

**ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ОЛЕСЯ ГОНЧАРА
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**ЗВІТ
З ПРЕДДИПЛОМНОЇ ПРАКТИКИ**

Освітньо-професійна програма: Комп'ютерне моделювання та технології програмування

Спеціальність: 113 Прикладна математика

Галузь знань: 11 Математика і статистика

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Студента 4 курсу групи ПА–17–2
Панасенко Єгор Сергійович
(прізвище та ініціали)

Керівник: канд. фіз.-мат. наук
Степанова Наталія Іванівна
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Кількість балів: _____

Національна шкала: _____

Члени комісії:

_____	Зайцева Т.А. <small>(прізвище та ініціали)</small>
_____	Сердюк М.Є. <small>(прізвище та ініціали)</small>
_____	Лисиця Н.М. <small>(прізвище та ініціали)</small>

м. Дніпро, 2021 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	5
1.1. Математичні моделі поверхонь та об'єктів	6
1.2. Дослідження математичних моделей складних об'єктів	8
2. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩОДО СТВОРЕННЯ І РЕДАГУ- ВАННЯ ГЛАДКИХ ОБ'ЄКТІВ	15
2.1. Бібліотека Visualization Library	16
3. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	17
4. ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	19
5. ОГЛЯД РОБОТИ ПРОГРАМИ	21
6. ОСНОВНА ДОКУМЕНТАЦІЯ ДО КОДУ	24
6.1. Алфавітний покажчик класів	25
6.2. Класи	25
6.3. Клас Beziator	27
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	37
ДОДАТОК А. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ	38
6.4. Файл osdo/beziator.h	38
6.5. beziator. h	39
6.6. Файл res/bezier.frag	40
6.7. bezier. frag	41
6.8. Файл res/bezier.geom	41
6.9. bezier. geom	41
6.10. Файл res/bezier.tesc	42
6.11. bezier. tesc	42
6.12. Файл res/bezier.tese	42
6.13. bezier. tese	42
6.14. Файл res/bezier.vert	43
6.15. bezier. vert	43

ВСТУП

Створення просторових моделей об'єктів виконується сьогодні у багатьох галузях науки і промисловості, таких як архітектура, медицина, будівництво, дизайн. Особливої уваги заслуговують також засоби подання динамічних 3D-об'єктів, які широко використовуються у кінематографі, індустрії комп'ютерних ігор.

У сучасному світі спостерігається неймовірний приріст потужності обчислювальної техніки і розробники систем віртуальної реальності, комп'ютерних ігор намагаються використати цю потужність якомога ефективніше з метою отримання графіки, найбільш схожої на реальний світ.

Для досягнення максимального задоволення користувачів розробники також створюють велику кількість окремих об'єктів та приголомшливих ефектів, що супроводжується значним споживанням дискового простору й оперативної пам'яті. Тому завжди є актуальними питання розробки більш ефективних методів моделювання об'єктів складної форми, які б використовували менше обчислювальних ресурсів.

Які можливості сьогодні мають розробники інтерактивних програмних продуктів для зберігання об'єктів? По-перше, майже двадцять років тому, коли потужність процесорів достатньо зросла, щоб швидко виконувати великі об'єми обчислень, було розроблено векторний формат SVG. Для побудови зображень формат використовує криві Безьє, які є окремим випадком B-сплайнів. Сьогодні формат SVG є поширеним, він підтримується всіма сучасними браузерами для настільних і мобільних пристроїв.

Формат SVG дозволяє зберігати як статичну, так і анімовану двовимірну графіку. Якщо розглядати використання SVG формату у інтерактивних системах, зокрема у комп'ютерних іграх, дуже цікавою є можливість закріплення за

об'єктом у даному форматі обробника подій, що дає користувачеві можливість керувати зображенням: міняти його форму, пересувати. Крім того, векторним форматам притаманні гарна масштабованість й незначне використання дискового простору за умови, що зображення складається з невеликої кількості простих елементів, що також сприяє популярності SVG формату у розробників інтерактивних графічних додатків.

З іншого боку, SVG як і всі векторні формати, має також і недоліки: у порівнянні з растровими аналогами побудова SVG-зображення потребує більше процесорного часу, а зображення, що складаються з великої кількості дрібних деталей, починають вимагати більше дискового простору ніж аналогічні растрові.

Також суттєвим обмеженням для використання формату SVG у індустрії комп'ютерних ігор є те, що він не підтримує опис тривимірної графіки.

У тривимірному просторі найбільш розповсюдженим форматом є OBJ – простий і гнучкий формат, що дозволяє створювати об'єкти за допомогою різних способів, у тому числі з використанням кривих Безьє і B-сплайнів.

Таким чином на даний час вже існують формати, які дозволяють зберігати окремі об'єкти компактно, забезпечувати їх легку масштабованість.

Але у реальному ігровому процесі, де об'єкти мають досить складні форми, постійно взаємодіють один з одним, а сцени є досить насиченими, виникає проблема: як найбільш просто зробити опис об'єктів і забезпечити їх подальшу динаміку з найменшим навантаженням на комп'ютерну систему?

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою цієї роботи є розробка програмного забезпечення для генерація та відображення 3D-моделей об'єктів у комп'ютерних іграх з використанням сплайнів у режимі реального часу. У загальному випадку розглядаються 3D-моделі об'єктів створені за допомогою поверхонь Безьє. Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі:

- розширити функціонал розробленого програмного забезпечення, розробленого у курсовій роботі, загалом додати можливість динамічно завантажувати моделі, змінювати деталізацію.
- зробити програмне забезпечення придатним для компіляції та роботи у різних операційних системах, загалом Linux та Windows
- розробити шейдер для генерації 3D-моделі за допомогою відеокарти.
- написати документацію до програмного забезпечення.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1. Математичні моделі поверхонь та об'єктів

Комп'ютерна графіка пропонує сьогодні різні засоби моделювання просторових форм і об'єктів. Геометричне моделювання - це математичний опис об'єктів у просторі певними атрибутами: координатами, розмірами, формою. При відображенні геометричних об'єктів потрібно враховувати також їх просторове розташування і поведінку: переміщення, повороти відносно координатних осей (шість ступенів свободи), зіткнення з перешкодами або іншими об'єктами. Крім того для отримання образів просторових форм на площині екрану необхідно використовувати ще одне геометричне перетворення - проєціювання.

1.1.1. Математичний опис моделей поверхонь та об'єктів

У комп'ютерній графіці прийнята така класифікація моделей поверхонь і об'єктів:

- Каркасні - на екрані візуалізуються не всі точки поверхні, а лише невелика їх кількість, достатня, щоб передати характер поверхні. Пари точок утворюють систему ліній і формують каркас моделі;
- Точкові - на екрані відображаються точки з відповідним забарвленням;
- Кінематичні - поверхня будується неперервним рухом у просторі лінії по заданій траєкторії;
- Кусочні – поверхня складається з окремих фрагментів, при обмеженому

наборі даних у поверхні присутні розриви і злами;

- Сплайнові – моделі використовуються для побудови гладких поверхонь на основі обчислення координат за допомогою розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь;
- Фрактальні – при побудові поверхні використовується властивість об'єктів до самоподібності в залежності від масштабу;
- Графічні - використовуються у разі, якщо не можливо виділити певний закон для побудови і поверхня заповнюється деякими дискретними елементами.

