OpenGL

http://www.opengl.org/

Bevezetés

- Tematika
  - OpenGL
    - Primitívek létrehozása
    - …
  - Előadás feldolgozása
- Hasznos oldalak

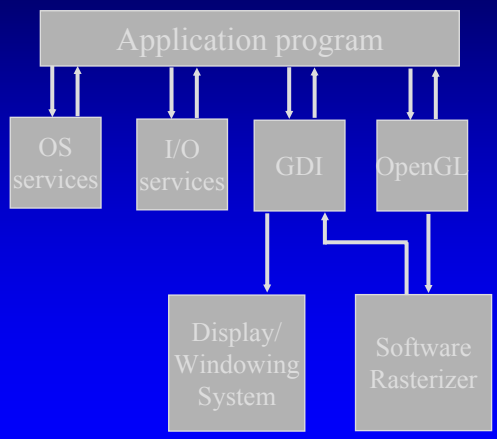
  http://www.opengl.org
  http://www.opengl.org//documentation/specs/glut/index.html
  http://www.mesa3d.org

Bevezetés

- OpenGL szabvány
  - Szoftveres felület a grafikus hardverhez
  - 3D-s grafikus és modellező könyvtár
    - Portábilis
    - Nagyon gyors
    - Gyorsabb, mint egy ray tracer
  - SGI által tervezett és optimalizált algoritmusok
- Hogyan működik az OpenGL
  - lépéseket kell megadni ahhoz, hogy megkapjuk az adott nézetet vagy megjelenést
  - 200-nál több parancs és függvény
    - Grafikus primitívek, megvilágítás, árnyékolás, textúrázás, keveredés, átlátszóság, animálás, stb.
  - Nincs ablak kezelés
  - Nincs OpenGL file formátum

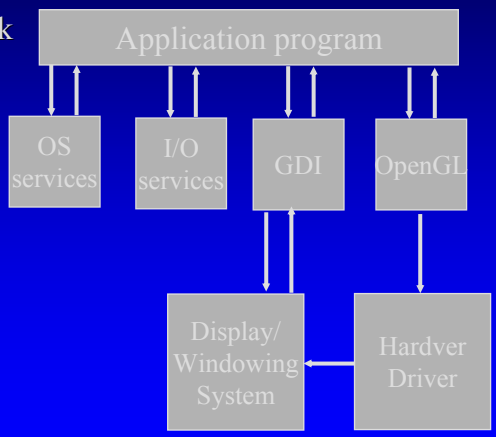
Bevezetés

- Általános megvalósítások
  - Szoftveres
  - GDI
    - Szöveg kiírás
    - 2D-s vonal rajzolás
    - ...
  - Microsoft
  - SGI
    - MMX-enhanced
    - Hivatalosan nem támogatott
  - Mesa
    - Conformance teszt



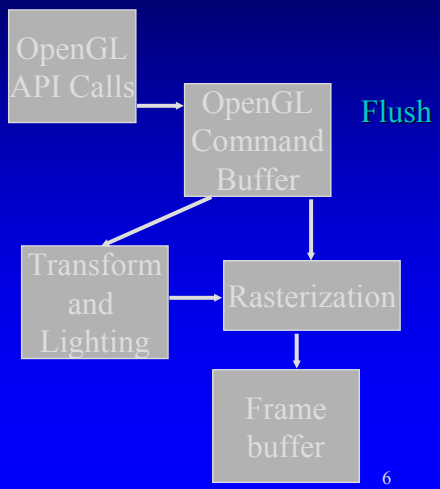
Bevezetés

- Hardveres megvalósítások
  - Speciális hardver eszköz meghajtó
  - Minden OpenGL API fv. hívás a hardver meghajtóhoz megy
  - Néha az OpenGL funkció szoftveresen van megvalósítva a meghajtó programban
  - Más funkciók pedig egyenesen a hardvert használják



OpenGL pipeline

- OpenGL alkalmazás fv. hívások
- Parancs puffer
  - Vertex adat
  - Textúra adat
  - ...
- Transzformáció és megvilágítás
  - Az objektumok geometriáját leíró pontok újraszámítása
- Raszterizálás
  - Színes kép készül



OpenGL állapotgép

- Minden parancs azonnali hatással van az aktuális renderelési állapotra
  - Flag-ek
    - A köd be van kapcsolva?
    - Engedélyezett a megvilágítás?
  - Numerikus értékek
  - Függvények segítségével állíthatóak és lekérdezhetőek

Függvény elnevezési szabályok

- <Lib prefix><Root command><Optional arg. count><Optional arg. type>

gl Color 3 f

glColor3f(…)

OpenGL utility toolkit (GLUT)

- Kezdetekben AUX
  - Kiegészítő library
- Kiváltotta a GLUT
  - Pop-up menük
  - Más ablakok kezelése
  - Joystick támogatás

http://www.opengl.org

- Első program

```
#include <GL/glut.h>
void RenderScene(void) {
  glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
  glFlush();
}
void SetupRC(void) {
  glClearColor(0.0f, 0.0f, 1.0f, 1.0f);
}
void main (void) {
  glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE |
                      GLUT_RGB);
  glutCreateWindow("Simple");
  glutDisplayFunc(RenderScene);
  SetupRC();
  glutMainLoop();
}
```


Linux Makefile (RedHat 7.3)

```
#       Makefile for OpenGL examples
APPS = simple
OBJ = $(APPS).o
SRC = $(APPS).c
CFLAGS = $(C_OPTS) -I/usr/include
LIBS = -L/usr/X11R6/lib -lX11 -lXi -lXmu -lglut -lGL -lGLU -lm -lpthread

application:$(APPS)

clean: rm -f $(APPS) *.raw *.o core a.out

realclean:          clean
        rm -f *~ *.bak *.BAK

.SUFFIXES: c o
.c.o:
        $(CC) -c $(CFLAGS) $<$

(APPS): $(OBJ)
        $(CC) -o $(APPS) $(CFLAGS) $(OBJ) $(LIBS)

depend:             makedepend -- $(CFLAGS) $(SRC)
```

OpenGL használata

- Programozási könyvtár
  - opengl32.dll
  - glu32.dll
  - opengl32.lib
  - glu32.lib
  - gl.h, glu.h
- Adattípusok
  - GLbyte
  - GLshort
  - GLint, GLsizei
  - GLfloat, GLclampf
  - GLdouble, GLclampd
  - GLubyte, GLboolean
  - GLushort
  - GLuint, GLenum, GLbitfield

Függvények az első programban

- *glutInitDisplayMode(unsigned int mode)*
  - Inicializálja a megjelenítési módot
  - *mode*
    - GLUT_SINGLE
    - GLUT_DOUBLE
    - GLUT_RGB, GLUT_RGBA
    - GLUT_DEPTH
    - GLUT_STENCIL
    - GLUT_ACCUM
    - GLUT_APLHA
- *glutDisplayFunc(void *(f)(void))*
  - Beállítja a callback fv.-t az aktuális ablakon
    - Átméretezés
    - Előtérbe kerülés
    - *glutPostRedisplay*
  - *glFlush* és *glutSwapBuffers* nem hívódik meg automatikusan ezután

Függvények az első programban

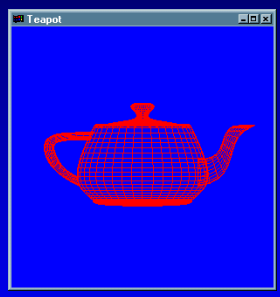
- *void glutMainLoop(void)*
  - Elindítja a GLUT eseménykezelő ciklusát
  - Nem tér vissza csak a program befejezése után
- *void glClear(GLbitfield mask);*
  - Az adott puffereket törli
  - A puffer egy tárolási terület a kép információ számára
  - Mask
    - GL_COLOR_BUFFER_BIT
    - GL_DEPT_BUFFER_BIT
    - GL_STENCIL_BUFFER_BIT
    - GL_ACCUM_BUFFER_BIT

Függvények az első programban

- *void glFlush(void)*
  - Az OpenGL pipeline-t és puffereket üríti
  - A várakozó parancsok végrehajtódnak
- *void glClearColor(GLclamf r, GLclampf g, GLclampf b, GLclampf a)*
  - Beállítja a kitöltési értéket, amit a red, green, blue és alpha (szín) pufferek törlésekor használ majd
  - Az értékek [0.0f, 1.0f] között lehetnek

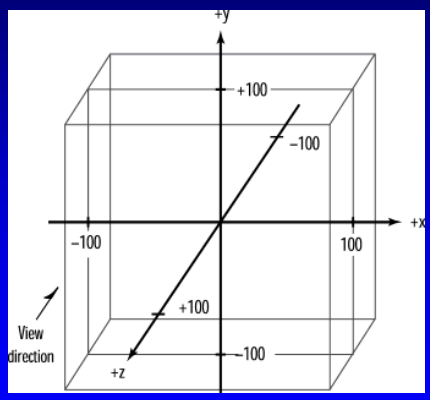
Teáskanna

```
#include <GL/glut.h>
void RenderScene(void) {
  glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
  glColor3f(1.0f, 0.0f, 0.0f);
  glutWireTeapot(0.5f);
  glFlush();
}
void SetupRC(void) {
  glClearColor(0.0f, 0.0f, 1.0f, 1.0f);
}
void main (void) {
  glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGB);
  glutCreateWindow("Teapot");
  glutDisplayFunc(RenderScene);
  SetupRC();
  glutMainLoop();
}
```



Vonalak, pontok, poligonok

- Az objektumok és a látvány egyszerű, kicsi alakzatokból épülnek fel
  - Primitívek
    - Egy vagy 2 dimenziós objektumok
- 3D-s festővászon
  - OpenGL parancsok
  - OpenGL függvények



