

УДК 004.94:519.813.7

### 3D МОДЕЛЮВАННЯ АНІМОВАНИХ ПЕРСОНАЖЕЙ

Д. П. Кучеров, К. О. Моргун

Національний авіаційний університет

d\_kuchеров@ukr.net

*Розглянуто сучасні підходи створення анімованих тривимірних фігур. Процес моделювання розкладається на п'ять взаємопов'язаних етапів розробки: створення каркасу, його текстурування, риггінг, анімацію та візуалізацію. В статті наведено детальний аналіз трудомісткості, визначаються етапи, на які витрачається найбільша кількість часу. Пропонується методика, яка дозволяє визначити найбільш придатні програмні засоби для задач створення тривимірних об'єктів та визначити можливі напрями щодо скорочення часових витрат.*

**Ключові слова:** тривимірна фігура, полігональне моделювання, сплайн-моделювання, текстура, ключовий кадр, розрахунок візуалізації.

*The article reviews current approaches create animated three-dimensional shapes. Process simulation is divided into five interrelated stages of development: creating frame, its texture, rigging, animation and rendering. This article is provided a detailed analysis of the complexity, defines the stages, which consumes the largest amount of time. The technique, which allows to determine the most suitable software for creating three-dimensional objects problems and to identify possible areas to reduce time-consuming are proposed.*

**Keywords:** three-dimensional object, polygonal modelling, spline-modelling, texture mapping, key frame, calculation visualization.

#### Постановка проблеми

Створення якісних спецефектів потребує значної кількості людських ресурсів та великої кількості дорогого обладнання. Тенденції розвитку кіноіндустрії дають зрозуміти, що виробники кінопродукції роблять велику ставку на спеціальні ефекти. Однією із функцій спецефектів є захват та надання вражень спостерігачу. Це знайшло широкого застосування в рекламі, на телебаченні і особливо в галузі комп'ютерних ігор.

Перспективною і найпоширенішою технологією моделювання тривимірних об'єктів на сьогодні є 3d-скульптинг — процес моделювання подібний до ліплення скульптури в реальному часі, тільки адаптований під комп'ютерну платформу. Матеріалом для скульптингу слугує полігональна 3d модель, кількість полігонів якої може досягати десятків мільйонів, а інструменти подібні до пензлів, які використовуються у Adobe Photoshop.

Застосування тривимірних об'єктів дає змогу домогтися кращого сприйняття інформації, залучити увагу глядачів та завантажити гравця у віртуальний світ. Основним завданням створюваного 3D персонажу є передача геометричних властивостей реального об'єкта та виклик відчуття реальності у глядача.

#### Аналіз останніх публікацій

Слід зауважити, що в кінематографії перші спроби створення об'ємних зображень розпочалися в кінці XIX ст. [1; 2], які застосовували стереоефекти.

При цьому об'ємність зображення досягається за використання двох точок зйомки. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють досягти тривимірності без застосування додаткових камер, створюючи так звані псевдостереозображення. Доповнююча частина стереопари утворюється з існуючого «плоского», шляхом синтезу та перетворення зображення в тривимірне [3].

Моделювання тривимірних об'єктів відбувається застосуванням відповідних програмних продуктів, що мають певну апаратну підтримку. Створити тривимірне зображення можливо, якщо використати основні його ознаки, сформульовані в працях [4–7].

Основи користування програмними пакетами Photoshop для створення тривимірного персонажу викладено в працях [8; 9]. Водночас це досить складна процедура, яку можна виконати застосовуючи різні програмні продукти. У зв'язку з цим виникає інтерес аналізу трудомісткості повної процедури створення 3D персонажу та виявлення найбільш тривалих операцій.

У статті на основі аналізу та досвіду застосування існуючих програмних пакетів щодо створення рухомих 3D моделей встановлюється узагальнена методика анімації з метою створення відеокліпу та проводиться аналіз трудомісткості цих операцій.

Моделювання 3D-об'єктів передбачає врахування основних закономірностей створення об'ємного об'єкта, що викладені в стислій формі в [4]. Перше за все об'ємний об'єкт має глибину.

Це означає, що 3D-об'єкт виходить за межі плоскої картинки, в нього з'являються близька й далека границі. Найпростішу уяву про тривимірність дає уявлення про аксонометричні проекції, які утворюються шляхом паралельного переносу однієї із площин під деяким кутом, а однакові точки з'єднуються прямими лініями.