У загальному випадку не можна стверджувати, що одна математична модель краща за іншу. Так, наприклад, каркасна модель зручна для виконання швидкої візуалізації поверхні, кінематична підходить для об'єктів з природною симетрією, графічна дає більш реалістичне уявлення про об'єкт. Тому необхідно обирати математичну модель з урахуванням потрібного ступеня реалістичності, обчислювальних можливостей комп'ютерної системи, особливостей задачі, для якої застосовується моделювання об'єктів.

1.1.2. Опис розташування об'єктів у сцені

Сцена у комп'ютерній графіці - це сукупність об'єктів, які підлягають відображенню, описана за допомогою деякої математичної моделі. Візуалізацією називають процес перетворення математичної моделі сцени у вигляд, придатний для показу на наявних пристроях виведення.

Для подання об'єктів сцени у графіці використовують декілька координатних систем: об'єктну (жорстко зв'язана з об'єктом), світову (нерухома система, призначена для визначення взаємного розташування всіх об'єктів сцени), видову (система спостерігача, визначає напрямок камери і ракурс показу).

Для здійснення переходу від однієї координатної системи до іншої використовуються матриці базових геометричних перетворень (зсуву, обертання, масштабування). Складні перетворення визначаються шляхом перемноження матриць відповідних елементарних перетворень між собою. Таким чином спочатку відбувається перехід від об'єктної системи координат до світової, а потім зі світової до видової.

Після отримання видових координат об'єктів сцени виконується проектування сцени на екранну площину. Для цього використовується матриця проєктивного перетворення (паралельне або центральне проектування), яка дає змогу отримати екранні (двовимірні) координати об'єктів сцени. Третя видова координата зазвичай зберігається; з її допомогою визначають взаємне розташування об'єктів сцени за глибиною.

На останньому кроці відбувається перетворення координат об'єктів з урахуванням особливостей системи графічного виводу.

1.2. Дослідження математичних моделей складних об'єктів

Для подальшої програмної реалізації серед існуючих математичних моделей поверхонь об'єктів було обрано поверхню Безьє, яка є частинним випадком В-сплайнів.

1.2.1. Сплайни і сплайн-інтерполяція

Існує досить велика кількість геометричних конструкцій, які називають сплайнами. Наприклад, експоненціальні (напружені) сплайни, тригонометричні, раціональні сплайни. У комп'ютерній графіці найбільш широке застосування знайшли кубічні сплайни та метод інтерполяції кубічними сплайнами.

Особливість сплайн-інтерполяції полягає в тому, що сплайнова крива скла-

дається з кількох поліномів третього ступеня, а їх кількість дорівнює кількості інтервалів, всередині яких ми виконуємо інтерполяцію. Гладкість побудованої інтерполяційної кривої забезпечується безперервністю першої похідної на всьому інтервалі інтерполяції.

Розглянемо загальний випадок сплайнової кривої. Нехай у тривимірному просторі існують вектори $u_i = [x_i \ y_i \ z_i]$, $i = \overline{0, n}$, ці вектори визначають вузлові точки сплайнової кривої. Будемо вважати, що вузлові точки пронумеровані у порядку з'єднання кривої.

Параметричне подання сплайнової кривої має вигляд:

$$\begin{cases} x_i(t) = s_{3x_i}t^3 + s_{2x_i}t^2 + s_{0x_i}t + s_{1x_i} \\ y_i(t) = s_{3y_i}t^3 + s_{2y_i}t^2 + s_{0y_i}t + s_{1y_i} \\ z_i(t) = s_{3z_i}t^3 + s_{2z_i}t^2 + s_{0z_i}t + s_{1z_i} \end{cases}$$

або у векторній формі:

$$\begin{cases} p_i(t) = [t^3 & t^2 & t & 1] S_i \\ \forall t \in [0, d_i], i = \overline{0, n} \end{cases}, \text{ де } S_i = \begin{bmatrix} s_{3x_i} & s_{3y_i} & s_{3z_i} \\ s_{2x_i} & s_{2y_i} & s_{2z_i} \\ s_{1x_i} & s_{1y_i} & s_{1z_i} \\ s_{0x_i} & s_{0y_i} & s_{0z_i} \end{bmatrix}$$

З урахуванням властивостей сплайнів будується система лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів сплайну:

$$QS = U \rightarrow S = Q^{-1}U$$

де $Q \in R^{4n \times 4n}$ - матриця яка задає необхідні умови для системи, $S =$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ \dots \\ S_n \end{bmatrix} \in R^{4n \times 3}, U \in R^{4n \times 3}$$

1.2.2. Крива Безьє

Окремим випадком сплайнів є крива Безьє. Кубічну криву Безьє можна побудувати з використанням чотирьох опорних точок $P_i, i = \overline{0, 3}$. У параметричному вигляді отримаємо:

$$B(t) = (1 - t)^3 P_0 + t(1 - t)^2 P_1 + t^2(1 - t) P_2 + t^3 P_3$$

де t – параметр, $t \in [0, 1]$

Розглянемо графічний спосіб побудови кривої Безьє із застосуванням алгоритму де Кастельє (рис. [?]).

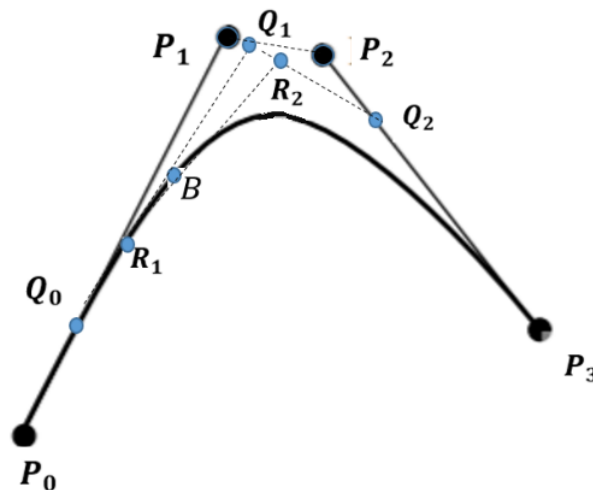


Рис. 1. Побудова кривої Безьє

Для отримання точки кривої, яка відповідає, наприклад, значенню параметра $t = 0.25$ потрібно відкласти 0.25 шляху на відрізках $P_i P_{i+1}$. В результаті отримаємо точки $Q_j, j = \overline{0, 2}$, на наступному кроці зробимо теж саме і отрима-

ємо R_0 та R_1 . У такий спосіб чином ми отримали дотичну до кривої, ця властивість буде використана для побудови нормалі у поверхні кривої Безьє. І знову прокладемо 0.25 шляху на відрізку R_0R_1 отримаємо нашу точку B , яка знаходиться на кривій. Якщо ми будемо послідовно обирати t , наприклад з кроком 0.1, та з'єднувати у відрізки, то ми отримаємо ламану. Зі зменшенням кроку ламана буде ставати все більш схожою на криву. Таким чином можна підібрати такий крок, при якому на екрані комп'ютера буде відображатися крива.

