

СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ  
„СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“



# Скелети

ТЕМА №25

# Съдържание

## Тема 25: Скелети

- Степени на свобода
- Скелети (йерархични системи)
- Реализация с костенуркова графика
- Реализация с локални координатни системи
- Реализация с трансформации

Степени на свобода

# Свързани системи

## Свързани системи

- Системи от свързани елементи
- Елементите не се деформират

## Движения

- Въртене на елемент около точка на закачване
- Много по-рядко – плъзгане на елемент

## Степени на свобода

- Минималният брой параметри, за дефиниране на достъпните движения в свързани системи
- Параметрите трябва да са независими
- На английски: *Degree of Freedom (DoF)*

## В компютърната графика

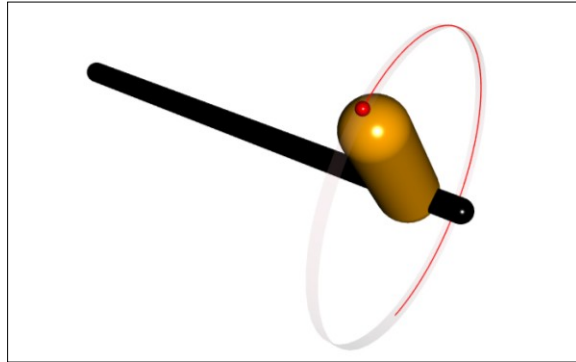
- Най-често от 0 до 6 степени на свобода

## **0 степени на свобода**

- Два елемента са твърдо свързани
- Без възможност за плъзгане и въртене
- Елементите не се обединяват най-вече за удобство
- Не са нужни параметри, понеже няма движение

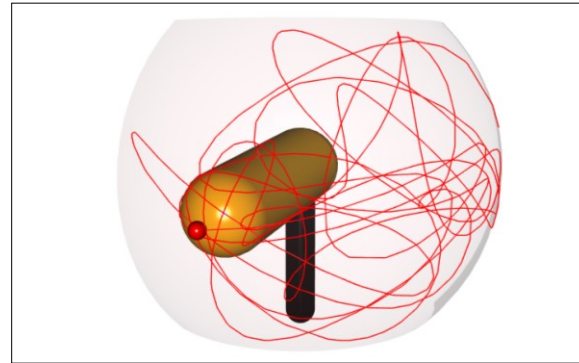
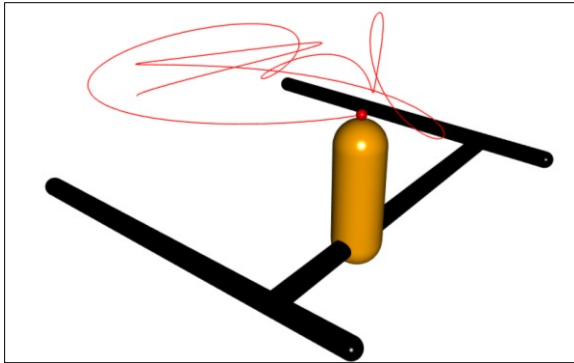
# 1 степен на свобода

- Плъзгане по ос с параметър, който е разстояние
- Въртене около ос с параметър - ъгъл



## 2 степени на свобода

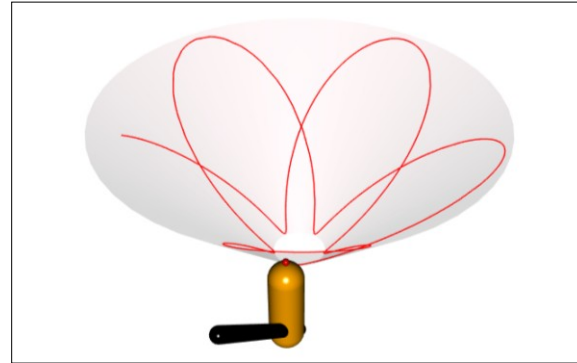
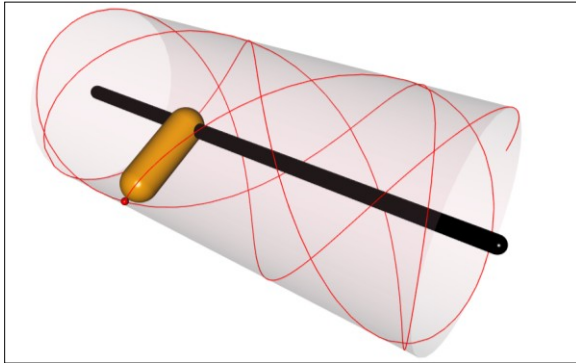
- Плъзгане по две оси  
(параметрите са две разстояния)
- Въртене около две оси  
(параметрите са два ъгъла)





