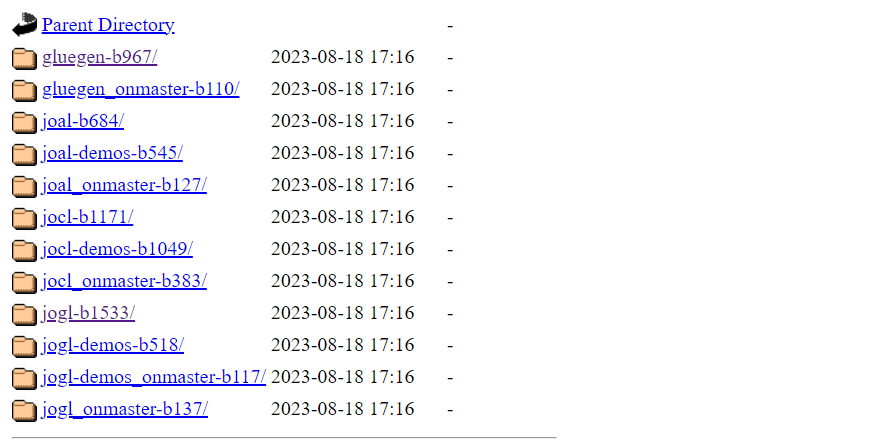
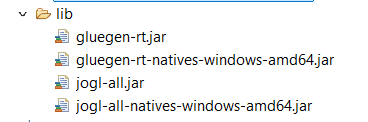
# Cài đặt thư viện JOGL

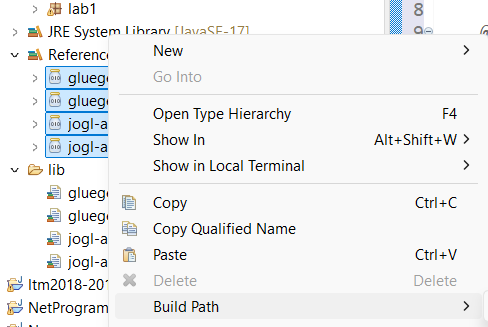
* Tải file cần thiết: link (<https://jogamp.org/deployment/autobuilds/master/?C=M;O=D>)
* Tải các file: gluegen và jogl



* Giải nén và copy các file sau vào /lib trong eclipse:



* Chọn tất cả và Build path:



# Chapter 2: THE OPENGL GRAPHICS PIPELINE

## 2.1. The OpenGL Pipeline

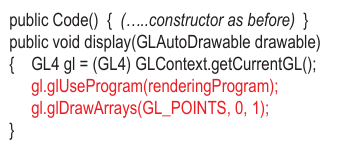
### 2.1.1. Java/JOGL Application

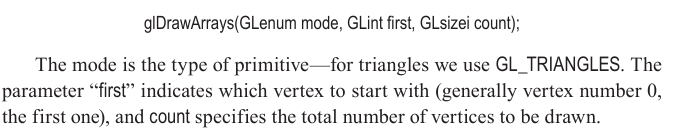


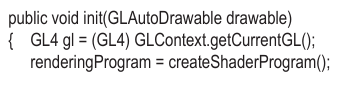
* Để dùng OpenGL cần chú trọng implement các phương thức như: display(), init(), reshape() và dispose(). Khi chương trình được chạy thì sẽ gọi callback các phương thức này.
* Phương thức display(): nơi chứa các code để vẽ lên GLCanvas
* Phương thức init(): giúp khởi tạo vùng có thể vẽ, trong ví dụ là GLCanvas. Trong ví dụ init() không để xử lý gì, nhưng hầu hết các chương trình là nơi sẽ đọc code GLSL, load mô hình 3D,…
* Phương thức reshape() được gọi khi GLCanvas được resize.
* Phương thức dispose() được gọi khi thoát ứng dụng.

### 2.1.2. Vexter and Fragment Shaders

* **Vertex shader** làm việc với các điểm đỉnh và xử lý các biến đổi không gian.
* **Fragment shader** làm việc với các đoạn của pixel và quyết định cách chúng được tô màu, đổ bóng trên màn hình.











- gl.glCreateShader(): giúp tạo loại đối tượng shader (ban đầu là object rỗng) mà mình muốn (GL\_VERTEX\_SHADER hoặc GL\_ FRAGMENT\_SHADER). Hàm trả về ID kiểu int là tham chiếu đến shader đó.

- gl.glShaderSource(): load code GLSL từ mảng chuỗi string vào đối tượng shader rỗng vừa tạo phía trên.

glShaderSource() có 5 tham số:

1. đối tượng shader mà để lưu trữ shader muốn load lên.
2. Số lượng strings trong shader source code.
3. Mảng string chứa source code.

Và 2 tham số không dùng tới.

- glCompileShader(): tạo shader.

- glCreateProgram(): tạo chương trình opengl sẽ chứa các shader vừa compile phía trên, hàm trả về id của program.

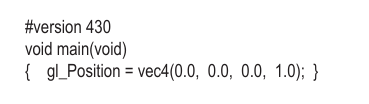
- glAttachShader(): sẽ gán các shader vào program vừa tạo.

- glLinkProgram(): yêu cầu glsl đảm bảo tương thích.

- Sau khi init() hoàn thành thì display() được gọi 1 cách tự động.

- glUseProgram(): sẽ load program chứa 2 shader đã tạo vào OpenGL pipeline stages (vào GPU), glUseProgram() không chạy shader mà chỉ load vào trong gpu.

- Tìm hiểu và vertex shader:



- dòng đầu tiền chỉ ra version của OpenGL.

- dòng tiếp theo là hàm main.

- Mục đích của vertex shader là gửi 1 vecto xuống pipeline.

- biến gl\_Position được sử dụng để set vị trí tọa độ điểm của vecto trong không gian 3D và nó được gửi vào stage kế tiếp của pipeline.

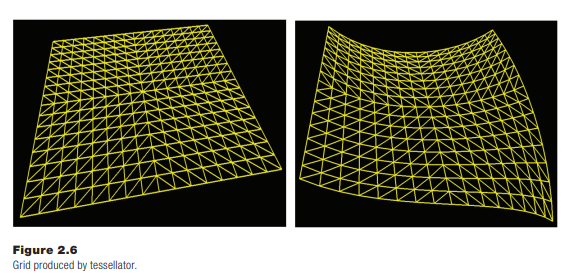
- vec4 sử dụng giữ 1 4-tuple, phù hợp cho tọa độ điểm.

- Mục đích của fragmen shader là thiết lập màu RGB cho pixel sẽ hiển thị, vec4 3 giá trị đầu là giá trị rgb và cuối là opacity.

- keyword “out” chỉ là biến sẽ là 1 output.

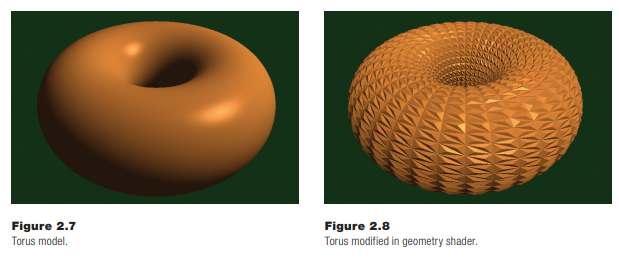
### 2.1.3. Tessellation

Trong đồ họa máy tính là quá trình chia nhỏ bề mặt của mô hình 3D thành các mảnh nhỏ hơn, thường là các tam giác, để tăng độ chi tiết và cải thiện chất lượng hiển thị. Nó giúp tạo ra các hiệu ứng bề mặt phức tạp, như chi tiết gồ ghề hoặc các bề mặt cong mịn hơn, bằng cách chia nhỏ hình học tùy theo mức độ cần thiết.



### 2.1.4. Geometry Shader

Là một giai đoạn trong pipeline đồ họa của GPU, nằm giữa Vertex Shader và Fragment Shader. Nó cho phép xử lý hình học, chẳng hạn như điểm, đường thẳng hoặc tam giác, và có thể tạo ra, thay đổi hoặc loại bỏ các hình học đó trước khi chúng được raster hóa (biến đổi thành các pixel để hiển thị trên màn hình).



### 2.1.5. Rasterization

Là quá trình chuyển đổi các đối tượng hình học (như điểm, đường thẳng, tam giác) trong không gian 3D thành các điểm ảnh (pixel) trên màn hình 2D để hiển thị hình ảnh. Đây là một bước quan trọng trong pipeline đồ họa của GPU, giúp biến đổi các mô hình 3D thành hình ảnh 2D mà chúng ta có thể nhìn thấy trên màn hình.

### 2.1.6 Fragment Shader

Là một giai đoạn trong pipeline đồ họa của GPU, chịu trách nhiệm xử lý các "fragment" (phân đoạn) để xác định màu sắc cuối cùng của từng pixel trên màn hình. Fragment Shader thực hiện các tính toán để xác định giá trị màu, độ trong suốt, và các thuộc tính khác của mỗi fragment dựa trên các thông tin từ giai đoạn rasterization, như tọa độ, màu sắc, và ánh sáng.

### 2.1.7 Pixel Operations

Là các thao tác được thực hiện trên các pixel hoặc fragment (phân đoạn) trong quá trình hiển thị đồ họa. Đây là các bước xử lý sau khi các pixel đã được tính toán bởi Fragment Shader nhưng trước khi ghi vào bộ đệm khung (framebuffer) để hiển thị lên màn hình. Các thao tác này bao gồm một loạt các kiểm tra và thay đổi để xác định xem và làm thế nào các pixel sẽ được lưu trữ trong bộ đệm khung.

## 2.2. DETECTING OPENGL AND GLSL ERRORS

## 2.3. READING GLSL SOURCE CODE FROM FILES

## 2.4. BUILDING OBJECTS FROM VERTICES

## 2.5. ANIMATING A SCENE

# Chapter 3: Mathematical Foundations

## 3.1. 3D COORDINATE SYSTEMS

## 3.2. POINTS

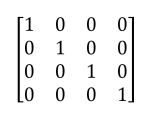
- Điểm 3D thường xác định dưới dạng x, y, z sử dụng trong tọa độ (x, y, z)

- Tuy nhiên để dễ dàng tính toán thì sử dụng tọa độ Homogeneous (Tọa độ đồng nhất, thêm 1 chiều có giá trị bằng 1). VD: (2, 8, 3) thì sẽ thành (2, 8, 3, 1).

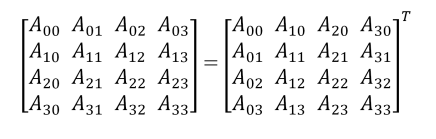
- Trong GLSL sử dụng vec4 để biểu diễn điểm. JOML là Vector3f và Vetor4f.

## 3.3. MATRICES

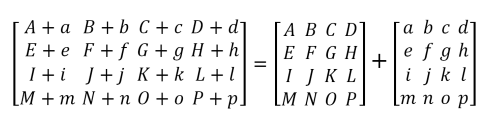
- Ma trận đơn vị: giá trị trên đường chéo 1 các vị trí khác là 0.



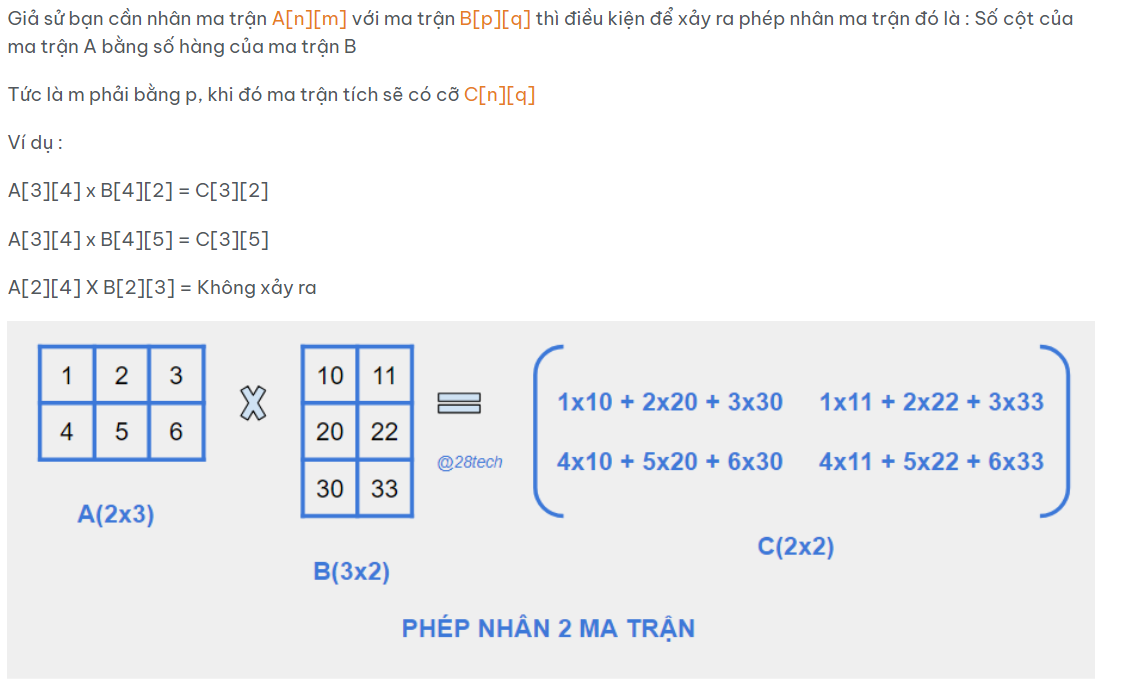
* Ma trận chuyển vị: Cầm góc trái dưới lật lên như lật trang sách.



* Phép cộng ma trận:



* Nhân ma trận:



* Ma trận nghịch đảo(khả nghịch):

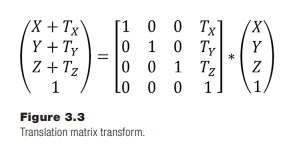


## 3.4. TRANSFORMATION MATRICES

Các phép biến đổi thường dung:

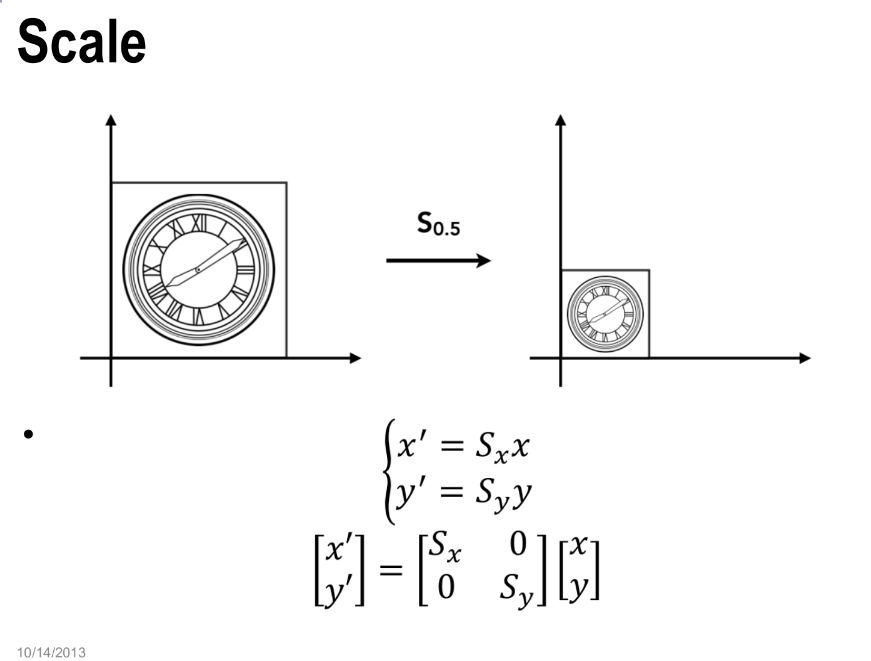
* Translation (phép dịch chuyển)
* Rotation (phép quay)
* Scale (phép scale)
* Projection (Phép phóng)
* Look at (Thiết lập điểm nhìn)

### 3.4.1 Translation

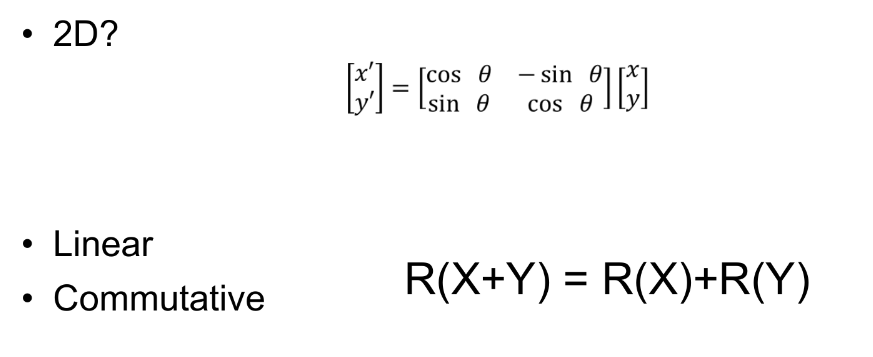


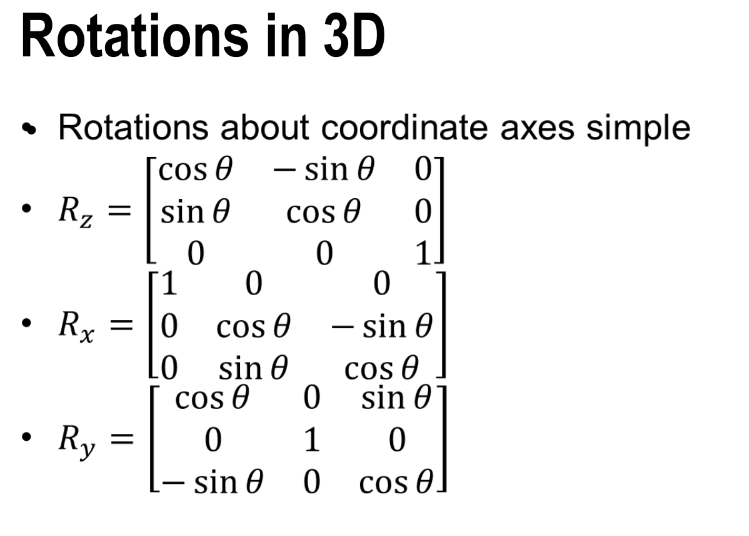
### 3.4.2 Scaling

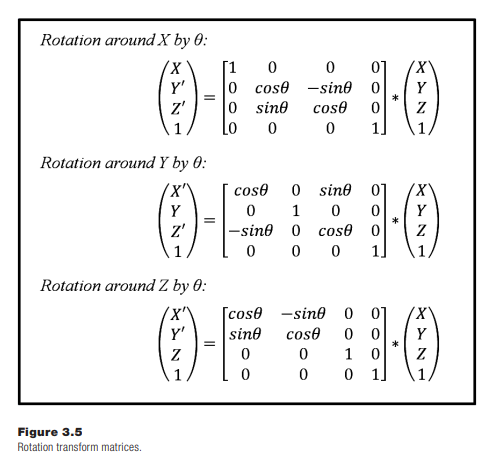




### 3.4.3 Rotation





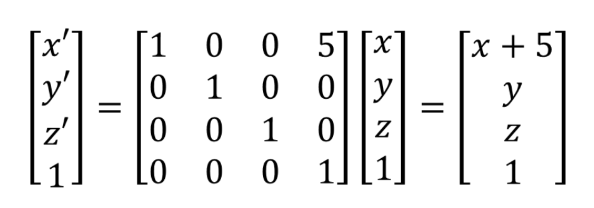


### 3.4.4 Homogeneous Coordinates

- Thêm chiều thứ 4 (w = 1)

- Ma trận 4x4 rất phổ biến trong đồ họa máy tính

- Hàng cuối cùng luôn là 0 0 0 1

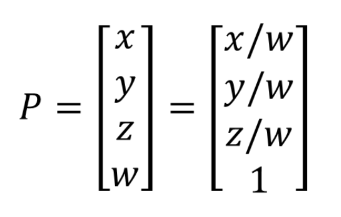


* Cách biểu diễn tọa độ Homogenous:

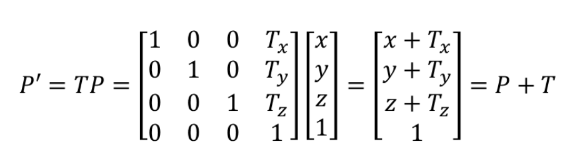
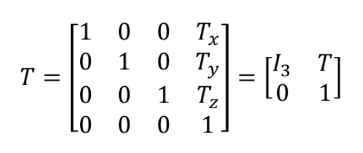
+ Chia cho tọa độ thứ 4 (w) để thu được điểm (không đồng nhất).

