

# RAČUNALNA ANIMACIJA

predavanja

Željka Mihajlović

2024./2025.

# Sadržaj (gradivo na predavanjima)

## Uvod

## 1 Definiranje objekata, putanja i pokreta

### 1.1 Alati za definiranje animacije

### 1.2 Zadavanje i praćenje putanje

#### 1.2.1 zadavanje putanje (B-krivulje)

#### 1.2.2 kontrola vremena duž putanje (parametrizacija duljinom luka)

#### 1.2.3 praćenje putanje

### 1.3 Animacija 6DOF (položaj i orijentacija)

#### 1.3.1 pogreške pri rotaciji

#### 1.3.2 rotacija

## 2 Uzorkovanje objekata, putanja i pokreta

### 2.1 Uzorkovanje objekata

### 2.2 Uzorkovanje putanja i pokreta

## 3 Strukture podataka

3.1 Polja podataka

3.2 Graf scene

## 4 Unaprijedna i inverzna kinematika

4.1 Hijerarhijski kinematički modeli

4.2 Kinematika

## 5 Dinamika

5.1 Sustavi čestica

5.2 Sustav opruga i masa (model tkanine)

5.3 Dinamika fluida

## 6 Detekcija sudara

6.1 Određivanje sjecišta

6.2 Optimizacijske strukture podataka

6.3 Određivanje dubine prodora i minimalne udaljenosti

## 7 Prikaz detalja površine

7.1 Preslikavanje izbočina

7.2 Preslikavanje zaklanjanja uslijed paralakse

7.3 Preslikavanje pomaka

7.4 Volumne teksture

7.5 Nefotorealistične tehnike prikaza

## 8 Deformiranje objekata

## 9 Vizualizacija

## 10 Miješana stvarnost (XR - Cross Reality)

# Bodovi na predmetu

## Bodovanje

Kontinuirano praćenje nastave:

- 30%      Međuispit (I kolokvij),
- 35%      Završni ispit (II kolokvij),
- 15%      laboratorijske vježbe 1 i 2
- 15%      samostalna vježba
- 5%      sudjelovanje u nastavi

Ukupno (uvjeti)

- 50%      laboratorijske vježbe (iz svake vježbe - 1, 2 i samostalne)
- 50%      ukupno za prolaz predmeta

Klasični ispit (50% pismeni 50% usmeni)

# Laboratorijske vježbe

- Upute za laboratorijske vježbe (termini predaje su na FerWeb-u)

- <http://www.zemris.fer.hr/predmeti/ra/>

- vježba 1 i 2 iz RA

- učitati tijelo iz .obj datoteke animacija kretanja po putanji – uz promjenu orijentacije (21.-25.10.2024.)
    - sustav čestica (16.-20.12.2024.)

## Literatura:

- nastavak na IRG labose ([http://www.zemris.fer.hr/predmeti/irg/laboratorijske\\_vjezbe.html](http://www.zemris.fer.hr/predmeti/irg/laboratorijske_vjezbe.html))
  - Dave Shreiner, Mason Woo, Jackie Neider, Tom Davis, [OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL](#), Addison-Wesley, 2009, 8<sup>th</sup> edition, 2013, [https://github.com/flaviusone/ACS-EGC/blob/master/Bibliografie/opengl\\_programming\\_guide\\_8th\\_edition.pdf](https://github.com/flaviusone/ACS-EGC/blob/master/Bibliografie/opengl_programming_guide_8th_edition.pdf)

- Samostalna vježba (od 7.1.2025.)

- Samostalna vježba (<http://www.zemris.fer.hr/predmeti/ra/labradovi.html>)
  1. Edukativne igrice za srednju školu, ili npr. IRG
  2. Grafička prezentacija algoritama s drugih predmeta (APR)
    - npr. gradijentni spust 2D i 3D
  3. VR, AR, MR – aplikacija AR SLAM (simultaneous localization & mapping)
  3. Praćenje GPS koordinata u Google maps – iscrtavanje objekta (kocka)
  5. Opis mogućnosti sustava Kinect, Magic Leap (DivIt)
  6. Deformiranje objekta, značajke objekta – geometrijske deformacije
  7. Jednostavna igrice – ping pong, vožnja autića, ...
  8. Interaktivni zadaci za vježbu iz grafike JS
  9. Kinetika, dinamika
  10. Povijest računalne animacije, igara, grafičkih kartica, istraživanja o utjecaju igara na mentalne sposobnosti, zašto se ljudi vole igrati?  
Poželjni je pretražiti znanstvenu literaturu (Npr.: <https://scholar.google.com/>)

Prezentacija Samostalne vježbe na predavanju

# Literatura:

- [1] Tomas Akenine-Möller, Eric Haines, and Naty Hoffman,  
*[Real-Time Rendering Resources](#)*, 4th Edition,  
A. K. Peters Ltd., 2018.
- [2] R. Stuart Ferguson  
*Practical Algorithms for 3D Computer Graphics, Second Edition*,  
Taylor & Francis Group, [2012](#).
- [3] J.F. Hughes, A. van Dam, M. McGuire, D.F. Sklar, J.D. Foley, S.K. Feiner, K. Akeley,  
*Computer Graphics: Principles and Practice, 3rd Edition*,  
Addison Wesley, Boston, [2014](#).
- [4] Rick Parent,  
*Computer Animation, Third Edition: Algorithms and Techniques*,  
Addison-Wesley, 3rd Edition, 2012.
- časopisi, konferencije [GDC](#), [GTC](#) ...