# О, има още варианти на 2 степени

- Едно плъзгане и едно въртене
- Различни варианти според реда на прилагане на двете свободи и доминантните скорости



# Трансформации

## Съответствие на трансформациите

- Плъзгането е транслация  
(максимално три степени на свобода)
- Въртенето е ротация  
(още три степени на свобода)
- Надуването и свиването е мащабиране  
(рядко се счита за степен на свобода)

# Степени и достижимост

- 0 степени – достижима е само една точка  
(има 0D достижимост)
- 1 степен – достижима е права или крива  
(има 1D достижимост)
- 2 степени – достижима е повърхност като сфера  
(2D достижимост)
- 3 степени – достижим е обем като кълбо  
(3D достижимост)

# ЧОВЕШКОТО ТЯЛО

## Ротационни степени на свобода

- Степени на свобода при въртене
- Има ги всичките 3

## 0 степени на свобода

- Зъби-челюст  
(изключая бокса и млечните зъби)
- Ребро-прешлен

# **1 степен на свобода**

- Коляно – сгъва се само в една равнина  
(в друга би боляло много)
- Фаланги на пръстите

# **2 степени на свобода**

- Челюст – нагоре-надолу и наляво-надясно  
(при дъвчене и преживяне, не се брои плъзгането напред-назад)
- Очи  
(с изключение на Попай Моряка)

## **3 степени на свобода**

- Китка – нагоре-надолу, наляво-надясно и усукване
- Език  
(въпреки, че няма кости и стави)
- Врат и кръст  
(приемаме с условност)

## **Важност на степените на свобода**

- Знае се отлично тяхната важност, особено при преживяване с гипсиран крак
- Или пък прищипан нерв
- Или пък спане накриво

# Скелети (Йерархични системи)

# Скелети

## Неформална дефиниция

- Дървовидни (йерархични) модели от свързани елементи

## Следствия

- Има един главен, първичен елемент
- Всеки друг елемент има точно един родител



# Използване в компютърната графика

- Представяне на биологични форми чрез скелет  
(хора, животни, растения)
- Моделиране на роботи и други сложни механизми
- Физическа симулация на вериги от обекти  
(влакова композиция, синджир)
- Планиране на движение с обратна кинематика

## **Представяне на скелети**

- Костите са недеформируеми
- Ставите са с 0 до 3 степени на свобода на въртене

## **Свързване**

- Всяка кост се свързва с друга чрез става
- Позата на скелета е множеството от ъглите на завъртяност във всички стави

## **Сложност при анимацията**

- Зависи от дълбочината на връзките
- Зависи от степените на свобода във всеки възел

## **В човешкото тяло**

- По-ниските степени на свобода (като в коляно, лакът, пръсти ...) се компенсират с по-дълбока йерархия

# Основни проблеми

## Проблеми при йерархичните системи

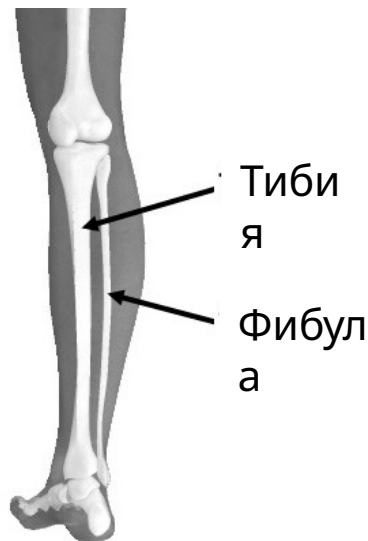
- Да се опише ориентацията на подчинените елементи
- Малка промяна във възел, променя всички навързани към него елементи

