проектуванні дозволяє вивчити властивості та поведінку модельного об'єкта, а потім уже після детального вивчення приступити до його реального виготовлення. Так, усередині 90-х років на суперкомп'ютері фірми "Фольксваген" був спроектований найбільш економічний і екологічно чистий автомобіль "Лупо ТДІ".

Важливим досягненням КГ є можливість імітувати роботу складних механізмів та здійснення перевірки на віртуальному макеті правильності функціонування всіх його елементів, проведення аналізу фактичних положень, що займають деталі механізмів у різні моменти часу.

Архітектура та будівництво є другою важливою сферою використання графічних систем проектування. Наприклад, фірма McDonalds з 1987р. використовує комп'ютерну графіку для архітектурного дизайну, розміщення посадкових місць, планування приміщень тощо. Відомо ряд ефективних приміненнь у проектуванні стадіонів, спортивних закладів тощо.

Отже, системи інженерної комп'ютерної графіки призначені для

- автоматизації креслярсько-графічних та конструкторських робіт,
- моделювання в реальному часі 2D-, 3D- об'єктів;
- формування різних поверхонь та їх перетинів;
- забезпечення промислового дизайну;
- наочної візуалізації компонентів та систем механічних, електричних та інших конструкцій, пристроїв і приладів;
- підвищення якості та швидкості проектування.

Типовими прикладами таких систем є САД-системи (Computer Aided Design – системи конструювання):

- AutoCAD – система для автоматизації розробки та виконання проектно-конструкторських, розрахунково-графічних робіт (графічне ядро більшості САПР);
- ProEngineer, Engineering Geometry Assistant – системи для розв'язування геометричних проблем;

- VariCAD, ArchiCAD ArcView – системи для розробки архітектурних проектів тощо.

2. Системи наукової комп'ютерної графіки призначені для проведення наукових досліджень та експериментів, для візуалізації наукових результатів у вигляді статичних або динамічних зображень, що інтерпретують великі масиви даних, для моделювання поведінки різних об'єктів, фізичних процесів (наприклад, швидкоплинних фізичних процесів). Такий реальний фізичний процес може відбуватися впродовж кількох мікросекунд і безпосереднє їх спостереження в реальному часі неможливе. Натурний експеримент часто дорогий і дає мало інформації. Тому розширити можливості дослідників можна шляхом проведення якісного модельного експерименту з екранною візуалізацією на комп'ютері.

Основними класами систем наукової комп'ютерної графіки є системи розв'язування науково-технічних задач (MatCAD, MatLab, Mathematica, Maple, Statistica, StatGraphics Plus та ін.). Спеціалізованими програмами наукової графіки для побудови кривих і поверхонь на основі таблиць із числовими даними є програми Grapher і Surfer.

У процесі розв'язування наукових задач із використанням ілюстративної КГ розв'язки одержують у вигляді наочних графічних ілюстрацій (наприклад, картину розподілу температури для нерівномірно нагрітої пластини). Візуалізація числових даних, що описують розподіл забруднення території, дозволяє в цілому уявити собі екологічну ситуацію або картину розповсюдження забруднення від деякого джерела забруднення. Візуалізація хімічних і атомних реакцій, поведінки плазми дозволяє краще зрозуміти механізм і закони протікаючих процесів. Засобами комп'ютерного відображення даних хіміки вивчають складні молекули білків. Візуалізація різних характеристик є ефективним (а іноді єдиним) методом розв'язування задач (наприклад, знаходження особливих розв'язків диференціальних рівнянь). Дедалі більшу роль починає відігравати інтерактивна комп'ютерна графіка у фундаментальних наукових дослідженнях. Людське пізнання користується двома механізмами мисленнями. Один із них – це можливість працювати з ланцюгом символів (алгебраїчне мислення), другий спосіб – це працювати з образами. Вони володіють більшою інтегрованістю, ніж символльні представлення. Без образних представлень ми не змогли б уявити собі світ в його повноті. Одна із функцій КГ – це використання одного з важливих механізмів людського пізнання – образного мислення, тобто КГ властива когнітивна функція (когнітивна – від англійського *cognitive*, що означає сприяти пізнанню). Когнітивна графіка відрізняється від ілюстративної тим, що її основною задачею є створення моделей представлення знань (когнітивних моделей).

Когнітивна функція графіки полягає в тому, щоб за допомогою формування зображень отримати нове знання, для якого не існує не тільки текстового символного опису, але воно не існує навіть у голові дослідника. Потім на основі спостережуваних образів картин можна перейти до формулювання відповідної гіпотези про механізми і процеси, які сховані за динамікою цих картин. Когнітивна графіка тільки зараз формується, вона зумовлює появу людино-машинної технології пізнання для розв'язування складних слабо формалізованих задач.