Крива Безьє задається формулою:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i b_{i,n}(t)$$

де P_i - контрольні точки, а $b_{k,n}(t)$ - поліноми Бернштейна, базисні функції кривої Безьє.

$$b_{k,n}(t) = C_i^n t^k (1-t)^{n-k}$$

де C_i^n число поєднань з n по k

$$C_i^n = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Побудуємо формулу кубічної кривої Безьє:

$$B(t) = (1-t)^3 P_0 + t(1-t)^2 P_1 + t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3$$

Цю формулу можна отримати побудувавши криву графічним способом. Прокласти шлях від однієї контрольної точки до іншої можна таким чином $(1-t)P_i + tP_{i+1}$, якщо ми послідовно проробимо ті самі кроки, що і у графі-

чному будуванні, отримаємо:

$$B(t) = t(t((1-t)P_2 + tP_3) + (1-t)((1-t)P_1 + tP_2)) + \\ + (1-t)(t((1-t)P_1 + tP_2) + (1-t)((1-t)P_0 + tP_1))$$

Спростимо формулу:

$$B(t) = -t^3P_0 + 3t^3P_1 - 3t^3P_2 + t^3P_3 + 3t^2P_0 - 6t^2P_1 + 3t^2P_2 - 3tP_0 + 3tP_1 + P_0 \quad (1)$$

Тепер ми можемо записати формулу у матричному вигляді:

$$B(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

або нехай $P_i = [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz} \ 1]$

$$B(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{0x} & p_{0y} & p_{0z} & 1 \\ p_{1x} & p_{1y} & p_{1z} & 1 \\ p_{2x} & p_{2y} & p_{2z} & 1 \\ p_{3x} & p_{3y} & p_{3z} & 1 \end{bmatrix}$$

Враховуючи що на сучасних комп'ютерах завдяки кешуванню рядків, то множити матрицю на вектор швидше ніж вектор на матрицю, то більш оптимальною формулою буде:

$$B(t) = \begin{bmatrix} p_{0x} & p_{0y} & p_{0z} & 1 \\ p_{1x} & p_{1y} & p_{1z} & 1 \\ p_{2x} & p_{2y} & p_{2z} & 1 \\ p_{3x} & p_{3y} & p_{3z} & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}$$

Тепер знайдемо похідну до вираження (1), для того щоб знайти дотичну, отримаємо:

$$B(t) = -3t^2 P_0 + 9t^2 P_1 - 9t^2 P_2 + 3 * t^2 P_3 + 6t P_0 - 12t P_1 + 6t P_2 - 3P_0 + 3P_1 \quad (2)$$

Запишемо у матричному вигляді:

$$B(t) = \begin{bmatrix} p_{0x} & p_{0y} & p_{0z} & 1 \\ p_{1x} & p_{1y} & p_{1z} & 1 \\ p_{2x} & p_{2y} & p_{2z} & 1 \\ p_{3x} & p_{3y} & p_{3z} & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 9 & -9 & 0 \\ 6 & -12 & 6 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}$$

Властивості кривої Безьє:

- неперервність заповнення сегменту між початковою та кінцевою точками,
- крива завжди знаходиться у фігурі утвореній контрольними точками, у кубічній кривій це буде деякий чотирикутник, цю властивість можна використати для того щоб перевірити чи не перетинаються дві криві на початковому етапі,
- якщо контрольні точки знаходяться на одній прямій, то утворюється пряма лінія,
- крива симетрична, тобто якщо переставити вектор контрольних точок у

зворотньому порядку, то отримаємо ту саму форму,

- крива афінно інваріантна,
- зміна однієї контрольної точки приводить до зміни всієї кривої,
- будь який сегмент кривої є крива Безьє.

1.2.3. Поверхня Безьє

Як і крива Безьє, поверхня Безьє визначається набором контрольних точок. Розглянемо графічний спосіб побудови кубічної поверхні Безьє з 16 контрольними точками (рис. [?]).

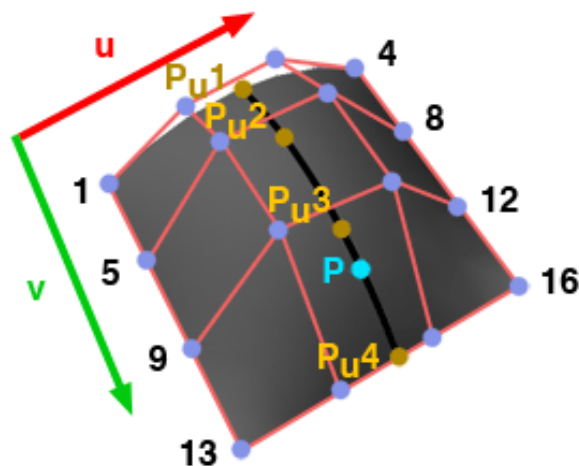


Рис. 2. Побудова поверхні Безьє

Спочатку будемо 4 кубічні криві Безьє через контрольні точки 1-4, 5-8, 9-12, 13-16 використовуючи дійсне число v , далі використовуючи точки відповідних v на отриманих кривих як контрольні точки наступної кривої будемо наступну криву використовуючи дійсне число u , таким чином ми отримаємо поверхню побудованої з багатьох кривих, причому як ми все знаємо відрізок отриманий в останньому кроці при побудові кривої це дотична, якщо ми будемо поверхню будуючи криві по контрольним точкам 1, 5, 9, 13 і так далі до

4, 8, 12, 16, то ми отримаємо ще одну дотичну, але в деякому іншому напрямку, і якщо ми знайдемо векторний добуток отриманих дотичних, ми отримаємо нормаль до поверхні у даній точці.

Поверхня Безьє задається формулою:

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n b_{i,n}(u) b_{j,n}(v) P_{ij}$$

В комп'ютерній графіці поверхні Безьє використовують для подання гладких поверхонь. Вони досить компактні, ними легко маніпулювати, вони мають гарні властивості безперервності. Крім того, такі канонічні поверхні, як сфери і циліндри, можна добре апроксимувати невеликим числом кубічних поверхонь Безьє.

2. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩОДО СТВОРЕННЯ І РЕДАГУВАННЯ ГЛАДКИХ ОБ'ЄКТІВ

На початку розробки графічного додатку розробник повинен визначитися, з якого рівня починати писати власний програмний код. Програмуванням на рівні графічного обладнання, як правило, займаються лише його виробники. Графічна бібліотека, яка реалізує певний стандарт абстрагування від обладнання, безпосередньо взаємодіє з драйвером. Стандартами абстрагування є, наприклад, бібліотеки OpenGL (відкрита графічна бібліотека для настільних комп'ютерів під керуванням різних ОС), Direct3D (призначена для різних ЕОМ під управлінням Windows і Windows Phone), Metal (для мобільних пристроїв під керуванням iOS). [7]

У даній роботі для розробки програмного продукту обрано крос-платформовий програмний інтерфейс OpenGL, що забезпечує незалежність програмного додатку від операційної системи.

2.1. Бібліотека Visualization Library

У ході роботи було знайдено таку бібліотеку, як Visualization Library. Ця бібліотека написана на мові C++ і може використовуватись для графіки у 2D або 3D. Вона дозволяє моделювати різні види поверхонь, фрактали, та багато іншого. Проаналізувавши можливості використання бібліотеки було отримано такі висновки:

- Бібліотека написана на мові C++ та з використанням виключень, таким чином це робить неможливим її використання іншими мовами програму-

вання.