## Пример с човешкия скелет

- От лумбарен прешлен (при кръста) до върха на показалеца има 20+ възела

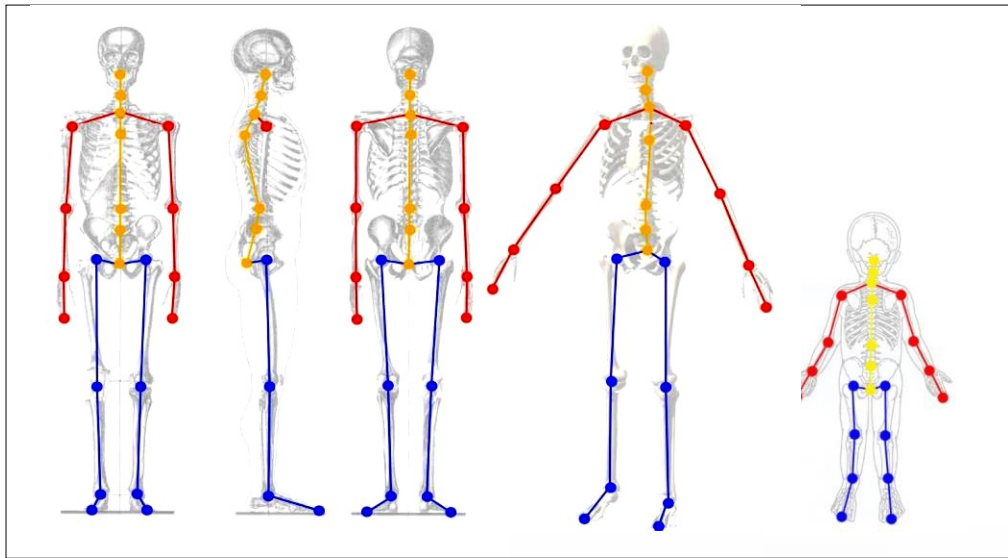
# Опростяване на скелет

- В КГ не е нужно точно анатомично представяне
- Някои кости (напр. тибия и фибула) се сливат
- Могат да се добавят несъществуващи кости



# Човешки скелет

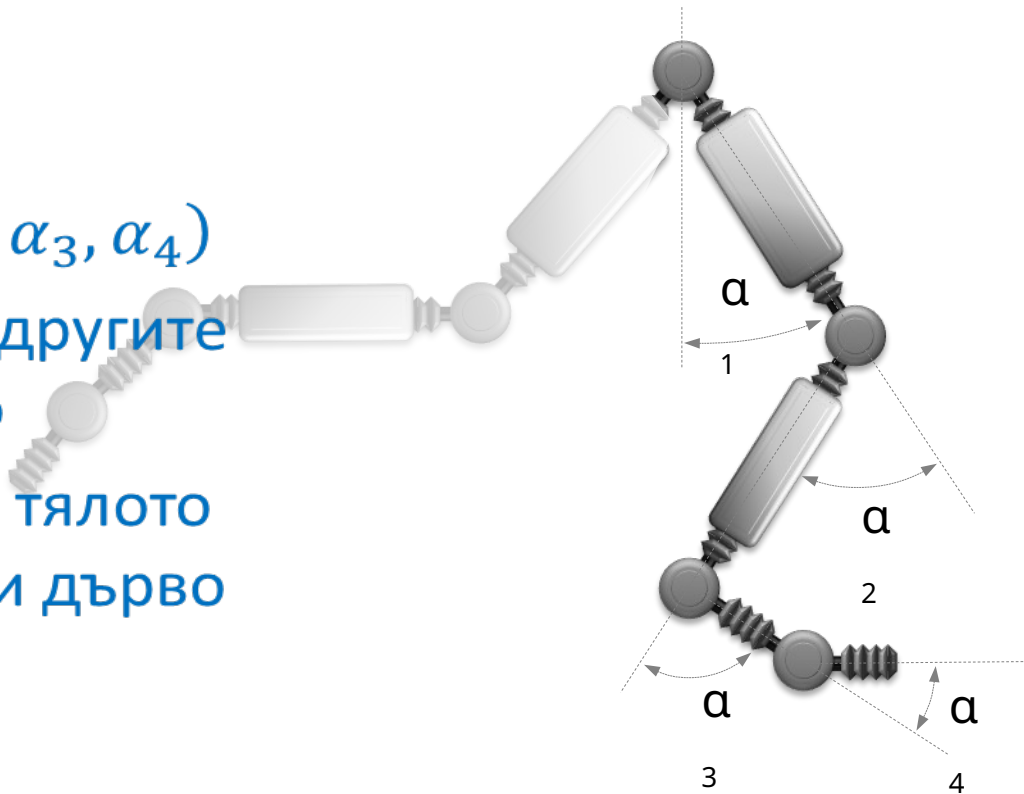
- Топология, независеща от възрастта
- Ако ходилата са обути, не се правят пръсти