Vertex

- *glVertex*
  - 2, 3 vagy 4 paraméter
  - Különböző típusok
  - Példa

    2D

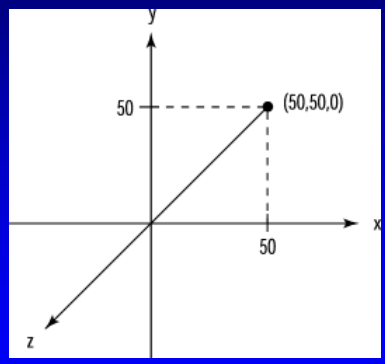
    glVertex2f(50.0f, 50.0f)

    3D

    glVertex3f(50.0f, 50.0f, 0.0f)

    3D homogén koordináták

    glVertex4f(50.0f, 50.0f, 0.0f, 1.0f)



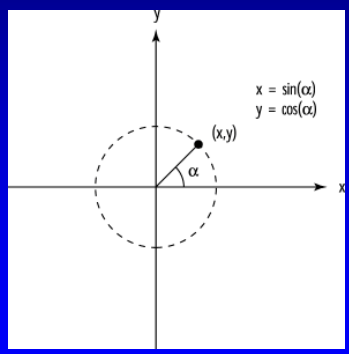
Vertex

- *void glBegin(GLenum mode)*
  - Milyen primitívet kell létrehozni
  - *mode*
    - GL_POINTS
    - GL_LINES
    - GL_LINE_STRIP
    - GL_LINE_LOOP
    - GL_TRIANGLES
    - GL_TRIANGLE_STRIP
    - GL_TRIANGLE_FAN
    - GL_QUADS
    - GL_QUAD_STRIP
    - GL_POLYGON
- void glEnd(void)
  - A vertex-ek listájának a végét jelzi. A *glBegin()*-nel párban kell használni
    - glVertex
    - glColor
    - glIndex
    - glNormal
    - glEvalCoord
    - glCallList
    - glCallLists
    - glTextCoord
    - glEdgeFlag
    - glMaterial

Vertex

- Pontok rajzolása
  - 0°-360°
  - A szögek radiánban vannak megadva
  - 3-szor rajzolja ki a kört
    - A z koordinátát alig-alig változtatva
  - *glutSpecialFunc*
    - Regisztrálja azt a fv-t, amely a speciális billentyűk leütésekor hívódik meg
  - *glRotatef* később

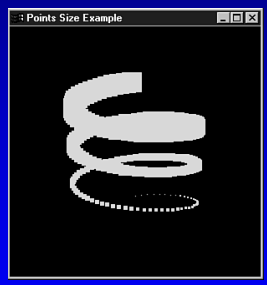
- Példa: points.c



Vertex - pont méret

- *void glPointSize(GLfloat size)*
  - *size* a pont közelítő átmérője
  - Nem mindegyik méret támogatott
- Példa
  GLfloat sizes[2];
  GLfloat step;
  glGetFloatv(GL_POINT_SIZE, sizes);
  glGetFloatv(
  GL_POINT_SIZE_GRANULARITY, &step);
- A glBegin és glEnd-en kívül szabad meghívni
- Ha kisebb vagy nagyobb értéket állítunk be a megengedettnél, akkor a legkisebb/legnagyobb értéket használja

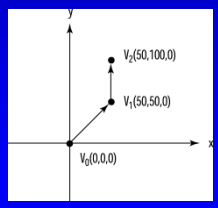
- Példa: pointsz.c



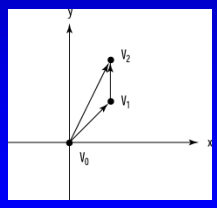
Vertex - vonal rajzolás

- *glBegin(GL_LINES)*
  glVertex3f(0.0f, 0.0f, 0.0f);
  glVertex3f(50.0f, 50.0f, 50.0f);
  glEnd();
  - Páratlan számú vertex esetén az utolsót nem veszi figyelembe
- *glBegin(GL_LINE_STRIP)*
  / GL_LINE_LOOP */*
  *glVertex3f(0.0f, 0.0f, 0.0f); /*v1*/*
  *glVertex3f(50.0f, 50.0f, 50.0f); /*v2*/*
  *glVertex3f(50.0f, 100.0f, 0.0f); /*v3*/*
  glEnd();

- Példa: lines.c



GL_LINE_STRIP

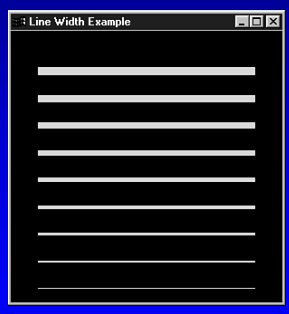


GL_LINE_LOOP

Vertex - vonal vastagság

- *glLineWidth(GLfloat width)*
- Példa
  GLfloat sizes[2];
  GLfloat step;
  glGetFloatv(
  GL_LINE_WIDTH_RANGE, sizes);
  glGetFloatv(
  GL_LINE_WIDTH_GRANULARITY,
  &step);

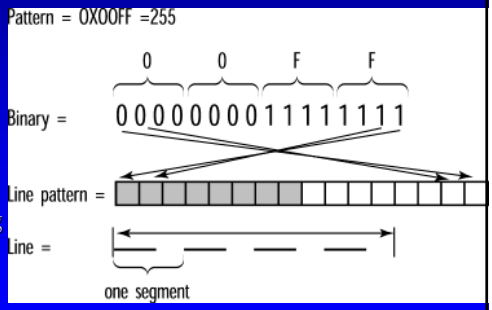
- Példa: linesw.c



Vertex - vonal „szaggatás”

- *glEnable(GL_LINE_STIPPLE)*
- *glDisable (GL_LINE_STIPPLE)*
- *void glLineStipple(*
  GLint factor,
  GLushort pattern)
- *Pattern*
  - 16 bit-es érték
  - 0-s bit a least significant
- *factor*
  - A minta szélességét adja meg
  - Pl. 5 esetén mindegyik bit a mintában 5 pixel-t jelent

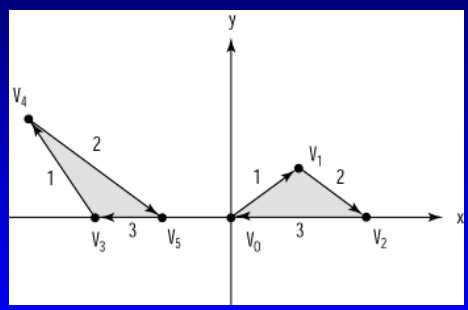
- Példa: lstipple.c



Vertex - háromszög

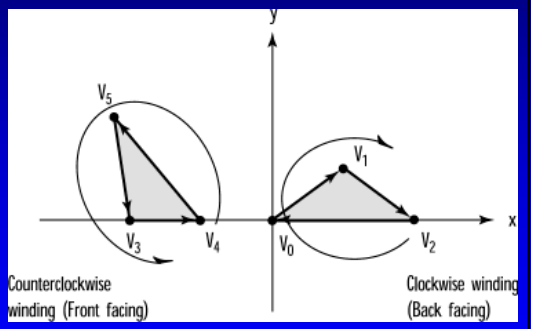
- *glBegin(GL_TRIANGLES);*
  *glVertex2f(0.0f, 0.0f); /*V0*/*
  *glVertex2f(25.0f, 25.0f); /*V1*/*
  *glVertex2f(50.0f, 0.0f); /*V2*/*

  *glVertex2f(-50.0f, 0.0f); /*V3*/*
  *glVertex2f(-75.0f, 50.0f); /*V4*/*
  *glVertex2f(-25.0f, 0.0f); /*V5*/*
  glEnd():
- Mindegyik poligon előállítható háromszögekből
- A videokártyák optimalizálva vannak a háromszögek kirajzolására



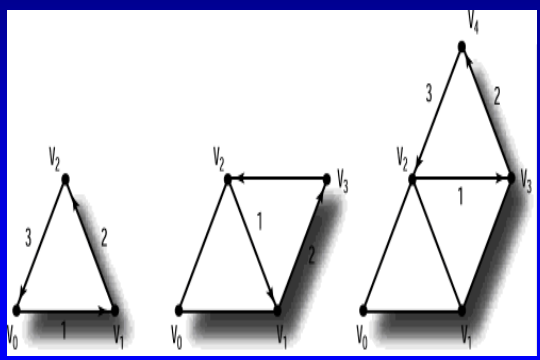
Vertex - „irányítottság”

- OpenGL-ben alapértelmezésben órajárással ellentétes irányítottságú elölnézet
- Jobb-sodrású
- Fontos pl. a színezésnél, hátsó terület elrejtésénél
- *glFrontFace(GL_CW)*
  - GL_CW
  - GL_CCW



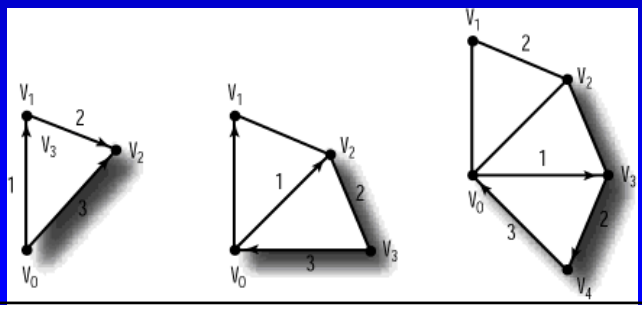
Vertex - háromszögcsík

- GL_TRIANGLE_STRIP
  - Megőrzi az irányítottságot mindegyik háromszögre
- Előnyök
  - Az első három pont megadása utan egy új háromszöghöz csak egy pontot kell megadni
  - Kevesebb vertex, gyorsabb végrehajtás a transzformációknál



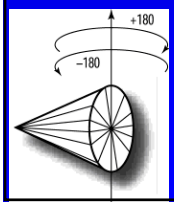
Vertex – háromszög-legyező

- TRIANGLE_FAN
  - Egy középpontnál kapcsolódó háromszögek csoportja
- Az első vertex a középpont
- Órajárással megegyező



Vertex - szolíd objektumok

- Színezés
  - A színek pontonként van megadva
  - *glShadeModel(GL_FLAT)*
    - GL_SMOOTH
- Rejtett felszín eltávolítás
  - Az alját később rajzolja ki
  - Mélység ellenőrzés
    - Pixel *z* koordinátája meghatározza
  - *glEnable(GL_DEPTH_TEST)*
  - *glDisable()*