- Бібліотека самостійно реалізує свою матрицю та вектор, таким чином закривають можливість оптимізувати операції над матрицями. Більш того бібліотека не використовує команди SSE, які дають приріст у швидкості, як це зроблено у бібліотеці CGLM.
- Бібліотека вже не підтримується розробниками, останній внесення змін у код було 20 лютого 2020 року, у порівнянні з бібліотекою CGLM, яка активно розвивається.
- Якщо подивитися на реалізацію кривих Безьє, то ми побачимо, що бібліотека не використовує матричний спосіб отримання вершин з поверхні Безьє, таким чином ми знову не можемо використати оптимізацію за допомогою команд SSE.
- Також перерірено спосіб знаходження нормалей для поверхні, бібліотека знаходить нормалі по отриманим трикутникам при будуванні поверхні, хоча для поверхні Безьє існує значно швидший та дешевший спосіб знаходження нормалі, цей спосіб будується на знаходження похідних до кривої Безьє з різних сторін.

3. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Для розробки програмного забезпечення висунуто такі вимоги:

- Програмне забезпечення повинно мати відкритий вихідний код та ліцензію вільного програмного забезпечення.

Це дозволить будь якому досвідченому користувачу зкомпілювати програмне забезпечення під будь яку платформу та операційну систему, або навіть дасть можливість модифікувати код під свої потреби.

Також ліцензія повинна бути сумісна з ліцензіями використаних бібліотек. Загалом були використані бібліотеки CGLM, ImGui, GLFW, EASTL та програмний інтерфейс OpenGL. Перші бібліотеки CGLM та ImGui використовують ліцензію MIT, бібліотека GLFW використовує ліцензію ZLib, а EASTL – ліцензію BSD. А програмний інтерфейс OpenGL має ліцензію подібну до ліцензії BSD. Усі ці ліцензії є сумісними з ліцензією LGPLv3, яка є подібною до GPL, але дозволяє використовувати програмне забезпечення у пропрієтарних проектах.

- Програмне забезпечення повинно працювати у режимі реального часу.

Саме таким чином було вибрано мову C++ та бібліотеку CGLM, які дозволяють досягти найбільшої швидкості роботи програми у порівнянні з іншими мовами програмування, причому практично не знижуючи швидкості розробки коду. Більш того CGLM автоматично компілюється з використанням SSE команд, якщо є така можливість, що ще дає приріст у швидкості.

- Програмне забезпечення повинно дати можливість використання бібліотеки якомога більшому колу розробників.

Саме тому було обрано мову програмування C++ та бібліотеку EASTL, яка на відміну від стандартної бібліотеки STL дозволяє розробляти без використання виключень. Таким чином за допомогою інструментів можна на основі цього програмного забезпечення згенерувати C код, який у подальшому можна обернути у більшість мов програмування і таким чином програмне забезпечення зможуть використати і розробники, які не знають C++, але знають деяку іншу мову програмування.

- Програмне забезпечення повинно бути якомога простим та легким, та залежати від простих та легких бібліотек.

Програмне забезпечення повинно розроблятися по принципу KISS (акронім для “Keep it simple, stupid”), що означає що проектування повинно бути якомога простішим. Таким чином можна уникнути багатьох помилок пов’язаних з тим що неможливо розробник не може охопити структуру вихідного коду складного програмного забезпечення, а також таке програмне забезпечення має дуже малий розмір зкомпільованої програми, що підвищує легкість розповсюдження. А також саме тому було вибрано саме такий набір бібліотек, а загалом графічну бібліотеку ImGui, яка має досить невеликий обсяг коду, приблизно 30 тисяч строк коду разом з коментарями.

4. ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Було розроблено програмне забезпечення на мові C++ для моделювання поверхні Безьє за допомогою програмного інтерфейсу OpenGL, що використовується для відображення 2D та 3D векторної графіки на екран, основна особливість, чому була вибрано саме OpenGL це те що інтерфейс має вільну ліцензію подібну до BSD, її підтримують більшість оперативних систем та інтерфейс на мові Cі. Також були використані бібліотеки:

- CGLM - математична бібліотека написана на мові Cі. Використовує ліцензію MIT.

У програмі загалом використовується для афінних перетворень та арифметичними операціями між матрицями. За замовчанням використовує команди SSE, що дозволяють прискорити швидкість обчислення завдяки повному виконанню особливостей обчислення процесорів.

- ImGui - бібліотека для графічного інтерфейсу написана на мові C++. Використовує ліцензію MIT.

Бібліотека має невелику кодову базу порівняно з аналогічними графічними бібліотеками та фреймворками, такими як GTK або QT, та дозволяє створювати динамічні віджети.

- GLFW - бібліотека для відображення вікна з OpenGL та обробки вводу. Використовує ліцензію ZLib.
- EASTL - бібліотека для заміни стандартного STL. Використовує ліцензію BSD.

Бібліотека EASTL дозволяє замінити стандартну бібліотеку STL для того щоб уникнути виключень, що не оброблюється деякими мовами програмування. Також бібліотека цікава тим що вона реалізує оптимізовані

версії контейнерів, що мають такий же самий інтерфейс, що і звичайні контейнери.

Код програмного забезпечення складається з таких компонентів:

- Вихідний код програми, який зберігається у директорії “osdo”. Тут знаходиться бібліотека “osdo”, яка не використовує STL, таким чином її можна використовувати іншими мовами програмування. Загалом тут знаходяться файли заголовків з розширенням “.h” та з реалізацією з розширенням “.cpp”, кожен файл заголовків у цій директорії утворює окремий клас.
- Вихідний код програми, який зберігається у директорії “druidengine”. Тут знаходиться інтерфейс програми, так як деякі компоненти ImGui, такі як файловий менеджер, використовує STL, це унеможлиблює використання іншими мовами програмування, хоча це і не потрібно, так як інтерфейс програми не потрібен для розробки. Загалом тут знаходяться файли заголовків з розширенням “.h” та з реалізацією з розширенням “.cpp”, кожен файл заголовків у цій директорії утворює окремий клас.
- Ресурси програми, які зберігаються у директорії “res” (скорочено “resource”). Тут знаходяться шейдери та тестові моделі чайнику, моделі машини та деякої еліпсоподібної моделі.
- Файл з правилами компіляції для CMake. CMake дозволяє компілювати програму незалежно від платформи, більш того дозволяє створити інсталяційний файл на цю платформу.

Після компіляції ми отримаємо нашу програму у директорії “bin” та ресурси у директорії “share/osdo”, ця структура директорії Unix подібна.

5. ОГЛЯД РОБОТИ ПРОГРАМИ

Для тестування розробленого програмного забезпечення використано відому модель чайник з Юти, за допомогою якої перевіряють відображення складних об'єктів. Результат генерації моделі продемонстровано на рис [?].

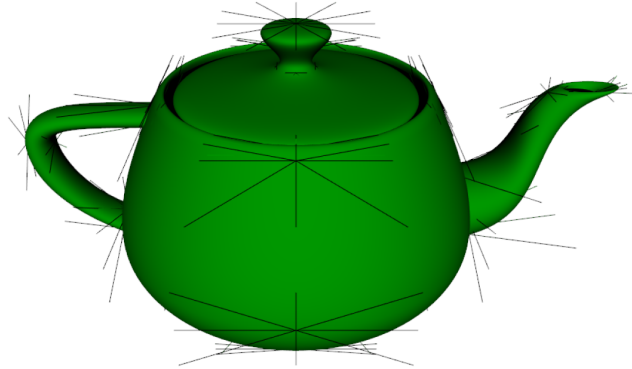


Рис. 3. Тестування програми на стандартній моделі

Інтерфейс користувача розробленої програми наведено на рис. [?]