+ Phép nhân với w > 0, không ảnh hưởng.

+ Giả sử w >= 0. Với w > 0, là điểm hữu hạn thông thường. Với w = 0, là điểm tại vô cực(được sử dụng cho vector để dường việc tịnh tiến).

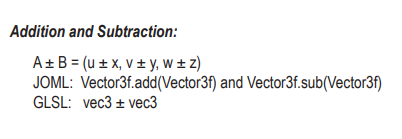


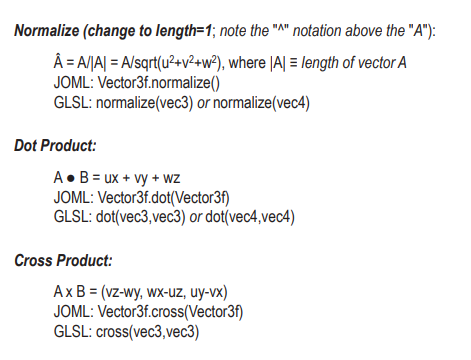
* Các biến đổi sử dụng Homogenous:



## 3.5. Vector

Các phép biến đổi vector: công, trừ vector, chuẩn hóa vector, tích vô hướng(Dot product), tích có hướng(Cross product).





## 3.6. LOCAL AND WORLD SPACE

**Local Space (Hệ tọa độ cục bộ)**

* **Local Space**, hay còn gọi là **Object Space**, là hệ tọa độ gắn liền với một đối tượng cụ thể. Trong hệ tọa độ này, tất cả các phép biến đổi và vị trí của các điểm đều được định nghĩa tương đối so với gốc tọa độ của chính đối tượng đó.
* **Gốc tọa độ (0,0,0)** trong Local Space thường nằm ở trung tâm của đối tượng hoặc một điểm đã định trước trên đối tượng.
* Khi làm việc với Local Space, các phép biến đổi như quay, dịch chuyển, và tỷ lệ được thực hiện trên đối tượng mà không phụ thuộc vào vị trí của nó trong thế giới.

Ví dụ:

* Một mô hình ô tô có các bánh xe. Trong Local Space của bánh xe, gốc tọa độ có thể nằm ở trục của bánh xe, và các điểm trên bánh xe được xác định dựa trên khoảng cách từ trục này.

**World Space (Hệ tọa độ thế giới)**

* **World Space** là hệ tọa độ toàn cục, nơi tất cả các đối tượng trong cảnh 3D được định vị tương đối với một gốc tọa độ chung của toàn bộ thế giới (thường là 0,0,00,0,00,0,0 của cảnh).
* Tất cả các đối tượng trong cảnh đều được chuyển đổi từ Local Space sang World Space để xác định vị trí và hướng của chúng trong không gian 3D.
* World Space giúp xác định mối quan hệ không gian giữa các đối tượng khác nhau, chẳng hạn như khoảng cách giữa chúng hoặc hướng tương đối.

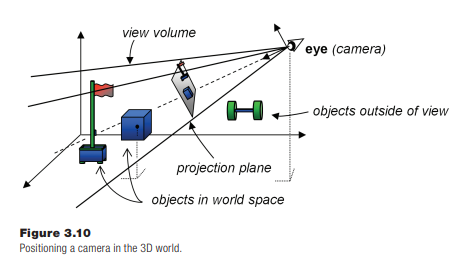
Ví dụ:

* Trong một trò chơi 3D, nếu ô tô được đặt ở vị trí (10,0,20)(10, 0, 20)(10,0,20) trong World Space, thì các tọa độ này xác định vị trí của ô tô trong không gian của toàn bộ thế giới.

## 3.7. EYE SPACE AND THE SYNTHETIC CAMERA

- **Eye Space** là hệ tọa độ mà trong đó các đối tượng được biểu diễn tương đối với camera, giúp đơn giản hóa các tính toán chiếu sáng và hiển thị.

- **Synthetic Camera** là mô hình camera ảo trong đồ họa máy tính, được sử dụng để biến cảnh 3D thành hình ảnh 2D, bao gồm các phép biến đổi nhìn và chiếu để mô phỏng góc nhìn của camera.



## 3.8. PROJECTION MATRICES

**Chức năng của Projection Matrices**

Khi hiển thị một cảnh 3D trên màn hình 2D, các đối tượng trong không gian 3D cần được chuyển đổi sao cho chúng có vẻ như có chiều sâu. Projection matrices thực hiện việc này bằng cách chiếu các điểm từ không gian tọa độ của camera (Eye Space) sang hệ tọa độ chuẩn hóa thiết bị (Normalized Device Coordinates - NDC), nơi các giá trị tọa độ nằm trong khoảng từ -1 đến 1 cho cả ba trục (x, y, z).

**Các loại Projection Matrices**

Có hai loại ma trận chiếu phổ biến:

1. **Perspective Projection Matrix (Ma trận chiếu phối cảnh)**
2. **Orthographic Projection Matrix (Ma trận chiếu trực giao)**

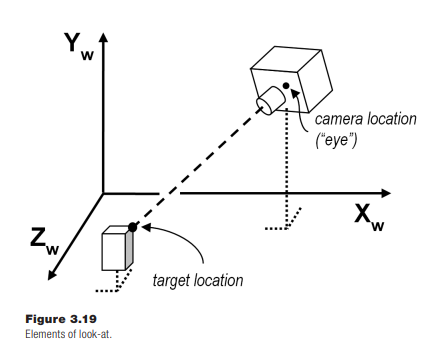
**1. Perspective Projection Matrix (Ma trận chiếu phối cảnh)**

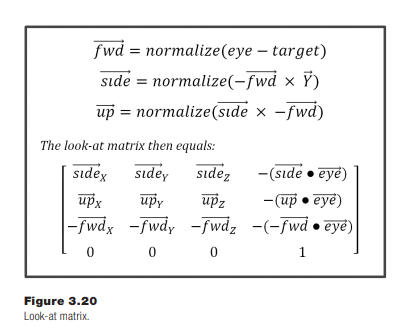
* **Mô tả:** Ma trận chiếu phối cảnh được sử dụng để tạo ra hiệu ứng phối cảnh, nơi các đối tượng xa hơn trong không gian 3D sẽ xuất hiện nhỏ hơn, trong khi các đối tượng gần hơn sẽ trông lớn hơn. Điều này tương tự như cách mà mắt người nhìn thấy thế giới, giúp tạo ra cảm giác về chiều sâu và khoảng cách.
* **Hoạt động:** Khi sử dụng phép chiếu phối cảnh, các tọa độ z sẽ được biến đổi sao cho các đối tượng xa có giá trị z lớn hơn (trong NDC) so với các đối tượng gần. Đồng thời, tọa độ x và y cũng được tỷ lệ theo giá trị z để tạo hiệu ứng phối cảnh.
* **Thông số quan trọng:** Góc nhìn (field of view - FOV), tỷ lệ khung hình (aspect ratio), và các mặt cắt gần xa (near và far clipping planes) giúp xác định phạm vi hiển thị của camera.

**2. Orthographic Projection Matrix (Ma trận chiếu trực giao)**

* **Mô tả:** Ma trận chiếu trực giao chiếu các đối tượng lên màn hình mà không có hiệu ứng phối cảnh, nghĩa là các đối tượng sẽ giữ nguyên kích thước bất kể chúng ở xa hay gần camera. Phép chiếu này phù hợp cho các ứng dụng như thiết kế CAD hoặc các trò chơi 2D.
* **Hoạt động:** Tất cả các điểm sẽ được chiếu theo các đường song song, và không có sự biến dạng tỷ lệ theo giá trị z như trong phép chiếu phối cảnh.
* **Thông số quan trọng:** Kích thước của vùng hiển thị (width và height), cùng với các mặt cắt gần xa (near và far clipping planes).

## 3.9. LOOK-AT MATRIX





## 3.10. GLSL FUNCTIONS FOR BUILDING MATRIX TRANSFORMS

## 3.11. SCENE GRAPH

**Scene Graphs** trong đồ họa máy tính là một cấu trúc dữ liệu phân cấp được sử dụng để tổ chức và quản lý các đối tượng trong một cảnh 3D. Nó giúp dễ dàng thực hiện và quản lý các phép biến đổi hình học (như dịch chuyển, quay, co giãn), cũng như các thuộc tính khác (như vật liệu, ánh sáng) của các đối tượng trong một cảnh phức tạp.

**Cấu trúc của Scene Graph**

Một **scene graph** thường được tổ chức dưới dạng một cây (tree), trong đó:

* **Nút gốc (root node):** Đại diện cho toàn bộ cảnh.
* **Các nút con (child nodes):** Đại diện cho các đối tượng hoặc nhóm đối tượng trong cảnh. Một nút con có thể chứa các nút con khác, tạo thành một cấu trúc phân cấp.
* **Mỗi nút trong đồ thị có thể đại diện cho:**
  + Một đối tượng hình học (hình khối, nhân vật, v.v.)
  + Các phép biến đổi (dịch chuyển, quay, co giãn)
  + Các thuộc tính như ánh sáng, vật liệu, hoặc texture

**Cách hoạt động của Scene Graph**

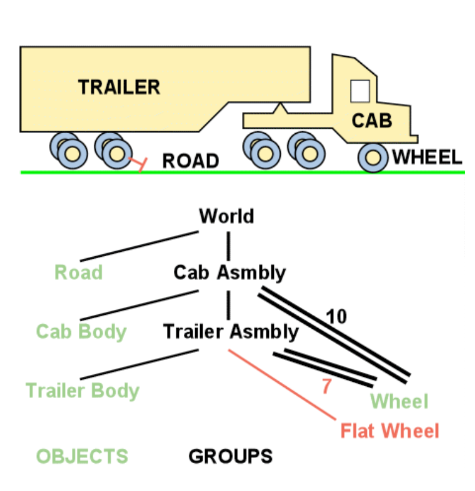
Các phép biến đổi và thuộc tính được áp dụng theo thứ tự từ nút gốc xuống các nút con. Điều này có nghĩa là:

1. **Kế thừa phép biến đổi:** Các nút con sẽ kế thừa các phép biến đổi từ nút cha của chúng. Ví dụ, nếu một đối tượng cha bị dịch chuyển, các đối tượng con của nó cũng sẽ dịch chuyển theo.
2. **Kết hợp phép biến đổi:** Các phép biến đổi có thể được kết hợp bằng cách nhân các ma trận biến đổi. Ví dụ, nếu một nút cha có phép quay và nút con có phép dịch chuyển, ma trận biến đổi kết hợp sẽ thực hiện cả hai phép biến đổi.
3. **Quản lý thuộc tính dễ dàng:** Scene graph cho phép dễ dàng thay đổi thuộc tính (như vật liệu hoặc ánh sáng) của toàn bộ nhánh của cây bằng cách thay đổi giá trị tại nút cha.

**Ví dụ về Scene Graph**

Giả sử bạn muốn tạo ra một mô hình ô tô với các bộ phận như thân xe, bánh xe, và cửa:

* **Nút gốc (ô tô):** Đại diện cho toàn bộ chiếc ô tô.
* **Các nút con (thân xe, bánh xe, cửa):** Mỗi nút con đại diện cho một phần của chiếc ô tô.
* **Phép biến đổi tại nút thân xe:** Nếu thân xe quay hoặc dịch chuyển, các bánh xe và cửa sẽ quay hoặc dịch chuyển theo.
* **Phép biến đổi riêng cho bánh xe:** Bánh xe có thể quay xung quanh trục của chúng mà không ảnh hưởng đến các bộ phận khác của ô tô.



# Chapter 4: MANAGING 3D GRAPHICS DATA

## 4.1. BUFFERS AND VERTEX ATTRIBUTES

Để 1 đối tượng được vẽ, các đỉnh của nó phải được gửi tới vertex shader. Các đỉnh thường được gửi bằng cách để chúng vào *buffer(bộ đệm)* bên phía Java và kết hợp buffer đó với 1 vertex attribute được khai báo trong shader. Có vài bước để hoàn thành việc đó, một vài thì chỉ cần làm 1 lần, 1 vài nếu cảnh đó chuyển động thì phải hoàn thành mỗi frame:

* Làm 1 lần – điển hình trong init():

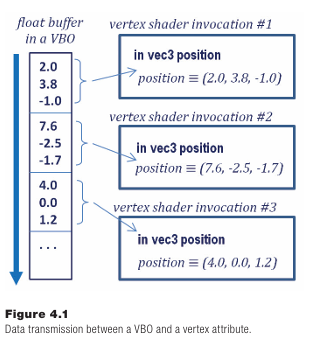
1. Tạo buffer.
2. Sao chép các đỉnh vào trong buffer.

* Làm mỗi frame, điển hình trong reshape():

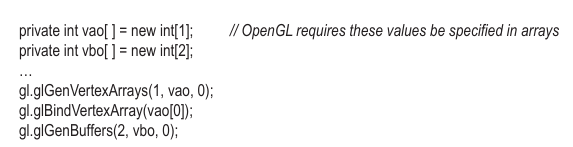
1. Tích hợp các buffer chứa các đỉnh.
2. Kết hợp các buffer với 1 vertex attribute
3. Tích hợp vertex attribute.
4. Sử dụng glDrawArrays(…) để vẽ đối tượng.

Những buffer được tạo tất cả trong 1 lần khi khởi chạy chương trình, trong init() hoặc trong hàm được gọi bởi init(). Trong OpenGL, 1 buffer được chứa trong 1 Vertex Buffer Object VBO. Một cảnh có thể cần nhiều VBO, bởi nó được tùy chỉnh để tạo và thực hiện chúng trong init(), thế nên chúng cần thiết khi chương trình của bạn cần vẽ 1 hay nhiều lần.

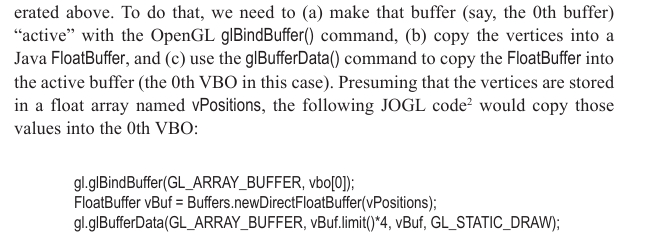
Một Buffer tương tác với 1 vertex attribute bởi 1 hướng xác định. Khi glDrawArrays() được thực thi, dữ liệu trong buffer bắt đầu chạy, tuần tự đi qua shader. Như đã nêu ở chương 2, vertex shader chỉ xử lý 1 lần 1 vector. 1 vector trong môi trường 3D cần 3 giá trị, thế nên thích hợp nhất là vec3. Sau đó mỗi 3 cặp giá trị trong buffer, shader sẽ thực thi:

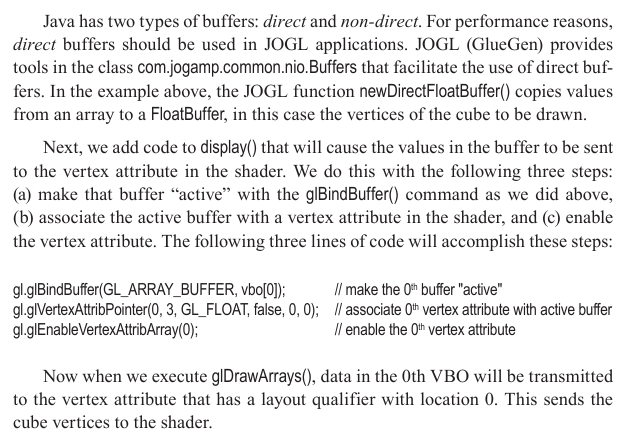


VAO(Vertex Array Object) được tạo ra nhầm cung cấp 1 hướng tổ chức các buffer và làm chúng dễ tích hợp hơn. OpenGL cần ít nhất 1 VAO được tạo.



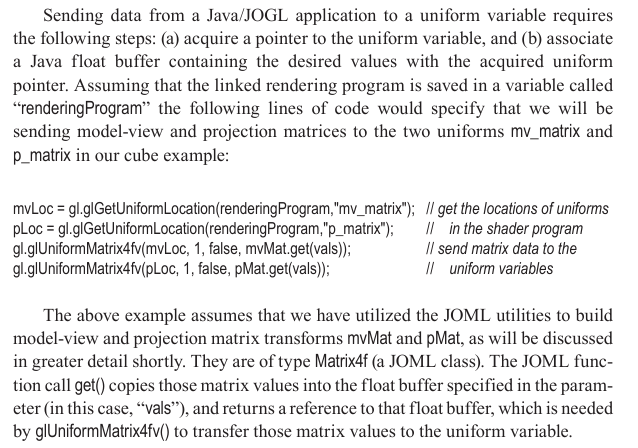
* glGenVertexArrays() và glGenBuffers(): tạo VAOs và VBOs, với tham số đầu là số vao và vbo.
* glBindVertexArrays(): xác định VAO nào được active.





## 4.2.UNIFORM VARIABLES

Uniform variables được khai báo trong 1 shader bằng cách sử dụng từ khóa “uniform”



## 4.3. INTERPOLATION OF VERTEX ATTRIBUTES

 **Xử lý thuộc tính đỉnh (vertex attributes) và biến thống nhất (uniform variables):**

* Các thuộc tính đỉnh được nội suy (interpolated) trong quá trình rasterization (phân mảnh), giúp chuyển đổi các đỉnh thành các đoạn nhỏ hơn gọi là "fragments" để tạo ra các điểm ảnh (pixels) trên màn hình. Quá trình này giúp các giá trị thuộc tính đỉnh được nội suy tuyến tính giữa các đỉnh để các pixel được hiển thị kết nối liền mạch với các bề mặt mô hình.
* Ngược lại, các biến thống nhất hoạt động như hằng số đã được khởi tạo và không thay đổi trong suốt quá trình xử lý của shader đỉnh, nghĩa là chúng giữ nguyên giá trị đối với mọi đỉnh. Không có sự nội suy cho các biến thống nhất; giá trị của chúng luôn không đổi, bất kể số lượng đỉnh.