# Представяне на поза

## Набор от ъгли

- За крак ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ )
- Аналогично за другите части на тялото
- Поза на цялото тялото чрез вектор или дърво от ъгли



# Движение на скелет

## Пряко задаване на движението

- За всеки ъгъл в става има функция спрямо времето

## Движение чрез интерполация

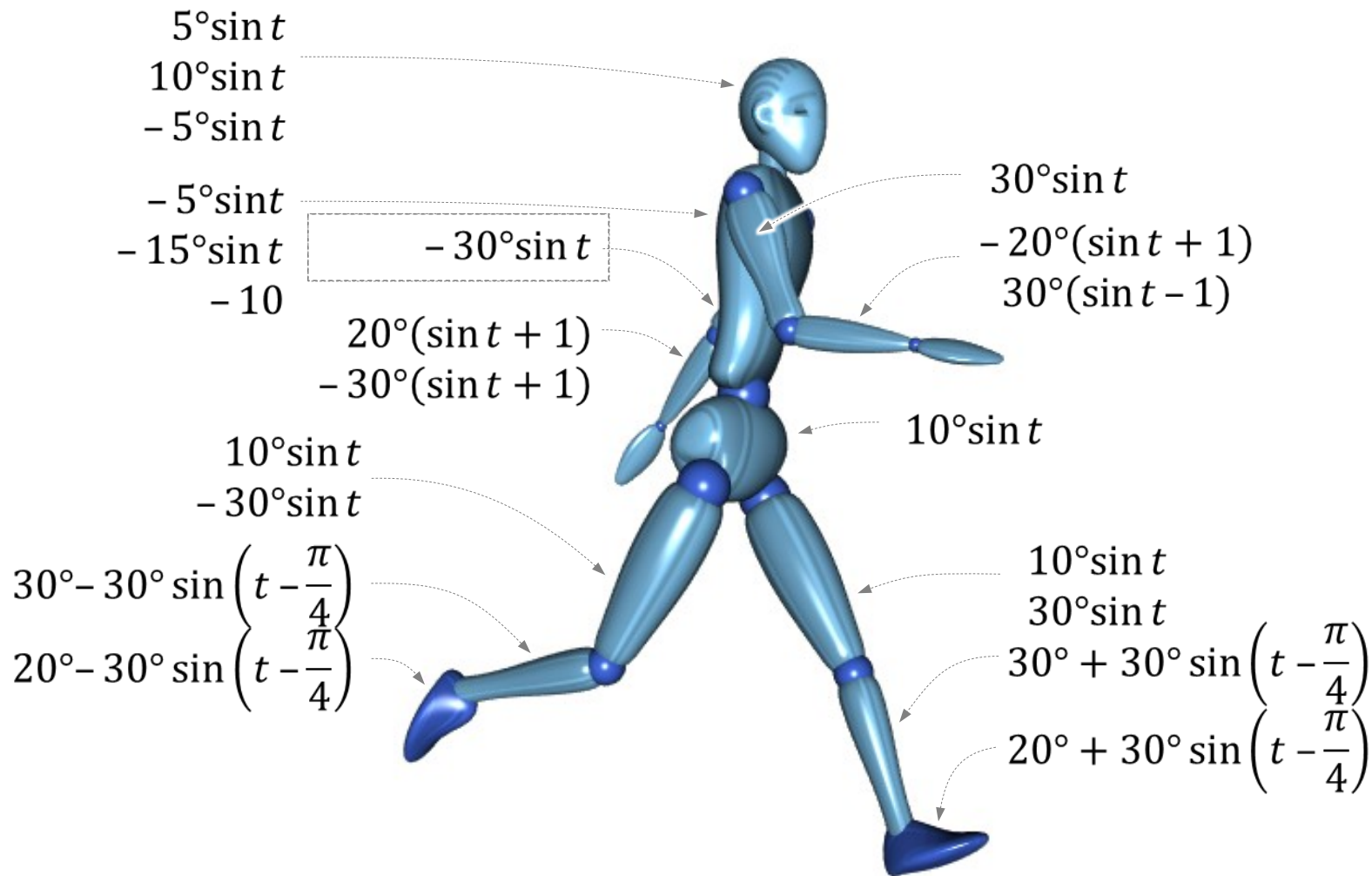
- Задават се само основните пози  
(всяка чрез вектор от вектори от ъгли)
- Междинните пози – чрез интерполация