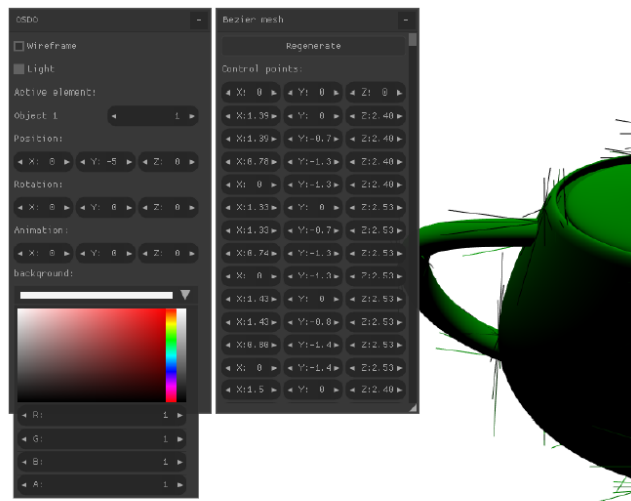


Рис. 4. Інтерфейс користувача програми

На рис. [?] продемонстровано побудовану з використанням розробленого програмного додатку каркасну модель тестового прикладу.

Далі розглянемо приклад створення об'єкту за допомогою розробленої програми. При початковому завантаженні програми ми отримаємо вікно, яке

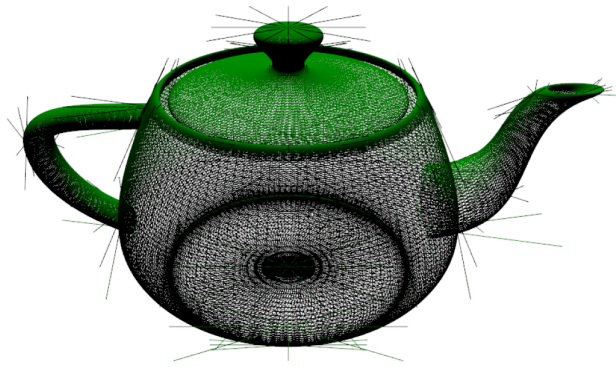


Рис. 5. Генерація каркасної моделі тестового прикладу

продемонстровано на рис.4. Для налаштування області виводу зображення користувач може скористуватися головним та допоміжним вікнами. У допоміжному вікні є можливість перемкнутися у режим каркасу, перемкнути режим світла. Зробивши камеру джерелом світла також можна вибрати активний елемент з наявних (за замовчанням це камера).

У активному елементі ми можемо задати позицію, поворот та анімацію повороту. Якщо перемкнутися на деякий об'єкт отримаємо наступні екрани (рис. [?] [?]).

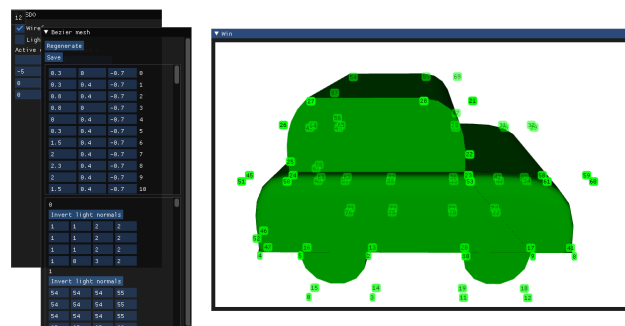


Рис. 6. Генерація моделі (режим редагування)

У даному режимі з'являється можливість редагування об'єкту побудованого за допомогою поверхонь Безьє. Загалом на головному вікні з'являються номери контрольних точок. Також з'являється третє вікно у якому присутні такі елементи:

- Кнопка "Regenerate" дозволяє перебудувати об'єкт

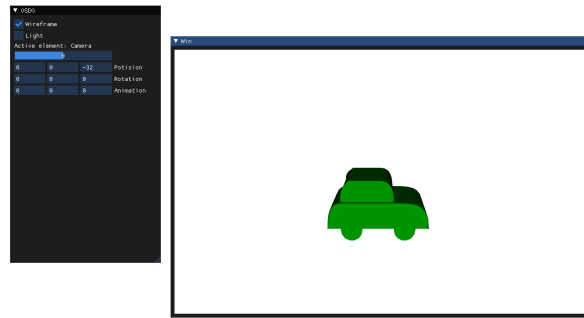


Рис. 7. Генерація моделі (режим редагування)

- Кнопка "Save зберігає об'єкт на диск
- Підвікно з можливістю знайти контрольну точку за її номером та змінити її координати
- Підвікно з можливістю знайти одну з поверхонь та відредагувати такими елементами:
- Кнопка "Invert light normals дозволяє змінити порядок контрольних точок поверхні для того щоб нормалі поверхні дивилися в протилежну сторону.
- 16 полів з номерами контрольних точок.

6. ОСНОВНА ДОКУМЕНТАЦІЯ ДО КОДУ

6.1. Алфавітний покажчик класів

6.2 Класи

Класи, структури, об'єднання та інтерфейси з коротким описом.

Beziator

Клас який зберігає та оброблює модель утворенню через поверхні

Безьє 27

Bijective

Інтерфейс до об'єктів, що можуть можуть бути переміщені та повернуті у просторі ??

Buffer

Буфер, у якому відбувається рендеринг у текстуру ??

Camera

Клас камери, якою можна маніпулювати у сцені ??

Context

Контекст, який зберігає усі завантажені у пам'ять ресурси ??

Framebuffer

Буфер кадру, що використовується для рендеренгу ??

Gl Bindable

Абстрактний клас, який виконує роль генерації та прив'язки об'єктів Open GL ??

Gl Binder

Клас який прив'язує контексту до деякого об'єкту Open GL ??

Image

Зберігає масив пікселів, ширину та висоту ??

Mesh

Меш, який зберігається на відеокарті ??

Model

Інтерфейс до деякої моделі, яку можна відобразити ??

Object

об'єкт моделі ??

Renderbuffer

Буфер рендеренгу (для зберігання кольорів або глибини) ??

Scene

Сцена із об'єктами ??

Shader

Клас взаємодії з шейдером у відеокарті ??

Shader Source

??

Texture

Клас текстури, що зберігається у відеокарті ??

OSDO ::vector< T >

Вектор що не змінює свій розмір ??