 **Quá trình nội suy của thuộc tính đỉnh trong rasterizer:**

* Quá trình này rất hữu ích trong nhiều trường hợp, chẳng hạn như nội suy màu sắc, tọa độ kết cấu (texture coordinates), và các vector pháp tuyến bề mặt. Tất cả các giá trị được gửi qua bộ đệm đến các thuộc tính đỉnh sẽ được nội suy thêm trong pipeline.

 **Khai báo thuộc tính đỉnh trong shader:**

* Trong shader đỉnh, các thuộc tính đỉnh thường được khai báo với từ khóa "in" để nhận các giá trị từ bộ đệm. Tuy nhiên, chúng cũng có thể được khai báo là "out" để gửi giá trị đến các giai đoạn tiếp theo trong pipeline. Ví dụ, khai báo out vec4 color; nghĩa là thuộc tính đỉnh "color" được gửi ra ngoài dưới dạng vec4.
* Riêng với vị trí đỉnh (vertex position), OpenGL có sẵn biến gl\_Position để đảm nhận việc này, và trong shader đỉnh, các phép biến đổi ma trận sẽ được áp dụng để tính toán và gán giá trị cho gl\_Position.

 **Quá trình rasterization:**

* Khi sử dụng lệnh glDrawArrays() với tham số GL\_TRIANGLES, quá trình rasterization diễn ra cho từng tam giác. Nội suy bắt đầu dọc theo các đường nối các đỉnh với độ chính xác phụ thuộc vào mật độ điểm ảnh trên màn hình. Sau đó, các điểm ảnh bên trong tam giác được nội suy dọc theo các đường ngang nối các điểm biên.

Tóm lại, điểm khác biệt lớn nhất giữa thuộc tính đỉnh và biến thống nhất là thuộc tính đỉnh có thể được nội suy để tạo ra sự chuyển tiếp mượt mà giữa các giá trị, còn biến thống nhất thì không thay đổi trong suốt quá trình xử lý.

## 4.4. MODEL-VIEW AND PERSPECTIVE MATRICES

1. **Ba loại ma trận cần sử dụng:**
   * **Ma trận Mô hình (Model matrix):** Định vị và định hướng đối tượng trong không gian tọa độ thế giới. Mỗi mô hình có một ma trận mô hình riêng, và ma trận này cần được cập nhật liên tục nếu mô hình di chuyển.
   * **Ma trận Nhìn (View matrix):** Dịch chuyển và xoay các mô hình trong thế giới để mô phỏng hiệu ứng của một camera ở vị trí mong muốn. Camera của OpenGL luôn ở vị trí (0,0,0) và hướng về trục Z âm. Để tạo ra hiệu ứng di chuyển camera, cần di chuyển các đối tượng theo hướng ngược lại (ví dụ, nếu muốn camera di chuyển sang phải thì cần di chuyển các đối tượng sang trái).
   * **Ma trận Phối cảnh (Perspective matrix):** Tạo hiệu ứng 3D theo hình dạng frustum (khối chóp cụt) mong muốn, như đã mô tả trong các chương trước.
2. **Khi nào cần tính toán các ma trận này:**
   * Các ma trận không thay đổi có thể được tạo ra trong hàm init(), trong khi các ma trận thay đổi cần được tạo trong hàm display() để cập nhật cho mỗi khung hình (frame).
   * Nếu mô hình được hoạt hình hóa và camera có thể di chuyển:
     + Mỗi khung hình cần tạo ra ma trận mô hình cho từng mô hình.
     + Ma trận nhìn được tạo một lần mỗi khung hình và được áp dụng cho tất cả các đối tượng trong khung hình đó.
     + Ma trận phối cảnh được tạo một lần trong hàm init() dựa trên kích thước cửa sổ và các tham số frustum, và chỉ cần thay đổi nếu cửa sổ được thay đổi kích thước.
3. **Cách xây dựng các ma trận trong hàm display():**
   * **Bước 1:** Tạo ma trận nhìn dựa trên vị trí và hướng của camera mong muốn.
   * **Bước 2:** Với mỗi mô hình, thực hiện các bước sau:
     + Tạo ma trận mô hình dựa trên vị trí và hướng của mô hình.
     + Kết hợp ma trận mô hình và ma trận nhìn thành một ma trận "MV" duy nhất.
     + Gửi ma trận MV và ma trận phối cảnh đến các biến thống nhất trong shader.
4. **Lợi ích của việc kết hợp ma trận mô hình và ma trận nhìn:**
   * Không nhất thiết phải kết hợp hai ma trận này, nhưng việc này mang lại một số lợi ích về hiệu suất, đặc biệt khi mô hình phức tạp có hàng trăm hoặc hàng nghìn đỉnh. Kết hợp ma trận mô hình và ma trận nhìn trước khi gửi đến shader giúp giảm số lượng phép tính cần thiết trong shader.
   * Việc giữ ma trận phối cảnh riêng biệt sẽ cần thiết cho các hiệu ứng chiếu sáng sau này.

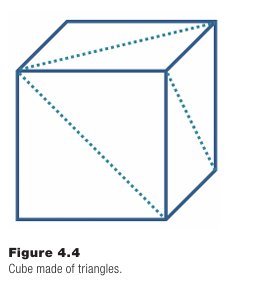
Tóm lại, quá trình này giúp định vị và hiển thị các đối tượng 3D trong không gian, đồng thời tối ưu hóa hiệu suất bằng cách quản lý hợp lý các ma trận biến đổi.

## 4.5. OUR FIRST 3D PROGRAM—A 3D CUBE

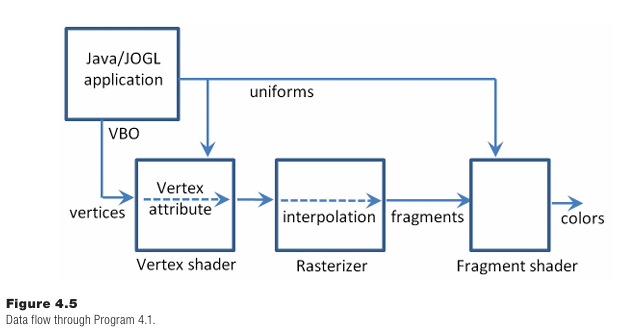
- File code trong thư mục src/book/

- Trong hàm setUpVertices():

+ Khai báo 1 mảng chứa 36 đỉnh. Tại sao khối hộp lại có 36 đỉnh? Tại vì mỗi mặt khối hộp được tạo từ được tạo từ 2 tam giác, tổng cộng cần là 12 tam giác.



* Mà mỗi tam giác được xác định bởi 3 đỉnh, tổng cộng là 36 điểm. Mỗi điểm có 3 giá trị x,y,z, tổng cộng là 108 giá trị trong mảng. Điều đó đúng nếu mỗi điểm tham gia vào nhiều tam giác, nhưng chúng ta vẫn xác định mỗi đỉnh riêng biệt vì chúng ta đang gửi mỗi đỉnh xuống pipeline một cách riêng biệt.
* Khối hộp được xác định trong 1 tọa độ, với (0,0,0) là tâm ở giữa, và với các góc trong khoảng từ -1.0 đến 1.0 trong 3 trục x, y, z. Phần còn lại của hàm là thiết lập VAO và VBOs, và load các đỉnh vào vbo buffer thứ 0.
* Ghi nhớ là hàm init() hoàn thành nhiệm vụ cần trong 1 lần: đọc shader và xây dựng chương trình render và load điểm vào buffer. Ghi nhớ nó cũng đặt vị trí khối hộp và camera trong thế giới; sau đó chúng ta se làm chuyển động khối hộp và cũng sẽ thấy làm cách nào để di chuyển camera xung quanh, tại nơi điểm chúng ta có thể loại bỏ vị trí cứng này.
* Bây giờ hãy nhìn vào hàm display(), gọi lại display() có thể gọi lặp lại và đánh giá cái mà được gọi lại trong frame rate. Chuyển động hoạt động liên tục bằng các vẽ và vẽ lại cảnh, hoặc khung hình, rất nhanh. Nó thường xuyên cần thiết để xóa chiều sâu của buffer trước khi render 1 khung hình, vì thế mặt ẩn sẽ diễn ra. Dùng glClear(GL\_DEPTH\_BUFFER\_BIT) để xóa chiều sâu buffer.
* Display() tích hợp shader bằng cách gọi glUseProgram() để cài đặt GLSL vào GPU. Gọi lại nó chạy lại shader program, nhưng nó sẽ có thể cho phép xếp vào hàng đợi OpenGL gọi để xác định vertex attribute của shader and uniform locations. Display() lấy uniform variable locations; xây dựng ma trận perspective, view, model. Liên kết ma trận view và ma trận model vào 1 ma trận mv; và chuyển perspective và ma trận mv cho corresponding uniforms.
* Display() cho phép buffer chứa điểm khối hộp và gắn chúng vào vertex attribute 0 để chuẩn bị gửi đến điểm để shader.
* Display() sẽ vẽ model bằng cách gọi glDrawArrays(), cụ thể là model cụ thể gồm các tam giác và tổng cộng 36 điểm.
* Cuối cùng xác định các shader. Vertex shader có vị trí vertex attribute. Bởi vì vị trí được xác định là 0 vì có thể tham chiếu dễ dàng bằng cách sử dụng 0 trong tham số đầu tiên của hàm glVertexAttribPointer() và trong glEnableVertexAttribArray(). Ghi nhớ vị trí vertex attribute được xác đinh bởi vec3, và nó cần thiết để chuyển sang 1 vec4 để thuận tiện với ma trận 4x4 bằng cách vec4(position, 1.0).
* Sự đa hình của vertex shader cho phép ma trận chuyển sang đỉnh, chuyển nó sang không gian camera. Những giá trị đó được đặt vào built-in OpenGL biến output gl\_Position và sau đó tiếp tục đi qua pipeline và nội suy bởi rasterizer.
* Tọa độ pixel nội suy sau đó được gửi tới fragment shader. Giống như vertex shader thì fragment shader cũng xử lý từng pixel một.



## 4.6. RENDERING MULTIPLE CONPIES OF AN OBJECT

### 4.6.1. Instancing

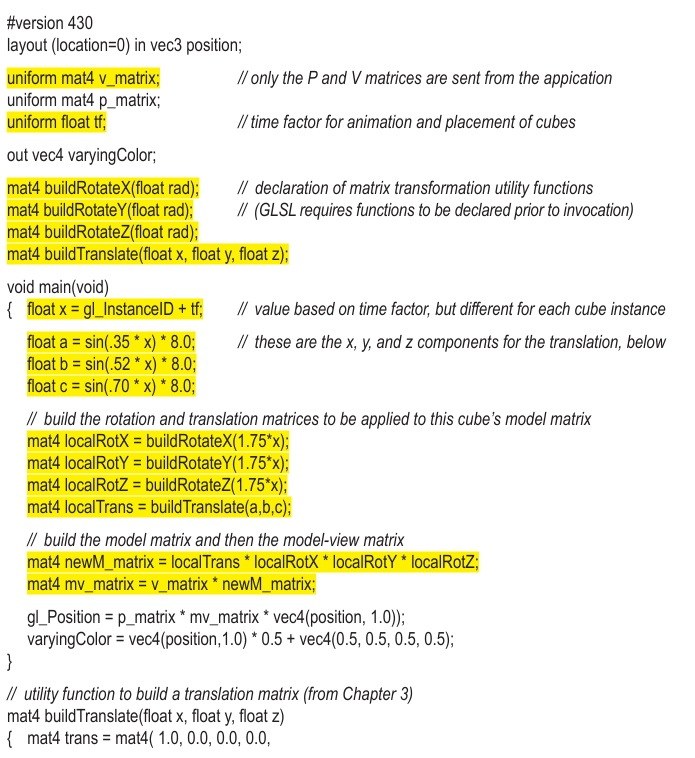
- Sử dụng hàm sau thay thế glDrawArrays() để vẽ đối tượng nhầm tối ưu performance:

glDrawArraysInstanced()

* Khi sử dụng instancing thì vertex shader có thể truy cập biến built-in, get\_InstanceID, 1 số nguyên trong glsl:



* Khi sử dụng instancing, thì vertex shader sẽ truy cập vào 1 biến built-in, gl\_InstanceID, 1 số int tham chiếu đến số instance của object hiện tại đang xử lý.



* Sử dụng glDrawArraysInstanced(GL\_TRIANGLES, 0, 36, 24) để vẽ

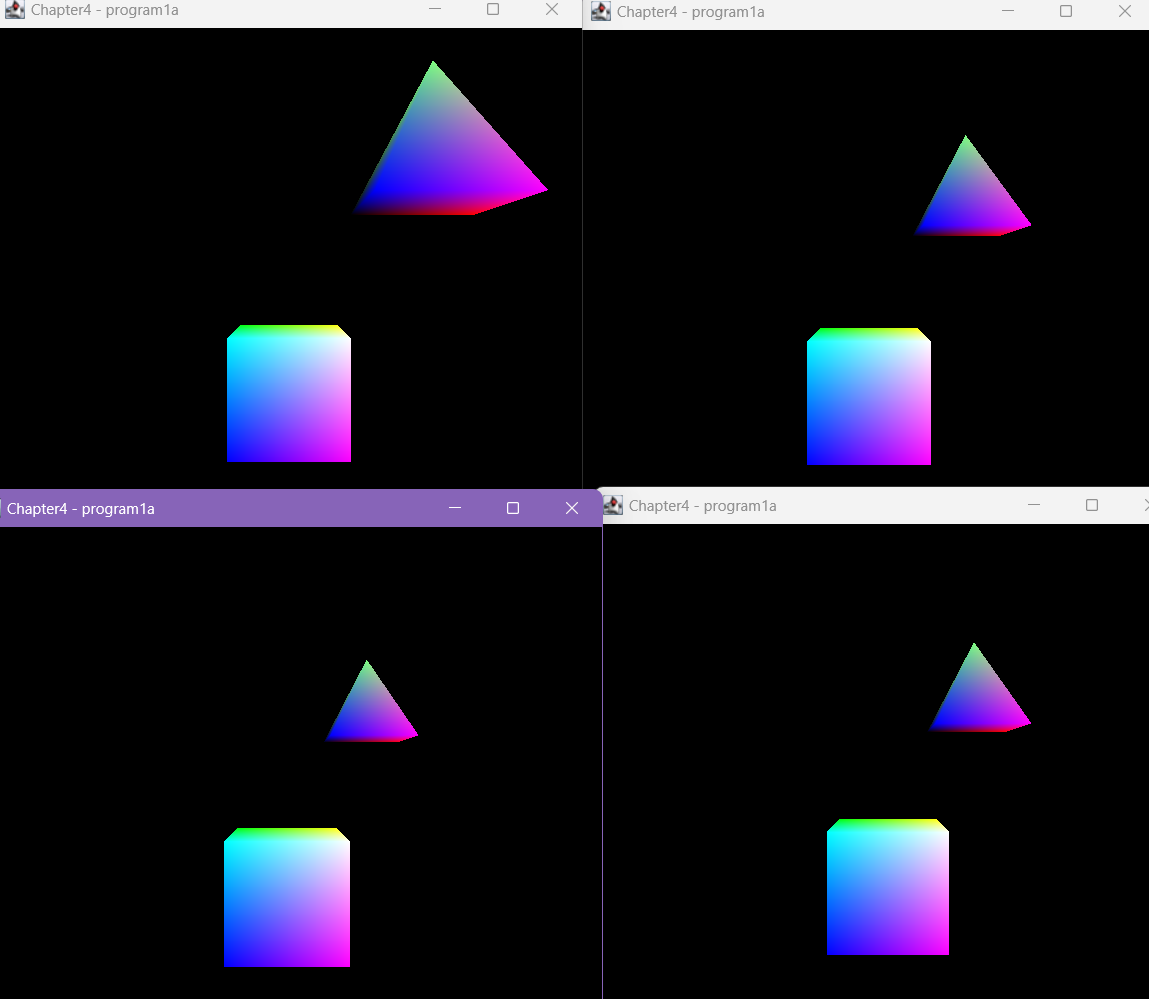
## 4.7. RENDERING MULTIPLE DIFFERENT MODELS IN SCENE

Để dựng nhiều hơn 1 model trong 1 khung cảnh, 1 cách tiếp cận đơn giản là sử dụng 1 separate buffer cho mỗi model. Mỗi model sẽ cần 1 ma trận model của nó, và như vậy 1 ma trận model-view sẽ được tạo cho mỗi model khi chúng ta dựng. Sẽ có nhiều thứ cần làm để chia gọi lại glDrawArrays() mỗi model. Có nhiều thay đổi trong init() và trong display().

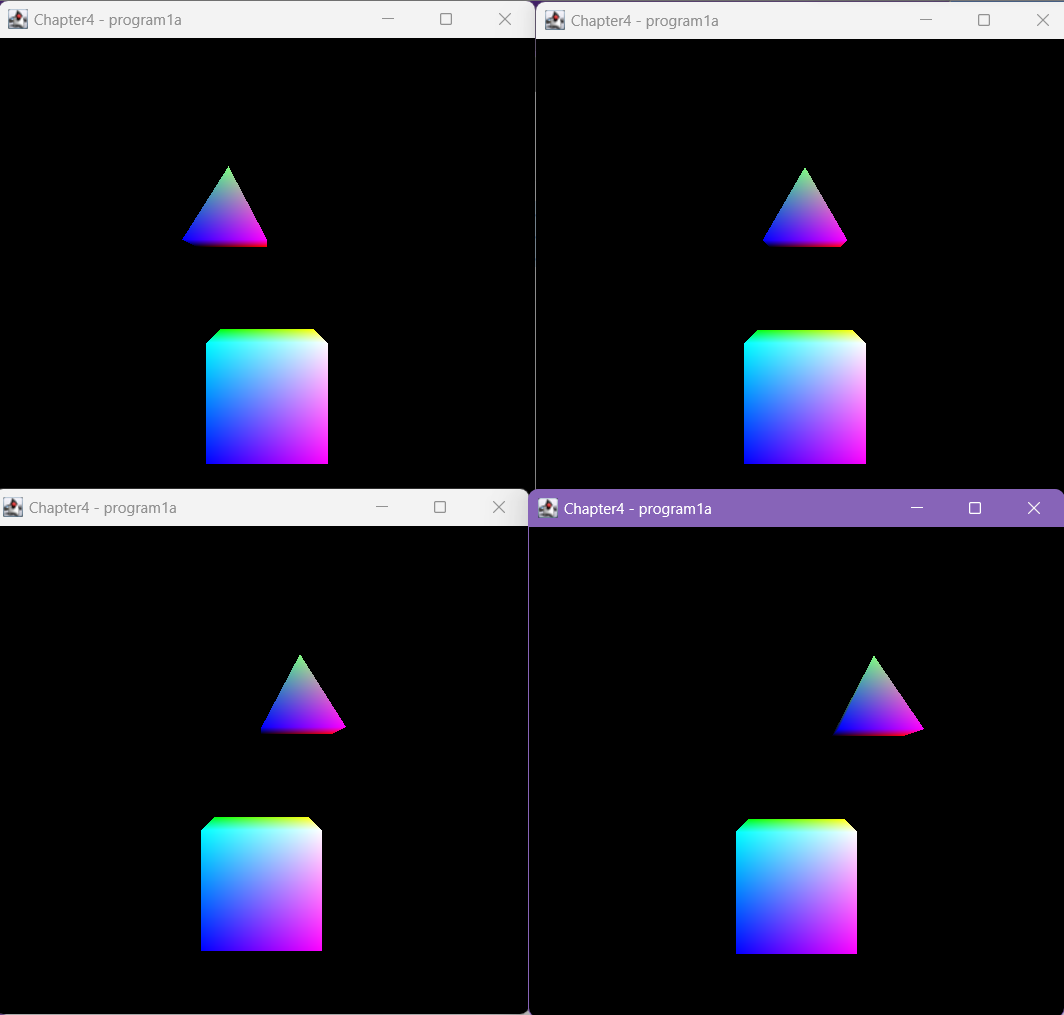
Một hướng khác là chúng ta sẽ cần shader khác hoặc 1 chương trình render khác cho mỗi đối tượng chúng ta muốn vẽ. Cách làm là chúng ta có thể tái sử dụng cùng 1 vertex and fragment shaders, và chỉ cần điều chỉnh chương trình Java/JOGL để gửi mỗi model xuống pipeline khi display() được gọi.