# Uvod

- riječ animacija doslovno znači oživjeti, dati život
- animirati znači pomicati nešto što se ne može samo od sebe micati
- dodavanje dimenzije – **vrijeme** obogaćivanje informacijom
- svaka veličina koju možemo mijenjati može biti animirana
  - položaj i orijentacija (putanja) kamere
  - putanja, oblici, svojstva izvora
  - položaj i orijentacija objekta 6DOF
  - oblik objekta (pokret ruke, preobražaj, rast)
  - tekstura, svojstva površine, parametri sjenčanja (koordinate teksture, hiperteksture)
  - posebni objekti – dim, magla, vatra



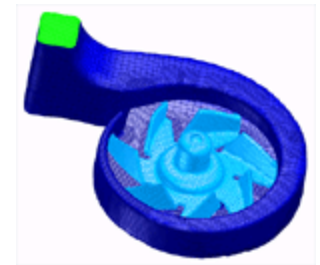
Vrijeme

- direktno ili indirektno određivanje kako će se objekt gibati u prostoru i vremenu
- osnovni problem je u alatima koji dizajneru omogućuju izražaj, a da ga pri tome ne opterećuju detaljima koji ga ne zanimaju
- ostvarivanje dodatnih vizualnih učinaka

# Područja primjene



- počeci animacije 70 – tih godina
  - CAD/CAM simulacije
  - industrija filma, TV, reklame, igre
    - <https://www.pixar.com/short-films-1> ('91 Disney, npr. Toy Story, Bug's Life, Monsters Inc., Finding Nemo, The Incredibles, Ratatouille) [Birds](#), [Piper](#)
    - <http://www.ilm.com/> (Lucasfilm - Star Wars; Jurassic Park, Terminator, The Abyss, Pirates of the Caribbean, Transformers, Star Trek, Avatar)
    - <http://www.dreamworksanimation.com/> (Shrek, How To Train Your Dragon, Madagascar)
    - <http://www.imageworks.com/>, (The Matrix, Stuart Little, Spider Man)
    - <http://www.blueskystudios.com/>, (Ice Age, Rio)
    - <http://www.rhythm.com> (Game of Thrones), <http://www.tippett.com/> (The Twilight Saga),
- ostvarivanje animacije neostvarive na druge načine
- smjesa animacije i snimke stvarnog svijeta
- animacija za
  - simulacije (npr. rada stroja)
  - umjetnički alati (dizajn u filmovima, reklame, igre)



# Podjela postupaka računalne animacije

- postupci računalne animacije
  - a) računalom potpomognuta animacija (*computer-assisted animation*)  
2D i 2.5D pomažu tradicionalne postupke izrade ručno crtanih objekata (interpolacija između ključnih okvira, bojanje)
  - b) računalno generirana animacija (*computer generated animation*)
    - tehnike niže razine (key frame, path following)  
ključni koncept interpolacijski algoritmi (in-betweening),
    - tehnike više razine (proceduralna animacija, behavioral model)  
algoritmi ili modeli koji se koriste za definiranje pokreta u skladu sa zadanim pravilima ili ograničenjima (zadaju se algoritmi, početni – rubni uvjeti, npr. fizikalno zasnovani, sustavi čestica)



- kompromis između više rada animatora ili računala u animaciji je
  - zadana pokretom (*Motion specification*) više rad animatora
  - modelom temeljena (*Model-based*) - više rad računala
- animatori ponekad žele veliku slobodu, apstrakciju ([terminator-šipke](#))
- kompromis između
  - zahtjeva na kvalitetu i
  - ostvarivosti u stvarnom vremenu
- dvije kategorije modeliranja
  - pokretni objekti
    - roboti, ljudi, životinje <https://demo.marpi.pl/spider/>
    - hodanje, dohvaćanje rukom, izraz lica
  - prirodni fenomeni
    - biljke, vatra, voda, tkanina, kosa
    - proceduralno generiranje, fizika