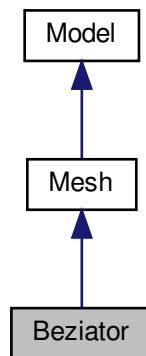
Vertex

6.3 Клас Beziator

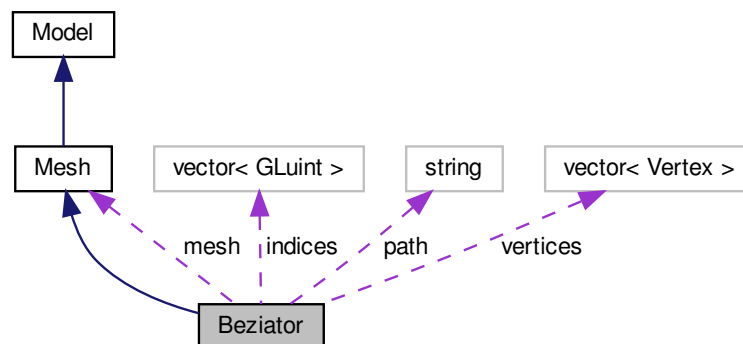
Клас який зберігає та оброблює модель утворенню через поверхні Безьє.

```
#include <beziator. h>
```

Схема успадкувань для Beziator



Діаграма зв'язків класу Beziator :



Загальнодоступні типи

- typedef [surfacei](#) _ t * [surfaces](#) _ vector

Тип позначаючий вказівник на масив з поверхнями Безьє.

Загальнодоступні елементи

- [Beziator](#) (const string &[path](#))

Конструктор до [Beziator](#), який зберігає шлях до файлу з моделлю.

- ~ [Beziator](#) () override

- bool [init](#) ()

Завантажує модель у пам'ять.

- void [draw](#) ([Shader](#) &shader, bool pre _ generated) override

Відображує модель.

- void [generate](#) (size _ t d=8) override

Генерує деталізований меш моделі.

- bool [save](#) ()

Зберігає модель у файл, вказаний у полі [path](#).

- void [rotate](#) (size _ t i)

Інвертує порядок індексів поверхні, щоб нормалі дивилися у протилежний бік.

- vector< [Vertex](#) > * [get](#) _ [vertices](#) () override

Видає список вершин моделі.

Захищені дані

- const string [path](#)

Шлях до файлу у якому зберігається модель.

- [Mesh](#) mesh

Згенерований за допомогою CPU меш моделі.

- `vector< Vertex > vertices`

Масив вершин/вузлів моделі.

- `vector< GLuint > indices`

Масив індексів, що утворюють поверхні Безьє.

6.3.1 Детальний опис

Клас який зберігає та оброблює модель утворенню через поверхні Безьє.

Див. визначення в файлі [beziator. h](#), рядок 22

6.3.2 Опис типів користувача

surfaces_vector `typedef surfacei _ t* Beziator ::surfaces _ vector`

Тип позначаючий вказівник на масив з поверхнями Безьє.

Див. визначення в файлі [beziator. h](#), рядок 27

6.3.3 Конструктор(и)

Beziator() `Beziator :: Beziator (`
`const string & path)`

Конструктор до [Beziator](#), який зберігає шлях до файлу з моделлю.

Обов'язково потрібно запустити метод `Beziator ::init` для того щоб завантажити модель у пам'ять.

Аргументи

<i>path</i>	Шлях до файлу у якому зберігається модель.
-------------	--

Див. визначення в файлі `beziator. cpp`, рядок 18

```
~Beziator() Beziator ::~ Beziator ( ) [override]
```

Див. визначення в файлі `beziator. cpp`, рядок 58

6.3.4 Опис методів компонент

```
draw() void Beziator ::draw (
    Shader & shader,
    bool pre _ generated ) [override], [virtual]
```

Відображує модель.

За допомогою флагу `pre _ generated` можна задати яким чином потрібно відображати, якщо задати `false`, то у буде використаний меш із поверхнями Безье 4x4, а якщо задано `true`, то відобразиться сгенерований деталізований меш моделі.

Аргументи

<i>shader</i>	Шейдер який використовується для відображення моделі.
<i>pre _ generated</i>	Флаг, який позначає який з мешів відображати.

Переозначення з [Model](#).

Див. визначення в файлі [beziator. cpp](#), рядок 61

Граф всіх викликів цієї функції :



```
generate() void Beziator ::generate (
    size _ t d = 8 ) [override], [virtual]
```

Генерує деталізований меш моделі.

Ступінь деталізації *d* позначає скільки вершин буде створено по двом осям, за замовчанням задано 8, таким чином поверхня буде складатися з $8 \times 8 = 64$ вершини.

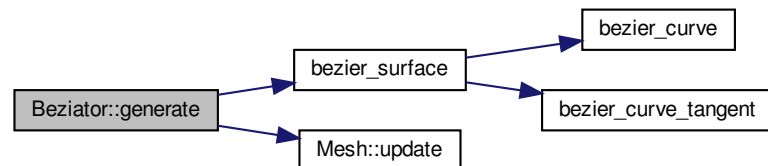
Аргументи

<i>d</i>	ступінь деталізації.
----------	----------------------

Переозначення з [Model](#).

Див. визначення в файлі [beziator. cpp](#), рядок 136

Граф всіх викликів цієї функції :



get_vertices() `vector< Vertex > * Beziator ::get _ vertices () [override], [virtual]`

Видає список вершин моделі.

Повертає

Вказівник на поле `vertices`.

Переозначення з [Model](#).

Див. визначення в файлі [beziator. cpp](#), рядок 287

init() `bool Beziator ::init ()`

Завантажує модель у пам'ять.

Повертає

Статус, чи успішно була завантажена модель.

Див. визначення в файлі [beziator. cpp](#), рядок 20

Граф всіх викликів цієї функції :



```
rotate() void Beziator  ::rotate (
    size _ t i )
```

Інвертує порядок індексів поверхні, щоб нормалі дивилися у протилежний бік.

Аргументи

<i>i</i>	номер поверхні.
----------	-----------------

Див. визначення в файлі [beziator. cpp](#), рядок 277

```
save() bool Beziator  ::save ( )
```

Зберігає модель у файл, вказаний у полі path.

Повертає

Статус зберігання файлу.

Див. визначення в файлі [beziator. cpp](#), рядок 110

6.3.5 Компонентні дані

indices `vector<GLuint> Beziator ::indices [protected]`

Масив індексів, що утворюють поверхні Безьє.

Індекси розташовані у масиві по 16 елементів, які утворюють поверхню з контрольними точками 4x4. Масив легко інтерпретується у `surfaces` `vector` :

```
surfacei_t *surfaces = reinterpret_cast<surfacei_t*>(indices.data());
```

Див. визначення в файлі [beziator. h](#), рядок 52

mesh `Mesh Beziator ::mesh [protected]`

Згенерований за допомогою CPU меш моделі.

Див. визначення в файлі [beziator. h](#), рядок 36

path `const string Beziator ::path [protected]`

Шлях до файлу у якому зберігається модель.

Див. визначення в файлі [beziator. h](#), рядок 32

vertices `vector<Vertex> Beziator ::vertices [protected]`

Масив вершин/вузлів моделі.