Tiếp tục bằng cách thêm 1 hình chóp, bởi cảnh của chúng ta gồm 1 khối họp và 1 khói chóp. Note: 1 khối chóp được tạo bởi 6 tam giác tổng cộng 6x3=18 đỉnh.

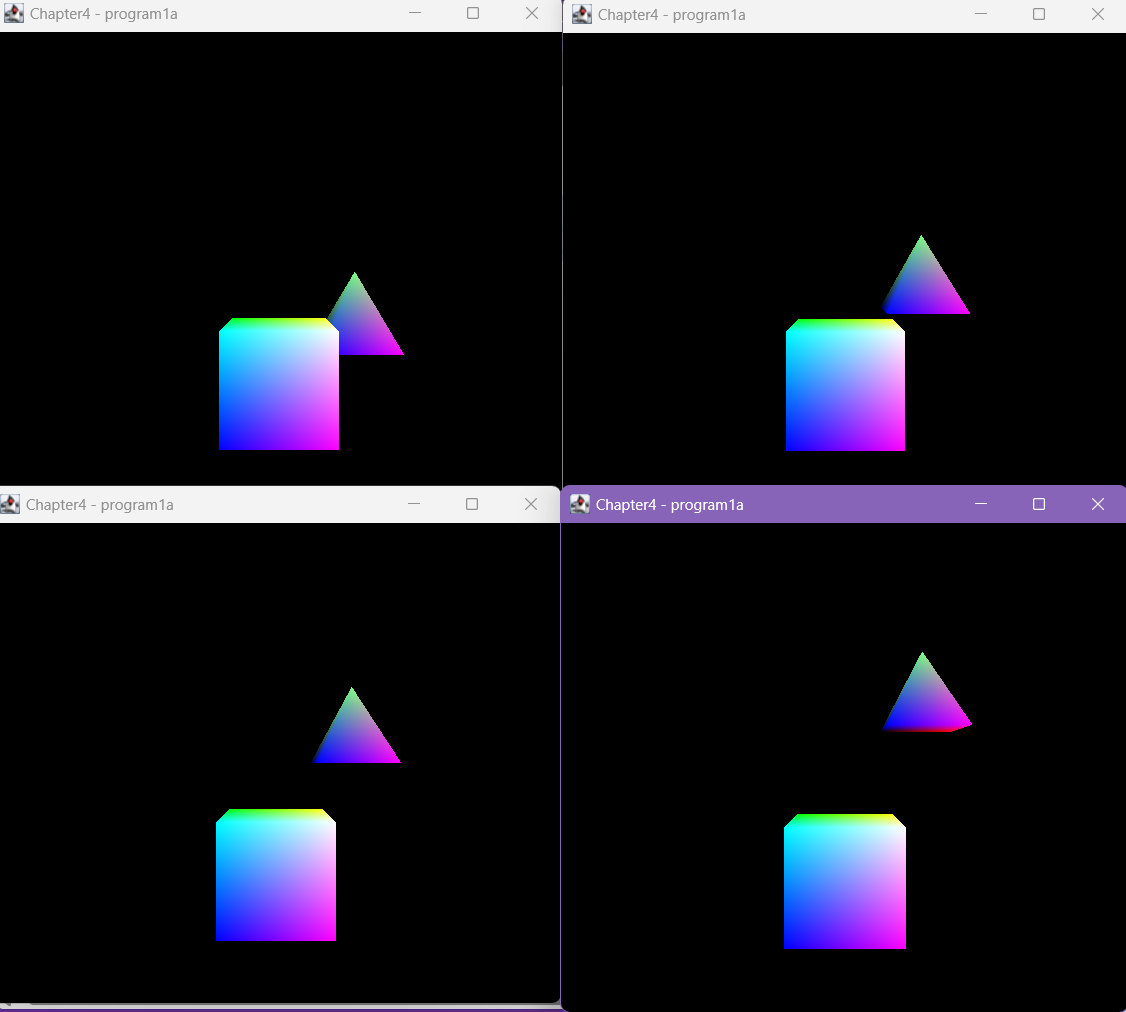
\*\*\* LocZ chỉnh độ xa gần màn hình:



\*\*\* LocX: chiều ngang



\*\*\*LocY: trục thẳng



* Ma trận view được đặt trên cùng hàm display() và để sử dụng trong ma trận model-view cho cả khối hộp và khối chóp.

## 4.8 MATRIX STACKS

Khi chúng ta dựng thì cần thiết lập 1 tập đơn các điểm. Tuy nhiên để xây dựng linh hoạt model bằng cách tập hơp các model đơn giản nhỏ hơn. Một đối tượng được xây dựng như thế gọi là 1 hierarchical(thứ bậc) model.

1 matrix stack là 1 hàng chờ của các ma trận chuyển đổi. Matrix stack giúp dễ dàng tạo và quản lý các đối tượng và cảnh thứ bậc 1 cách tùy ý, nơi những chuyển đổi có thể dựng trong lúc cái khác chuyển đổi. Nhiều ma trận model, view, model-view sễ có thể cần trong 1 cảnh tùy biến có thể bị thay thế bởi 1 instance của Matrixf4Stack.

Một vài hàm quan trọng của Matrix4fStack:

* pushMatrix(): tạo 1 bản copy của ma trận trên cùng và đẩy bản copy đó vào stack.
* popMatrix(): xóa và trả về ma trận trên cùng.
* get(v): copy giá trị ma trận cao nhất vào buffer v và trả về 1 tham chiếu đến buffer (ma trận đó không bị xóa khỏi stack).
* Rotate(d, x, y, z)
* Scale(x, y, z) thiết lập hướng của ma trận trên cùng của stack
* Translate(x, y, z)

Matrix4fStack được thiết kế như 1 subclass của Matrix4f, vì vậy thừa hưởng các hàm có trong Matrix4f. Nếu 1 trong các hàm trong Matrix4fStack, nó sẽ áp dụng lên ma trận trên cùng của stack.

Ma trận đầu tiên được push vào stack thường là ma trận VIEW. Những ma trận phía trên nó là ma trận model-view với mức độ phức tạp tăng dần; nghĩa là, chúng có nhiều biến đổi mô hình hơn được áp dụng vào. Các biến đổi này có thể được áp dụng trực tiếp hoặc bằng cách gộp các ma trận khác vào trước.

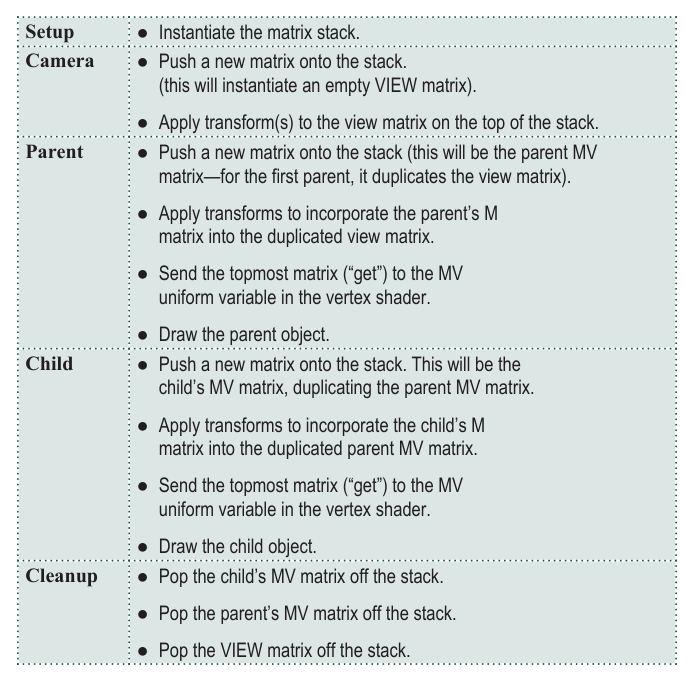
Trong ví dụ về hệ trái đất, ma trận nằm ngay trên ma trận VIEW sẽ là ma trận MV của mặt trời. Ma trận nằm trên ma trận đó sẽ là ma trận MV của Trái đất, bao gồm một bản sao của ma trận MV của mặt trời với các biến đổi mô hình của Trái đất được áp dụng vào. Nói cách khác, ma trận MV của Trái đất được tạo ra bằng cách kết hợp các biến đổi của trái đất này vào các biến đổi của mặt trời. Tương tự, ma trận MV của mặt trăng nằm trên ma trận MV của trái đất và được tạo ra bằng cách áp dụng các biến đổi của ma trận mô hình mặt trăng lên ma trận MV của trái đất nằm ngay bên dưới nó.

Sau khi hiển thị mặt trăng, một "mặt trăng" thứ hai có thể được hiển thị bằng cách “pop” ma trận của mặt trăng đầu tiên ra khỏi ngăn xếp (khôi phục đỉnh ngăn xếp về ma trận model-view của trái đất) và sau đó lặp lại quá trình này cho mặt trăng thứ hai.

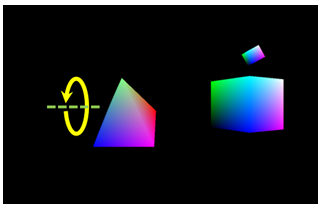
Cách tiếp cận cơ bản như sau:

1. Khi một đối tượng mới được giới thiệu so với một đối tượng cha, thực hiện một lệnh “pushMatrix()”.
2. Áp dụng các biến đổi của đối tượng mới; tức là nhân một biến đổi vào ma trận ở đỉnh ngăn xếp.
3. Khi một đối tượng hoặc tiểu đối tượng được vẽ xong, gọi lệnh “popMatrix()” để loại bỏ ma trận model-view của nó khỏi đỉnh của ngăn xếp.

Trong các chương sau, chúng ta sẽ học cách tạo ra các hình cầu và làm cho chúng trông giống như các trái đất và mặt trăng. Hiện tại, để đơn giản hóa, chúng ta sẽ xây dựng một "hệ trái đất" bằng cách sử dụng kim tự tháp và một vài khối lập phương.



Lưu ý rằng sự quay của kim tự tháp (“mặt trời”) quanh trục của nó nằm trong hệ tọa độ cục bộ của riêng nó và không nên ảnh hưởng đến các “đối tượng con” (trong trường hợp này là trái đất và mặt trăng). Do đó, sự quay của mặt trời (như hình minh họa bên dưới) được đưa vào ngăn xếp, nhưng sau khi vẽ xong mặt trời, nó cần được loại bỏ (pop) khỏi ngăn xếp.



Sự quay xung quanh mặt trời của khối lập phương lớn (trái đất) (hình bên trái, bên dưới) sẽ ảnh hưởng đến chuyển động của mặt trăng, do đó nó được đưa vào ngăn xếp và vẫn giữ nguyên khi vẽ mặt trăng. Ngược lại, sự quay quanh trục của trái đất (hình bên phải, bên dưới) là chuyển động cục bộ và không ảnh hưởng đến mặt trăng, vì vậy nó sẽ được loại bỏ (pop) khỏi ngăn xếp trước khi vẽ mặt trăng.



Tương tự, chúng ta sẽ đưa các biến đổi vào ngăn xếp cho các chuyển động quay của mặt trăng (quay xung quanh trái đất và quanh trục của nó), như được chỉ ra trong các hình ảnh sau.



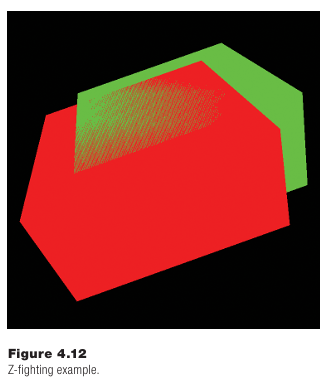
Dưới đây là trình tự các bước cho “trái đất”:

* pushMatrix() — Đây sẽ là phần của ma trận MV của trái đất mà cũng sẽ ảnh hưởng đến các đối tượng con.
* translate(...) — Thao tác này sẽ thêm chuyển động của trái đất xung quanh mặt trời vào ma trận MV của trái đất. Trong ví dụ này, chúng ta sử dụng lượng giác để tính toán chuyển động của trái đất như một phép tịnh tiến.
* pushMatrix() — Đây sẽ là ma trận MV hoàn chỉnh của trái đất, bao gồm cả sự quay quanh trục của nó.
* rotate(...) — Thao tác này sẽ thêm vào sự quay quanh trục của trái đất (sau đó sẽ được loại bỏ (pop) và không ảnh hưởng đến các đối tượng con).
* get() — Thao tác này sẽ lấy ma trận MV và gửi nó đến đồng phục MV (MV uniform).
* Vẽ trái đất.
* popMatrix() — Thao tác này sẽ loại bỏ ma trận MV của trái đất khỏi ngăn xếp, làm lộ ra bản sao trước đó của ma trận MV của trái đất mà không bao gồm sự quay quanh trục của trái đất (để chỉ có phép tịnh tiến của trái đất mới ảnh hưởng đến mặt trăng).

## 4.9 COMBATING “Z\_FIGHTING” ARTIFACTS

Hãy nhớ rằng khi vẽ nhiều đối tượng, OpenGL sử dụng thuật toán Z-buffer (đã được trình bày trước đó trong Hình 2.14) để loại bỏ các bề mặt bị che khuất. Thông thường, thuật toán này xác định các bề mặt nào của đối tượng sẽ hiển thị và được vẽ trên màn hình, so với các bề mặt nằm sau các đối tượng khác và do đó không nên được vẽ, bằng cách chọn màu của một pixel là màu của đoạn (fragment) tương ứng gần nhất với camera.

Tuy nhiên, có thể có những trường hợp hai bề mặt của đối tượng trong một cảnh trùng nhau và nằm trên các mặt phẳng trùng khớp, khiến thuật toán Z-buffer gặp khó khăn trong việc xác định bề mặt nào trong số hai bề mặt đó nên được vẽ (vì không có bề mặt nào "gần nhất" với camera). Khi điều này xảy ra, các lỗi làm tròn số của số thực có thể khiến một số phần của bề mặt được vẽ sử dụng màu của một đối tượng, trong khi các phần khác sử dụng màu của đối tượng kia. Hiện tượng này được gọi là "Z-fighting" hoặc "depth-fighting", vì hiệu ứng này là kết quả của việc các đoạn vẽ “đấu tranh” với nhau để chiếm các mục nhập pixel tương ứng trong Z-buffer. Hình 4.12 minh họa một ví dụ về Z-fighting giữa hai hộp có các mặt trùng khớp (mặt trên) chồng lên nhau.



Các tình huống như vậy thường xảy ra khi tạo địa hình hoặc bóng đổ. Trong các trường hợp như vậy, thường có thể dự đoán được hiện tượng Z-fighting, và một cách phổ biến để khắc phục nó là di chuyển một đối tượng đi một chút để các bề mặt không còn đồng phẳng. Chúng ta sẽ xem một ví dụ về điều này ở Chương 8.

Z-fighting cũng có thể xảy ra do độ chính xác giới hạn của các giá trị trong bộ đệm chiều sâu (depth buffer). Đối với mỗi pixel được xử lý bởi thuật toán Z-buffer, độ chính xác của thông tin về chiều sâu bị giới hạn bởi số lượng bit có sẵn để lưu trữ trong bộ đệm chiều sâu. Khoảng cách càng lớn giữa các mặt phẳng cắt gần và xa được sử dụng để xây dựng ma trận phối cảnh, thì càng có khả năng các điểm của hai đối tượng với độ sâu thực tế tương tự nhau (nhưng không bằng nhau) sẽ được biểu diễn bằng cùng một giá trị số trong bộ đệm chiều sâu. Do đó, lập trình viên cần chọn các giá trị cho mặt phẳng cắt gần và xa sao cho khoảng cách giữa hai mặt phẳng này là nhỏ nhất, trong khi vẫn đảm bảo rằng tất cả các đối tượng quan trọng trong cảnh nằm trong khung nhìn (viewing frustum).

Cũng cần hiểu rằng, do ảnh hưởng của phép biến đổi phối cảnh, việc thay đổi giá trị của mặt phẳng cắt gần có thể tác động lớn hơn đến khả năng xuất hiện hiện tượng Z-fighting so với thay đổi tương tự ở mặt phẳng cắt xa. Vì vậy, tốt nhất là tránh chọn mặt phẳng cắt gần quá sát với mắt.

Trong các ví dụ trước trong sách này, chúng ta chỉ đơn giản sử dụng các giá trị 0.1 và 1000 (trong các lệnh gọi hàm perspective()) cho các mặt phẳng cắt gần và xa. Các giá trị này có thể cần phải điều chỉnh cho phù hợp với cảnh của bạn.

## 4.10 OTHER OPTIONS FOR PRIMITIVES

## 4.11 CODING FOR PERFORMANCE

### 4.11.1 Minimizing Dynamic Memory Allocation

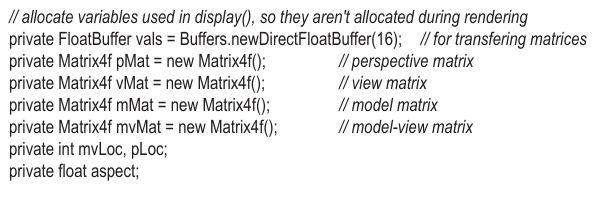
Module quan trọng trong các ứng dụng Java/JOGL của chúng ta, về mặt hiệu suất, chính là hàm display(). Đây là hàm được gọi lặp đi lặp lại trong bất kỳ hoạt ảnh hay quá trình hiển thị thời gian thực nào, vì vậy đây cũng là nơi (hoặc trong bất kỳ hàm nào mà nó gọi đến) mà chúng ta cần tối ưu hóa để đạt hiệu suất cao nhất.

Một cách quan trọng để giảm thiểu chi phí trong hàm display() là tránh bất kỳ thao tác nào yêu cầu cấp phát bộ nhớ. Các ví dụ rõ ràng về những việc cần tránh bao gồm:

* Khởi tạo đối tượng
* Khai báo biến
* Cấp phát bộ đệm

Chúng tôi khuyến khích người đọc xem lại từng chương trình mà chúng ta đã phát triển cho đến nay và lưu ý rằng mọi biến được sử dụng trong hàm display() (ngoại trừ biến gl kiểu GL4) đều đã được khai báo và cấp phát bộ nhớ trước khi hàm display() thực sự được gọi. Một ví dụ khác là Matrix4fStack, trong đó JOML yêu cầu cấp phát trước dung lượng tối đa của ngăn xếp, để toàn bộ ngăn xếp được cấp phát trước, tránh việc cấp phát không gian động khi thực hiện các thao tác “push” trong display().

Thực tế là chúng ta hiện đang giảm thiểu số lượng khai báo hoặc khởi tạo của bất kỳ loại nào xuất hiện trong display(). Chẳng hạn, trong Chương trình 4.1, có đoạn mã sau được đặt ở đầu chương trình.