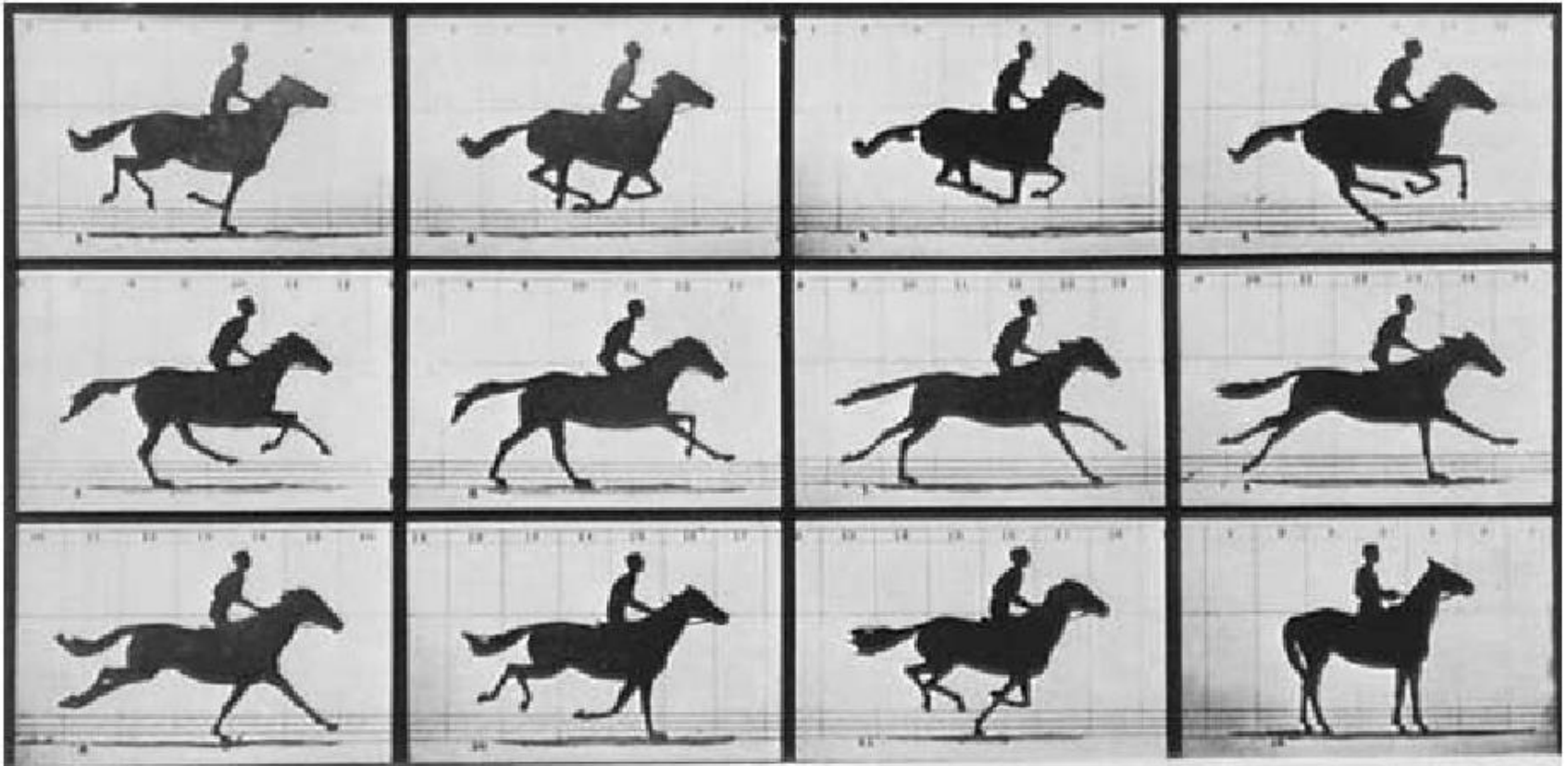
2002

# Percepcija

- sustav čovjeka - sofisticirana percepcija informacije
- niz slika – kontinuirani pokret – obogaćivanje informacijom
- slika (vrijeme zadržanja slike)
  - pozitivna poslije-slika (engl. positive afterimage)  
nakon gašenja slike, slika ostaje na kratko vrijeme

<http://andrew-hoyer.com/experiments/zoetrope/>





Copyright, 1878, by MUYBRIDGE.

MORSE'S Gallery, 417 Montgomery St., San Francisco.

## THE HORSE IN MOTION.

Illustrated by  
MUYBRIDGE.

"SALLIE GARDNER," owned by DELAND STANFORD, passing at a 1.40 gait over the Palo Alto track, 19th June, 1878.

The negatives of these photographs were made at intervals of twenty-thousandths of a second, and about the center of each pair of lines showing consecutive positions appeared on each twenty-seventh set line of progressive drawing, a single image of the horse. The original lines were freely used in the printing, the horizontal lines representing the divisions of feet on the track. The exposure of each negative was less than the two-thousandth part of a second.