3. При великих обсягах інформації потрібно мати швидкий доступ до неї та легку форму її розуміння. Один із важливих аспектів інформаційної технології – розв'язування інформаційних задач методами машинної графіки. Графічна форма подання інформації має переваги – це наглядність, ємність, висока швидкість сприйняття. Більшу частину інформації про навколишній світ людина сприймає візуально. Інформаційні пошукові системи при роботі з базами даних використовують засоби машинної графіки. Існують графічні бази даних, де зберігаються графічні образи (малюнки, ілюстрації, сліди фізичних частин, дактилоскопічні відбитки), геометричні бази даних, де зберігаються геометричні об'єкти (описи деталей, структури молекул), картографічні бази даних, які містять карти місцевості. Для роботи з графічними базами даних створені відповідні СУБД (наприклад, SDMS). Ці СУБД забезпечують огляд інформації, можливість інтерактивної роботи з графічними об'єктами. У наш час стають популярними геоінформаційні системи (ГІС) для роботи з картографічними базами даних (із географічною інформацією) [27]. Типовими для кожної ГІС є такі операції: введення та редагування об'єктів з урахуванням їх розміщення на поверхні Землі, формування цифрових моделей, запис у бази даних, виконання різноманітних запитів до баз даних, аналіз множини об'єктів, розміщених на деякій території, візуалізація об'єктів, що знаходяться на поверхні Землі, причому візуалізацію треба виконувати з різним ступенем деталізації як для Землі загалом, так і в межах окремих ділянок.

4. Ілюстраційна комп'ютерна графіка дозволяє використовувати персональний комп'ютер як інструмент для художника. Спеціальні програми перетворюють комп'ютер у віртуальну майстерню художника. Ілюстраційна графіка має практичні застосування в усіх галузях людської діяльності: промисловості, сільському господарстві, бізнесі, менеджменті, телебаченні, пресі, освіті, поліграфії, шоу-бізнесі тощо. Системи ілюстраційної графіки призначені для створення та художньої обробки різних ілюстрацій (малюнків, фотографій, карт тощо). Користувач систем ілюстраційної графіки має можливість

- вводити зображення;
- будувати власні зображення шляхом компоювання інших зображень;
- редагувати зображення;
- моделювати форму, розташування та властивості об'єктів;
- анімувати зображення;
- створювати ефекти об'ємності тощо.

Типовими прикладами таких систем є Illustrator, Corel Draw, Photoshop, Painter, 3DStudio MAX, Bryce 3D, Poser, PowerPoint, Hyper Method, Director, Free Hand, Premiere тощо. Системи ділової комп'ютерної графіки призначені для наочного графічного зображення табличних даних (наприклад, для зображення даних у вигляді графіків, діаграм). Прикладами таких систем є MS Excel, Quattro Pro, SuperCalc, PowerPoint тощо.

5. Геометричне моделювання – це розв'язування різних геометричних задач у 2D-вимірному, 3D-вимірному та n -вимірному просторах. Поява комп'ютерів сприяла автоматизації геометричного моделювання з використанням засобів машинної графіки. Користувач має можливість, застосовуючи геометричну мову програмування, оперувати поняттям геометричного об'єкта та здійснювати операції над геометричними об'єктами, тобто користувач оперує категоріями, а результати роботи програми одержуються як у символічній, так і в графічній формах. Для розв'язування задач із геометричними об'єктами створені спеціальні інструментальні засоби – інтегровані системи машинної геометрії і графіки. Ці системи є сукупністю процедур формування та перетворення графічних образів, визначення їх параметрів. Прикладами таких інструментальних засобів є системи ГЕОМАЛ, СИМАК.

6. Комп'ютерна анімація (від англ. *animation* – оживлення) – це сукупність засобів та методів, зорієнтованих на одержання на екрані ЕОМ динамічних графічних зображень, тобто з пересуванням та зміною форми зображень. Для створення анімації генеруються послідовність кадрів, що дещо відрізняються один від одного, і в такий спосіб створюється ілюзія руху та зміна форми об'єктів.

Методи анімації базуються на модифікаціях такого алгоритму:

- виведення спрайта на екран;
- стирання спрайта;
- виведення з деяким зсувом іншого варіанту спрайта.

Спрайт – це логічно завершений елемент зображення на екрані ЕОМ, який рухається.