Lưu ý rằng chúng ta đã cố ý đặt một chú thích ở đầu khối mã để chỉ ra rằng các biến này được cấp phát trước để sử dụng sau này trong hàm display() (mặc dù đến bây giờ chúng ta mới nêu rõ điều đó).

Cũng có các ví dụ tinh vi hơn. Chẳng hạn, các lệnh gọi hàm chuyển đổi dữ liệu từ loại này sang loại khác có thể trong một số trường hợp sẽ khởi tạo và trả về dữ liệu đã chuyển đổi. Vì vậy, điều quan trọng là cần hiểu rõ hành vi của bất kỳ hàm thư viện nào được gọi từ display().

May mắn thay, thư viện toán học JOML mà chúng ta đang sử dụng đã được thiết kế cẩn thận để loại bỏ (hoặc ít nhất là giảm thiểu) việc cấp phát bộ nhớ khi gọi các hàm của nó, đồng thời vẫn cung cấp các chức năng cần thiết cho OpenGL. Hầu hết các hàm của JOML hoạt động trực tiếp trên đối tượng từ đó hàm được gọi hoặc trên một trong các tham số của nó (thay vì xây dựng một kết quả và trả về), do đó cho phép không gian lưu trữ kết quả có thể được cấp phát trước.

Một ví dụ về cách JOML được thiết kế khéo léo để tối ưu hóa hiệu suất theo cách này có thể thấy trong các lệnh gọi glUniformMatrix4fv(). Hãy cùng xem kỹ một lệnh gọi như vậy, lệnh chuyển ma trận model-view vào một biến uniform.



### 4.11.2 Pre-Computing the Perspective Matrix

May mắn thay, JOGL tự động gọi hàm reshape() bất cứ khi nào cửa sổ được thay đổi kích thước. Cho đến giờ, chúng ta đã để hàm reshape() trống — và bây giờ chúng ta đã có một mục đích sử dụng cho nó. Chúng ta chỉ cần di chuyển mã tính toán ma trận phối cảnh vào trong init(), và cũng sao chép mã này vào trong reshape().



### 4.11.3 Back-Face Culling

Một cách khác để cải thiện hiệu suất hiển thị là tận dụng khả năng của OpenGL trong việc loại bỏ mặt sau (back-face culling). Khi một mô hình 3D được "đóng" hoàn toàn, có nghĩa là bên trong của nó không bao giờ được nhìn thấy (như trong trường hợp của khối lập phương và hình chóp), thì những phần bề mặt ngoài có góc quay ra xa khỏi người xem sẽ luôn bị che khuất bởi một phần khác của cùng mô hình. Nghĩa là, các tam giác quay mặt ra khỏi người xem sẽ không thể nhìn thấy (chúng sẽ bị loại bỏ trong quá trình xóa bề mặt ẩn), vì vậy không có lý do gì để rasterize hoặc hiển thị chúng.

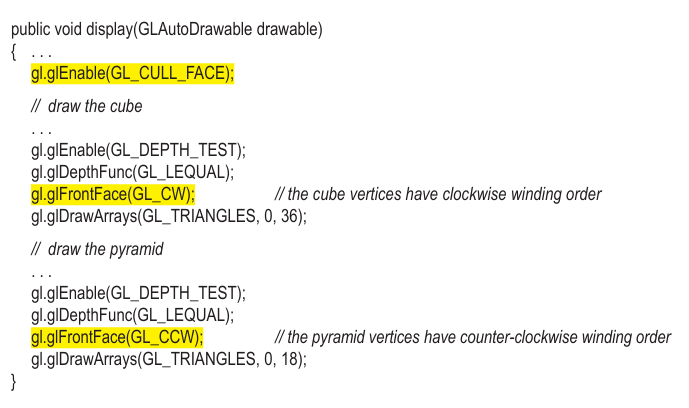
Chúng ta có thể yêu cầu OpenGL xác định và "loại bỏ" (không hiển thị) các tam giác quay mặt sau bằng lệnh glEnable(GL\_CULL\_FACE). Chúng ta cũng có thể tắt loại bỏ mặt bằng glDisable(GL\_CULL\_FACE). Mặc định, loại bỏ mặt bị tắt, nên nếu muốn OpenGL loại bỏ các tam giác quay mặt sau, bạn phải bật nó lên. Khi loại bỏ mặt được bật, mặc định các tam giác chỉ được hiển thị nếu chúng quay mặt trước. Cũng theo mặc định, một tam giác được coi là quay mặt trước nếu ba đỉnh của nó được xếp theo hướng ngược chiều kim đồng hồ (dựa trên thứ tự mà chúng được xác định trong bộ đệm) khi nhìn từ camera của OpenGL. Các tam giác có đỉnh xếp theo chiều kim đồng hồ (khi nhìn từ camera OpenGL) là quay mặt sau và sẽ không được hiển thị.

Định nghĩa quay mặt trước theo chiều ngược kim đồng hồ này đôi khi được gọi là *winding order* và có thể được đặt rõ ràng bằng cách gọi hàm glFrontFace(GL\_CCW) cho ngược chiều kim đồng hồ (mặc định) hoặc glFrontFace(GL\_CW) cho chiều kim đồng hồ. Tương tự, có thể đặt rõ ràng là tam giác quay mặt trước hay mặt sau được hiển thị. Thực ra, với mục đích này, chúng ta sẽ chỉ định cái nào không được hiển thị — tức là cái nào bị “loại bỏ”. Chúng ta có thể chỉ định rằng các tam giác quay mặt sau bị loại bỏ (dù không cần thiết vì đó là mặc định) bằng cách gọi glCullFace(GL\_BACK). Ngoài ra, có thể chỉ định thay thế rằng các tam giác quay mặt trước bị loại bỏ, hoặc thậm chí là tất cả các tam giác đều bị loại bỏ, bằng cách thay thế tham số GL\_BACK bằng GL\_FRONT hoặc GL\_FRONT\_AND\_BACK tương ứng.

Như chúng ta sẽ thấy ở Chương 6, các mô hình 3D thường được thiết kế sao cho bề mặt ngoài được tạo thành từ các tam giác có cùng hướng quay—thường là ngược chiều kim đồng hồ—để nếu bật loại bỏ mặt thì mặc định phần bề mặt ngoài của mô hình hướng về camera sẽ được hiển thị. Vì mặc định OpenGL giả định hướng quay là ngược chiều kim đồng hồ, nếu một mô hình được thiết kế để hiển thị với hướng quay theo chiều kim đồng hồ, lập trình viên cần gọi gl\_FrontFace(GL\_CW) để điều chỉnh nếu loại bỏ mặt sau được bật.

Lưu ý rằng trong trường hợp GL\_TRIANGLE\_STRIP, hướng quay của mỗi tam giác thay đổi luân phiên. OpenGL xử lý việc này bằng cách “đảo chiều” thứ tự đỉnh khi tạo mỗi tam giác kế tiếp, như sau: 0-1-2, sau đó 2-1-3, 2-3-4, 4-3-5, 4-5-6, và cứ thế tiếp tục.

Loại bỏ mặt sau cải thiện hiệu suất bằng cách đảm bảo rằng OpenGL không tốn thời gian rasterize và hiển thị các bề mặt không được định sẵn để nhìn thấy. Hầu hết các ví dụ trong chương này có kích thước nhỏ, nên không có động lực lớn để bật loại bỏ mặt (ngoại trừ ví dụ trong Hình 4.9 với 100.000 khối lập phương hoạt hình được lặp lại, điều này có thể gây khó khăn về hiệu suất trên một số hệ thống). Trên thực tế, hầu hết các mô hình 3D thường là “đóng,” do đó, việc bật loại bỏ mặt sau là thông lệ phổ biến. Ví dụ, chúng ta có thể thêm loại bỏ mặt sau vào Chương trình 4.3 bằng cách sửa đổi hàm display() như sau:



Việc thiết lập đúng thứ tự winding là rất quan trọng khi sử dụng loại bỏ mặt sau (back-face culling). Một thiết lập sai, chẳng hạn chọn GL\_CW khi lẽ ra phải là GL\_CCW, có thể khiến nội thất của một đối tượng được hiển thị thay vì phần ngoại thất của nó, từ đó gây ra hiện tượng méo hình tương tự như khi ma trận phối cảnh không đúng.

Hiệu quả không phải là lý do duy nhất để sử dụng loại bỏ mặt. Trong các chương sau, chúng ta sẽ thấy những ứng dụng khác, chẳng hạn như trong những trường hợp mà chúng ta muốn nhìn thấy bên trong của một mô hình 3D hoặc khi sử dụng tính năng trong suốt.

# Chapter 5: Texture Mapping

5.1. LOADING TEXTURE IMAGE FILES

Có một số tập dữ liệu và cơ chế cần được phối hợp để thực hiện ánh xạ kết cấu (texture mapping) hiệu quả trong JOGL/GLSL:

* **Một đối tượng kết cấu (texture object)** để chứa hình ảnh kết cấu (trong chương này, chúng ta chỉ xem xét các hình ảnh 2D).
* **Một biến sampler đặc biệt** trong uniform để shader đỉnh (vertex shader) có thể truy cập vào kết cấu.
* **Một bộ đệm** để chứa tọa độ kết cấu.
* **Một thuộc tính đỉnh (vertex attribute)** để truyền tọa độ kết cấu qua pipeline.
* **Một đơn vị kết cấu** trên card đồ họa.

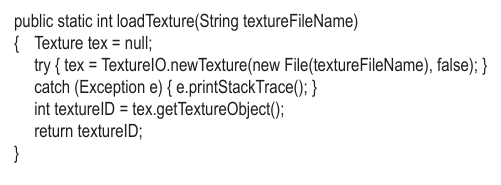
Một hình ảnh kết cấu có thể là bất kỳ hình ảnh nào, từ hình ảnh của các vật thể nhân tạo hoặc thiên nhiên như vải, cỏ, hoặc bề mặt hành tinh, đến các họa tiết hình học như bàn cờ trong Hình 5.1. Trong các trò chơi điện tử và phim hoạt hình, hình ảnh kết cấu thường được sử dụng để tạo khuôn mặt và trang phục cho các nhân vật hoặc tạo da cho sinh vật, như trên hình chú cá heo trong Hình 5.1.

Hình ảnh thường được lưu trữ trong các tệp hình ảnh, chẳng hạn như .jpg, .png, .gif hoặc .tiff. Để làm cho hình ảnh kết cấu có thể truy cập trong shaders trong pipeline OpenGL, chúng ta cần trích xuất màu sắc từ hình ảnh và đặt chúng vào một đối tượng kết cấu OpenGL (một cấu trúc có sẵn trong OpenGL để chứa hình ảnh kết cấu).

Java có một số công cụ hữu ích trong các gói imageio và awt để đọc hình ảnh kết cấu. Các bước thực hiện như sau: (a) đọc dữ liệu hình ảnh vào ByteBuffer bằng cách sử dụng các công cụ buffer của JOGL mà chúng ta đã thấy trong Chương 4, (b) sử dụng glGenTextures() để khởi tạo một đối tượng kết cấu và gán cho nó một ID số nguyên, (c) gọi glBindTexture() để kích hoạt đối tượng kết cấu vừa tạo, (d) tải dữ liệu hình ảnh đã đọc vào đối tượng kết cấu bằng lệnh glTexImage2D(), và (e) điều chỉnh các thiết lập kết cấu bằng hàm glTexParameter(). Kết quả là một ID số nguyên tham chiếu đến đối tượng kết cấu OpenGL đã sẵn sàng. Chúng ta sẽ đi qua các bước này ở cuối chương này.

Tuy nhiên, JOGL bao gồm các công cụ riêng để làm việc với kết cấu, giúp việc tải tệp hình ảnh kết cấu vào đối tượng kết cấu OpenGL trở nên đơn giản hơn nhiều. Các công cụ này nằm trong các lớp JOGL: Texture, TextureIO, và TextureData.

Để thêm kết cấu vào một đối tượng, bắt đầu bằng cách khai báo một biến kiểu Texture. Đây là một lớp JOGL; một đối tượng Texture trong JOGL đóng vai trò như một bao bọc (wrapper) cho một đối tượng kết cấu OpenGL. Tiếp theo, chúng ta gọi newTexture() — một phương thức tĩnh trong lớp TextureIO — để tạo ra đối tượng kết cấu. Hàm newTexture() chấp nhận tên tệp hình ảnh làm một trong các tham số của nó (nhiều loại tệp hình ảnh chuẩn được hỗ trợ, bao gồm bốn loại đã đề cập ở trên). Các bước này được triển khai trong hàm sau đây:



Chúng ta sẽ sử dụng hàm này thường xuyên, vì vậy chúng ta sẽ thêm nó vào lớp tiện ích Utils.java. Sau đó, ứng dụng Java/JOGL chỉ cần gọi hàm loadTexture() trên để tạo đối tượng kết cấu OpenGL như sau:

int myTexture = Utils.loadTexture("image.jpg");

Trong đó, image.jpg là tệp hình ảnh kết cấu và myTexture là một ID số nguyên đại diện cho đối tượng kết cấu OpenGL đã tạo ra.

5.2. TEXTURE COORDINATES

Bây giờ khi đã có phương tiện để nạp hình ảnh kết cấu vào OpenGL, chúng ta cần xác định cách thức áp dụng kết cấu lên bề mặt của đối tượng được hiển thị. Chúng ta làm điều này bằng cách chỉ định tọa độ kết cấu cho mỗi đỉnh trong mô hình của mình.

Tọa độ kết cấu là tham chiếu đến các điểm ảnh trong một hình ảnh kết cấu (thường là 2D). Các điểm ảnh trong hình ảnh kết cấu được gọi là **texels**, nhằm phân biệt chúng với các điểm ảnh được hiển thị trên màn hình. Tọa độ kết cấu được dùng để ánh xạ các điểm trên mô hình 3D đến các vị trí trong kết cấu. Mỗi điểm trên bề mặt mô hình, ngoài tọa độ (x, y, z) để xác định vị trí trong không gian 3D, còn có thêm tọa độ kết cấu (s, t) chỉ ra texel trong hình ảnh kết cấu sẽ cung cấp màu sắc của điểm đó. Như vậy, bề mặt của đối tượng sẽ được “tô màu” bởi hình ảnh kết cấu. Việc định hướng kết cấu trên bề mặt đối tượng được quyết định bằng cách gán tọa độ kết cấu cho các đỉnh của đối tượng.

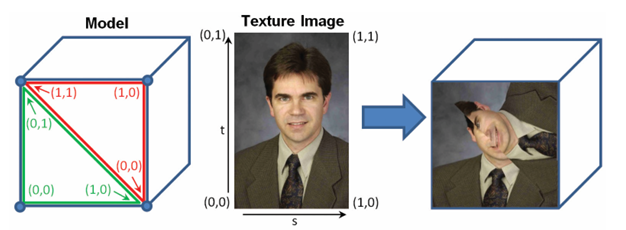
Để sử dụng ánh xạ kết cấu, cần cung cấp tọa độ kết cấu cho mỗi đỉnh của đối tượng được phủ kết cấu. OpenGL sẽ dùng các tọa độ này để xác định màu sắc của mỗi điểm ảnh được raster hóa trong mô hình, thông qua việc tra cứu màu tại texel được tham chiếu trong hình ảnh. Để đảm bảo rằng mỗi điểm ảnh trong mô hình được hiển thị sẽ được tô màu với một texel thích hợp từ hình ảnh kết cấu, tọa độ kết cấu được đặt trong một thuộc tính đỉnh (vertex attribute) để chúng cũng được nội suy bởi bộ rasterizer. Nhờ đó, hình ảnh kết cấu được nội suy và lấp đầy cùng với các đỉnh của mô hình.

Đối với mỗi tập hợp tọa độ đỉnh (x, y, z) đi qua vertex shader, sẽ có một tập hợp tọa độ kết cấu (s, t) tương ứng. Do đó, chúng ta sẽ thiết lập hai bộ đệm, một bộ đệm cho các tọa độ đỉnh (với ba thành phần x, y, và z trong mỗi mục) và một bộ đệm cho các tọa độ kết cấu tương ứng (với hai thành phần s và t trong mỗi mục). Mỗi lần vertex shader được gọi, nó sẽ nhận một đỉnh gồm cả tọa độ không gian và tọa độ kết cấu tương ứng.

Tọa độ kết cấu thường là 2D (OpenGL hỗ trợ các loại tọa độ khác nhưng chúng ta sẽ không đề cập trong chương này). Giả định rằng hình ảnh là hình chữ nhật, với tọa độ (0,0) ở góc dưới trái và (1,1) ở góc trên phải. Do đó, tọa độ kết cấu lý tưởng nên có giá trị trong phạm vi (0,1).

Hãy xem ví dụ trong Hình 5.2. Mô hình khối lập phương được xây dựng từ các tam giác. Bốn góc của một mặt khối được đánh dấu, nhưng nhớ rằng cần hai tam giác để tạo thành mỗi mặt vuông. Các tọa độ kết cấu cho mỗi trong sáu đỉnh xác định một mặt của khối lập phương được liệt kê cạnh bốn góc, với các góc ở trên cùng bên trái và dưới cùng bên phải mỗi góc gồm một cặp đỉnh. Hình ảnh kết cấu cũng được hiển thị. Các tọa độ kết cấu (được đánh dấu bằng s và t) đã ánh xạ các phần của hình ảnh (các texel) lên các điểm ảnh được raster hóa của mặt trước của mô hình. Lưu ý rằng tất cả các điểm ảnh ở giữa các đỉnh đã được tô màu với các texel xen kẽ trong hình ảnh. Điều này đạt được vì tọa độ kết cấu được gửi đến fragment shader dưới dạng một thuộc tính đỉnh và do đó cũng được nội suy giống như các đỉnh.

Trong ví dụ này, chúng ta cố ý xác định các tọa độ kết cấu dẫn đến một bề mặt được tô màu lạ, nhằm mục đích minh họa. Nếu nhìn kỹ, bạn cũng có thể thấy hình ảnh có vẻ bị kéo giãn một chút — điều này là do tỷ lệ của hình ảnh kết cấu không khớp với tỷ lệ của mặt khối lập phương tương ứng với các tọa độ kết cấu đã cho.



Với các mô hình đơn giản như khối lập phương hoặc hình chóp, việc chọn tọa độ kết cấu tương đối dễ dàng. Nhưng với các mô hình phức tạp hơn có bề mặt cong và nhiều tam giác, việc xác định tọa độ kết cấu thủ công là không thực tế. Trong trường hợp các hình học cong như hình cầu hoặc hình xuyến, tọa độ kết cấu có thể được tính toán theo thuật toán hoặc phương pháp toán học. Đối với các mô hình được xây dựng bằng các công cụ như Maya [MA21] hoặc Blender [BL21], các công cụ này cung cấp tính năng "UV-mapping" (nằm ngoài phạm vi của cuốn sách này) để giúp công việc này trở nên dễ dàng hơn.

Chúng ta hãy quay lại với việc hiển thị hình chóp, nhưng lần này sẽ phủ kết cấu với hình ảnh của gạch. Chúng ta sẽ cần phải xác định (a) một đối tượng kết cấu OpenGL để chứa hình ảnh kết cấu, (b) tọa độ kết cấu cho các đỉnh của mô hình, (c) một bộ đệm để lưu trữ tọa độ kết cấu, (d) các thuộc tính đỉnh để shader đỉnh có thể nhận và truyền tọa độ kết cấu qua pipeline, (e) một đơn vị kết cấu trên card đồ họa để chứa đối tượng kết cấu, và (f) một biến sampler uniform để truy cập đơn vị kết cấu trong GLSL, mà chúng ta sẽ tìm hiểu ngay sau đây. Các yếu tố này sẽ được mô tả trong các phần tiếp theo.