[Horse.gif](#)

- naš sustav vida uzorkuje u određenom frekvencijskom opsegu
  - a) ↓ donja frekvencija - kontinuiranost vida (engl. persistence of vision)  
niz bliskih slika doživljava se kao kontinuirana slika  
ukoliko nije dovoljna frekvencija nastaje trzanje, treperenje, titranje (flicker)  
<http://www.realtimerendering.com/udacity/?load=demo/unit1-fps.js> (fps)
  - b) ↑ gornja frekvencija - percepcija gibanja  
balka koja se dovoljno brzo vrti vidjet ćemo kao krug,  
razmazanost pokreta (motion blur) brzi objekti se “razvlače” u smjeru  
gibanja <https://thewebdesignerpro.com/skeletalanimation.html>

- dvije frekvencije za

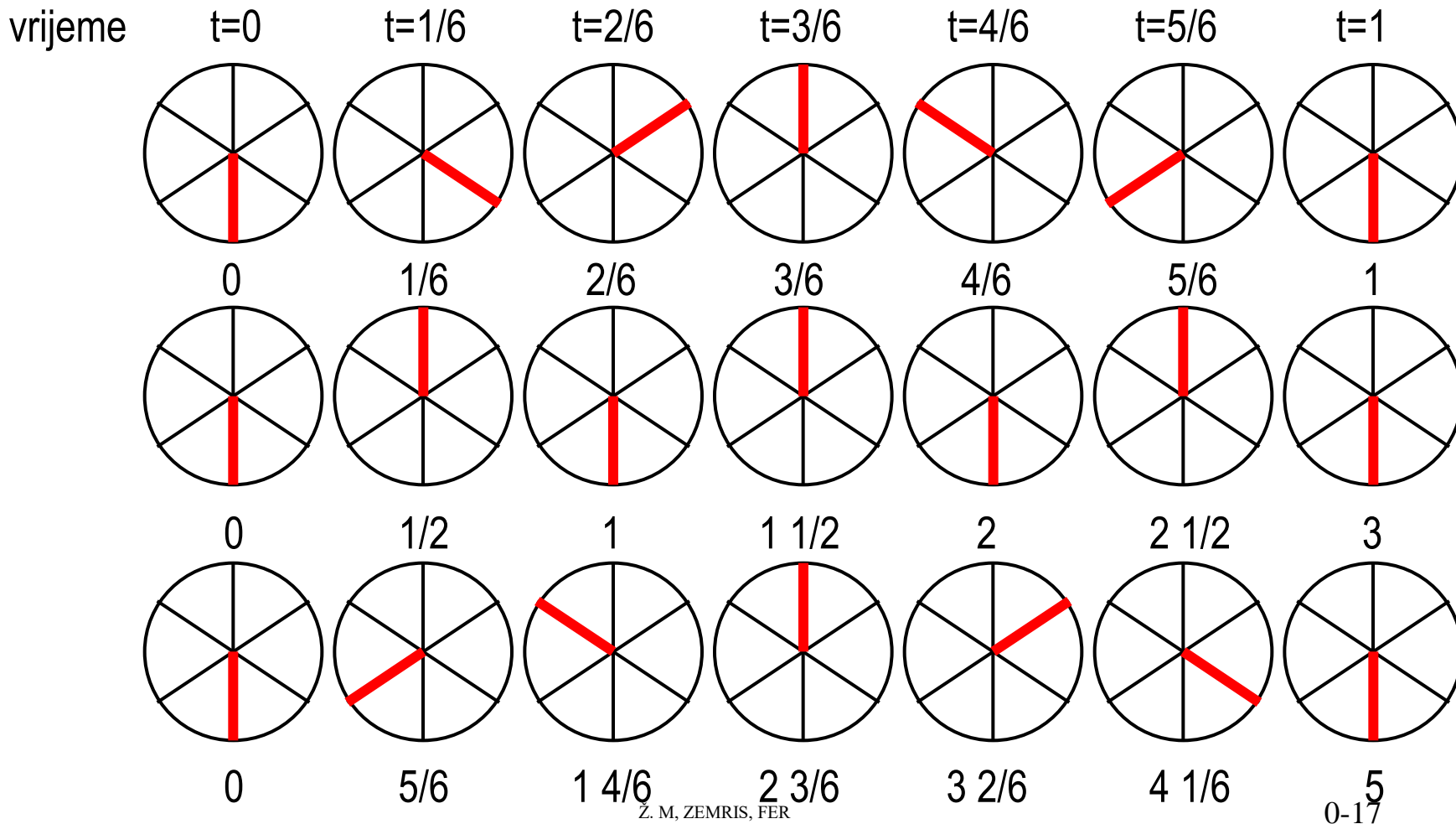
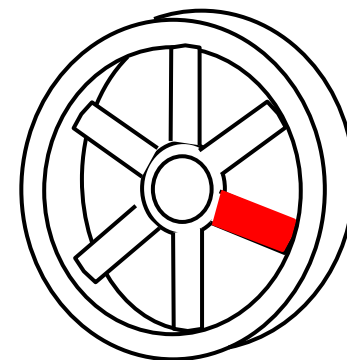
- broj slika u sekundi (play back rate) – titranje npr. monitora
- broj različitih slika u sekundi (sampling rate) – istrzano gibanje,
  - ukoliko frekvencija nije dovoljno velika javlja se stroboskopski učinak, odnosno paljenje i gašenje svjetla – razmazanost pokreta umanjuje ovaj učinak