Часто анімацію реалізують на основі використання відеосторінок. Виведення "зображень" на різні сторінки відеопам'яті забезпечує більш плавний рух спрайта та усуває миготіння екрана. Для цього застосовують

такий алгоритм:

- вивести зображення на сторінку 0, яка є видимою за замовчуванням;
- сформувати нове зображення на невидимій сторінці 1;
- зробити видимою сторінку 1;
- сформувати нове зображення на невидимій сторінці 0 і т.д.

Використовуючи чотири сторінки відеопам'яті, будь-яку об'ємну фігуру можна розглядати в плавному русі без миготіння екрана. Для цього достатньо коректно побудувати відповідну фазу руху фігури на чітко визначеній сторінці.

Системи комп'ютерної анімації надають користувачу можливості

- підготовки окремих статичних зображень (програмно або інтерактивно за допомогою графічних редакторів);
- опису динаміки графічних зображень;
- якісного виведення комп'ютерних фільмів на екран дисплея;
- редагування фільмів.

Вони застосовуються для автоматизації підготовки мультфільмів, відеокліпів, художніх фільмів із 3D-спецефектами. Один із перших суперкомп'ютерних центрів був створений саме на студії Діснея і використовувався для створення мультфільмів. Це пояснюється тим, що при створенні мультфільмів необхідно виконувати великий обсяг обчислювальної роботи для побудови зображень, що відповідають проміжним фазам руху персонажа.

Створення тривимірних світів активно входить у кіноіндустрію, особливо у сфері фантастики. Одним із перших фільмів був фільм „Зоряні війни”. Він був створений за допомогою комп'ютера GRAY. Далі були фільми „Термінатор-2”, „Вавилон-5” та десятки інших. У фільмі „Титанік” більша частина інтер'єру лайнера – не реальні декорації, а графічні зображення. До недавнього часу технології комп'ютерної графіки використовувалися для імітації сцен, створення екзотичних чудовиськ, нереальних фантастичних зображень і ефектів та інших елементів, які були лише фоном для гри живих артистів. У 2001 р. вийшов на екрани повнометражний фільм „Фінальна фантазія”, в якому все, включаючи людей, синтезовано комп'ютером – живі артисти лише озвучили ролі за кадром. Прикладом комп'ютерних анімаційних систем є системи ANIMA, ANIMATOR, МОНТАЖ, ASAS, 3DStudio MAX.

GIF Animator – це найбільш популярна програма для створення професійної анімації. Вона містить ряд ефектів і переходів, має зручний інтерфейс та можливість налаштування швидкості і розмірів анімаційного зображення, володіє широкими можливостями роботи з текстом.

Macromedia Flash – прийнятий стандарт для використання в анімації векторних зображень, дозволяє створювати високоякісну векторну анімацію (фільми, рекламні ролики для розміщення в Інтернеті).

3DStudio MAX – професійне програмне забезпечення для тривимірного моделювання й анімації, розробки комп'ютерних ігор та роликів.

7. Індустрія розваг активно використовує методи комп'ютерного синтезу для створення численних комп'ютерних ігор, в яких віртуальні персонажі діють у віртуальних комп'ютерних світах. Наступним кроком є системи віртуальної реальності, які створюють ілюзію присутності й участі людини в житті віртуального світу, який може бути моделлю існуючого або видуманого простору. *Віртуальна реальність* – це технологія, що забезпечує реалістичне моделювання оточуючої дійсності (3D-простору) та підтримує інтерактивну взаємодію з користувачем.

Основа систем віртуальної реальності – високопродуктивні графічні робочі станції, що володіють великою швидкістю та можливостями побудови високореалістичних зображень. Засоби відображення можуть бути різними – від звичайних моніторів із високою роздільною здатністю до екранів на всю стіну, чи стереоскопічних систем відображення. Розвиток засобів віртуальної реальності почався з досліджень по створенню авіаційних тренажерів. Зараз системи віртуальної реальності широко використовують для імітації функціонування складних систем. Важливими характеристиками віртуальних систем є вплив не тільки на зір і на слух, а й на інші органи відчуття за рахунок використання спеціальних шлемів, костюмів, сенсорів на тілі людини. Комп'ютерні графічні системи на базі моделювання відповідних середовищ, об'єктів та ефектів використовуються для тренування льотчиків, шоферів, диспетчерів, операторів складних хімічних, енергетичних установок, військових тощо. Наприклад, в кінці 70-х років для космічних кораблів “Шатл” з'явилися льотні тренажери, що базуються на КГ. Перші кроки в цьому напрямку були зроблені ще в 60-х роках. Ці графічні системи дають можливість тренувати швидкість реакції пам'яті, логічне мислення. Прикладом імітаційного тренажера є парний тренажер повітряного бою. Місце кожного пілота оснащено імітаційним екраном і ричагами управління за допомогою яких можна змінити умови спостереження. В пам'яті ЕОМ закладені необхідні дані. Під час бою, змінюючи положення ричагів, інформація поступає в ЕОМ і в режимі реального часу переформатовується видима картина.