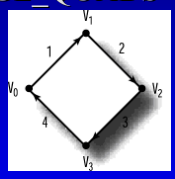


Példa: triangle.c

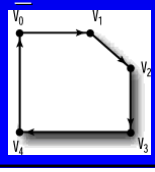
- Belső/külső oldalak kirajzolásának letiltása
  - Alapértelmezéskor kirajzolja
  - *glEnable(GL_CULL_FACE)*
  - *glCullFace(GL_FRONT)*
    - GL_BACK
- Poligon módok
  - Alapértelmezésben szolíd
  - *glPolygonMode(GL_BACK, GL_LINE)*
  - GL_POINT, GL_FILL
  - GL_FRONT, GL_FRONT_AND_BACK

Vertex - más primitívek

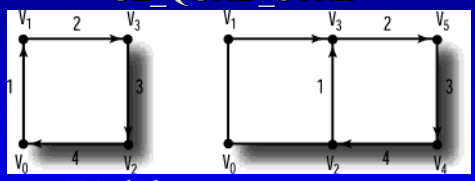
- Négy oldalú poligon
  - GL_QUADS



- Általános poligon
  - GL_POLYGON



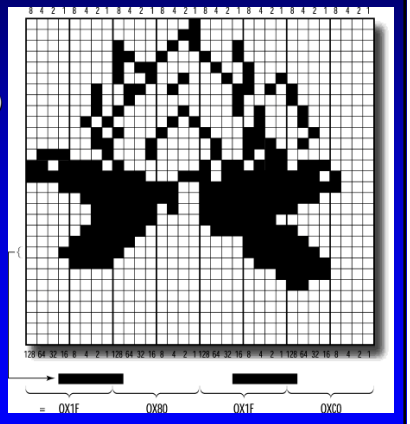
- Négy oldalú csík
  - GL_QUAD_STRIP



- Téglalap
  - *glRectf(GLfloat x1, GLfloat y1, GLfloat x2, GLfloat y2,)*

Poligonok kitöltése

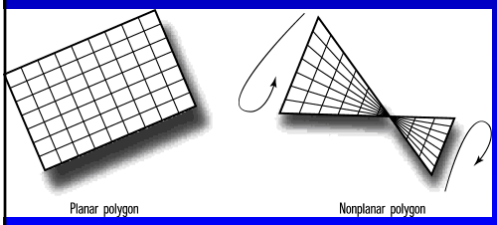
- Texture mapping később
- Szaggatott vonal minta
  - *glEnable(GL_POLYGON_STIPPLE)*
  - *glPolygonStipple(pBitmap)*
    - *GLubyte *pBitmap*
    - 32x32
    - A legmagasabb helyiértékű bit elsőként
    - Alulról felfele haladva
    - A minta nem forog a poligonnal
    - Csak egyszerű poligon kitöltésre használjuk

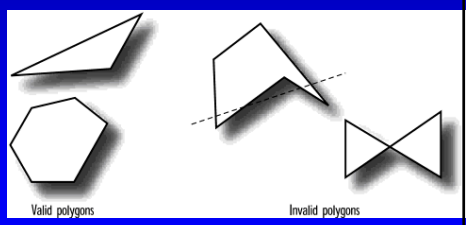


Példa: pstipple.c

Poligonokra vonatkozó szabályok

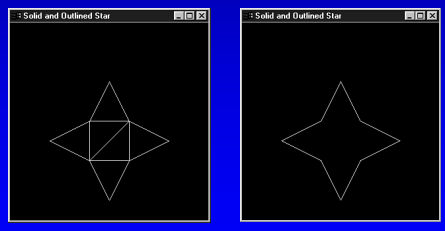
- Minden pont egy síkon van
- A poligonok élei nem metszhetik egymást
- Konvex-ek





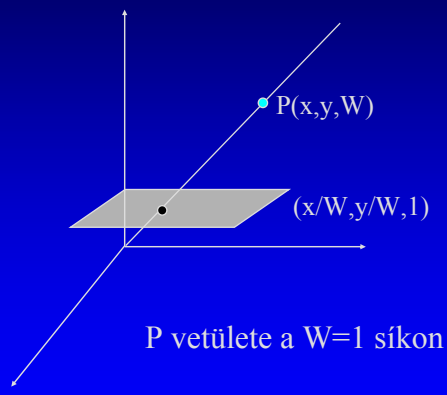
Parcellák és élek

- Konvex poligonokból előállítható nem konvex poligon
- Amikor kitöltjük a poligonokat, akkor nem látjuk az éleket
- *edge flag*
  - *glEdgeFlag(True)*
    - *False*
    - *Poligon mód: GL_LINE, GL_POINT*
- Példa: star.c



Homogén koordináták

- $(x,y) \rightarrow (x,y,W)$
- $(x,y,W) = (x',y',W')$, ha $\exists\alpha$: $x'=\alpha x$, $y'=\alpha y$, $W'=\alpha W$
- Egy ponthoz végtelen sok (x,y,W) tartozik
- (0,0,0) nem megengedett
- Ha $W\neq 0$; (x/W,y/W,1) a szokásos jelölése (x,y)-nak
- Ha W=0; (x,y,0) végtelen távoli pont



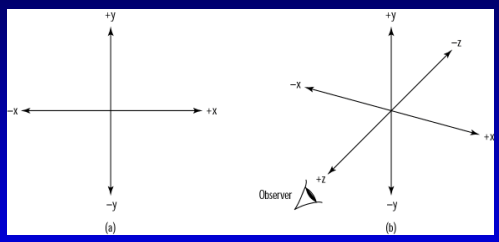
P vetülete a W=1 síkon

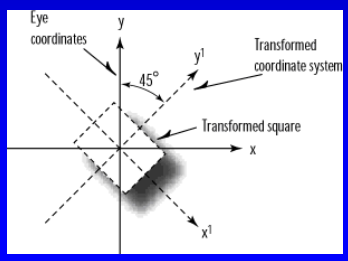
Koordináta transzformációk

- OpenGL transzformációk
  - Viewing
    - A néző vagy a kamera helyének a megadása
  - Modellező (Modeling)
    - Az objektumok mozgatása
  - Modelview
    - Dualitás a nézeti és a modellező transzformációk között
- Projekció
  - A nézet vágása és méretezése
- Nézeti
  - A végleges eredmény ablakra való leképezése

Szem koordináták

- A megfigyelő nézőpontja
- Virtuálisan rögzített koordináta rendszer





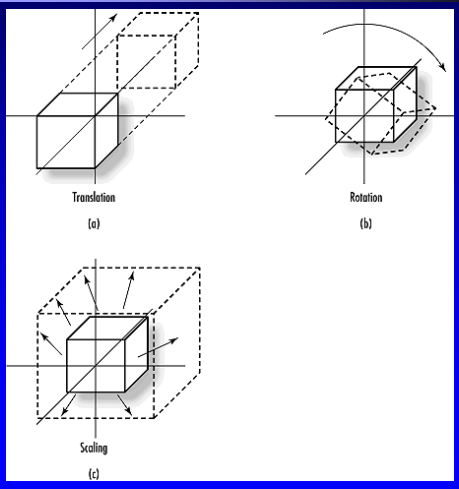
A monitorra merőleges (ahogy a megfigyelő látja)

Viewing transzformációk

- Ez hajtódik végre először
- Nézőpont meghatározása
  - (0, 0, 0)
  - A *z* tengely negatív része felé nézve
  - A pozitív értékek a *z* tengelyen a megfigyelő mögött vannak
  - *void gluLookAt(GLdouble eyex, GLdouble eyey, GLdouble eyez, GLdouble centerx, GLdouble centery, GLdouble centerz, GLdouble upx, GLdouble upy, GLdouble upz)*
- A megfigyelő pont transzformálása
- Ezt kell legelőször definiálni

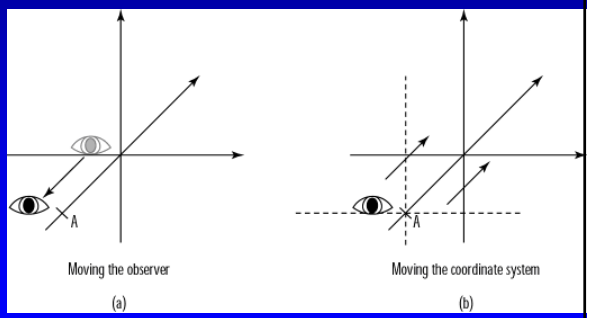
Modellező transzformációk

- A modell vagy annak egy részének a manipulálására használjuk
- A végső kinézetet befolyásolja



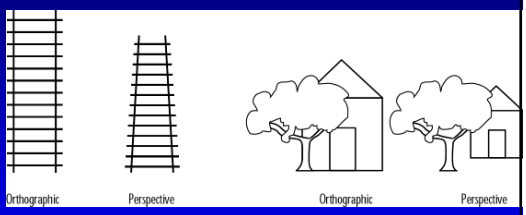
Modelnézeti dualitás

- A viewing transzformáció és a modellező transzformációk duálisak



Projekció/Nézeti transzformáció

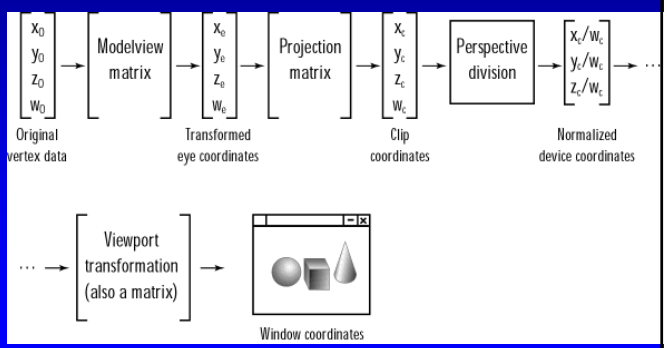
- Utolsóként van alkalmazva
- Definiálja a nézeti teret és vágósíkokat
  - Ortogonális
    - 2D-s rajzok
    - CAD
  - Perspektivikus
    - Valós élet