NPR: NTSC – 30 slika u sekundi s preplitanjem (interlaced) tj. 60 polu-slika, animirani filmovi sa 6 različitih slika u sekundi [kotač](#) [kotač](#)



## Neželjeni učinci aliasa u vremenu

- simulirano vrijeme (kotač se vrti nekom brzinom u simuliranom vremenu u suprotnom smjeru kazaljke na satu)
- frekvencija kojom “okidamo” slike tj. uzorkujemo da bi ostvarili prikaz je zadana



# Alias učinci u vremenskoj domeni - Temporal Anti-Aliasing (TAA)

- učinak kotača - kamera se pomiče u desno i ubrzava



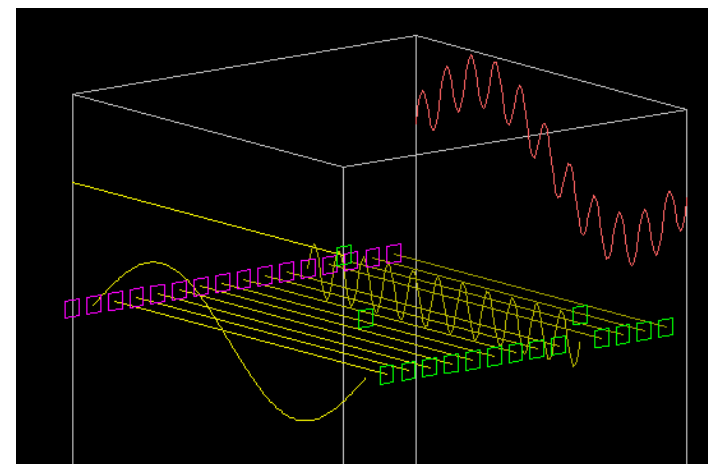
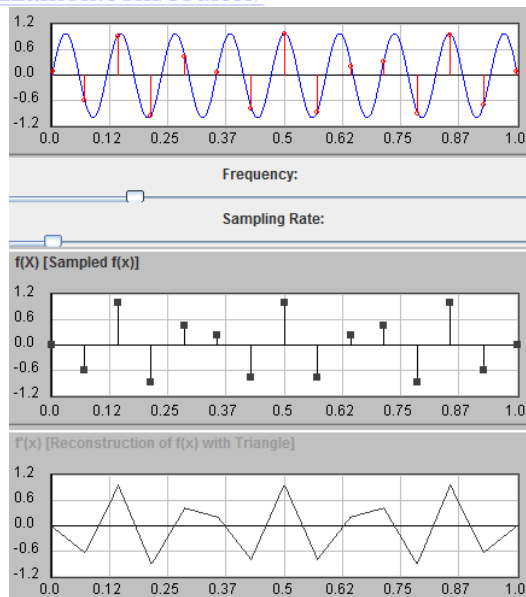
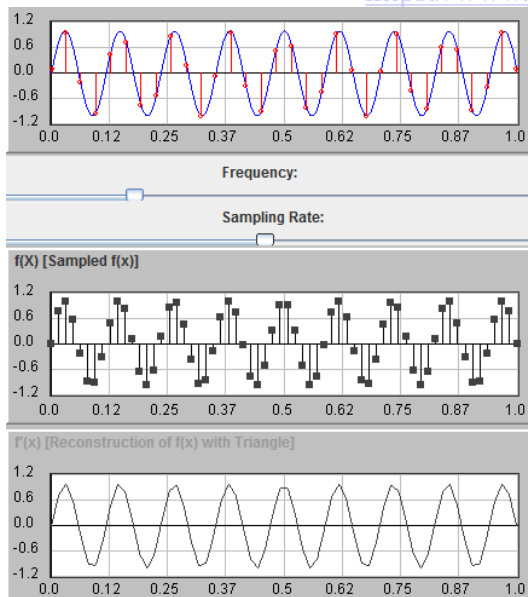
<https://michaelbach.de/ot/mot-wagonWheel/index.html>

– titranje zbog puno detalja (visoke frekvencije),

<http://felixpalmer.github.io/lod-terrain/> [https://threejs.org/examples/#webgl\\_postprocessing\\_taa](https://threejs.org/examples/#webgl_postprocessing_taa)

– problem glatkog gibanja (stutter – zamuckivanje slike)