## 5.3. CREATING A TEXTURE OBJECT

Giả sử hình ảnh được hiển thị ở đây được lưu trong một tệp có tên là "brick1.jpg" [LU16].

Như đã trình bày trước đó, chúng ta có thể tải hình ảnh này bằng cách gọi hàm loadTexture() của chúng ta như sau:

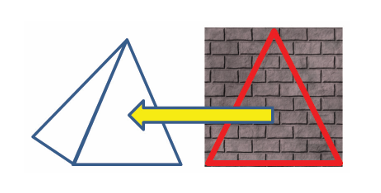
int brickTexture = Utils.loadTexture("brick1.jpg");

Lưu ý rằng các đối tượng kết cấu được nhận diện bằng các ID kiểu số nguyên, vì vậy brickTexture có kiểu dữ liệu là int.

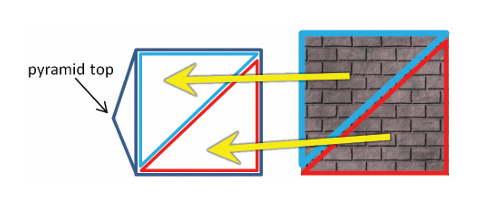
## 5.4. CONSTRUCTING TEXTURE COORDINATES

Pyramid của chúng ta có bốn mặt hình tam giác và một đáy hình vuông. Mặc dù về mặt hình học, điều này chỉ cần năm (5) điểm, chúng ta đã render nó bằng các tam giác. Điều này yêu cầu bốn tam giác cho các mặt bên và hai tam giác cho đáy vuông, với tổng cộng là sáu tam giác. Mỗi tam giác có ba đỉnh, dẫn đến tổng cộng 6\*3=18 đỉnh cần được xác định trong mô hình.

Chúng ta đã liệt kê các đỉnh hình học của pyramid trong Chương trình 4.3, trong mảng float pyramidPositions[]. Có nhiều cách để định hướng các tọa độ texture sao cho hình ảnh các viên gạch sẽ được vẽ lên pyramid. Một cách đơn giản (dù chưa hoàn hảo) là làm cho phần trên cùng của ảnh tương ứng với đỉnh của pyramid, như sau:



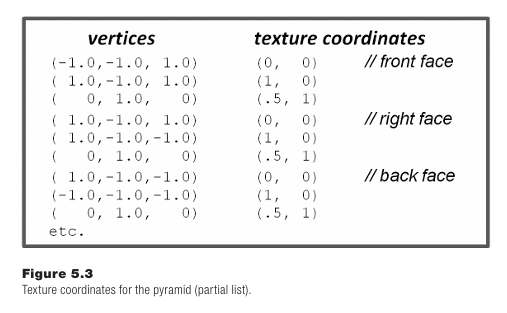
Chúng ta có thể thực hiện điều này cho cả bốn cạnh của tam giác. Chúng ta cũng cần sơn phần đáy hình vuông của kim tự tháp, phần này bao gồm hai tam giác. Một cách đơn giản và hợp lý là áp dụng toàn bộ khu vực từ bức tranh lên đó (kim tự tháp đã được nghiêng lại và đang nằm trên cạnh của nó).



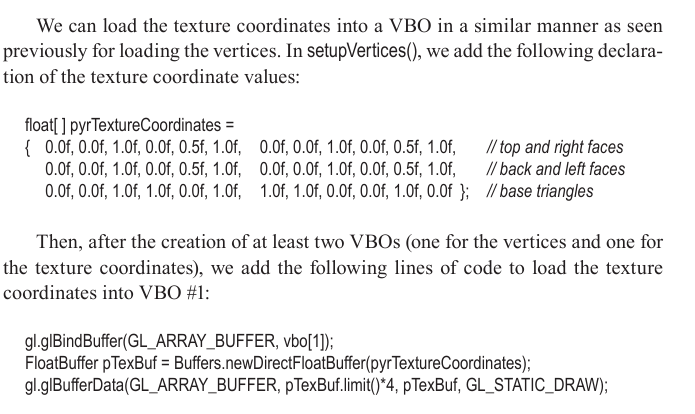
Sử dụng chiến lược rất đơn giản này cho chín đỉnh đầu tiên của kim tự tháp từ

Chương trình 4.3, tập hợp các đỉnh và tọa độ kết cấu tương ứng được hiển thị

trong Hình 5.3.



## 5.5. LOADING TEXTURE COORDINATES INTO BUFFERS



## 5.6. USING THE TEXTURE IN A SHADER: SAMPLER VARIABLES AND TEXTURE UNITS

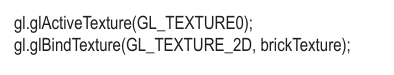
Để tối ưu hóa hiệu suất, chúng ta sẽ thực hiện thao tác ánh xạ (texturing) trực tiếp trên phần cứng. Điều này có nghĩa là shader đoạn (fragment shader) của chúng ta cần có cách truy cập vào đối tượng texture đã tạo trong ứng dụng Java/JOGL. Cơ chế để làm điều này là thông qua một công cụ đặc biệt của GLSL gọi là biến sampler uniform. Đây là một biến được thiết kế để chỉ dẫn một đơn vị texture trên card đồ họa về texel nào cần lấy hoặc "mẫu" từ một đối tượng texture đã tải.

Khai báo một biến sampler trong shader rất dễ—chỉ cần thêm nó vào tập hợp các uniform của bạn:



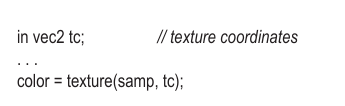
Trong đó, biến sampler của chúng ta được đặt tên là “samp”; phần “layout (binding=0)” trong khai báo chỉ rõ rằng sampler này sẽ được liên kết với đơn vị texture 0.

Một đơn vị texture (và sampler tương ứng) có thể được sử dụng để lấy mẫu từ bất kỳ đối tượng texture nào bạn muốn, và điều này có thể thay đổi trong thời gian thực. Hàm display() của bạn sẽ cần chỉ định đối tượng texture mà đơn vị texture sẽ lấy mẫu trong khung hình hiện tại. Do đó, mỗi khi bạn vẽ một đối tượng, bạn sẽ cần kích hoạt một đơn vị texture và liên kết nó với một đối tượng texture cụ thể, như sau:

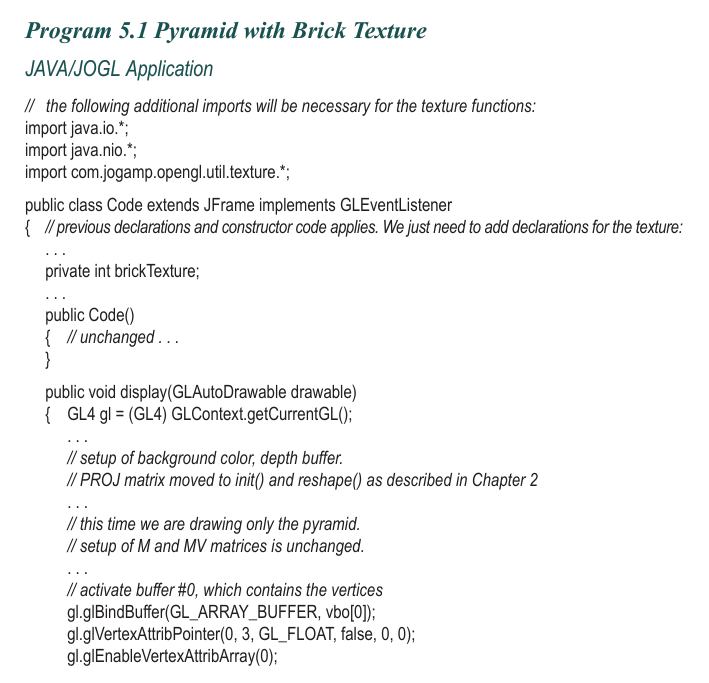


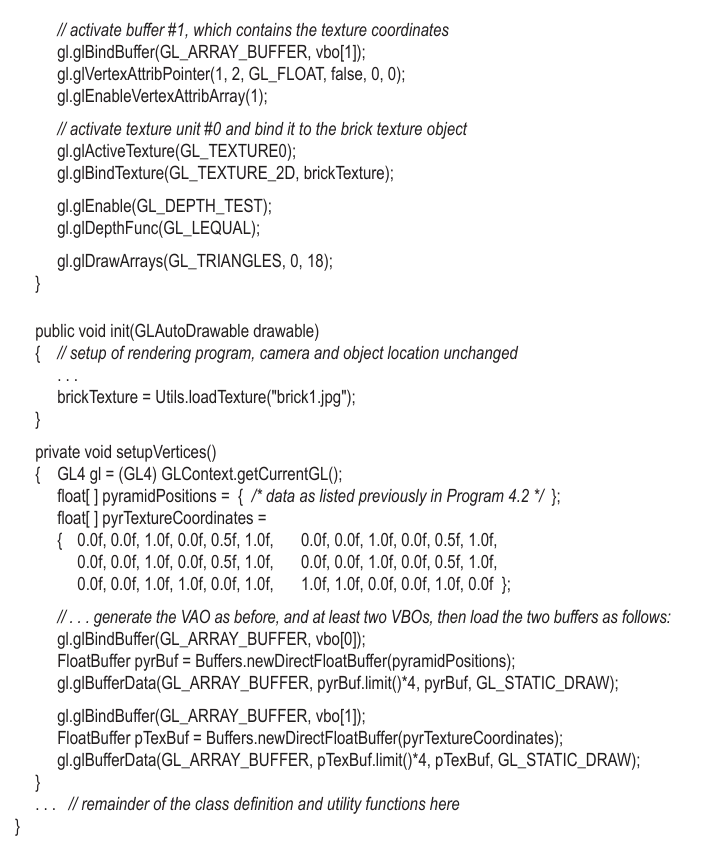
Số lượng đơn vị texture có sẵn phụ thuộc vào số lượng mà card đồ họa hỗ trợ. Theo tài liệu API của OpenGL, phiên bản OpenGL 4.5 yêu cầu ít nhất là 16 đơn vị texture cho mỗi giai đoạn shader và ít nhất 80 đơn vị texture tổng cộng cho tất cả các giai đoạn [OP21]. Trong ví dụ này, chúng ta đã kích hoạt đơn vị texture số 0 bằng cách chỉ định GL\_TEXTURE0 trong lệnh glActiveTexture().

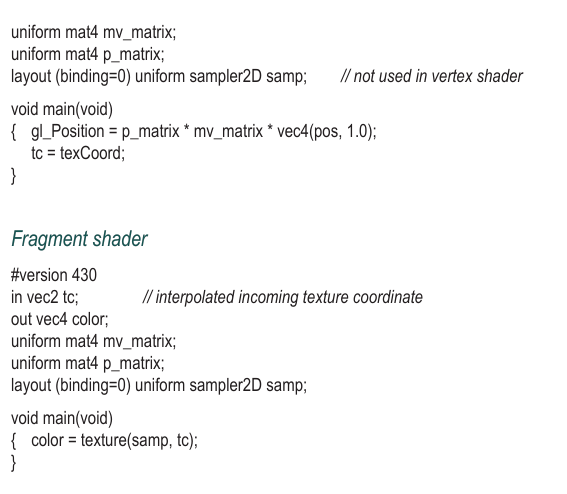
Để thực hiện ánh xạ texture thực sự, chúng ta cần thay đổi cách shader đoạn xuất ra màu sắc. Trước đó, shader đoạn của chúng ta hoặc là xuất ra một màu sắc cố định, hoặc nhận màu sắc từ một thuộc tính đỉnh. Lần này, thay vào đó, chúng ta cần sử dụng tọa độ texture được nội suy nhận từ shader đỉnh (thông qua bộ rasterizer) để lấy mẫu từ đối tượng texture, bằng cách gọi hàm texture() như sau:



## 5.7. TEXTURE MAPPING: EXAMPLE PROGRAM







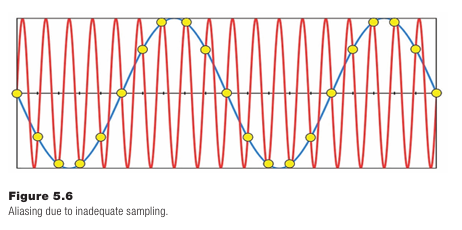
## 5.8 MIPMAPPING

Việc ánh xạ hình ảnh kết cấu lên các bề mặt thường gây ra các hiện tượng không mong muốn trong hình ảnh được kết xuất. Những hiện tượng này xuất hiện khi độ phân giải hoặc tỷ lệ của ảnh kết cấu không phù hợp hoàn hảo với khu vực đang được gán kết cấu trong cảnh 3D.

Một vấn đề thường gặp là khi độ phân giải của ảnh kết cấu thấp hơn khu vực cần gán, dẫn đến việc hình ảnh phải kéo giãn để bao phủ khu vực đó, gây mờ hoặc méo hình. Một giải pháp cho vấn đề này, tùy thuộc vào loại kết cấu, là điều chỉnh tọa độ kết cấu để giảm việc kéo giãn. Ngoài ra, sử dụng một ảnh kết cấu có độ phân giải cao hơn cũng có thể giúp cải thiện chất lượng hình ảnh.

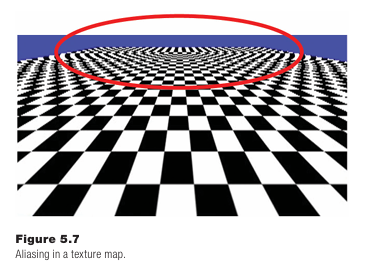
Ngược lại, khi độ phân giải của ảnh kết cấu cao hơn khu vực mà nó bao phủ, hiện tượng răng cưa (aliasing) có thể xuất hiện, dẫn đến các mẫu hình kỳ lạ hoặc hiệu ứng “nhấp nháy” trong các đối tượng chuyển động. Hiện tượng răng cưa này xảy ra do lỗi lấy mẫu, một khái niệm thường được đề cập trong xử lý tín hiệu. Khi một tín hiệu hoặc kết cấu không được lấy mẫu đủ chi tiết để phản ánh chính xác các đặc điểm của nó, nó có thể trông khác đi hoặc thậm chí tạo ra các mẫu sai trong hình ảnh kết xuất.

Điều này được minh họa qua việc so sánh các sóng được lấy mẫu và tái tạo. Hãy tưởng tượng một sóng gốc được biểu diễn bằng màu đỏ, với các điểm màu vàng đánh dấu các điểm mẫu của nó. Nếu mật độ mẫu quá thấp, những mẫu này có thể tái tạo một dạng sóng mới không khớp với sóng gốc, dẫn đến một kết quả hoàn toàn khác (được hiển thị bằng màu xanh lam).

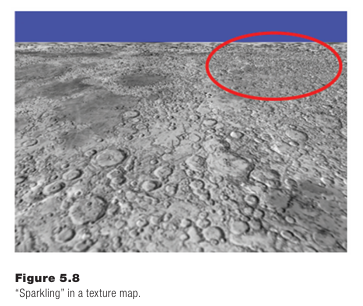


Tương tự, trong ánh xạ kết cấu, khi một hình ảnh có độ phân giải cao (với nhiều chi tiết) được lấy mẫu thưa thớt (chẳng hạn khi sử dụng biến sampler với lấy mẫu đồng đều), các màu được truy xuất sẽ không đủ để thể hiện chi tiết thực tế của hình ảnh và có thể trông như ngẫu nhiên. Nếu ảnh kết cấu có một mẫu lặp lại, hiện tượng răng cưa có thể tạo ra một mẫu khác với mẫu gốc. Nếu đối tượng được gán kết cấu đang di chuyển, các lỗi làm tròn trong việc tìm kiếm texel có thể dẫn đến sự thay đổi liên tục của điểm ảnh được lấy mẫu tại một tọa độ kết cấu nhất định, tạo ra hiệu ứng “lấp lánh” không mong muốn trên bề mặt của đối tượng đang được vẽ.

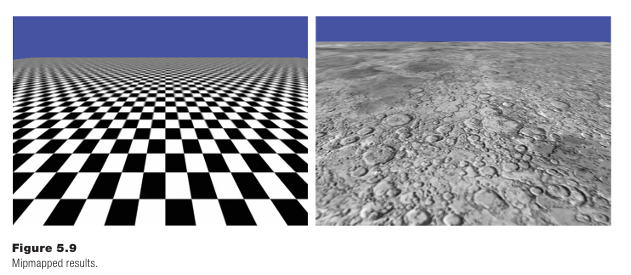
Hình 5.7 cho thấy một cảnh cận cảnh nghiêng của đỉnh một khối lập phương, được gán kết cấu bởi một hình ảnh lớn và có độ phân giải cao của một bàn cờ. Hiện tượng răng cưa hiện rõ ở phần trên của hình, nơi sự thiếu hụt lấy mẫu của bàn cờ đã tạo ra hiệu ứng "kẻ sọc". Nếu đây là một cảnh động, các mẫu này có thể thay đổi giữa các mẫu sai khác nhau như mẫu này.



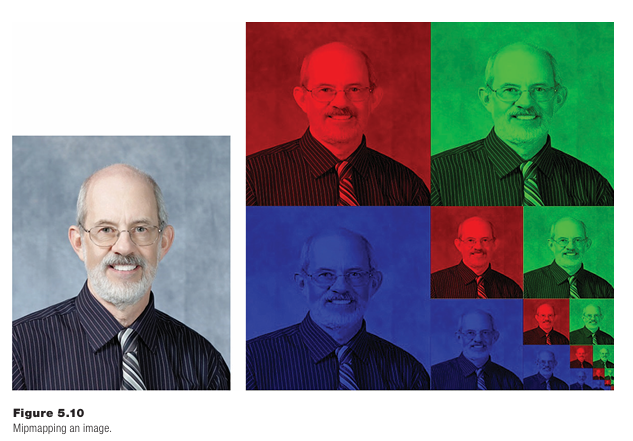
Một ví dụ khác xuất hiện trong Hình 5.8, nơi khối lập phương được gán kết cấu với hình ảnh bề mặt mặt trăng. Thoạt nhìn, hình ảnh này trông sắc nét và chi tiết. Tuy nhiên, một số chi tiết ở góc trên bên phải của hình ảnh là sai và gây ra hiệu ứng “lấp lánh” khi đối tượng khối lập phương (hoặc camera) di chuyển. (Rất tiếc, chúng tôi không thể hiển thị rõ hiệu ứng lấp lánh này trong một hình ảnh tĩnh.)



Những hiện tượng sai lệch do lỗi lấy mẫu này có thể được khắc phục phần lớn bằng một kỹ thuật gọi là mipmapping. Trong kỹ thuật này, các phiên bản khác nhau của hình ảnh kết cấu được tạo ở các độ phân giải khác nhau. OpenGL sau đó sẽ sử dụng hình ảnh kết cấu gần nhất với độ phân giải của điểm đang được kết cấu. Thậm chí, màu sắc có thể được tính trung bình giữa các hình ảnh gần nhất với độ phân giải của vùng đang được kết cấu. Kết quả của việc áp dụng mipmapping cho các hình trong Hình 5.7 và Hình 5.8 được hiển thị trong Hình 5.9.