Наступна ознака — нерівномірність освітлення, що проявляється в наявності на об'ємному об'єкті тіней і відблисків. При відбитті світла від гладкої поверхні проявляються відблиски. Вони виникають там, де світло ближче всього падає на об'єкт. Тінь проявляється із протилежної сторони об'єкта, тобто це місце, що закривається об'єктом поширення світла.

Ще одна дуже важлива ознака об'ємності зображення полягає в порушенні паралельності прямих, прямі лінії сходяться в напрямку горизонту. Цей факт нескладно виявити на картинах, фотографіях. Якщо порівняти об'єкти переднього й заднього планів, то можна помітити, що об'єкти переднього плану завжди мають більші розміри, ніж об'єктів заднього плану.

Наступна ознака об'ємності зображень — це текстура, структура матеріалу або тла зображення. Слід звернути увагу, що текстура матеріалу, близької частини 3D картини краще промальована, ніж більш віддалена, яка виглядає розмитію.

### Цілі

Ставиться завдання сформулювати методику створення 3D-об'єкту, який враховує перелічені властивості на прикладі робота, що має властивості анімації та може бути застосований в якості елемента ігрового движка та оцінити трудомісткість використовуваних процедур.

### Моделювання

Традиційне подання тримірної фігури відбувається шляхом побудови сітки ортогональних плоских кривих. Звичайним шляхом отримання такої сітки є малювання або оцифрування тривимірної моделі.

Автоматизований підхід до створення тривимірних об'єктів базується на методах описання поверхні моделювання [10; 11]:

- полігонами;
- сплайнами;
- NURBS моделювання.

Полігональне моделювання проводиться плоскими багатокутниками, які складаються з вершин, що з'єднуються ребрами. Групи таких полігонів створюють каркас будь-якого об'єкта, який придатний далі до подальшої обробки. Недолік полігонального моделювання полягає в тому, що для надання реалістичного вигляду об'єкта необхідно використовувати велику кількість полігонів. А масштабування фігури веде до необхідності додавання або видалення зайвих вершин та ребер з об'єкта, при збільшенні об'єктів стають очевидними прямокутні краї фігури. Метод не є інваріантним відносно перетворення. Це перш за все пов'язано з тим, що моделювання використовує кусково-лінійну апроксимацію поліномами першого порядку.

На рис. 1 показане моделювання поверхні квадратами. Моделювання сплайнами розглядається як більш загальний підхід апроксимації, коли криві описуються функціями, порядок яких більше за перший.

Найбільш застосований є третій порядок тому, що на низькому порядку не можливо досягти необхідної плавності форми, що вимагається, а більш високий порядок веде до небажаних коливань між заданими точками.

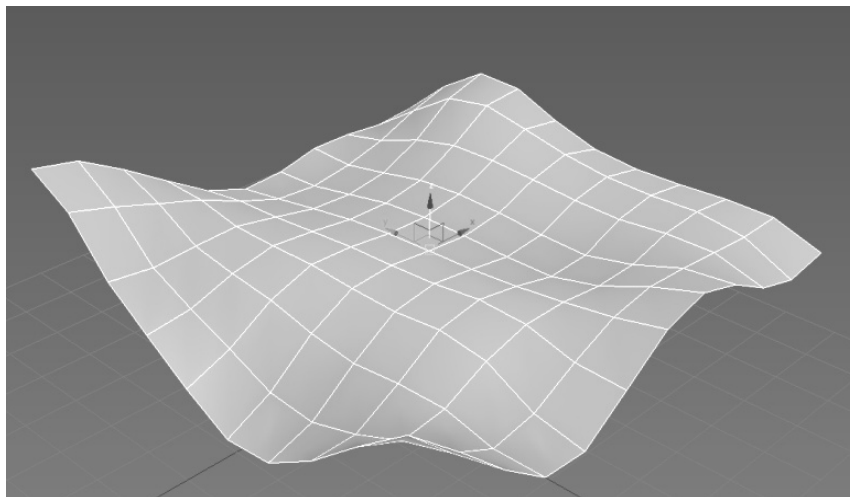


Рис. 1. Загальний вигляд полігональної сітки

Дана форма подання кривої дає можливість описувати криву чотирма вузловими точками, дві з яких є кінцевими через які проходить крива, та ще дві задають схил кривої при підході до кінцевих точок. Найбільш вдалим вважається подання кусково-гладкої кривої у параметричній формі, яка може задаватися поліномами Без'є вигляду [10]

$$Q = TP, \tag{1}$$

де  $P$  — матриця опорних точок, що складається з координатних точок  $(a, b, c, d)$  по трьом координатних осям  $(x, y, z)$  має вигляд

$$P = \begin{pmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \\ d_x & d_y & d_z \end{pmatrix}, \tag{2}$$