Див. визначення в файлі [beziator. h](#), рядок 42

Документація цих класів була створена з файлів :

- [osdo/beziator. h](#)
- [osdo/beziator. cpp](#)

ВИСНОВКИ

У ході курсової роботи були отримані такі результати:

- розширено функціонал розробленого програмного забезпечення, розробленого у курсовій роботі, загалом додати можливість динамічно завантажувати моделі, змінювати деталізацію.
- зроблено програмне забезпечення придатним для компіляції та роботи у різних операційних системах, загалом Linux та Windows
- розроблено шейдер для генерації 3D-моделі за допомогою відеокарти.
- написано документацію до програмного забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

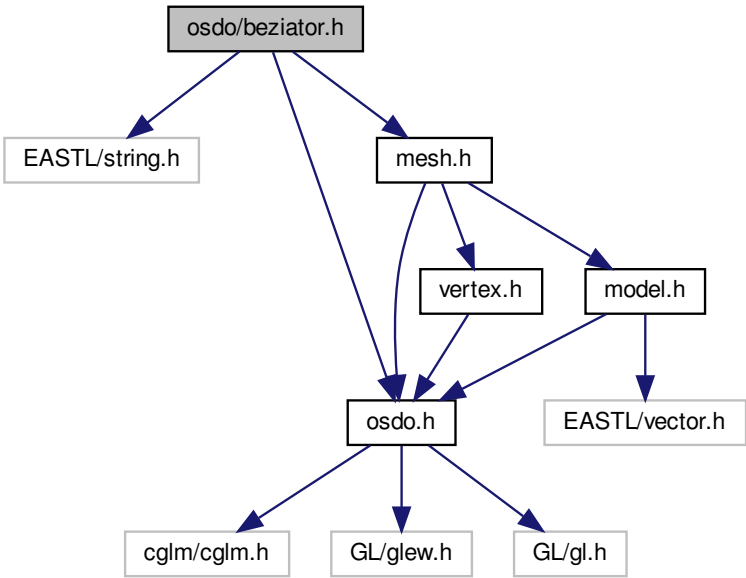
1. Офіційний сайт Міністерства освіти та науки України: <http://mon.gov.ua/>
2. СТП-02066747-009-01. Стандарт Дніпропетровського національного університету. Методика виконання випускних, курсових та дипломних проєктів (робіт). Структура, правила оформлення та порядок узгодження і затвердження. Затверджено ректором ДНУ 31.10.2001 р.
3. СТП-02066747-010-01. Стандарт Дніпропетровського національного університету. Організація та проведення дипломування. Затверджено ректором ДНУ 1.11.2001 р.
4. http://www.dnu.dp.ua/docs/obgovorenniya/Polozhennya_Anti plagiat_2016.doc
5. Порев. В.Н. Компьютерная графика – СПб: БХВ-Петербург, 2002 – 432 с.
6. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. - СПб: БХВ-Петербург, 2003 - 560 с.
7. Вычислительная геометрия и алгоритмы компьютерной графики. Работа с 3D-графикой средствами OpenGL: учеб. пособие / К. В. Рябинин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – 100 с.

ДОДАТОК А. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

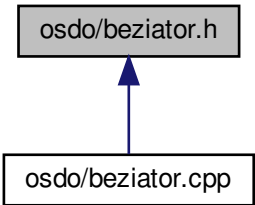
6.4 Файл osdo/beziator.h

Клас який зберігає та оброблює модель утворену через поверхні Безьє.

```
#include <EASTL/string.h>
#include "osdo.h"
#include "mesh.h"
Діаграма включених заголовочних файлів для beziator.h :
```



Граф файлів, які включають цей файл :



Класи

- class [Beziator](#)

Клас який зберігає та оброблює модель утворенню через поверхні Безьє.

Визначення типів

- typedef GLuint `surfacei_t` [4][4]

Набір індексів на вершини, що утворюють поверхню 4x4.

6.4.1 Детальний опис

Клас який зберігає та оброблює модель утворенню через поверхні Безьє.

Див. визначення в файлі `beziator.h`

6.4.2 Опис визначень типів

`surfacei_t` typedef GLuint `surfacei_t` [4][4]

Набір індексів на вершини, що утворюють поверхню 4x4.

Див. визначення в файлі `beziator.h`, рядок 17

6.5 beziator.h

```
00001 /**
00002  * @file beziator.h
00003  * @brief
00004  */
00005 #ifndef BEZIATOR_H
00006 #define BEZIATOR_H
00007
00008 #include <EASTL/string.h>
00009 #include "osdo.h"
00010 #include "mesh.h"
00011
00012 using eastl::string;
00013
00014 /**
00015  * @brief
00016  */
00017 typedef GLuint surfacei_t [4][4];
00018
00019 /**
00020  * @brief
00021  */
00022 class Beziator : public Mesh {
00023 public:
00024     /**
00025      * @brief
00026      */
00027     typedef surfacei_t* surfaces_vector;
00028 protected:
00029     /**
00030      * @brief
00031      */
00032     const string path;
00033     /**
00034      * @brief
00035      */
00036     Mesh mesh;
00037     //Mesh frame;
00038     //Mesh normals;
00039     /**
00040      * @brief
00041      */
00042     vector<Vertex> vertices;
00043     /**
```

```

00044     * @brief      ,      .
00045     *
00046     *      16      ,
00047     *      4x4.
00048     *      `surfaces_vector`:
00049     *
00050     *      surfacei_t *surfaces = reinterpret_cast<surfacei_t*>(indices.data());
00051     */
00052     vector<GLuint> indices;
00053 public:
00054     /**
00055     * @brief      Beziator,      .
00056     *
00057     *      '      `Beziator::init`
00058     *      ' .
00059     * @param path      .
00060     */
00061     Beziator(const string& path);
00062     ~Beziator() override;
00063
00064     /**
00065     * @brief      ' .
00066     * @return      ,      .
00067     */
00068     bool init();
00069
00070     /**
00071     * @brief      .
00072     *
00073     *      `pre_generated`
00074     *      ,      `false`,      `true`,
00075     *      4x4,      `true`,
00076     *      .
00077     * @param shader      .
00078     * @param pre_generated      ,      .
00079     */
00080     void draw(Shader &shader, bool pre_generated) override;
00081
00082     /**
00083     * @brief      .
00084     *
00085     *      `d`
00086     *      ,      8,
00087     *      8x8=64      .
00088     * @param d      .
00089     */
00090     void generate(size_t d = 8) override;
00091
00092     /**
00093     * @brief      ,      `path`.
00094     * @return      .
00095     */
00096     bool save();
00097
00098     /**
00099     * @brief      ,      .
00100     * @param i      .
00101     */
00102     void rotate(size_t i);
00103
00104     /**
00105     * @brief      .
00106     * @return      `vertices`.
00107     */
00108     vector<Vertex> *get_vertices() override;
00109 };
00110
00111 #endif // BEZIATOR_H

```

6.6 Файл res/bezier.frag

6.7 bezier. frag

```

00001 #version 420 core
00002 layout(location = 0) out vec4 FragColor;
00003
00004 struct Data {
00005     vec4 color;
00006     vec2 uv;
00007     vec3 normal;
00008     vec3 frag_pos;
00009 };
00010
00011 layout(location = 0) in Data data;
00012
00013 struct DirLight {
00014     vec3 direction;
00015
00016     vec3 ambient;
00017     vec3 diffuse;
00018     vec3 specular;
00019 };
00020
00021 uniform vec3 viewPos;
00022 uniform DirLight dirLight;
00023 uniform float materialShininess;
00024 uniform float alpha;
00025 uniform bool textured;
00026 uniform sampler2D textureSample;
00027
00028 // calculates the color when using a directional light.
00029 vec3 CalcDirLight(DirLight light, vec3 normal, vec3 viewDir, vec3 color)
00030 {
00031     vec3 lightDir = normalize(-light.direction);
00032     // diffuse shading
00033     float diff = max(dot(normal, lightDir), 0.0);
00034     // specular shading
00035     vec3 reflectDir = reflect(-lightDir, normal);
00036     float spec = pow(max(dot(viewDir, reflectDir), 0.0), materialShininess);
00037     // combine results
00038     vec3 ambient = light.ambient * color;
00039     vec3 diffuse = light.diffuse * diff * color;
00040     vec3 specular = light.specular * spec * color;
00041     return (ambient + diffuse + specular);
00042 }
00043
00044 void main()
00045 {
00046     vec3 norm = normalize(data.normal);
00047     vec3 viewDir = normalize(-viewPos - data.frag_pos);
00048     vec4 color = data.color;
00049     if (textured) {
00050         color = texture(textureSample, data.uv);
00051     }
00052     vec3 tmp = CalcDirLight(dirLight, norm, viewDir, vec3(color));
00053     FragColor = vec4(tmp, alpha);
00054 }