- <https://www.zubspace.com/tools/smooth-movement-test>
- <https://www.falstad.com/fourier/> <https://lspo.feri.um.si/CoLoS/applets/fft/ftd.html>
- <https://www.jezzamon.com/fourier/>



## Razmazanost pokreta (engl. motion blur)

- kod fotografiranja ovisno o vremenu ekspozicije snimit ćemo vremenski okvir odnosno period vremena (integral promjena – munje, vatromet, sport),
- brzo kretanje objekta ili kamere stvara razmazan pokret
- računalom generirane promjene predstavljaju jedan trenutak pa je potrebno dodavanje učinaka razmazanosti pokreta i isticanje fokusa

<http://www.zeropointnine.com/blog/assets/motionblur1/index.html>

<https://playground.babylonjs.com/#9LRA3T#10> (ovisi o brzini promjene)

### Isticanje fokusa:

<http://www.clicktorelease.com/tmp/threejs/mblur/>



uz razmazanost

bez razmazanosti

0-19

## Dvostruki spremnik prikaza (engl. double buffer)

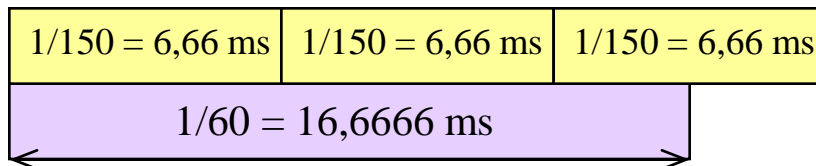
- osvježavanje prikaza
  - iscrtavanje iz slikovne prikazne memorije i upisivanje u tu memoriju nije sinkronizirno, dešava se titranje
  - potrebna su dva spremnika kao za vrijeme osvježavanje ne bi nastupile promjene
- rad s dvostrukim spremnikom
  - inicijalizacija dvostrukog spremnika  
**glutInitDisplayMode (GLUT\_RGB | GLUT\_DOUBLE);**
  - iscrtavanje  
**glutSwapBuffers();** umjesto **glFlush();**

# Trostruki spremnik prikaza (engl. triple buffer)

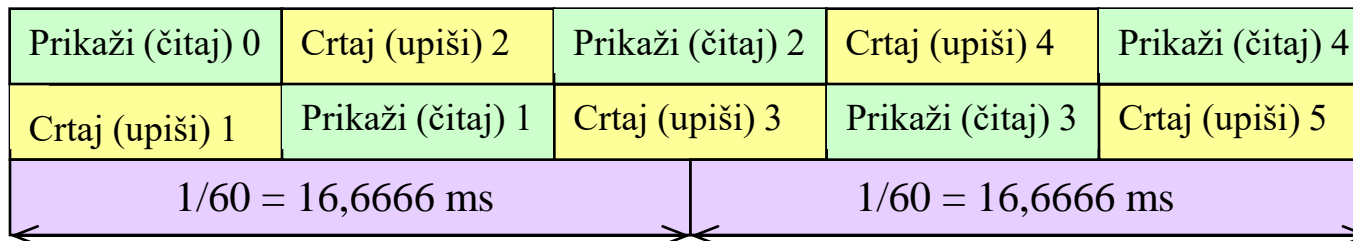
- zašto se koristi trostruki spremnik
- npr. frekvencija osvježavanja (LCD ili CRT) neka je 60 Hz, ako možemo ostvariti 150 FPS koliko različitih slika ćemo vidjeti?

Kod V-Sync monitora frekvencija osvježavanja je konstantna. Novi G-Sync monitori dinamički mogu mijenjati (prilagođavati frekvenciju osvježavanja).

Pretpostavimo da se vrijeme potrebno za generiranje jedne slike ne mijenja (konstantan FPS). Ako se koristi samo jedan spremnik kod animacije doći će do kidanja slike (engl. screen tearing):

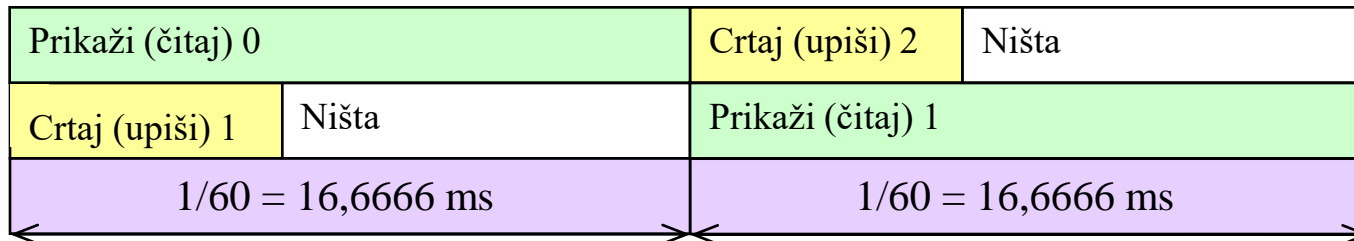


Dvostruki spremnik bez sinkronizacije:



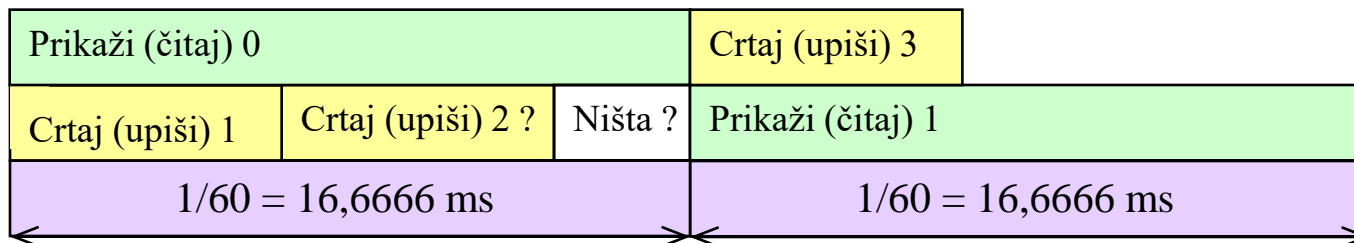
Dvostruki spremnik sa sinkronizacijom (čeka s izračunom okvira):

- animacija se može drastično usporiti



Dvostruki spremnik sa sinkronizacijom (ne čeka s izračunom okvira):

- hoće li stići izračunati 2 okvir (2. okvir pregazi 1.)



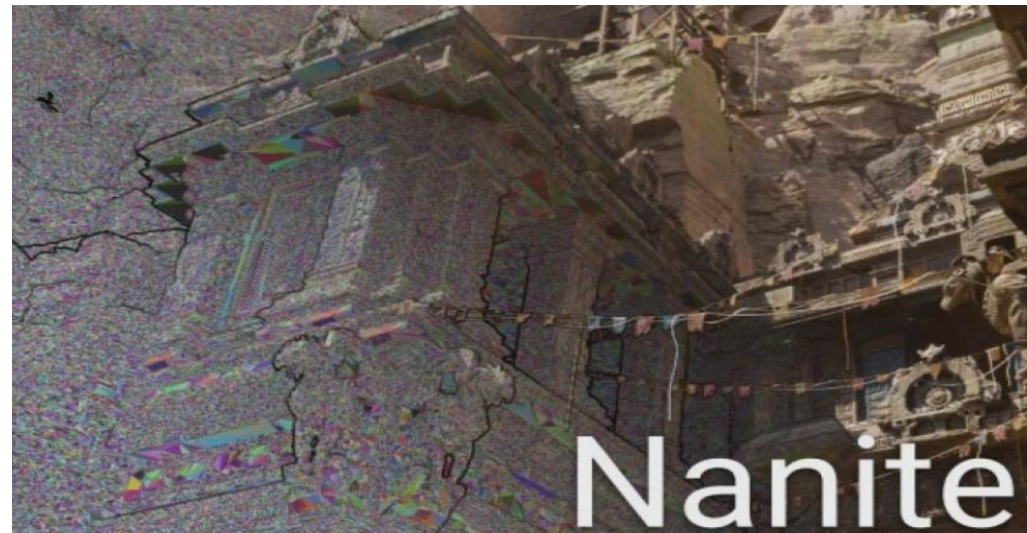
Trostruki spremnik:

- treći spremnik se koristi kada su 1. i 2. zauzeti, tada se u 3. spremnik pohranjuje novi okvir a u trenutku sinkronizacije provjerava se koji spremnik ima noviji okvir i da li je iscrtan do kraja pa se taj prikazuje u slijedećem ciklusu

Što ako je prikazna jedinica 60 Hz, a imamo 59 FPS?

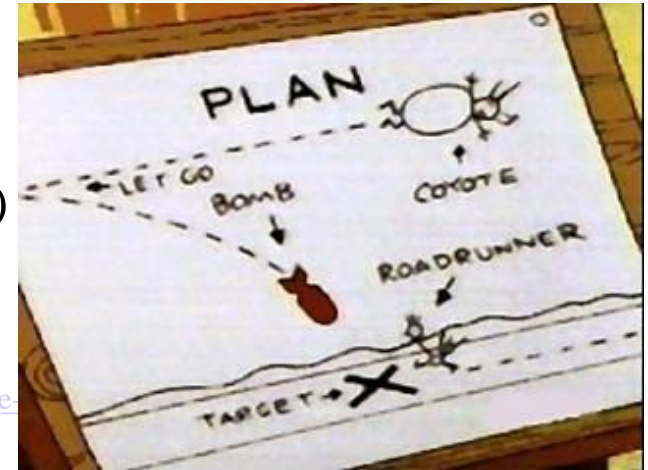
# Povijesni razvoj

- osnove su razvijene za Disney 1920<sup>te</sup>, 1930<sup>te</sup>
  - opisao 1987, John Lasseter (Pixar)
  - 1982 Star Trek II (sustav čestica)
  - 1991 Terminator II
  - 1993 Jurassic park
  - ...
  - 1996-2016 <https://www.youtube.com/watch?v=Ae5rwNVNVrQ>
  - 2020 Epic Games UE5 (Nanite) <https://www.youtube.com/watch?v=qC5KtatMcUw>
- SIGGRAPH, filmska industrija