а  $T$  — вектор с координатами  $T = [t^3, t^2, t, 1]$ , в якому параметр  $t$  приймає значення в інтервалі  $[0,1]$ . Таким чином, криву необхідної форми можна досягти, якщо знайти потрібні коефіцієнти матриці  $P$  у виразі (2). У загальному випадку крива  $S$  стає лінійною сумою  $n$  поліномів (1)

$$S = \sum_{i=1}^n Q_i. \tag{3}$$

Моделювання за допомогою неоднорідних раціональних В-сплайнів отримав назву NURBS. Даний підхід є узагальненням кривих Без'є на випадок, коли опорні точки задавати нерівномірно. Підхід алгоритмізований та використовується практично кожним програмним пакетом, що підтримує комп'ютерне моделювання.

З метою оцінки трудомісткості проводився аналіз часових витрат тривимірного робота при побудові засобами полігонального та сплайнового моделювання редактора 3ds MAX.

Застосування методу полігонального моделювання починається з вибору форми об'ємної фігури примітиву, яка потім конвертується в полігональну сітку та отримується необхідна форма.

Модель містить 11 сфер, 7 прямокутників, 4 циліндри. В узагальнених показниках найбільш прийнятна модель вимагає застосування 25 операцій, на які витрачено приблизно 9 годин.

На відміну від полігонального проектування застосування сплайнів для створення каркасу моделі вимагало 95 елементарних операцій, на що було витрачено більш як 14 годин.

Дані трудомісткості за окремими операціями при полігональному та сплайновому моделюванні наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Трудомісткість моделювання**

Операція	Полігональне моделювання		Моделювання сплайнами	
	кількість ключових операцій	час, год	кількість ключових операцій	час, год
Створення базових фігур	22	0,5	42	2
Переміщення точок	1	8	1	4
Редагування ліній	–	–	42	8
Використання модифікаторів	2	0,12	10	0,33
Результат	25	9,02	95	14,33

Збільшення часу на побудову фігури при сплайновому моделюванні пояснюється збільшеною кількістю точок у вихідному об'єкті та необхідністю працювати з більш складними видами поліномів 3-го порядку, що стало визначним для кількості та трудомісткості виконуваних дій.

Не зважаючи на те, що трудомісткість побудови тримірної фігури сплайнами є технічно більш складною процедурою, але якість побудованого каркасу фігури виявляється кращою.

**Текстурування**

Передбачає покриття каркасу (рис. 2) певну растровим зображенням. Процедура в загальному випадку складається з трьох етапів роботи:

- переходу від геометричних координат  $X, Y, Z$  об'єкту до координат  $U, V, W$  розгортки, де координати  $U$  та  $V$  відповідають площині, а  $W$  — надає глибину текстурі;
- так званого «запікання» текстури;
- групування елементів розгортки.

Створення моделі тривимірного об'єкта відбувалося у такому порядку [12]. На першому етапі встановлювалося відповідність між координатами поверхні ( $X, Y, Z$ ) і координатами об'єкта ( $U, V, W$ )

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де  $T$  — матриця стискуючого однорідного перетворення. Даний процес виконується модифікатором *Unwrap*.

Під «запіканням» текстури — розуміється перенесення текстури на поверхню об'єкта. Процес автоматизований існує велика кількість програм, що виконують дану функцію. Найбільш вдалим вважаються засоби PhotoShop та MudBox [8, 9]. Групування елементів розгортки виконувалося для підгонки площин полігональної сітки під зображення на ескізі. До кожної частини моделі (голова, тулуб, кінцівки) окремо було застосовано модифікатор *Unwrap*, для відображення текстурних координат. Після підготовки розгортки кожної деталі, до всіх елементів було застосовано текстуру Checkerboard (шахова дошка) для з'ясування співвідношення до масштабу об'єкта.