- Nézeti transzformáció
  - 2D-s leképzés az ablakra
  - *glViewport()*

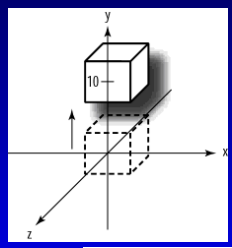
Mátrixok

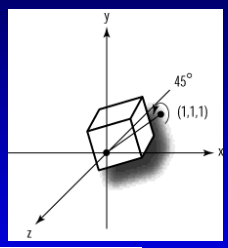
- Transzformációs sor
  - Modellnézeti
  - Projekciós
  - Nézeti

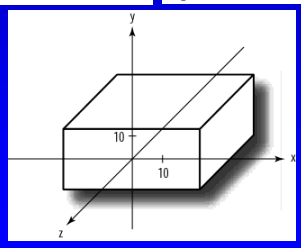


Modelnézeti mátrix

- 4x4-es mátrix
- A vertex koordinátákat transzformálja
- *void glTranslatef(GLfloat x, GLfloat y, GLfloat z)*
- *void glRotatef(GLfloat angle, GLfloat x, GLfloat y, GLfloat z)*
- *glScale(GLfloat x, GLfloat y, GLfloat z)*

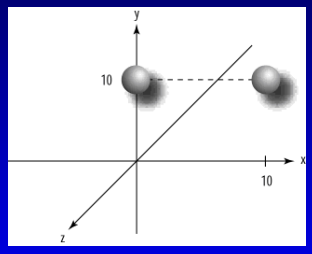


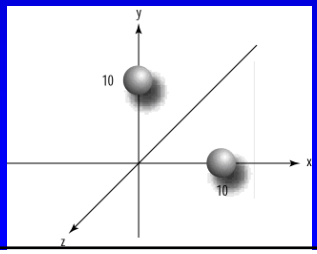




Az egység mátrix

- A transzformációkat egymásután használva azok hatása összegződik
- A két utasítás segítségével a Modelview mátrix-ba betöltjük az egységmátrixot
  - *glMatrixMode(GL_MODELVIEW) glLoadIdentity()*
  - *GL_MODELVIEW, GL_PROJECTION, GL_TEXTURE*

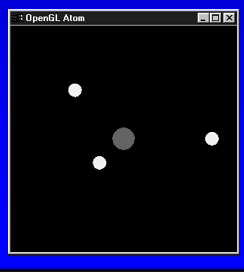


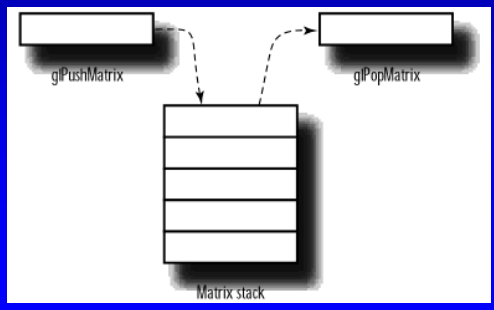


Mátrix vermek

- *glGet(GL_MAX_MODELVIEW_STACK_DEPTH)* (Microsoft 32)
- *glGet(GL_MAX_PROJECTION_STACK_DEPTH)* (Microsoft 2)
- *GL_STACK_OVERFLOW*
- *GL_STACK_UNDERFLOW*
- *void glPushMatrix(void)*
- *void glPopMatrix(void)*

Példa: atom.c



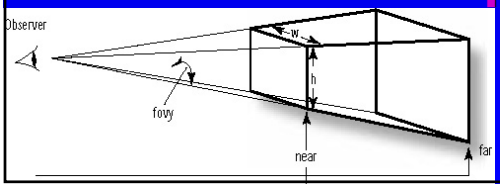


Vetületek használata

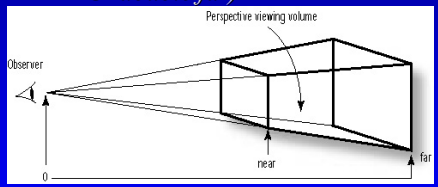
- A vetület mátrix meghatározza a nézeti tér méretét és alakját
  - Ortogonális

    Példa: ortho.c
  - Perspektivikus

    Példa: perspect.c



- Perspektív
  - Piramis szelet
    - *glFrustum(GLdouble left, ..., GLdouble far)*



- *void gluPerspective(GLdouble fovy, GLdouble aspect, GLdouble znear, GLdouble zfar)*
  - *fovy* field of view
  - *aspect*

Perspektív vetület

```
// Change viewing volume and viewport.  Called when window is resized
void ChangeSize(GLsizei w, GLsizei h)   {
GLfloat fAspect;
// Prevent a divide by zero
        if (h == 0)  h = 1;
// Set Viewport to window dimensions
   glViewport(0, 0, w, h);
        fAspect = (GLfloat)w/(GLfloat)h;
// Reset coordinate system
        glMatrixMode(GL_PROJECTION);
        glLoadIdentity();
// Produce the perspective projection
        gluPerspective(60.0f, fAspect, 1.0, 400.0);
        glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
        glLoadIdentity();
}
```

Példa: solar.c

Mátrix műveletek

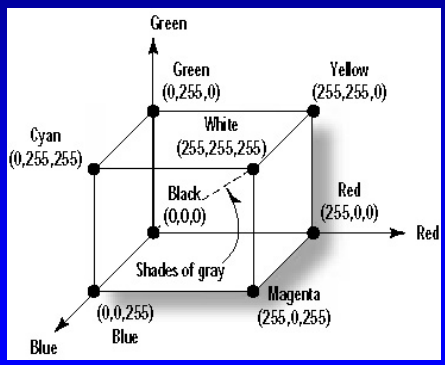
- Gyorsabbak a magasabb szintű műveletek
- Mátrix betöltés
  - *GLfloat m[] = {*
    1.0, 0.0, 0.0, 0.0,
    0.0, 1.0, 0.0, 0.0,
    0.0, 0.0, 1.0, 0.0,
    0.0, 0.0, 0.0, 1.0}
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
    glLoadMatrix(m);

$$\begin{bmatrix} a_0 & a_4 & a_8 & a_{12} \\ a_1 & a_5 & a_9 & a_{13} \\ a_2 & a_6 & a_{10} & a_{14} \\ a_3 & a_7 & a_{11} & a_{15} \end{bmatrix}$$

- Saját transzformáció végrehajtása
  - *GLfloat m[] = {*
    1.0, 0.0, 0.0, 10.0,
    0.0, 1.0, 0.0, 0.0,
    0.0, 0.0, 1.0, 0.0,
    0.0, 0.0, 0.0, 1.0}
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
    glMulMatrix(m);
- Más transzformációk
  - Árnyék rajzolás
  - ...

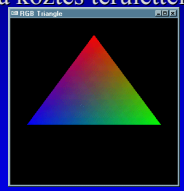
Szín, fény, anyag

- Szín mélység
  - 4, 8, 16, 24
  - 32 - true color
    - 32 bit-es cím határra igazítja a pixel adatot
    - Pixelenként 1 byte-ot veszítünk
    - Gyorsabb
  - 16 bit
    - Gyakorlatilag ugyanaz mint a 24 bit
    - Memória megtakarítás
    - gyorsítás
- RGB kocka



Szín

- A rajzolási szín beállítása
  - *void glColor<x><t>(r, g, b, a)*
    - <x> argumentumok száma
      - alfa - átlátszóság
    - <t> argumentumok típusa
      - b, d, f, i, s, ub, ui, us
  - *glColor3f*
    - Intenzitás
  - *glColor3ub*
    - glColor3ub(0, 255, 128) = RGB(0, 255, 128)
- Ha minden vertex-re külön definiáljuk a színt, akkor mi lesz a köztes területtel?



  - *glShadeModel()*
    - GL_FLAT – utolsó vertex színe
      - GL_POLYGON esetében az első vertex színe
    - GL_SMOOTH

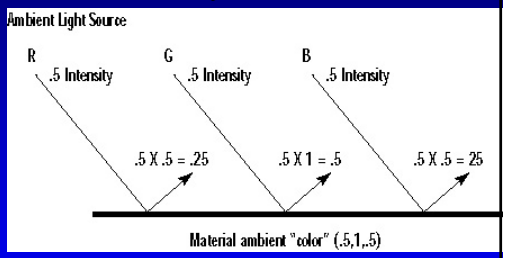
Fény

Példa: jet.c

- A tárgyak színét sok minden befolyásolja
  - Ambiens – környező
    - Van forrás
    - A sugarak iránytalanok
    - Az objektumokat megvilágítva ilyen fénnyel olyan, mint ha minden irányból minden felületet érne a fény
  - Diffúz - szórt
    - Bizonyos irányból jön
    - Egyenletesen szétszóródik a felszínen
  - Spekuláris - tükröződő
    - Irányított
    - Bizonyos irányokból élesen tükröződik
    - Fényes foltot hagy a felületen
- Egy egyszerű forrás előállítható a három típus segítségével

Anyag

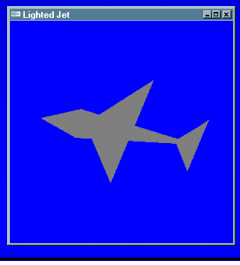
- Egy poligon piros
- A poligon egy olyan anyagból készült, amely a piros fényt tükrözi
  - Definiálni kell az anyag tükrözési tulajdonságait az ambiens, diffúz és a spekuláris fényforrásokra
  - Fény kibocsátási tulajdonság
    - Hátsó lámpa
    - ...
- Ambient fény



- Diffúz és Spekuláris
  - Az intenzitás függ a fény
    - Beesési szögétől
    - Távolságtól
    - Hígulási tényezők (köd)

Fény hozzáadás I.