```

6.8 Файл res/bezier.geom

6.9 bezier. geom

```

00001 #version 420 core
00002 layout(triangles) in;
00003 layout(triangle_strip, max_vertices=16) out;
00004
00005 struct Data {
00006     vec4 color;
00007     vec2 uv;
00008     vec3 normal;
00009     vec3 frag_pos;
00010 };
00011
00012 in Data vertex[3];

```

```

00013 out Data geometry;
00014
00015 void main() {
00016     int i;
00017     for(i = 0; i < 16; i++) {
00018         gl_Position = gl_in[i].gl_Position;
00019         geometry.color = vertex[i].color;
00020         geometry.uv = vertex[i].uv;
00021         geometry.pos = vertex[i].pos;
00022         geometry.normal = vertex[i].normal;
00023         EmitVertex();
00024     }
00025     EndPrimitive();
00026 }

```

6.10 Файл res/bezier.tesc

6.11 bezier. tesc

```

00001 #version 420 core
00002
00003 struct Data {
00004     vec4 color;
00005     vec2 uv;
00006     vec3 normal;
00007     vec3 frag_pos;
00008 };
00009
00010 layout(location = 0) in Data inData[];
00011 layout(location = 0) out Data outData[];
00012
00013 uniform int inner;
00014 uniform int outer;
00015
00016 layout(vertices = 16) out;
00017
00018 void main(void) {
00019     gl_TessLevelInner[0] = inner;
00020     gl_TessLevelInner[1] = inner;
00021     gl_TessLevelOuter[0] = outer;
00022     gl_TessLevelOuter[1] = outer;
00023     gl_TessLevelOuter[2] = outer;
00024     gl_TessLevelOuter[3] = outer;
00025
00026     gl_out[gl_InvocationID].gl_Position = gl_in[gl_InvocationID].gl_Position;
00027     outData[gl_InvocationID].color = inData[gl_InvocationID].color;
00028     outData[gl_InvocationID].uv = inData[gl_InvocationID].uv;
00029     outData[gl_InvocationID].normal = inData[gl_InvocationID].normal;
00030     outData[gl_InvocationID].frag_pos = inData[gl_InvocationID].frag_pos;
00031 }

```

6.12 Файл res/bezier.tese

6.13 bezier. tese

```

00001 #version 420 core
00002
00003 layout(quads, equal_spacing) in;
00004
00005 struct Data {
00006     vec4 color;
00007     vec2 uv;
00008     vec3 normal;
00009     vec3 frag_pos;
00010 };
00011
00012 layout(location = 0) in Data inData[];
00013 layout(location = 0) out Data outData;
00014
00015 mat4 b = mat4 ( 1,  0,  0, 0,

```

```

00016         -3,  3,  0,  0,
00017         3, -6,  3,  0,
00018         -1,  3, -3,  1);
00019
00020 void main(void) {
00021     float x = gl_TessCoord.x;
00022     float y = gl_TessCoord.y;
00023     vec4 u = vec4 (1.0, x, x*x, x*x*x);
00024     vec4 v = vec4 (1.0, y, y*y, y*y*y);
00025     vec4 uu = vec4 (0, 1.0, 2*x, 3*x*x);
00026     vec4 vv = vec4 (0, 1.0, 2*y, 3*y*y);
00027
00028     vec4 bu = b * u;
00029     vec4 bv = b * v;
00030     vec4 buu = b * uu;
00031     vec4 bvv = b * vv;
00032
00033     mat4 pu[4], pv[4], cu, cv;
00034     for (int i = 0; i < 4; i++) {
00035         for (int j = 0; j < 4; j++) {
00036             pv[i][j] = gl_in[j*4 + i].gl_Position;
00037         }
00038     }
00039     for (int i = 0; i < 4; i++) {
00040         cv[i] = pv[i] * bv;
00041     }
00042
00043     gl_Position = cv * bu;
00044
00045     for (int i = 0; i < 4; i++) {
00046         for (int j = 0; j < 4; j++) {
00047             pu[i][j] = vec4(inData[i*4 + j].normal, 1);
00048             pv[i][j] = vec4(inData[j*4 + i].normal, 1);
00049         }
00050     }
00051     for (int i = 0; i < 4; i++) {
00052         cu[i] = pu[i] * bu;
00053         cv[i] = pv[i] * bv;
00054     }
00055     vec4 du = cv * buu, dv = cu * bvv;
00056     outData.normal = cross(vec3(du), vec3(dv));
00057
00058     for (int i = 0; i < 4; i++) {
00059         for (int j = 0; j < 4; j++) {
00060             pv[i][j] = vec4(inData[j*4 + i].frag_pos, 1);
00061         }
00062     }
00063     for (int i = 0; i < 4; i++) {
00064         cv[i] = pv[i] * bv;
00065     }
00066     outData.frag_pos = vec3(cv * bu);
00067
00068
00069     /*for (int i = 0; i < 4; i++) {
00070         for (int j = 0; j < 4; j++) {
00071             pv[i][j] = vec4(inData[i*4 + i].uv, 0, 1);
00072         }
00073     }
00074     for (int i = 0; i < 4; i++) {
00075         cv[i] = pv[i] * bv;
00076     }
00077     outData.uv = vec2(cv * bu);*/
00078     outData.uv = vec2(x, y);
00079
00080     outData.color = inData[0].color;
00081 }

```

6.14 Файл res/bezier.vert

6.15 bezier. vert

```

00001 #version 420 core
00002 layout (location = 0) in vec3 position;

```

```
00003 layout (location = 1) in vec3 normal;
00004 layout (location = 2) in vec4 color;
00005 layout (location = 3) in vec2 uv;
00006
00007 struct Data {
00008     vec4 color;
00009     vec2 uv;
00010     vec3 normal;
00011     vec3 frag_pos;
00012 };
00013
00014 layout(location = 0) out Data data;
00015
00016 uniform mat4 model;
00017 uniform mat4 camera;
00018 uniform mat4 projection;
00019
00020 void main()
00021 {
00022     mat4 trans = projection * camera * model;
00023     vec4 pos = trans * vec4(position, 1.0);
00024     gl_Position = pos;
00025     data.color = color;
00026     data.uv = uv;
00027     data.frag_pos = vec3(model * vec4(position, 1.0));
00028     data.normal = mat3(transpose(inverse(model))) * vec3(normal);
00029 }
```