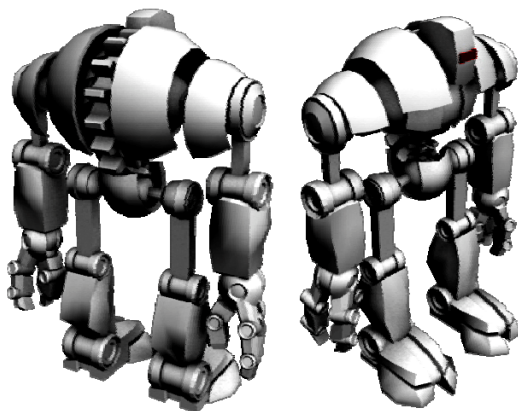


Рис. 2. Модель без текстур



Рис. 3. Текстурована модель

Потім всі елементи було наново переконвертовані в Editable Poly (полігон), та потім до них було знову застосовано модифікатор *Unwrap* для відображення розгортки усіх деталей на одному робочому полі.

Текстурні розгортки було відмасштабовано з метою однакового відображення зображення кожної поверхні.

Результуючий файл в форматі .OBJ відправлено в програму MudBox для текстурування моделі.

Там було створено текстури Diffuse Map та Specular Map для надання властивості об'ємності фігури.

Після створення текстур у редакторі матеріалів було вибрано Arch&Design («Архітектура та дизайн» - назва матеріалу), де до вузлів Diffuse Color Map Reflection Color Map було підключено текстури, які були створені за допомогою MudBox.

На завершення цього етапу було створено текстуровану модель рис. 3.

Слід зазначити, що текстурування з використанням програми MudBox дозволило на 2 години скоротити час виконання цієї ж операції ніж в редакторі Photoshop, відповідний аналіз надано в табл. 2.

Таблиця 2

#### Трудомісткість текстурування

Операція	Photoshop		MudBox	
	кількість ключових операцій	час, год	кількість ключових операцій	час, год
Підготовка UVW розгортки	6	0,12	6	0,12
«Запікання» текстури	4	0,17	4	0,17
Фарбування текстури	—	6	—	4
Результат	10	6,29	10	4,29

**Ригінг** являє собою зв'язування керованих та керуючих елементів моделі з метою спрощення подальшої анімації (рис. 4). Обирається базова точка, до якої прив'язуються всі інші зчленування.

Кожному зчленуванню відповідає власна система координат.

Розглядаючи перетворення локальної системи координат матрицею  $A_i$  для  $i$ -го зчленування  $j$ -ї секції, можна отримати координати  $n$ -ї ланки у вигляді матриці  $T^j$

$$T_n^j = A_1 \cdot \dots \cdot A_n. \quad (5)$$

Вираз (5) повністю співпадає з уявленням систем координат зчленувань маніпуляційного, робота [12]. У виразі (5) матриця  $T \in R^4$ , основу якої складає векторний простір  $NOAP$ , в якому

$$\begin{aligned} N &= (n_x, n_y, n_z, 0)^T, \quad O = (O_x, O_y, O_z, 0)^T, \\ A &= (a_x, a_y, a_z, 0)^T, \quad P = (p_x, p_y, p_z, 0)^T. \end{aligned} \quad (6)$$

У цьому виразі вектори  $N$  — нормаль до направляючих векторів,  $O$  — орієнтація вектору,  $A$  — хід зчленування, що утворює правобічну систему координат, а  $P$  — описує положення координат  $n$ -го елемента.

В програмній реалізації риг при виконанні операції простої прив'язки використовує принцип наслідування при об'єктно-орієнтованого програмуванні, програмний код використовує операції (5), (6).