# Движение чрез функции

- Ъглите на завъртане в ставите се контролират от периодични функции





# Движение с интерполация

## В компютърната графика

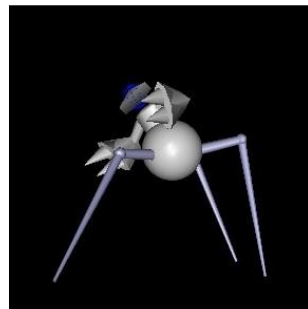
- Спестява ръчното дефиниране на всяко движение
- Лесно се контролира скоростта на движение

## Реализация

- Една поза се описва с вектор от вектори от ъгли  
(програмистки казано, масив от комплекти от три ъгъла)

# Примерни модели

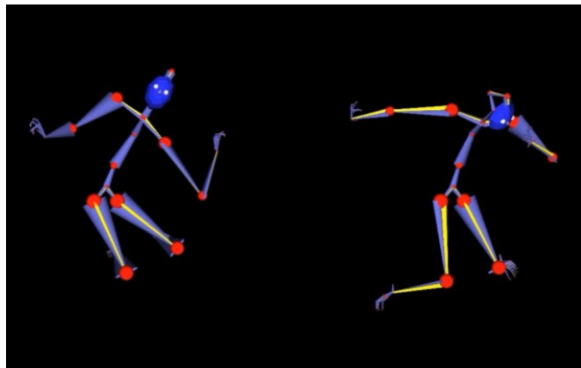
- Полет в безтегловност [NOGRAVITYMAN.ELI](#)
- Модел на мутант [THEMUTANT.ELI](#)
- Трикрак робот [SPIDERWARIOR.ELI](#)
- Интерполация на пози [MARCHINGMAN.ELI](#)



# В помощ на аниматора

## Допустими интервали на въртене

- Дефинират се за всяка става
- Гарантират естественост дори и на случайни пози:



"Emotional Postures"

<http://youtu.be/55q-PWGyBnk>

# Реализация с костенуркова графика

# Реализация на скелети

## Три основни метода

- Костенуркова графика  
(за подробности вижте тема 14)
- Локални координатни системи (ЛКС)  
(детайли ще намерите в тема 25)
- Трансформации  
(очаквайте в тема 26)