- Megvilágítás engedélyezése
  - *glEnable(GL_LIGHTING)*
  - Használja az anyag tulajdonságokat, a fény paramétereket a vertex-ek színének kiszámításánál



- Megvilágítási modell
  - *glLightModelfv(GLenum, const GLfloat *params)*
    - GL_LIGHT_MODEL_AMBIENT
    - GL_LIGHT_MODEL_LOCAL_VIEWER
    - GL_LIGHT_MODEL_TWO_SIDE
    - Default (0.2, 0.2, 0.2, 1.0)
  - Példa

```
GLfloat ambientLight[] =
{ 1.0f, 1.0f, 1.0f, 1.0f };
glEnable(GL_LIGHTING);
glLightModelfv(
GL_LIGHT_MODEL_AMBIENT,
ambientLight);
```


Fény hozzáadás II.

- Anyag tulajdonságok
  - glMaterialfv(GLenum, GLenum, const GLfloat *params)
    - face
      - GL_FRONT
      - GL_BACK
      - GL_FRONT_AND_BACK
    - pname
      - GL_AMBIENT
      - GL_DIFFUSE
      - GL_SPECULAR
      - GL_EMISSION
      - GL_SHININESS
      - GL_AMBIENT_AND_DIFFUSE
      - GL_COLOR_INDEXES
- Példa

```
GLfloat  gray[] = {
0.75f, 0.75f, 0.75f, 1.0f };
glMaterialfv(GL_FRONT,
GL_AMBIENT_AND_DIFFUSE,
gray);
glBegin(GL_TRIANGLES);
  glVertex3f(-15.0f, 0.0f, 30.0f);
  glVertex3f(0.0f, 15.0f, 30.0f);
  glVertex3f(0.0f, 0.0f, -56.0f);
glEnd();
```

Fény hozzáadás III.

- Color tracking
  - Az anyagi tulajdonságokat csak *glColor* hívásával állítjuk be
  - *glEnable(GL_COLOR_MATERIAL)*
  - *glColorMaterial(GLenum, GLenum)*
    - face
      - GL_FRONT
      - GL_BACK
      - GL_FRONT_AND_BACK

  Példa: ambient.c

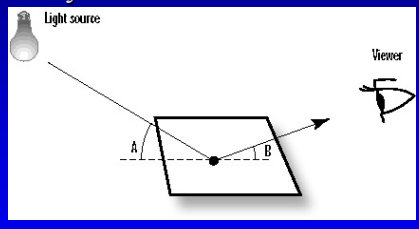
- mode
  - GL_EMISSION
  - GL_AMBIENT
  - GL_DIFFUSE
  - GL_SPECULAR
  - GL_AMBIENT_AND_DIFFUSE
- Példa

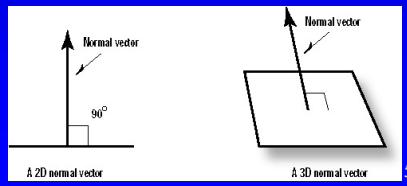
```
glEnable(GL_COLOR_MATERIAL);
glColorMaterial(GL_FRONT,
GL_AMBIENT_AND_DIFFUSE);
glColor3f(0.75f, 0.75f, 0.75f);
glBegin(GL_TRIANGLES);
 glVertex3f(-15.0f, 0.0f, 30.0f);
 glVertex3f(0.0f, 15.0f, 30.0f);
 glVertex3f(0.0f, 0.0f, -56.0f);
glEnd();
```


Fényforrások használata

- Az OpenGL legalább 8 független fényforrást támogat
  - A fényforrást elhelyezhetjük egy végtelen távoli pontban
  - Az objektumhoz közel is elhelyezhetjük
  - Reflektor forrást adhatunk meg
    - Tölcsér
    - Karakterisztikák
      - Melyik irányban

- Melyik a felfele mutató irány?



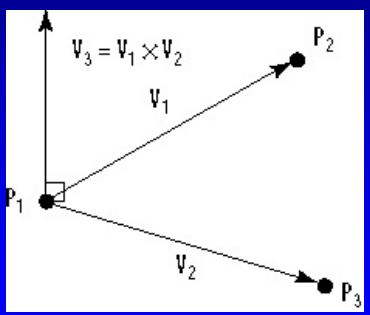


Normál egységvektorok

- *glNormal3f(GLfloat, GLfloat, GLfloat)*
  - A normál vektorát definiálja a következő vertex-nek vagy halmaznak
- *glEnable(GL_NORMALIZE)*
  - Automatikusan egységnyire normalizálja a vektorokat
  - Sebesség csökkenés
- *glScale()*
  - Módosítja a normálisok hosszát
- *glEnable(GL_RESCALE_NORMALS)*
  - OpenGL 1.2
  - A normal vektorok nem egységnyiek, de skálázhatóak egy értékkel (*glScale)*
  - Kevesebb műveletet kell végrehajtani
- Példa

```
void ReduceToUnit(float vector[3]) {
        float length;
length = (float)sqrt((vector[0]*vector[0]) +
(vector[1]*vector[1])+(vector[2]*vector[2]));
if (length == 0.0f) length = 1.0f;
vector[0] /= length;
vector[1] /= length;
vector[2] /= length;
}
```


Egységvektorok kiszámítása



- Példa

```
void calcNormal(float v[3][3], float out[3]) {
float v1[3],v2[3];
static const int x = 0;
static const int y = 1;
static const int z = 2;
v1[x] = v[0][x] - v[1][x];
v1[y] = v[0][y] - v[1][y];
v1[z] = v[0][z] - v[1][z];
v2[x] = v[1][x] - v[2][x];
v2[y] = v[1][y] - v[2][y];
v2[z] = v[1][z] - v[2][z];
out[x] = v1[y]*v2[z] - v1[z]*v2[y];
out[y] = v1[z]*v2[x] - v1[x]*v2[z];
out[z] = v1[x]*v2[y] - v1[y]*v2[x];
ReduceToUnit(out);}
```

A fényforrás beállítása

- *glLightfv(GLenum, GLenum, const GLfloat *)*
  - *light*
    - GL_LIGHT0 ... GL_MAX_LIGHTS
  - *pname*
    - GL_AMBIENT
    - GL_DIFFUSE
    - GL_SPECULAR
    - GL_POSITION
    - GL_SPOT_DIRECTION
    - GL_SPOT_EXPONENT
    - GL_SPOT_CUTOFF
    - GL_CONSTANT_ATTENUATION
    - GL_LINEAR_ATTENUATION
    - GL_QUADRATIC_ATTENUATION

- Példa

```
GLfloat ambientLight[] = {0.3f,
0.3f, 0.3f, 1.0f};
GLfloat diffuseLight[] = {0.7f,
0.7f, 0.7f, 1.0f};
GLFloat lightPos = {-50.0f.
50.0f, 100.0f, 1.0f };
glLightfv(GL_LIGHT0,
GL_AMBIENT, ambientlight);
glLightfv(GL_LIGHT0,
GL_DIFFUSE, diffuseLight);
glEnable(GL_LIGHT0);
glLightfv(GL_LIGHT0,
GL_POSITION, lightPos);
```

Példa: litjet.c

Fényhatások - Tükröződés

- Tükröződő fény
  - Példa

```
GLfloat  ambientLight[] = { 0.3f,
0.3f, 0.3f, 1.0f };
GLfloat  diffuseLight[] = { 0.7f,
0.7f, 0.7f, 1.0f };
GLfloat  specular[] = { 1.0f, 1.0f,
1.0f, 1.0f};
...
glEnable(GL_LIGHTING);
glLightfv(GL_LIGHT0,
GL_AMBIENT,ambientLight);
glLightfv(GL_LIGHT0,
GL_DIFFUSE,diffuseLight);
glLightfv(GL_LIGHT0,
GL_SPECULAR,specular);
glEnable(GL_LIGHT0);
```

- Tükröződő visszaverődés
  - Példa

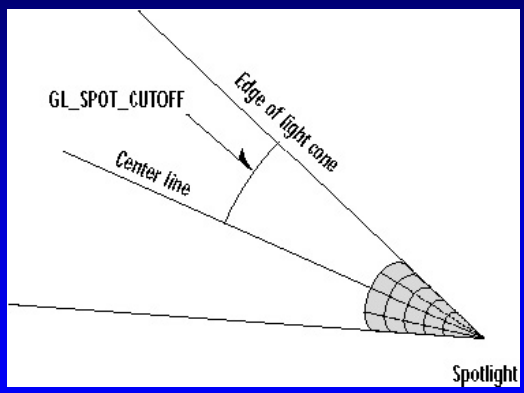
```
GLfloat  specref[] =  { 1.0f, 1.0f,
1.0f, 1.0f };
...
glEnable(
GL_COLOR_MATERIAL);
glMaterialfv(GL_FRONT,
GL_SPECULAR,specref);
glMateriali(GL_FRONT,
GL_SHININESS,128);
```

  - glMateriali(GLenum, GLenum, GLint)
    - 1-128

Példa: shinyjet.c

Reflektorfény

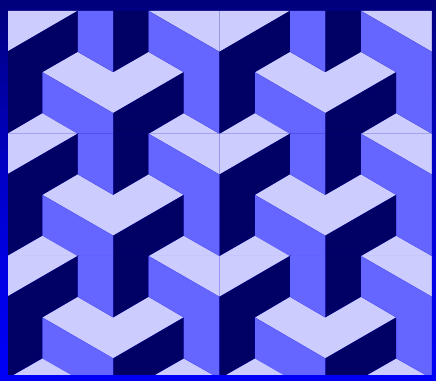
- GLfloat spotDir[] = {
  0.0f, 0.0f, -1.0f };
- glLightfv(GL_LIGHT0, GL_SPOT_DIRECTION, spotDir);
  - irány
- glLightf(GL_LIGHT0, GL_SPOT_CUTOFF, 60.0f);
  - szög
- glLightf(GL_LIGHT0, GL_SPOT_EXPONENT, 100.0f);
  - $(\max \{p \cdot d, 0\})^e$