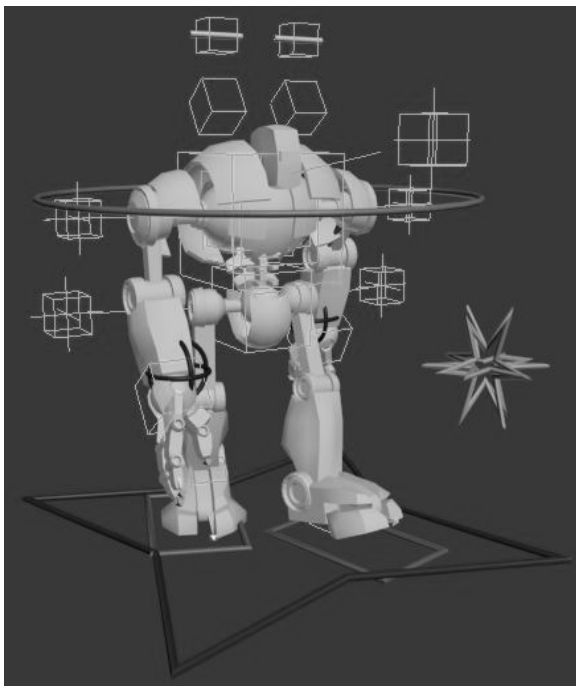


Рис. 4. Ригінг моделі робота

В середовищі 3ds MAX операції (5), (6) виконуються за допомогою функцій *Bones* для анімації системи кісток, пустих контейнерів *dummy*, введення базових точок *points*. Анімація реалізована за допомогою системи інверсної кінематики *IKSolver*, обмежувачів *LookAt Constraint*, *Orientation Constraint* [9]. Відповідно до розробленої моделі проводилися такі операції:

- створюється кістковий апарат (рис. 5), до яких прив'язано ключові вузли моделі (суглоби, хребет, голова), що складають окремі зчленування;
- застосовано систему інверсної кінематики *IKSolver* для локтевих та ножних суглобів, а також до хребта;
- обмежено рух кісток стегнового, ключичного суглобів за допомогою обмежувача *LookAt Constraint*;
- створено систему пустих контейнерів *dummy*, які вирівняні з точками обертання майже кожного об'єкту моделі;
- створено допоміжні об'єкти для анімації із сплайнів;
- виконано ієрархічну прив'язку об'єктів один до одного.

Риг завершується перевіркою готовності моделі до анімації шляхом відтворення різних поз. Під час перевірки неузгоджені рухи моделі виправлялися шляхом зміни орієнтації точок обертання. Трудомісткість ригінгу наведена в табл. 3.

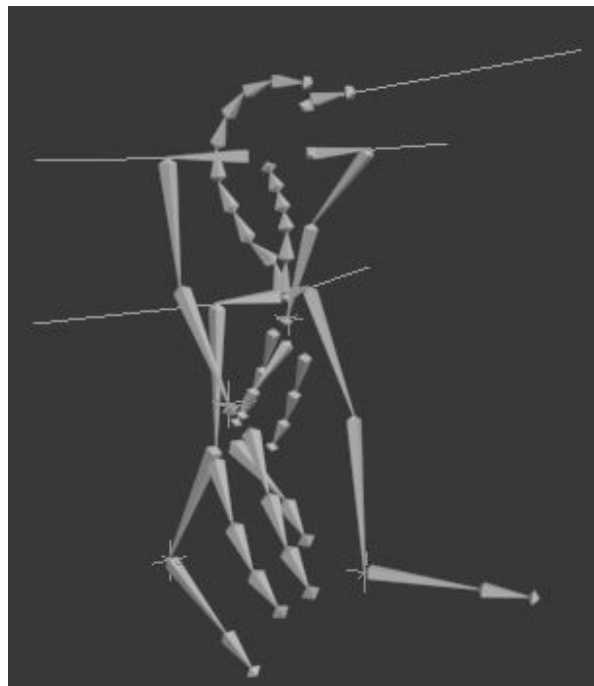


Рис. 5. Система кісток

Таблиця 3

## Трудомісткість ригінгу

Операція	Bones		CAT	
	кількість операцій	час, год	кількість операцій	час, год
Інверсна кінематика	5	0,12	2	0,033
Прив'язка	80	2	80	2
Обмежувачі	7	0,17	4	0,17
Перевірка та налагодження роботи	87	2	20	0,5
Результат	179	4,29	106	2,703

У табл. 3 операція анімації проводилася шляхом інверсної кінематики, прив'язки та обмежувачів. Інверсна кінематика — процес визначення параметрів зв'язаних гнучких об'єктів (наприклад, кінематична пара або кінематичний ланцюг) для досягнення необхідної позиції, орієнтації і розташування цих об'єктів.