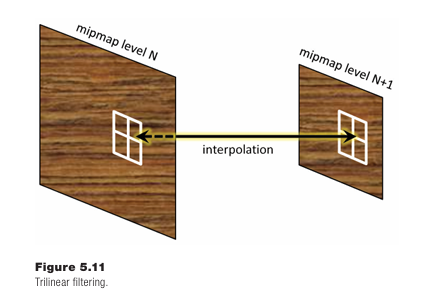
Mipmapping hoạt động bằng cách sử dụng một cơ chế thông minh để lưu trữ một loạt các bản sao của cùng một hình ảnh với độ phân giải ngày càng thấp hơn, trong một ảnh kết cấu có kích thước lớn hơn hình ảnh gốc một phần ba. Điều này được thực hiện bằng cách lưu trữ riêng các thành phần R, G và B của hình ảnh trong ba phần tư không gian hình ảnh kết cấu, sau đó lặp lại quá trình này trong phần không gian còn lại, có kích thước bằng một phần tư, cho cùng một hình ảnh nhưng với độ phân giải bằng một phần tư so với ban đầu. Quá trình phân chia này tiếp tục cho đến khi phần còn lại quá nhỏ để chứa bất kỳ dữ liệu hình ảnh hữu ích nào. Một hình ảnh ví dụ và hình ảnh minh họa về mipmap tạo ra được hiển thị trong Hình 5.10.



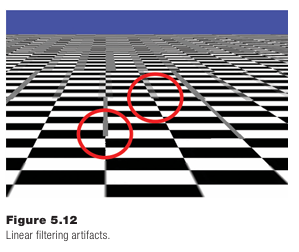
Phương pháp nhồi nhiều hình ảnh vào một không gian nhỏ (chỉ lớn hơn một chút so với không gian cần thiết để lưu trữ hình ảnh gốc) chính là nguồn gốc tên gọi của mipmapping. MIP là viết tắt của *multum in parvo* [WI83], một cụm từ tiếng Latin có nghĩa là “nhiều trong một không gian nhỏ.”

Khi áp dụng texture cho một đối tượng, mipmap có thể được lấy mẫu bằng nhiều cách khác nhau. Trong OpenGL, cách lấy mẫu mipmap có thể được chọn bằng cách đặt tham số GL\_TEXTURE\_MIN\_FILTER thành kỹ thuật giảm kích thước mong muốn, một trong các tùy chọn sau đây:

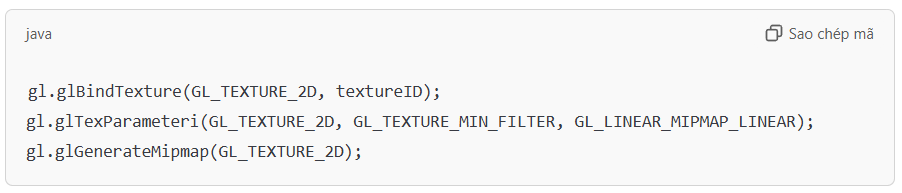
* **GL\_NEAREST\_MIPMAP\_NEAREST** chọn mipmap có độ phân giải gần giống nhất với vùng pixel đang được áp dụng texture, sau đó lấy texel gần nhất với tọa độ texture mong muốn.
* **GL\_LINEAR\_MIPMAP\_NEAREST** chọn mipmap có độ phân giải gần giống nhất với vùng pixel đang được áp dụng texture, sau đó nội suy bốn texel gần nhất với tọa độ texture. Đây được gọi là “lọc tuyến tính.”
* **GL\_NEAREST\_MIPMAP\_LINEAR** chọn hai mipmap có độ phân giải gần nhất với vùng pixel đang được áp dụng texture. Sau đó, nó lấy texel gần nhất với tọa độ texture từ mỗi mipmap và nội suy chúng. Đây được gọi là “lọc song tuyến tính.”
* **GL\_LINEAR\_MIPMAP\_LINEAR** chọn hai mipmap có độ phân giải gần nhất với vùng pixel đang được áp dụng texture. Sau đó, nó nội suy bốn texel gần nhất trong mỗi mipmap và nội suy hai kết quả đó. Đây được gọi là “lọc tam tuyến tính” và được minh họa trong Hình 5.11.



Lọc tam tuyến tính (trilinear filtering) thường được ưu tiên hơn vì các mức độ pha trộn thấp hơn thường tạo ra các hiện tượng không mong muốn, chẳng hạn như các đường ranh giới nhìn thấy được giữa các cấp độ mipmap. Hình 5.12 cho thấy ảnh cận cảnh của bảng caro khi sử dụng mipmapping với chỉ lọc tuyến tính, có các hiện tượng không mong muốn được khoanh tròn, nơi mà các đường dọc đột ngột chuyển từ dày sang mỏng ở một ranh giới mipmap. Ngược lại, ví dụ trong Hình 5.9 đã sử dụng lọc tam tuyến tính.



Mipmapping được hỗ trợ phong phú trong OpenGL. OpenGL cung cấp các cơ chế để bạn có thể tự tạo các cấp độ mipmap hoặc để OpenGL tự động tạo chúng. Trong hầu hết các trường hợp, các mipmap được tạo tự động bởi OpenGL là đủ. Điều này được thực hiện bằng cách thêm các dòng mã sau vào hàm Utils.loadTexture() (đã mô tả trước đó trong Mục 5.1), ngay sau lời gọi hàm getTextureObject():



Dòng lệnh này yêu cầu OpenGL tạo các mipmap. Texture “gạch” được kích hoạt bằng lệnh gọi glBindTexture(), sau đó lệnh gọi hàm glTexParameteri() kích hoạt một trong các bộ lọc thu nhỏ (minification filters) đã liệt kê ở trên, chẳng hạn như GL\_LINEAR\_MIPMAP\_LINEAR trong lệnh trên, bộ lọc này kích hoạt lọc tam tuyến tính (trilinear filtering).

Sau khi mipmap được tạo, tùy chọn lọc có thể được thay đổi (mặc dù điều này hiếm khi cần thiết) bằng cách gọi glTexParameteri() lại, ví dụ như trong hàm hiển thị. Mipmapping thậm chí có thể bị tắt bằng cách chọn GL\_NEAREST hoặc GL\_LINEAR.

Đối với các ứng dụng quan trọng, bạn cũng có thể tự tạo các mipmap, sử dụng phần mềm chỉnh sửa hình ảnh mà bạn ưa thích. Các mipmap này sau đó có thể được thêm vào như các cấp độ mipmap khi tạo đối tượng texture bằng cách gọi lặp lại hàm glTexImage2D() của OpenGL, hoặc hàm updateSubImage() của JOGL, cho mỗi cấp độ mipmap. Tuy nhiên, cách tiếp cận này vượt ra ngoài phạm vi của cuốn sách này.

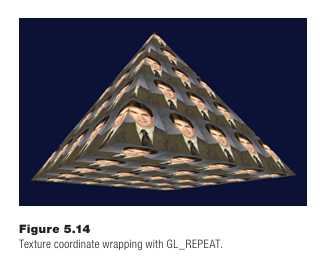
## 5.9. ANISOTROPIC FILTERING

## 5.10. WRAPPING AND TILING

Cho đến giờ, chúng ta đã giả định rằng các tọa độ texture đều nằm trong phạm vi (0,1). Tuy nhiên, OpenGL thực sự hỗ trợ các tọa độ texture có giá trị bất kỳ. Có một số tùy chọn để chỉ định điều gì xảy ra khi tọa độ texture vượt ra ngoài phạm vi (0,1). Hành vi mong muốn được thiết lập bằng cách sử dụng hàm glTexParameteri(), và một số tùy chọn bao gồm:

* **GL\_REPEAT**: Phần nguyên của tọa độ texture sẽ bị bỏ qua, tạo ra một mẫu lặp lại hoặc “xếp gạch”. Đây là hành vi mặc định.
* **GL\_MIRRORED\_REPEAT**: Phần nguyên của tọa độ bị bỏ qua, nhưng các tọa độ sẽ bị đảo ngược khi phần nguyên là số lẻ, tạo ra mẫu lặp xen kẽ giữa bình thường và đối xứng.
* **GL\_CLAMP\_TO\_EDGE**: Các tọa độ nhỏ hơn 0 và lớn hơn 1 sẽ được thiết lập thành 0 và 1 tương ứng.
* **GL\_CLAMP\_TO\_BORDER**: Các texel nằm ngoài phạm vi (0,1) sẽ được gán màu viền được chỉ định.

Ví dụ, hãy xem xét một hình chóp có tọa độ texture được định nghĩa trong phạm vi (0,5) thay vì (0,1). Hành vi mặc định (**GL\_REPEAT**), khi sử dụng ảnh texture đã hiển thị trước đó trong Hình 5.2, sẽ dẫn đến việc texture lặp lại năm lần trên bề mặt (thường được gọi là “xếp gạch”), như được hiển thị trong Hình 5.14.



Để làm cho các ô gạch có sự thay đổi luân phiên giữa chế độ bình thường và chế độ phản chiếu, chúng ta có thể chỉ định như sau:

gl.glTexParameteri(GL\_TEXTURE\_2D, GL\_TEXTURE\_WRAP\_S, GL\_MIRRORED\_REPEAT);

gl.glTexParameteri(GL\_TEXTURE\_2D, GL\_TEXTURE\_WRAP\_T, GL\_MIRRORED\_REPEAT);

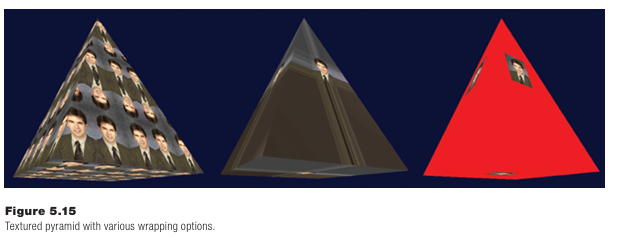
Để đặt các giá trị nhỏ hơn 0 và lớn hơn 1 về 0 và 1 tương ứng, chúng ta có thể thay thế GL\_MIRRORED\_REPEAT bằng GL\_CLAMP\_TO\_EDGE. Để các giá trị nhỏ hơn 0 và lớn hơn 1 dẫn đến màu "viền" có thể được thực hiện như sau:

gl.glTexParameteri(GL\_TEXTURE\_2D, GL\_TEXTURE\_WRAP\_S, GL\_CLAMP\_TO\_BORDER);

gl.glTexParameteri(GL\_TEXTURE\_2D, GL\_TEXTURE\_WRAP\_T, GL\_CLAMP\_TO\_BORDER);

f loat[ ] redColor = new float[ ] { 1.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f }; gl.glTexParameterfv(GL\_TEXTURE\_2D, GL\_TEXTURE\_BORDER\_COLOR, redColor, 0);

Hiệu ứng của từng tùy chọn này (lặp phản chiếu, ép về cạnh, và ép về viền), với tọa độ kết cấu từ -2 đến +3, được hiển thị theo thứ tự từ trái sang phải trong Hình 5.15.



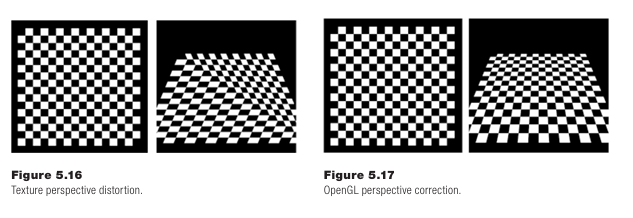
Trong ví dụ ở giữa (ép về cạnh), các điểm ảnh dọc theo cạnh của hình ảnh kết cấu được nhân rộng ra ngoài. Lưu ý rằng, như một hiệu ứng phụ, các vùng dưới bên trái và dưới bên phải của các mặt của hình chóp nhận màu từ các điểm ảnh dưới bên trái và dưới bên phải của hình ảnh kết cấu tương ứng.

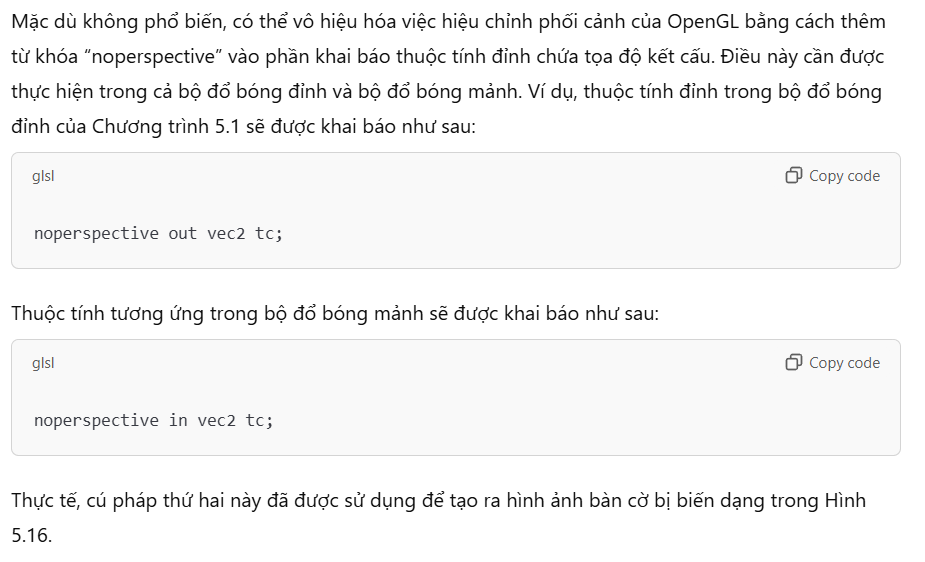
## 5.11. PERSPECTIVE DISTORTION

Chúng ta đã thấy rằng khi các tọa độ kết cấu (texture coordinates) được truyền từ bộ đổ bóng đỉnh (vertex shader) đến bộ đổ bóng mảnh (fragment shader), chúng sẽ được nội suy khi đi qua bộ phân mảnh (rasterizer). Chúng ta cũng đã thấy đây là kết quả của quá trình nội suy tuyến tính tự động được thực hiện trên các thuộc tính đỉnh.

Tuy nhiên, trong trường hợp của tọa độ kết cấu, nội suy tuyến tính có thể dẫn đến hiện tượng biến dạng đáng chú ý trong cảnh 3D với phép chiếu phối cảnh. Xét một hình chữ nhật tạo thành từ hai tam giác và được phủ một hình ảnh kẻ ô vuông, đối diện với camera. Khi hình chữ nhật xoay quanh trục X, phần trên của hình chữ nhật nghiêng ra xa camera, trong khi phần dưới lại gần camera hơn. Do đó, ta kỳ vọng các ô vuông ở phần trên sẽ nhỏ hơn và các ô vuông ở phần dưới sẽ lớn hơn. Tuy nhiên, nội suy tuyến tính của các tọa độ kết cấu sẽ khiến chiều cao của tất cả các ô vuông bằng nhau. Sự biến dạng này càng rõ rệt dọc theo đường chéo xác định hai tam giác tạo thành hình chữ nhật. Kết quả biến dạng này được thể hiện trong Hình 5.16.

May mắn thay, có các thuật toán để hiệu chỉnh biến dạng phối cảnh, và mặc định, OpenGL áp dụng một thuật toán hiệu chỉnh phối cảnh [OP14, SP16] trong quá trình phân mảnh. Hình 5.17 hiển thị hình ảnh bàn cờ xoay tròn tương tự, nhưng được kết xuất đúng cách bởi OpenGL.





## 5.12. LOADING TEXTURE IMAGE FILES USING JAVA AWT CLASSES

Trong phần còn lại của sách này, chúng ta sẽ sử dụng các lớp JOGL như Texture, TextureIO, và TextureData như đã mô tả trước đó trong chương này để tải dữ liệu hình ảnh kết cấu vào các đối tượng kết cấu OpenGL. Tuy nhiên, có thể tải trực tiếp dữ liệu tệp hình ảnh kết cấu vào các kết cấu của OpenGL bằng cách sử dụng các lớp Java AWT và một số lệnh OpenGL bổ sung. Quá trình này phức tạp hơn khá nhiều, vì vậy để đơn giản và rõ ràng, chúng ta sẽ sử dụng các lớp JOGL trong sách này khi có thể. Tuy nhiên, hiểu quá trình này (và các lệnh cụ thể) có thể thay thế cho các lớp kết cấu JOGL là điều hữu ích. Ví dụ, các lớp kết cấu JOGL không hỗ trợ kết cấu 3D, vì vậy, như chúng ta sẽ thấy sau, việc xây dựng một đối tượng kết cấu 3D của OpenGL sẽ yêu cầu chúng ta tự thực hiện nhiều bước trong Java. Chúng ta cũng sẽ sử dụng một số bước này khi xây dựng skybox, như được mô tả trong Chương 9.

Xây dựng một hàm tải kết cấu tương tự như hàm trong Chương trình 5.1 mà không sử dụng các lớp kết cấu JOGL được thể hiện trong Chương trình 5.2. Để tránh nhầm lẫn, chúng ta sẽ gọi nó là loadTextureAWT(). Hàm này bắt đầu bằng cách gọi hai hàm tiện ích (cũng được hiển thị). Hàm đầu tiên là getBufferedImage(), dùng để đọc tệp hình ảnh được chỉ định, giả định ở định dạng nhận dạng được như .jpg hoặc .png, và trả về một BufferedImage của Java chứa dữ liệu tệp hình ảnh. Hàm tiện ích thứ hai, getRGBAPixelData(), trích xuất các màu điểm ảnh RGBA từ BufferedImage được chỉ định và trả về chúng trong một mảng byte được sắp xếp theo dạng mà OpenGL yêu cầu. Trong hàm này, chúng ta có thể lật hình ảnh theo chiều dọc hoặc không (được chỉ định bởi một tham số boolean) tùy thuộc vào ứng dụng.

Sau đó, hàm loadTextureAWT() tiếp tục bằng cách sao chép mảng byte được trả về từ getRGBAPixelData() vào một ByteBuffer của Java, sử dụng phương thức Buffers.newDirectByteBuffer() của JOGL được mô tả trong Chương 4. Tiếp theo, nó tạo đối tượng kết cấu, theo cách tương tự với các bước chúng ta đã sử dụng để tạo VBO. Giống như các bộ đệm, các kết cấu được gán các ID nguyên bằng cách gọi glGenTextures(). Ở đây, biến textureID được sử dụng để giữ ID của một đối tượng kết cấu đã được tạo. Sau đó, đối tượng kết cấu được kích hoạt bằng cách gọi glBindTexture(), và sau đó chúng ta tải dữ liệu hình ảnh đã đọc vào đối tượng kết cấu đang hoạt động bằng cách sử dụng lệnh glTexImage2D(). Lưu ý tham số đầu tiên trong lệnh này chỉ định loại đối tượng kết cấu—trong trường hợp này là GL\_TEXTURE\_2D (sau này chúng ta sẽ sử dụng lệnh này để tạo các loại kết cấu OpenGL khác, như bản đồ khối kết cấu trong Chương 9 và kết cấu 3D trong Chương 14). Lệnh tiếp theo, glTexParameteri(), có thể được sử dụng để điều chỉnh một số cài đặt kết cấu, chẳng hạn như xây dựng mipmap. Khi loadTextureAWT() hoàn tất, nó trả về ID nguyên cho đối tượng kết cấu OpenGL hiện có, như đã thực hiện trong Chương trình 5.1.