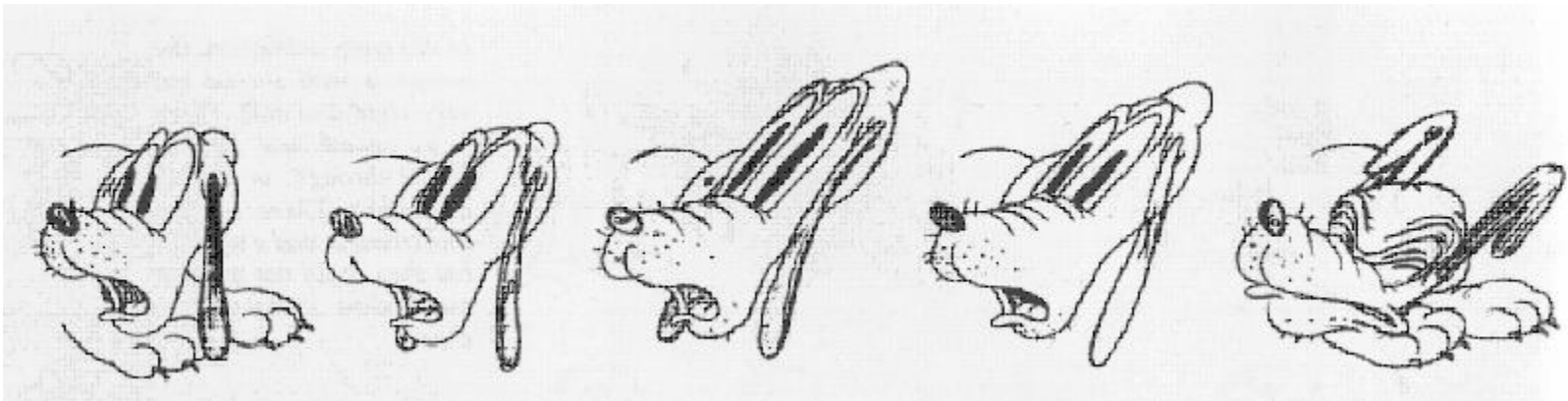


# Animacija u filmskoj industriji, industriji igara

- priča
- definiranje stila, ilustracije
- dizajn likova, skice
- vizualna skripta (engl. storyboard, dope sheet)
  - ključne scene (akcijske),
  - položaji kamere
  - <https://www.hitberrygames.com/post/game-design-document-template>
  - izrada modela likova, objekata i scene



Skripte za izradu igre (GDD – Game design document)





# Osnovne tehnike animacije

- ključni okviri (engl. key frames)
  - animator određuje važne (ključne) položaje
  - određivanje međupoložaja - **interpolacija**
- uzorkovanje gibanja (engl. motion capture)
  - uzorkovanje gibanja iz stvarnog svijeta
  - animirani objekti su vođeni takvim podacima
- proceduralno zadana animacija
  - niz jednadžbi i pravila određuje gibanje objekata, uređivanje čvorova geometrije (objekti, animacija)
  - fizikalno temeljena pravila  
(odjeća, voda, dim, vatra, kosa, krzno, perje)
  - simulacije – ponašanje objekta
  - upravljanje jatom, gomilom ljudi
  - primjena umjetne inteligencije (AI)  
[https://threejs.org/examples/webgl\\_gpgpu\\_birds.html](https://threejs.org/examples/webgl_gpgpu_birds.html)
  - [https://threejs.org/examples/webgl\\_gpgpu\\_birds\\_gltf](https://threejs.org/examples/webgl_gpgpu_birds_gltf)  
[https://demo.marpi.pl/spawning\\_pool/](https://demo.marpi.pl/spawning_pool/) <http://shibuyacrowd.mattatz.org/>
  - vremenski zahtjevna, problem upravljanja



# Ključni okviri - kadrovi

- postupci interpolacije između zadanih kadrova
  - vrijeme je obično izravno vezano uz parametar, na taj način se izravno kontrolira brzina
  - interpolacija: položaja, orijentacije, veličine, boje, svjetla, normala, deformacije ...
  - <https://www.inkfood.com/tween-3d-objects/>
  - [https://threejs.live/#/misc\\_animation\\_authoring](https://threejs.live/#/misc_animation_authoring)
  - <http://jeromeetienne.github.io/threex.cubecamera/examples/demo.html>