Прив'язка є операцією наслідування параметрів об'єкта. Обмежувачі вирішують питання обмеження рухів об'єктів відповідно до заданих параметрів.

**Анімація**

Створення анімації моделі відбувалося методом ключових кадрів в середовищі 3ds MAX. Ключовий кадр містить параметри  $X, Y, Z$ , які відображаються у редакторі графіків у відношенні

Амплітуда/час, тому кожний параметр можна змінювати для досягнення більш точного

результату. Сам графічний редактор оснащений гнучкою системою інструментів для зміни форми графіка руху.

У табл. 3 наведено результати часових витрати для створення анімованої фігури за допомогою засобів 3ds MAX та редактора CAT.

Створення шару анімації — можливість створювати шару анімації у редакторі CAT, які зберігають інформацію про анімацію об'єктів.

Аналіз табличних даних показує, що трудомісткість анімації розглянутими продуктами приблизно однакова, а найбільш складна задача, яка вимагає прив'язки.

Час  $T_{\text{анм}}$ , що витрачається на анімацію, може бути розрахований за формулою

$$T_{\text{анм}} = N_{\text{кадр}} / V_{\text{кадр}} \quad (7)$$

В формулі (7)  $N_{\text{кадр}}$  — загальна кількість кадрів в кліпі, а  $V_{\text{кадр}}$  — темп зміни кадрів в кліпі. Трудомісткість анімації показана в табл. 4.

Таблиця 4

## Трудомісткість анімації

Операція	Bones		CAT	
	кількість операцій	час, год	кількість операцій	час, год
Створення ключів анімації	100	6	80	5
Редагування кривих	5	2	5	2
Створення шару анімації	-	-	2	0,2
Результат	105	8	87	7,2

З табл. 4 видно, застосовані функція Bones та програма CAT дають однакові результати.

**Візуалізація**

Етап візуалізації (рендерінг) тривимірної сцени проводиться шляхом сканування з метою створення растрового зображення в цифровій формі. Рівняння рендерінгу є повним формальним описом процесу візуалізації, що відноситься до сприйняття кінцевого зображення, та стосується кількості випромінювання в напрямку глядача. Кількість випромінювання  $L_0(x, \omega, \lambda, t)$ , що діє на око з довжиною  $\lambda$  від точки  $x$ , з напрямку  $\omega$  в момент  $t$  визначається

сумою кількості випромінюваного світла  $L_e(x, \omega, \lambda, t)$  та відбитого світла від цієї точки, що є сумою променів за всіма напрямками з врахуванням коефіцієнту відбиття під заданим кутом, записується в загальному вигляді [14]

$$L_0(x, \omega, \lambda, t) = L_e(x, \omega, \lambda, t) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega, \omega', \lambda, t) L_i(x, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot n) d\omega' \quad (8)$$

В формулі (8)  $f_r(x, \omega', \omega, \lambda, t)$  - двонапрямлена функція розподілення відбиття кількості випромінювання світла, відбитого від  $\omega'$  до  $\omega$ ;  $L_i(x, \omega, \lambda, t)$  - кількість світла, що приходить в напрямку  $\omega'$  на довжині  $\lambda$  з точки  $x$  за час  $t$ ;

$(-\omega' \cdot n)$  — величина, що враховує поглинання вхідного випромінювання по заданому куту  $\omega'$ ,  $n$  — нормаль до ділянки поверхні.

Звичайно до інтегрального рівняння (8) застосовують чисельні методи розрахунку, наприклад метод Монте-Карло.

Довжини хвиль світла  $\lambda$  обмежують трьома значеннями RGB та арифметичним усередненням, кількість напрямків  $\omega'$  обмежують 20. Кількість точок  $x$  залежно від кадрового розрізнення коливається від 1000 до 10000, а для FullHD складає понад 20 млрд, тому візуалізація — це тривалий процес, який вимагає від апаратних засобів великих ресурсів потужності, а для кліпу цей процес відбувається покадрово. Наприклад, якщо час на застосування рендерінгу 1 кадру вимагається 5 хв, встановлена частота зміни кадрів становить 24 кадр/с, то для кліпу тривалістю 30 с операція рендерінгу потребує 60 год.

Для розробленого персонажу візуалізація в інтересах порівняння проводилась в 3ds MAX двома засобами: системами Mental ray та V-ray. Приблизний час візуалізації розробленого персонажу — 2 доби.