Példa: spot.c

Textúrák

- Képek feszítése a poligonokra
- Nagy számításigényű
- Textúra ~ kép
  - 1D-s textúra
  - 2D Windows .bmp
  - 3D (volume) MRI
    - 256x256x256
    - OpenGL 1.2



Példa: tex1d.c

Textúrák definiálása

- 1D textúrák definiálása
  - *void glTexImage1D(target, level, components, width, border, format, type, pixels)*
    - *target*: GL_TEXTURE_1D
    - *level*: szint, alap 0, (mipmap)
    - *components*: színek száma 1, 3, 4
    - *width*: méret, 2 hatványa
    - *border*: keret pixelek száma 0, 1, 2
    - *format*: szín típusa GL_RGB, GL_COLOR_INDEX
    - *type*: GL_BYTE, GL_FLOAT
    - *pixels*: GLvoid *
- 2D textúrák definiálása
  - *void glTexImage2D (target, level, components, width, height, border, format, type, pixels)*
    - *height*: magasság, 2 hatvány

Textúrák

- Textúra módok
  - GL_MODULATE
    - Hozzáigazítja a textúrát világítás és szín információhoz
    - Legtöbbször ezt használjuk
  - GL_DECAL
    - Nem változik a textúra
  - GL_BLEND
    - Egy vagy két komponensű textúra esetén használható
    - A textúra kép keveredik:
      - textúra színnel,
      - megvilágítási és szín információkkal.
- Példa

glTextEnvi(GL_TEXTURE_ENV, GL_TEXTURE_ENV_MODE, mode);

GLfloat rgba[4];
glTextEnvi(GL_TEXTURE_ENV, GL_TEXTURE_ENV_COLOR, rgba);

Textúra filterek

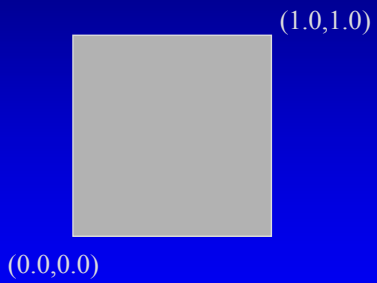
- Textúra filterek
  - Pixelek interpolálása
  - GL_TEXTURE_MIN_FILTER
    - Poligon kisebb mint a textúra kép
  - GL_TEXTURE_MAG_FILTER
    - Poligon nagyobb mint a textúra kép
  - Filterek
    - GL_NEAREST, GL_LINEAR, GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST, GL_NEAREST_MIPMAP_LINEAR, GL_LINEAR_MIPMAP_NEAREST, GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR

- Példa

glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, filter);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, filter);

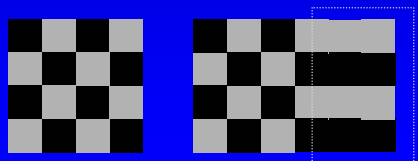
Textúrák koordináták

- Textúra koordináták
  - *glTexCoord1d(GLdouble)*
    glTexCoord1f(GLfloat)
    glTexCoord1i(GLint)
  - *glTexCoord2d(GLdouble, GLdouble)*
    glTexCoord2f(GLfloat, GLfloat)
    glTexCoord2i(GLint, GLint)



Textúrák

- Textúra csomagolás
  - A textúra koordináták 0.0-1.0 között vannak
  - Koordináták kívül kerülnek
    - összekapcsolódnak
    - ismétlődnek
  - További keret (border) pixelek:
    - a keret pixeleket használja majd
- *glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_S, wrap)*
- *glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_T, wrap)*
- *wrap*
  - GL_CLAMP
  - GL_REPEAT



Textúra példa (2D)

- *Glubyte *bits*
  *BITMAPINFO *info*

```
bits = LoadDIBITMAP("pot.bmp", &info);
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, 3, info->bmiHeader.biWidth,
        info->bmiHeader.biHeight, 0, GL_BGR_EXT,
        GL_UNSIGNED_BYTE, bits);

glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_REPEAT);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_REPEAT);

glEnable(GL_TEXTURE_2D);

glColor3f(1.0, 1.0, 1.0);
gluSolidTeapot(10.0);
```

Textúrák

- Több textúra
  - Textúra objektumok
    - Számokkal való azonosítás
    - Memóriában lehet tartani őket
  - Kezelésük
    - *glGenTextures*
    - *glBindTexture*
      - textúra műveletek eltárolódnak az adott objektumban
    - *glDeleteTexture*

- Példa

```
GLuint tex_obj;

glGenTextures(1, &text_obj);
glBindTexture(
GL_TEXTURE_1D, tex_obj);
...
glTexImage1D(...);
...
glDeleteTexture(1, &tex_obj);
```


Textúrák

- Automatikusan a memóriában tartja a nemrégen használt textúrákat
- Nem hatékony
  - 8 MB textúra memória ↔ 30 MB textúra adat
- *glPrioritizeTextures()*
  - 0.0 legalacsonyabb
  - 1.0 legmagasabb

- Példa

```
GLuint text_objs[5];
GLclampf tex_priors[5];

glPrioritizeTextures(5,
tex_objs, tex_priors);
```

Textúrák

- Egyszerű textúra beolvasó
  - texture.c
  - bitmap.c

  Példa: terrain.c

- Példa

```
glGenTextures(1, &texture);
glBindTexture(type, texture);
glTexParameteri(type,
GL_TEXTURE_MAG_FILTER,
magfilter);
glTexParameteri(type,
GL_TEXTURE_MIN_FILTER,
minfilter);
glTexParameteri(type,
GL_TEXTURE_WRAP_S, wrap);
glTexParameteri(type,
GL_TEXTURE_WRAP_T, wrap);
glTexEnvi(GL_TEXTURE_ENV,
GL_TEXTURE_ENV_MODE,
GL_MODULATE);
```


Textúrák

- Megvilágítás és textúrák
  - GL_MODULATE, GL_BLEND
  - GL_DECAL
  - Normálisok beállítása
  - Példa: terrain5.c
- Tükröződő fény
  - Világos pixel-t kapunk és nem fehéret
  - Kétszer kell kirajzolni az objektumokat
    - Textúra nélkül
    - Textúrával
  - Blending később
  - Példa: specular.c

Vizuális hatások

- Blending – keveredés
  - Pixel szintű vezérlés az RGBA szín tárolásánál a szín pufferben
  - Nem használható indexelt szín módban és indexelt színű ablakokban
  - *glEnable(GL_BLEND)*
    glDisable(GL_BLEND)
  - *glBlendFunc(GLenum source, GLenum target)*
    - GL_ONE, GL_ZERO = *Disable(GL_BLEND)*
    - *Source* = glColor-ral beállított értékek
    - *Target* = color pufferben lévő érték

Vizuális hatások

- Átlátszóság
  - *glEnable(GL_BLEND);*
    glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA,
    GL_MINUS_SRC_ALPHA);
  - Rd = Rs*As + Rd*(1 - As)
    Gd = Gs*As + Gd*(1 - As)
    Bd = Bs*As + Bd*(1 - As)
  - A forrás alfa komponensét használjuk
    - Nincs szükség olyan kártyára, amely támogatja az alfa színsíkot a szín pufferben
  - A mélységi puffer teszt meggátolhat a megfelelő eredmény elérésében
    - Az átlátszó objektumokat hátulról kezdjük kirajzolni és a nem átlátszó objektumok után

Blending függvények

- Forrás színre
  - GL_ZERO
    - 0,0,0
  - GL_ONE
    - a forrás szín nem változik
  - GL_DST_COLOR
    - a forrás színt megszorozza a cél pixel színével
  - GL_ONE_MINUS_DST_COLOR
    - a forrás színt megszorozza a (1,1,1,1-cél szín) értékkel
  - GL_SRC_ALPHA
    - a forrás színt megszorozza a forrás alfa értékével
  - GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA
  - GL_DST_ALPHA
  - GL_ONE_MINUS_DST_ALPHA
  - GL_SRC_ALPHA_SATURATE
    - a min[forrás szín, (1-dest_alpha)]
- Cél színre
  - GL_ZERO
    - 0, 0, 0
  - GL_ONE
    - A cél szín nem változik
  - GL_SRC_COLOR
    - Cél színt megszorozza a forrás pixel színével
  - GL_ONE_MINUS_SRC_COLOR
    - A cél színt megszorozza a (1,1,1,1-forrás szín) értékkel
  - GL_SRC_ALPHA
    - A cél színt megszorozza a forrás alfa értékével
  - GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA
  - GL_DST_ALPHA
  - GL_ONE_MINUS_DST_ALPHA
  - GL_SRC_ALPHA_SATURATE

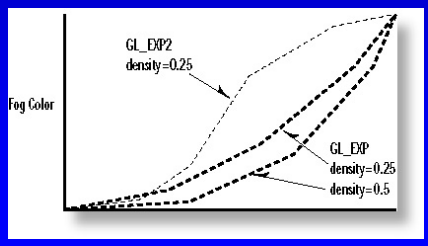
Vizuális hatások

```
glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);
glPushMatrix();
glTranslatef(0.0, 0.0, -15.0);
glRotatef(-45.0, 0.0, 1.0, 0.0);
glDisable(GL_BLEND);
glColor3f(1.0, 1.0, 0.0);
glutSolidTeapot(1.0);
glPopMatrix();
glPushMatrix();
glTranslatef(0.0, 0.0, -10.0);
glRotatef(45.0, 0.0, 1.0, 0.0);
glEnable(GL_BLEND);
glColor4f(1.0, 1.0, 1.0, 0.25);
glutSolidTeapot(1.0);
glPopMatrix();
```

Példa: blendpot.c

Vizuális hatások

- Köd
  - *glFogi(GLenum, params)*
    - GL_FOG_MODE
      - GL_LINEAR (mélység árnyékolás)
      - GL_EXP (erős köd és felhő)
      - GL_EXP2 (füst és pára)
    - GL_FOG_COLOR
      - Szín, RGBA tömb
    - GL_FOG_START
      - A legközelebbi pont, ahol a ködöt alkalmazni kell
    - GL_FOG_END
      - A legtávolabbi pont, amitől a legnagyobb értékkel állítja elő a ködöt
    - GL_FOG_DENSITY
      - 0.0-nál nagyobb
      - Tipikusan 0.1-nél kisebb
    - GL_FOG_INDEX
      - Indexelt szín módban a köd színének a sorszáma