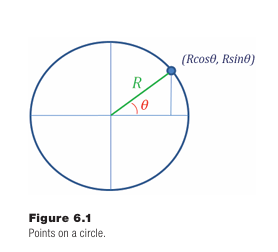
Giả sử rằng chúng ta đã đặt tất cả mã liên quan trong lớp tiện ích Utils.java, lệnh gọi đơn loadTextureAWT() sau đó sẽ tạo ID nguyên cho đối tượng kết cấu OpenGL:



# Chapter 6: 3D Models

## 6.1. PROCEDURAL MODELS—BUILDING A SPHERE

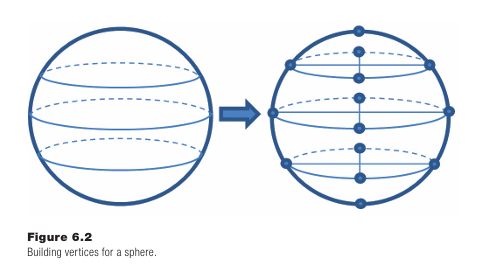
Một số loại vật thể, chẳng hạn như hình cầu, hình nón, và tương tự, có các định nghĩa toán học mà dễ dàng để tạo ra bằng thuật toán. Hãy xem xét ví dụ về một hình tròn với bán kính R; tọa độ của các điểm xung quanh chu vi của nó được xác định rõ ràng (Hình 6.1).



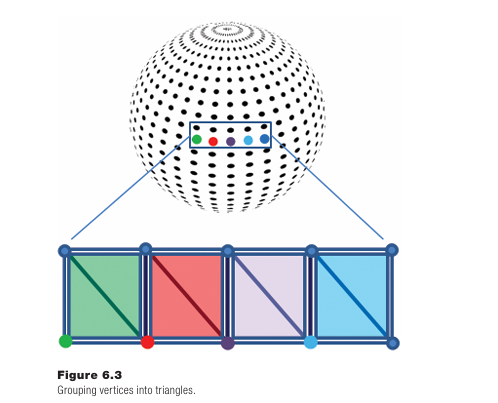
Chúng ta có thể sử dụng kiến thức về hình học của hình tròn một cách có hệ thống để tạo ra mô hình hình cầu theo thuật toán. Chiến lược của chúng ta như sau:

1. Chọn một độ chính xác, biểu thị số lượng vùng tròn mà hình cầu được chia ra. Trong hình bên trái của Hình 6.2, hình cầu được chia thành bốn vùng.

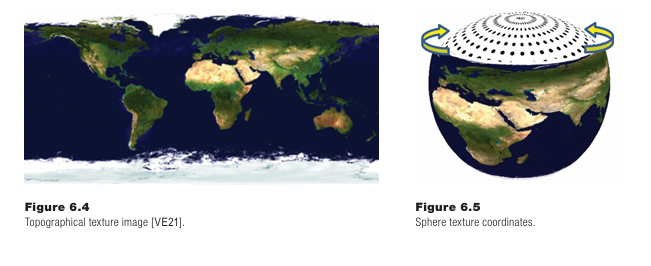
2. Chia chu vi của mỗi lớp cắt tròn thành một số điểm. Xem hình bên phải của Hình 6.2. Nhiều điểm và các lớp cắt ngang hơn sẽ tạo ra một mô hình hình cầu chính xác và mịn hơn. Trong mô hình của chúng ta, mỗi lớp sẽ có cùng số lượng điểm, bao gồm cả tại đỉnh và đáy (nơi mà các điểm đó trùng nhau).



1. Nhóm các đỉnh thành các tam giác. Một cách tiếp cận là di chuyển qua các đỉnh, tạo hai tam giác ở mỗi bước. Ví dụ, khi di chuyển dọc theo hàng các đỉnh có màu trên hình cầu trong Hình 6.3, đối với mỗi một trong năm đỉnh đó, chúng ta tạo hai tam giác được hiển thị bằng màu tương ứng (các bước được mô tả chi tiết hơn bên dưới).

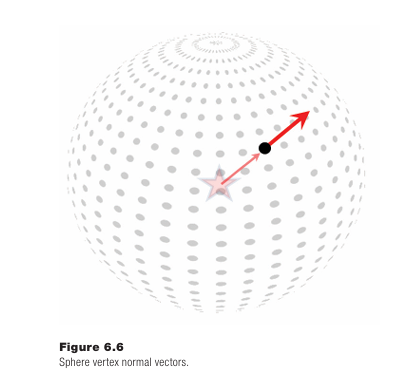


1. Chọn tọa độ kết cấu tùy thuộc vào tính chất của hình ảnh kết cấu của chúng ta. Trong trường hợp hình cầu, có nhiều hình ảnh kết cấu địa hình, chẳng hạn như hình ảnh của hành tinh Trái Đất được hiển thị trong Hình 6.4 [VE21]. Nếu chúng ta giả định loại hình ảnh kết cấu này, thì bằng cách tưởng tượng hình ảnh đó “bao quanh” hình cầu như trong Hình 6.5, chúng ta có thể gán tọa độ kết cấu cho mỗi đỉnh theo các vị trí tương ứng của các texel trong hình ảnh.



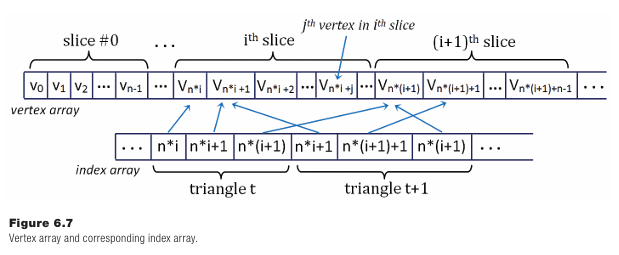
1. Việc tạo ra các vector pháp tuyến—các vector vuông góc với bề mặt của mô hình—cho mỗi đỉnh cũng thường là mong muốn. Chúng ta sẽ sử dụng chúng trong Chương 7 cho việc chiếu sáng.

Xác định vector pháp tuyến có thể khó, nhưng trong trường hợp của hình cầu, vector từ tâm của hình cầu đến một đỉnh tình cờ lại chính là vector pháp tuyến cho đỉnh đó! Hình 6.6 minh họa tính chất này (tâm của hình cầu được biểu thị bằng một “ngôi sao”).

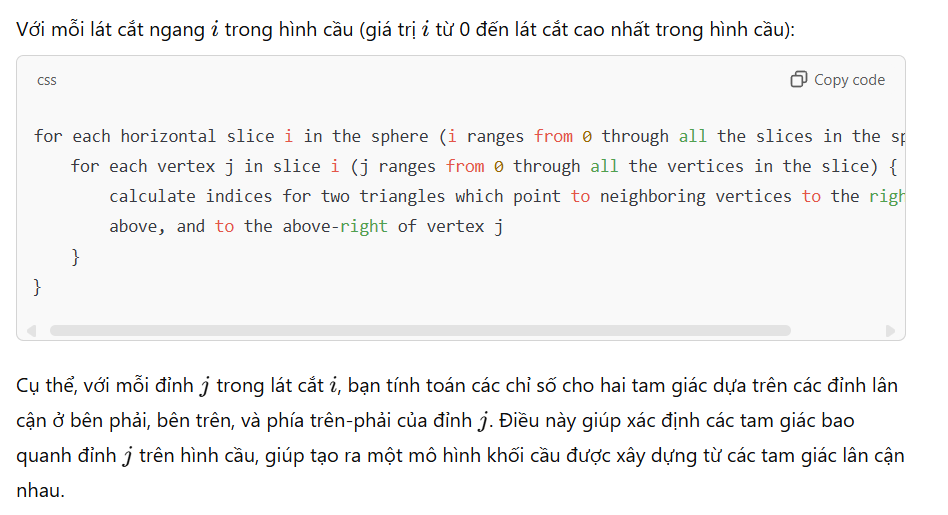


Một số mô hình định nghĩa các tam giác bằng cách sử dụng chỉ số. Lưu ý trong Hình 6.3 rằng mỗi đỉnh xuất hiện trong nhiều tam giác, điều này dẫn đến việc mỗi đỉnh sẽ được chỉ định nhiều lần. Thay vì làm vậy, chúng ta chỉ lưu trữ mỗi đỉnh một lần và sau đó chỉ định các chỉ số cho mỗi góc của tam giác, tham chiếu đến các đỉnh mong muốn. Vì chúng ta sẽ lưu trữ vị trí của một đỉnh, tọa độ kết cấu và vector pháp tuyến, điều này có thể giúp tiết kiệm bộ nhớ cho các mô hình lớn.

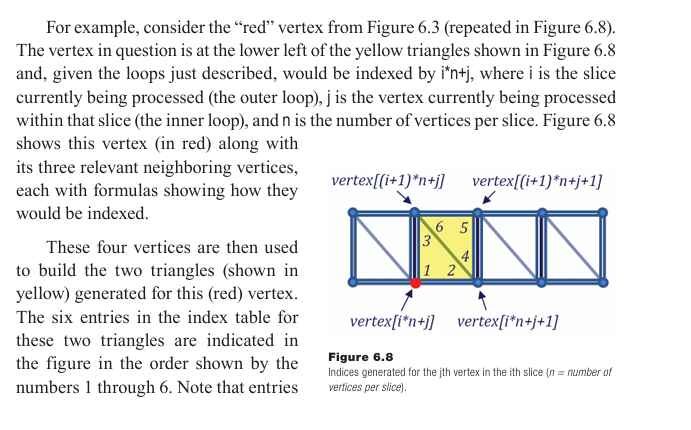
Các đỉnh được lưu trữ trong một mảng một chiều, bắt đầu từ các đỉnh trong lát cắt ngang thấp nhất. Khi sử dụng chỉ số, mảng chỉ số đi kèm sẽ bao gồm một mục nhập cho mỗi góc tam giác. Nội dung của mảng này là các tham chiếu nguyên (cụ thể là các chỉ số con) đến mảng đỉnh. Giả sử rằng mỗi lát cắt chứa n đỉnh, mảng đỉnh sẽ trông như trong Hình 6.7, cùng với một phần ví dụ của mảng chỉ số tương ứng.

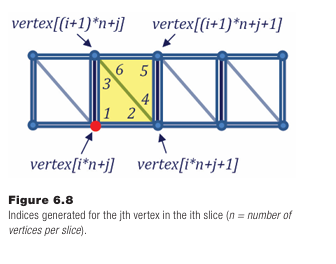


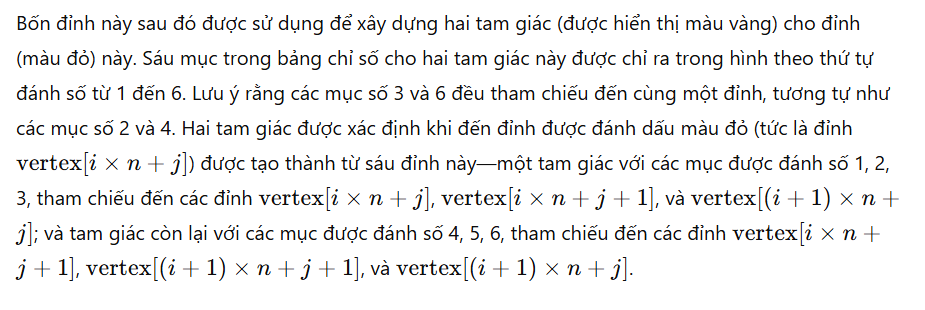
Chúng ta có thể duyệt các đỉnh theo dạng vòng tròn quanh mỗi lát cắt ngang, bắt đầu từ đáy của hình cầu. Khi đến mỗi đỉnh, chúng ta xây dựng hai tam giác tạo thành một vùng vuông ở phía trên và bên phải của nó, như đã chỉ ra trước đó trong Hình 6.3. Quá trình này được tổ chức thành các vòng lặp lồng nhau, như sau:



Ví dụ, hãy xem xét đỉnh "đỏ" trong Hình 6.3 (được lặp lại trong Hình 6.8). Đỉnh này nằm ở góc dưới bên trái của các tam giác màu vàng trong Hình 6.8 và, dựa trên các vòng lặp đã mô tả, sẽ được chỉ mục bằng công thức i×n+ji \times n + ji×n+j, trong đó iii là lát cắt hiện đang được xử lý (vòng lặp ngoài), jjj là đỉnh hiện đang được xử lý trong lát cắt đó (vòng lặp trong), và nnn là số lượng đỉnh trên mỗi lát cắt. Hình 6.8 cho thấy đỉnh này (màu đỏ) cùng với ba đỉnh lân cận liên quan của nó, mỗi đỉnh với công thức cho biết cách mà chúng sẽ được chỉ mục.





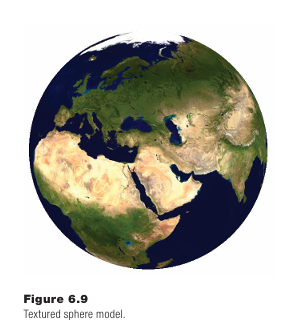




Khi sử dụng lớp Sphere, ta cần ba giá trị cho mỗi đỉnh và vector pháp tuyến, nhưng chỉ cần hai giá trị cho mỗi tọa độ kết cấu (texture coordinate). Điều này được phản ánh trong các khai báo mảng (pvalues, tvalues, và nvalues) mà sau đó được điền bằng các giá trị từ các hàm của lớp Sphere và tải vào các bộ đệm.

Điều quan trọng cần lưu ý là mặc dù sử dụng đánh chỉ mục trong quá trình xây dựng hình cầu, dữ liệu đỉnh cuối cùng của hình cầu lưu trữ trong các VBO (Vertex Buffer Objects) không sử dụng đánh chỉ mục. Thay vào đó, khi hàm setupVertices() lặp qua các chỉ số của hình cầu, nó tạo ra các mục đỉnh riêng biệt (thường trùng lặp) trong VBO cho mỗi mục chỉ số. OpenGL có cơ chế đánh chỉ mục dữ liệu đỉnh; để đơn giản, ta không sử dụng cơ chế này trong ví dụ này, nhưng sẽ dùng đánh chỉ mục của OpenGL trong ví dụ tiếp theo.

Hình 6.9 hiển thị kết quả của Chương trình 6.1, với độ chính xác là 48. Góc nhìn đã được xoay nhẹ để rõ ràng hơn. Kết cấu từ Hình 6.5 đã được tải lên như mô tả trong Chương 5.



Nhiều mô hình khác có thể được tạo theo quy trình, từ các hình dạng hình học đến các vật thể trong thế giới thực. Một trong những mô hình nổi tiếng nhất là “Utah teapot” [CH21], được phát triển vào năm 1975 bởi Martin Newell, sử dụng nhiều đường cong và bề mặt Bézier. Bộ công cụ tiện ích OpenGL (hoặc “GLUT”) [GL21] thậm chí bao gồm các thủ tục để vẽ ấm trà (!). (xem Hình 6.10). Chúng ta không đề cập đến GLUT trong cuốn sách này, nhưng các bề mặt Bézier sẽ được giới thiệu ở Chương 11.

## 6.2 OPENGL INDEXING—BUILDING A TORUS

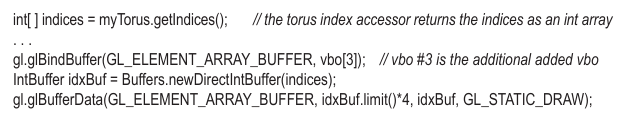
### 6.2.1 The Torus

Các thuật toán để tạo ra một hình torus có thể được tìm thấy trên nhiều trang web khác nhau. Paul Baker cung cấp một mô tả từng bước để định nghĩa một lát cắt hình tròn, sau đó xoay lát cắt đó quanh một vòng tròn để tạo thành một chiếc bánh donut, trong hướng dẫn OpenGL bump mapping của ông [PP07]. Hình 6.11 cho thấy hai góc nhìn — từ bên hông và từ trên xuống.

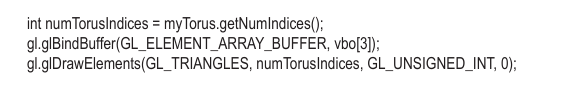
### 6.2.2 Indexing in OpenGL

Trong cả mô hình hình cầu và hình xuyến của chúng tôi, chúng tôi tạo ra một mảng các chỉ số nguyên tham chiếu vào mảng đỉnh. Trong trường hợp của hình cầu, chúng tôi sử dụng danh sách các chỉ số để xây dựng một tập hợp đầy đủ các đỉnh riêng lẻ và tải chúng vào VBO (Vertex Buffer Object) giống như các ví dụ đã thực hiện trong các chương trước. Việc khởi tạo hình xuyến và tải các đỉnh, các vector pháp tuyến, v.v. vào các bộ đệm có thể thực hiện theo cách tương tự như trong Chương trình 6.1, nhưng thay vào đó chúng tôi sẽ sử dụng chỉ mục của OpenGL.

Khi sử dụng chỉ mục của OpenGL, chúng tôi cũng tải chính các chỉ số vào một VBO. Chúng tôi tạo ra thêm một VBO nữa để chứa các chỉ số. Vì mỗi giá trị chỉ số chỉ là một tham chiếu số nguyên, trước tiên chúng tôi sao chép mảng chỉ số vào một IntBuffer của Java, sau đó sử dụng glBufferData() để tải IntBuffer này vào VBO đã thêm, và chỉ định rằng VBO này là loại GL\_ELEMENT\_ARRAY\_BUFFER (điều này thông báo cho OpenGL rằng VBO chứa các chỉ số). Mã thực hiện việc này có thể được thêm vào hàm setupVertices().



Trong phương thức display(), chúng ta thay thế lệnh glDrawArrays() bằng lệnh glDrawElements(), lệnh này yêu cầu OpenGL sử dụng VBO chứa chỉ số để tra cứu các đỉnh sẽ được vẽ. Chúng ta cũng kích hoạt VBO chứa các chỉ số bằng cách sử dụng glBindBuffer(), chỉ định VBO nào chứa các chỉ số và xác định rằng nó thuộc loại GL\_ELEMENT\_ARRAY\_BUFFER. Mã thực hiện như sau:



Điều thú vị là các shader dùng để vẽ hình cầu vẫn hoạt động mà không cần thay đổi gì cho hình xuyến, ngay cả khi chúng ta đã thực hiện các thay đổi trong ứng dụng Java/JOGL để triển khai tính năng đánh chỉ số. OpenGL có thể nhận diện sự hiện diện của GL\_ELEMENT\_ARRAY\_BUFFER và sử dụng nó để truy cập các thuộc tính của đỉnh.

Chương trình 6.2 giới thiệu một lớp tên là Torus dựa trên cách triển khai của Baker. Các biến “inner” và “outer” đề cập đến bán kính trong và ngoài tương ứng trong Hình 6.11. Biến prec (“độ chính xác”) có vai trò tương tự như trong hình cầu, với các tính toán tương tự cho số lượng đỉnh và chỉ số. Ngược lại, việc xác định các vector pháp tuyến phức tạp hơn nhiều so với hình cầu. Chúng tôi đã sử dụng chiến lược được mô tả bởi Baker, trong đó hai vector tiếp tuyến được tính toán (Baker đặt tên là sTangent và tTangent, dù thường được gọi là “tangent” và “bitangent”); tích chéo của chúng tạo thành vector pháp tuyến.

Chúng ta sẽ sử dụng lớp Torus này (và lớp Sphere đã mô tả trước đó) trong nhiều ví dụ xuyên suốt phần còn lại của sách giáo khoa.

## 6.3 LOADING EXTERNALLY PRODUCED MODELS (@)