**Методика створення об'єкта**

Таким чином, повна методика створення анімованого 3D персонажу складалася з 5 послідовних етапів: моделювання, текстурювання, ригінгу, анімації та візуалізації. Створення вимагало приблизно 5 діб безперервної роботи, найбільш трудомісткі етапи — це створення моделі та візуалізації.

На рис. 6 показано етапність робіт з визначеними найбільш раціональними засобами створення, а саме: моделювання відбувалося точками з лінійними функціями, що їх поєднували (багатокутниками), текстурювання програмою MudBox. Останні три процеси відбувалися в середовищі 3ds MAX.

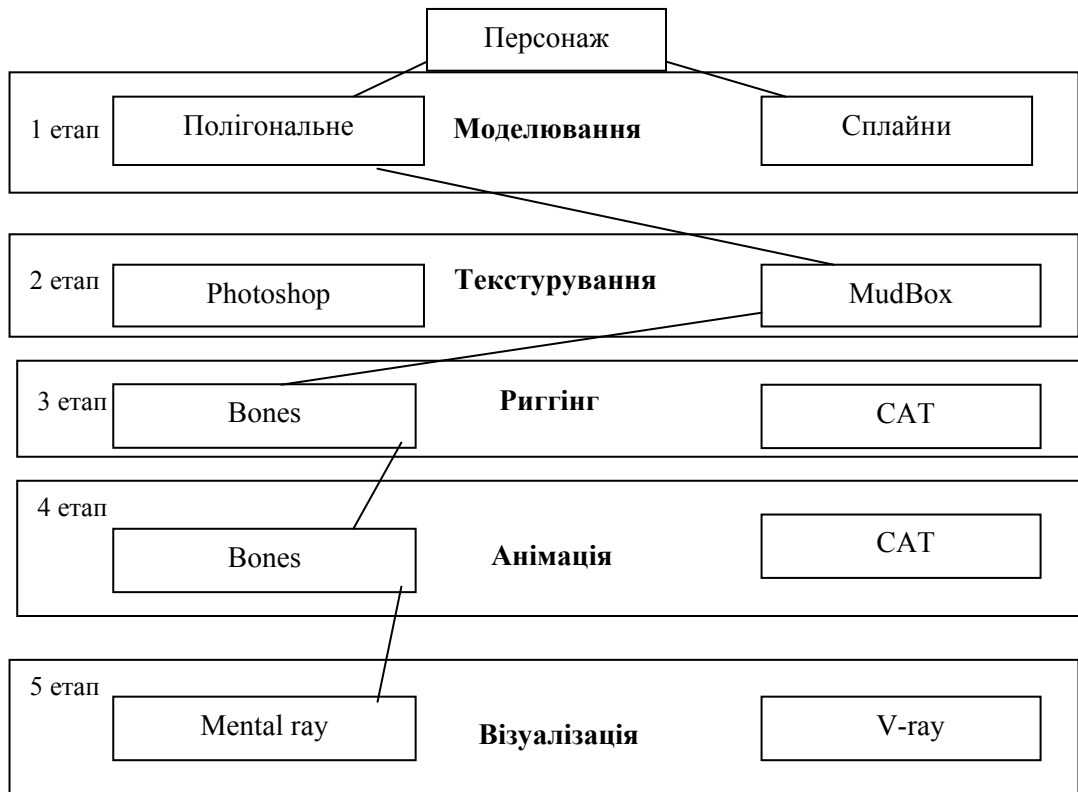


Рис. 6. Методика розробки 3 складного об'єкту

Слід відзначити, що найбільш тривалі процеси це моделювання, де відбувається підготовка вихідної моделі та візуалізація, як кінцевий етап перетворення тримірного зображення для перегляду його на двомірному екрані.

**Висновок**

Сучасні апаратні засоби дозволяють проводити обчислення великих масивів

графічної інформації в короткі проміжки часу, величезна доля ресурсів припадає на графічні процесори для розрахунку інформації при створенні спецефектів.

Графічні карти на сьогодні є одними з самих дорогих компонентів ЕОМ, вони є серцем створення візуальних ефектів, тому виробники приділяють увагу всім елементам графічних карт стимулюючи їх рівномірний розвиток.