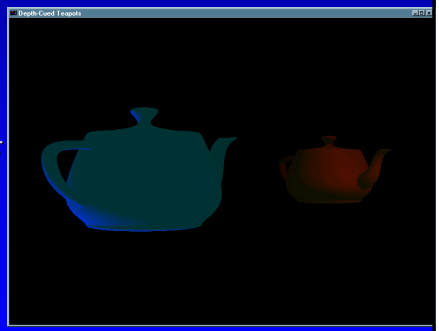


Vizuális hatások

- Példa

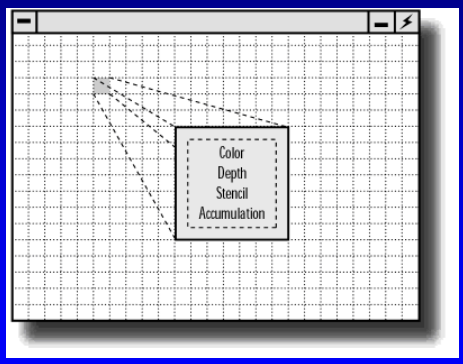
```
static float fog_color[4] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0};

glEnable(GL_DEPTH_TEST);
glEnable(GL_FOG);
glFogfv(GL_FOG_COLOR, fogcolor);
glFogi(GL_FOG_MODE, GL_LINEAR);
glFogf(GL_FOG_START, 10.0);
glFogf(GL_FOG_END, 20.0);
```



Pufferek

- Mindegyik puffer sajátos képességgel bír
  - Color
  - Depth
  - Stencil
  - Accumulation
- Két dimenziós tömbök
  - A sorok és oszlopok száma megegyezik az ablak kliens területén lévőkkel
  - Más tagoltsággal illetve típussal rendelkeznek



A pufferek beállítása GLUT-ban

- Puffer kiválasztása
  - void glutInitDisplayMode(mode)
    - GLUT_RGB, GLUT_RGBA
    - GLUT_INDEX
    - GLUT_SINGLE
    - GLUT_DOUBLE
    - GLUT_ACCUM
    - GLUT_ALPHA
    - GLUT_DEPTH
    - GLUT_STENCIL
    - GLUT_MULTISAMPLE
    - GLUT_STEREO
    - GLUT_LUMINANCE
- Csak a szükséges puffereket válasszuk ki
  - Korlátozott memória méret
  - Ha olyan kombinációt (Microsoft) választunk ki, amit a videó kártya nem támogat, akkor a szoftveres implementáció „kihagyja” a hardveresen gyorsított funkciókat

Pufferek

- Szín puffer
  - Pixel szín információk
  - A legközelebbi szín
  - Az általános Microsoft OpenGL nem támogatja az alfa komponenst
- Dupla Puffer
  - Animáció
  - Csak a szín pufferre van hatása
    - Nem kapunk még egy mélység puffert vagy összegző puffert
  - Egy pixel formátum kiválasztása dupla pufferelléssel → OpenGL kiválaszt egy háttér puffert rajzolásra
  - *glDrawBuffer(GLenum)*
    - GL_FRONT (látható)
    - GL_BACK (láthatatlan)
    - GL_FRONT_AND_BACK

Pufferek

- Mélység puffer
  - Távolság értékek
  - Mindegyik érték a pixelek távolságát jelentik a nézőponttól
  - 16, 32 bites értékek
  - Nem látható felület eltávolítására használjuk általában
  - *glEnable(GL_DEPTH_TEST)*
  - *glDisable(GL_DEPTH_TEST)*
- Mélység összehasonlítás
  - A pixelek z pozícióját összehasonlítja a mélység puffer értékével
  - Ha az összehasonlítás *igaz*, akkor a pixel a mélység mentén van tárolva
  - *glDepthFunc()*
  - GL_LESS alapértelmezés
    - Igaz, ha a forrás z kisebb a mélység z értékénél

Pufferek

- Összehasonlítás
  - GL_NEVER
  - GL_LESS
  - GL_EQUAL
  - GL_LEQUAL
  - GL_GREATER
  - GL_NOTEQUAL
  - GL_GEQUAL
  - GL_ALWAYS

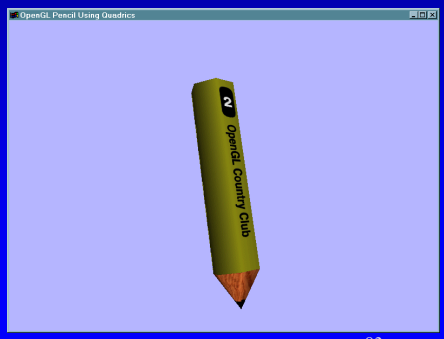
  Példa: glut.c
- Mélység értékek
  - Leképezett Z koordináták,
  - A csonka nézet elejétől a nézet hátsó lapjáig megy [0.0, 1.0]
  - GL_EQUAL, GL_NOTEQUAL esetén néha szükség van a mélység értékek tartományának a megváltoztatására
  - *GLfloat near, far;*
    glDepthRange(near, far);
  - Iniciális mélységi értékek beállítása
    GLfloat depth;
    glClearDepth(depth);

Vonalakon és háromszögeken túl

- Másodfokú felület
  - *gluQuadricOrientation(GLUquadricObj *obj, GLenum orientation)*
    - GLU_OUTSIDE, GLU_INSIDE
  - *gluQuadricTexture(GLUquadricObj *obj, GLboolean textureCoords)*
    - GLU_TRUE, GLU_FALSE

Hengerek rajzolása

- *void gluCylinder(GLUquadricObj *obj, GLdouble baseRadius, GLdouble topradius, GLdouble height, GLint slices, GLint stacks)*
  - *slices*: hány részből áll a henger körben
  - *stacks*: felosztás (alulról felfele), reflektor fény esetén
  - Textúra
    - Elülső éltől helyezi rá (0, R, 0)
    - A képnek fejjel lefele kell állnia
- Kúp rajzolás
  - *gluCylinder()*
  - (top/bottom)Radius = 0

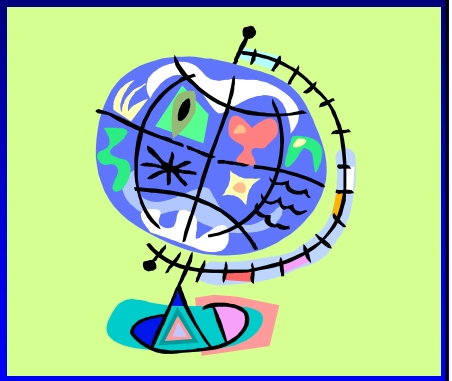


Korong rajzolás

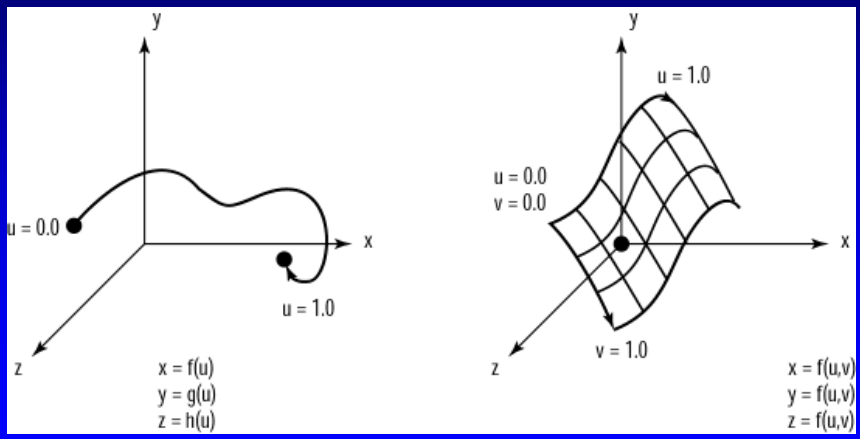
- *void gluDisk(GLUquadricObj *obj, GLdouble innerRadius, GLdouble outerRadius, GLint slices, GLint loops)*
  - innerRadius
    - belső üres terület
  - Loops
    - 1 - kör,
    - 2 – csavaralátét
  - Textúra
    - A textúra teteje a korong tetejére kerül
- Korong részlet
  - *void gluPartialDisk(GLUquadricObj *obj, GLdouble innerRadius, GLdouble outerRadius, GLint slices, GLint loops, GLdouble startAngle, GLdouble sweepAngle)*
    - *startangle*
      - clockwise szög fokban
    - *sweepangle*
      - körszelet szöge

Gömb rajzolása

- *void gluSphere(*
  *GLUquadric *obj,*
  GLdouble radius,
  GLint slices, GLint stacks)
- Textúrák
  - A szélességi és hosszúsági koordinátákat használja. A világ térkép tökéletesen ráilleszkedik.