8. Графічні системи використовуються для створення творів мистецтва, музейної та реставраційної діяльності, оздоблення інтер'єрів, підготовки рекламних роликів та відеокліпів, різних заставок і телеефектів, оформлення Web-сторінок, створення художніх відеофільмів та спец-

ефектів в кіно, спрощення та скорочення часу підготовки друкованих матеріалів різного призначення, підвищення якості друкованої продукції, оформлення обложок книг і журналів.

9. У медицині КГ використовується, наприклад, для автоматизованого проектування імплантів (особливо кісток і суглобів), що дозволяє скоротити час проведення операцій. Анатомічні моделі КГ використовуються в медичних дослідженнях і в хірургічній практиці. Широке розповсюдження отримала КГ в економіці, рекламному бізнесі, криміналістиці та інших сферах людської діяльності. У наш час розвиток Internet істотно розширює сфери застосування КГ. Із цією метою вдосконалюються методи передачі візуальної інформації, розробляються нові графічні формати.

Контрольні питання та завдання

1. Який режим роботи називається інтерактивним?
2. Назвіть основні задачі КГ.
3. Що таке примітив? Наведіть приклади примітивів.
4. Що характеризують параметри та атрибути примітивів?
5. Які є способи задання геометричних об'єктів?
6. Що таке поліедр? Як задати модель поліедра?
7. Назвіть платонові тіла. Які їхні властивості?
8. Що таке сцена? Яка необхідна інформація для задання сцени?
9. В чому полягають недоліки явної та неявної форм задання кривої?
10. Які переваги має параметрична форми задання кривих і поверхонь?
11. Які лінії називаються циклічними/гвинтовими? Наведіть приклади.
12. Яку роль відіграють полігональні сітки в комп'ютерній графіці?
13. Що таке морфінг?
14. Назвіть області/приклад застосування КГ.
15. Коротко охарактеризуйте можливості найбільш відомих графічних пакетів.
16. Дайте визначення інженерній, ілюстраційній та діловій комп'ютерній графіці. Опишіть напрямки їх практичного застосування. Наведіть приклади задач для яких вони використовуються.
17. Наведіть приклади програм, які спеціалізовані на науковій комп'ютерній графіці. Які основні задачі вони розв'язують?
18. Охарактеризуйте поняття комп'ютерної анімації. Опишіть іструментарій мов програмування високого рівня для створення анімаційних зображень.
19. Що таке віртуальна реальність?
20. Назвіть основні задачі когнітивної графіки.
21. Наведіть приклади криволінійних поверхонь 2-го порядку.

Вправи і задачі для самостійного виконання

1. Розробіть алгоритм аналізу простоти/опуклості многокутника.
2. Задайте алгоритм визначення внутрішньої області непростого многокутника.
3. На прямій задано n точок. Знайти пару найбільш близьких між собою точок.
4. Задано n точок на площині. Знайти пару найбільш близьких між собою точок.
5. Знайдіть координати всіх вершин тетраедра, якщо початок системи координат знаходиться в центрі описаної навколо нього сфери, а одна з вершин тетраедра знаходиться на осі z .
6. Знайдіть на поверхні сфери чотири рівновіддалених між собою точки. *Вказівка. Ці точки – вершини вписаного тетраедра.*
7. Розробіть алгоритм визначення видимих та невидимих граней платонових тіл.
8. Виведіть рівняння тора (тор утворюється обертанням кола відносно осей координат).
9. Виведіть рівняння траєкторії руху точки кола радіусом r_0 , якщо воно котиться зовні/всередині еліпса з півосями a та b .
10. Розробіть алгоритм все більш точнішої апроксимації сфери многогранною трикутною поверхнею. Для цього візьміть на початку тетраедр і кожну його грань середніми лініями розбийте на чотири трикутники. Вершини нових трикутників із центра сфери спроектуйте на сферу і на цих точках побудуйте нові трикутні грані, які краще апроксимують сферу і т.д.
11. Побудуйте сферу мінімального радіуса, що обмежує n точок в просторі?
12. За матеріалами комп'ютерних періодичних видань проаналізуйте останні досягнення в галузі практичних застосувань комп'ютерної графіки. Наведіть декілька прикладів.