Лідерами випуску сучасних графічних карт є компанії AMD та NVIDIA. Але обладнання для створення спецефектів не закінчується тільки створенням та модернізацією графічних процесорів. Також стрімко розвиваються засоби вводу та виводу графічної інформації.

Основний упор робиться на створення та передачу зображень з великою детальністю, що вимагає великої кількості обчислювальних операцій. Розвиток програмних та апаратних засобів комп'ютерної графіки відбувається хоча й незалежно один від одного, але ж розробники повинні враховувати апаратні можливості.

У статті проаналізовано поширені методи обробки та підготовки 3D персонажу до його застосування у відеокліпі. При створенні каркаса моделі з точки зору часових показників кращі результати має полігональне моделювання, текстурювання програмним засобом MudBox, а також ригінг у системі САТ. Найбільш тривалим виявилася візуалізація.

Приблизний розподіл робочого часу при створенні анімованого 3D персонажу за окремими етапами від загального часу роботи такий: моделювання — 24,3 %; текстурювання — 11,01 %; ригінг — 7,2%; анімація — 15,82 %; візуалізація — 49,97 %.

Ураховуючи результати, отримані при виконанні дослідження, подальші дослідження планується направити на скорочення часу при виконанні первинної операції моделювання, візуалізації та визначення критеріїв якості створення моделі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Проворнов С. М.* Кинопроекторная техника / С. М. Проворнов — М. : Искусство, 2004. — Т. 1. — 458 с.

2. *Масуренков Д. И.* Этапы развития комбинированных съёмок [Электронный ресурс] / Д. И. Масуренков // MediaVision. — 2011. — № 2. — С. 43–46. — Режим доступа до журн.:

[http://mediavision-mag.ru/uploads/01%202011/43\\_46.pdf](http://mediavision-mag.ru/uploads/01%202011/43_46.pdf)

3. *Ли Дж.* Трёхмерная графика и анимация / Ли Дж., Б. Уэр. — М. : Вильямс, 2002. — 640 с.

4. *Моргун К. О.* Створення 3D-моделей для комп'ютерних ігор та фільмів / К. О. Моргун., Д. П. Кучеров // Матеріали Міжнарод. НПК з проблем видавничо-поліграфічної галузі. 20 листопада 2014 року, м. Київ, НДІСВД. — К. : ПрАТ «УкрНДІ СВД», 2014. — С. 50–52.

5. *Грегори Р. Л.* Глаз и мозг. Психология зрительного восприятия / Р. Л. Грегори. — М., 1970.

6. *Грегг Дж.* Опыты со зрением / пер. с англ. А. И. Коган. — М. : Мир, 1970. — 202 с.

7. *Хьюбел Д.* Глаз, мозг, зрение / Д. Хьюбел. — М. : Мир, 1990. — 239 с.

8. *Маргулис Д.* Photoshop LAB Color: загадка каньона и другие приключения в самом мощном цветовом пространстве / Д. Маргулис. — М. : Интелбук, 2006. — 480 с.

9. *Мединов О. Ю.* Photoshop. Мультимедийный курс / О. Ю. Мединов. — СПбю : Питер 2008. — 208 с.

10. *Роджерс Д.* Математические основы машинной графики / Д. Роджерс, Адамс Дж. — М. : Мир, 2001. — 604 с.

11. *Корнейчук Н. П.* Экстремальные свойства полиномов и сплайнов / Н. П. Корнейчук, В. Ф. Бабенко, А. А. Лигун. — К. : Наукова думка, 1992. — 304 с.

12. *Шахинпур М.* Курс робототехники / М. Шахинпур. — М. : Мир, 1990. — 527 с. (Рус. пер. Shahinpoor M. A Robot Engineering Textbook / Shahinpoor M. — New York: Harper & Row, 1987.)

13. *Marks W. B., Dobbie, W.H. & MacNichol, E.F.* Visual pigments of single primate cones. Science (1964) 143: P. 1181 — 1183.

14. *Marc, R. E, Sperling H. G.* Chromatic Organization of Primate Cones. Science (1977) 196: P. 454—456.

15. *Наука* создания фотореалистичного 3D [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <http://3dyuriki.com/2009/12/28/nauka-sozdaniya-fotorealisticnogo-3d/>

Стаття надійшла до редакції 27.03.2015