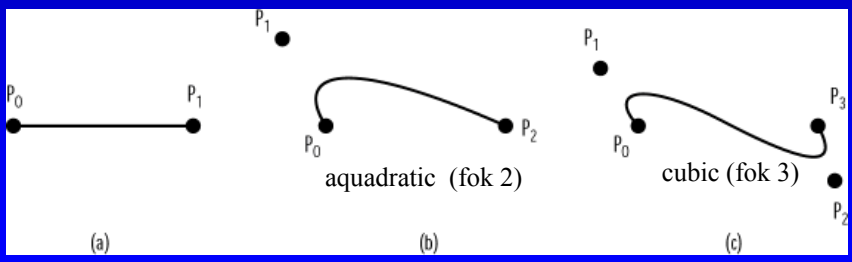


Görbék és felületek

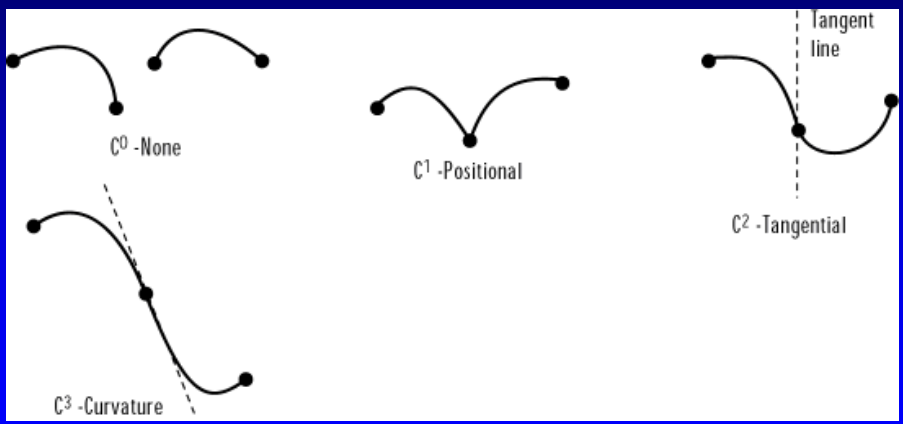


Görbék és felületek

- Rang
  - A kontrol pontok száma
- Fok = Rang - 1



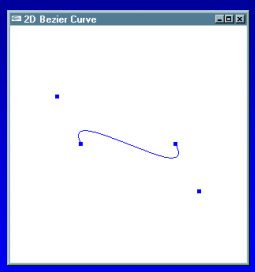
Folytonosság



Kiértékelők

- Bézier görbék rajzolása
  - Kontrol pontok
  - Parametrikus *u* és *v*
- Alkalmas kiértékelő fv.
- Generálja a pontokat, amelyek a görbét vagy a felszínt alkotják

2D-s görbe I.



Példa: bezier.c

```
void RenderScene(void)          {
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glMap1f(GL_MAP1_VERTEX_3, //Type of data generated
0.0f,           // Lower u range
100.0f,         // Upper u range
3,              // Distance between points in the data
nNumPoints,  // number of control points
&ctrlPoints[0][0]);  // array of control points
glEnable(GL_MAP1_VERTEX_3);
glBegin(GL_LINE_STRIP);
for(i = 0; i <= 100; i++) {
  glEvalCoord1f((GLfloat) i); }
glEnd();
DrawPoints();
glutSwapBuffers();}
```

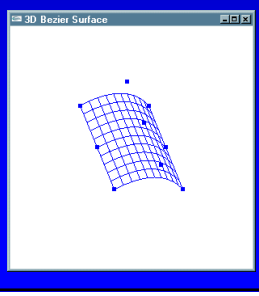
2D-s görbe II.

- *glMapGrid1f(GLint, GLfloat, GLfloat)*
  - un: felosztás száma
  - u1,u2: alsó és felső értékek u irányban
- *glEvalMesh1(GLenum, GLint, GLint)*
  - mode: GL_POINT, GL_LINE, GL_FILL
  - i1,i2: első és utolsó integer érték az u tartományra

```
void RenderScene(void) {
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glMap1f(GL_MAP1_VERTEX_3,
100.0f,
100.0f,
3,
nNumPoints,
&ctrlPoints[0][0]);
glEnable(GL_MAP1_VERTEX_3);
glMapGrid1d(100,0.0,100.0);
glEvalMesh1(GL_LINE,0,100);
DrawPoints();
glutSwapBuffers();
}
```


3D-s felszín

- Hasonló a 2D-s görbékhez
  - *u* és *v* tartományon definiálni kell a pontokat

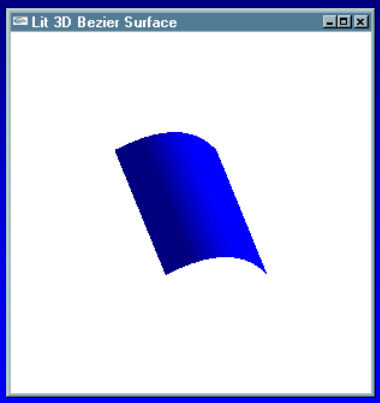



```
void RenderScene(void) {
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glMatrixMode(GL_MODELVIEW); glPushMatrix();
glRotatef(45.0f, 0.0f, 1.0f, 0.0f);glRotatef(60.0f, 1.0f, 0.0f, 0.0f);
glMap2f(GL_MAP2_VERTEX_3,       // Type of data generated
0.0f,       // Lower u range
10.0f,      // Upper u range
3,   // Distance between points in the data
3,   // Dimension in u direction (order)
0.0f,       // Lover v range
10.0f,      // Upper v range
9,   // Distance between points in the data
3,   // Dimension in v direction (order)
&ctrlPoints[0][0][0]); glEnable(GL_MAP2_VERTEX_3);
glMapGrid2f(10,0.0f,10.0f,10,0.0f,10.0f);
glEvalMesh2(GL_LINE,0,10,0,10);
DrawPoints();glPopMatrix();glutSwapBuffers();}
```

Megvilágítás

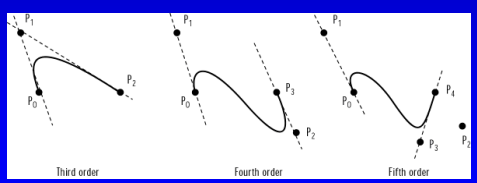
- *glEvalMesh2(GL_FILL, 0, 10, 0, 10);*
- *glEnable(GL_AUTO_NORMAL)*
- Engedélyezni kell a megvilágítást

Példa: bezier3d.c



Non Uniform Rational B-Spline

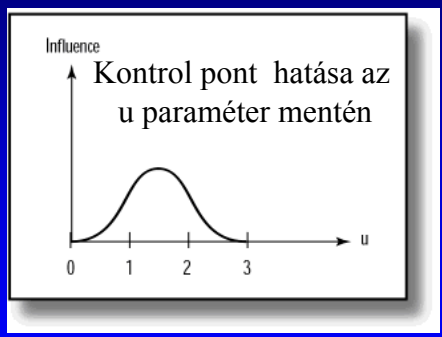
- Bézier görbe kvadratikus esetben elég sima
- Több pont esetén már simaság csökken



- B-spline-ok (bi-cubic splines)
- Szegmensekre van szétbontva a görbe
- Az adott szegmens alakját a legközelebbi 4 pont határoza meg
- Egy hosszabb görbe sok kontrol ponttal simább
- A csomópontokkal a szegmensek között C3 folytonosságot mutat
- A görbének nem feltétlenül kell átmennie bármelyik kontrol ponton

Csomók

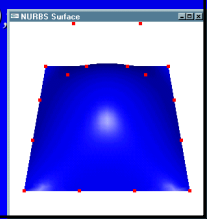
- Két csomópont értéket definiálunk minden kontrol ponthoz
- Az értékek tartománya megegyezik az *u* és *v* értelmezésitartományával
- Nem csökkenőek
- A csomópontok meghatározzák a kontrolpontok hatását az *u* és *v* tartományon belül
- 0-3 közötti pontok vannak hatással a görbe alakjára



NURBS felszín kreálása

- *GLUnurbsObj *pNurb = NULL;*
  ...
  pNurb = gluNewNurbsRender();
  ...
  if (pNurb)
  gluDeleteNurbsRender(pNurb);
- NURBS tulajdonságok
  - *gluNurbsProperty(pNurb, GLU_SAMPLING_TOLERANCE, 25.0f);*
  - *gluNurbsProperty(pNurb, GLU_DISPLAY_MODE, (GLfloat)GLU_FILL);*
- *gluBeginSurface(pNurb);*
  gluNurbsSurface(pNurb,
  8, Knots, //No. knots and knots array u
  8, Knots, //No. knots and knots array v
  *4*3, //distance between control p. in u*
  3, //distance between conrol p. in v dir
  &ctrlPoints[0][0][0],
  4,4, //u and v order of surface
  GL_MAP2_VERTEX_3);
  gluEndSurface(pNurb);

Példa: nurbs.c

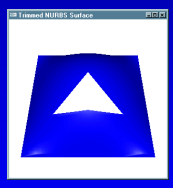


Kivágás I.

- Kivágni egy szeletet egy NURBS felszínből
- *gluBeginSurface(pNurb);*
  gluNurbsSurface(pNurb,
  8, Knots, //No. knots and knots array u
  8, Knots, //No. knots and knots array v
  *4*3, //distance between control p. in u*
  3, //distance between conrol p. in v dir
  &ctrlPoints[0][0][0],
  4,4, //u and v order of surface
  GL_MAP2_VERTEX_3);

  // Outer area, include entire curve
  gluBeginTrim (pNurb);
  gluPwlCurve (pNurb, 5,
  &outsidePts[0][0], 2,
  GLU_MAP1_TRIM_2);
  gluEndTrim (pNurb);
  // Inner triangluar area
  gluBeginTrim (pNurb);
  gluPwlCurve (pNurb, 4,
  &insidePts[0][0], 2,
  GLU_MAP1_TRIM_2);
  gluEndTrim (pNurb);

  glEndSurface(pNurb);



Példa: nurbt.c

Kivágás II.

- *gluNurbsCurve(*
  *GLUnurbsObj *nObj, GLint nknots,*
  *GLfloat *knot, GLint stride, GLfloat*
  **ctlArray, GLint order, GLenum type)*
  - nknots: csomók száma
  - knot: tömb
  - stride: eltolás a kontrol pontok között a görbén
  - ctlArray: kontrol pontok
  - order: NURBS felület rangja
  - type: GL_MAP2_VERTEX_3, GL_ MAP2_VERTEX_4, ...
- gluPwlCurve(
  GLUnurbsObj *nObj,
  GLint count,
  GLfloat *array,
  GLint stride,
  GLenum type)
  - count: tömbben lévő elemek száma
  - array: határ pontok
  - stride: eltolás a pontok között a görbén
  - type: GLU_MAP1_TRIM_2, GLU_MAP1_TRIM_3 (w)