# Скелет с костенурка

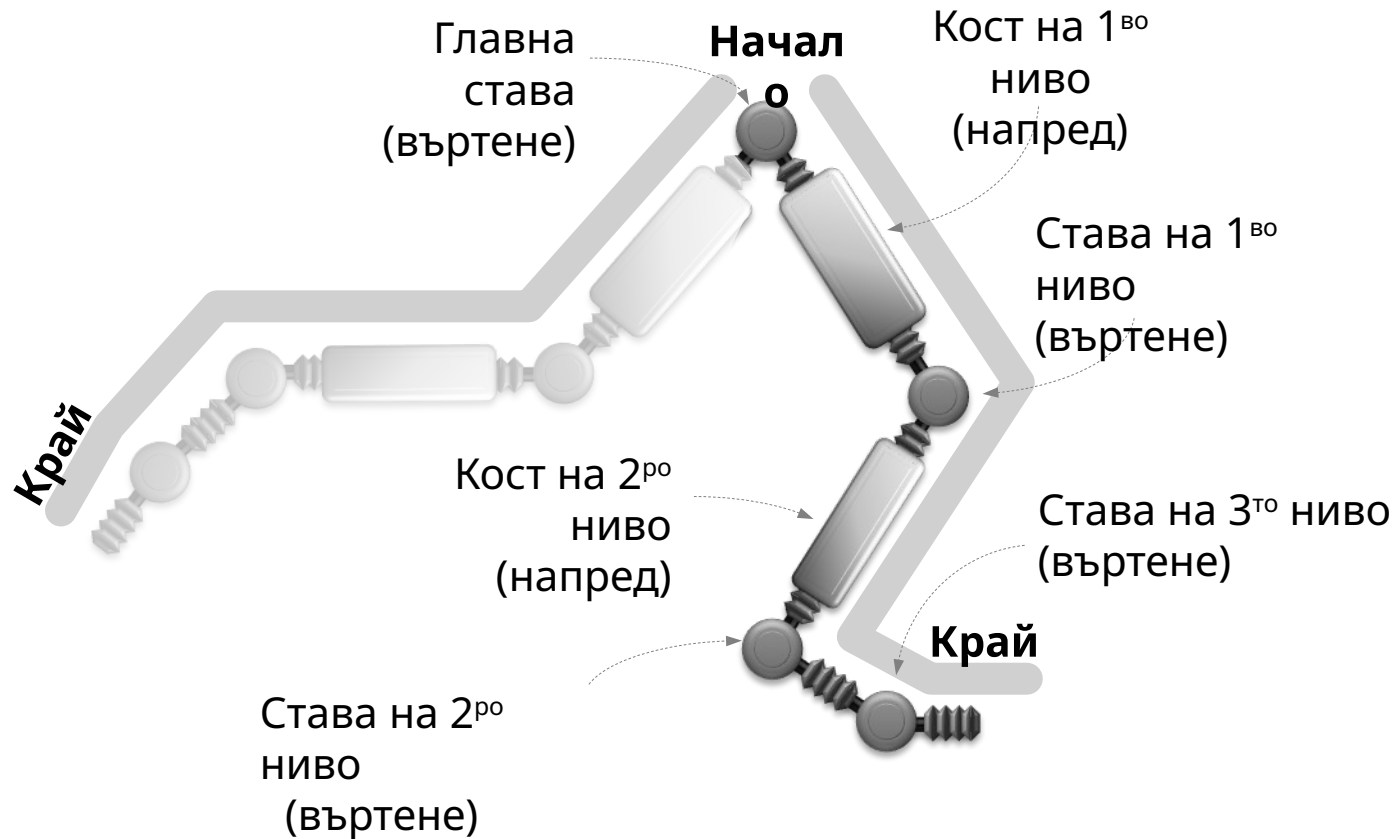
## Обхождане с костенурка

- Започва се от основния елемент на скелета
- На всяка кост има придвижване напред
- На всяка става има въртене около толкова оси, колкото е степента на свобода

## Особеност

- При става с няколко изходящи кости ще се налага връщане на костенурката



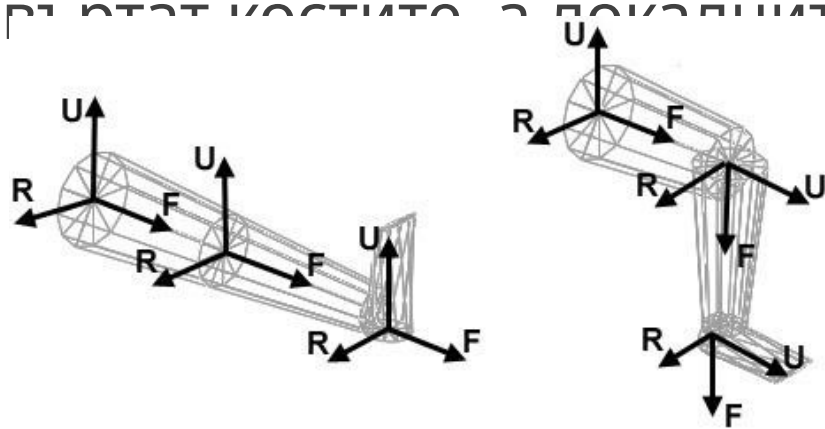


# Реализация с локални координатни системи

# Скелет с ЛКС

## Представяне на скелет

- Във всяка става се слага локална координатна система
- Не се зареждат костите с локалните системи



## Ползи от ЛКС

- Всеки обект се дефинира спрямо неговата си координатна система
- Обектът не се движи, движи се само ЛКС-то му
- При анимация не се преизчислява мястото и ориентацията на обект

# Локални координатни системи

- Всички камъчета са статични



# Взаимовръзка

## Два еквивалентни подхода

- Скелети с костенурка
- Скелети с ЛКС

## Защото

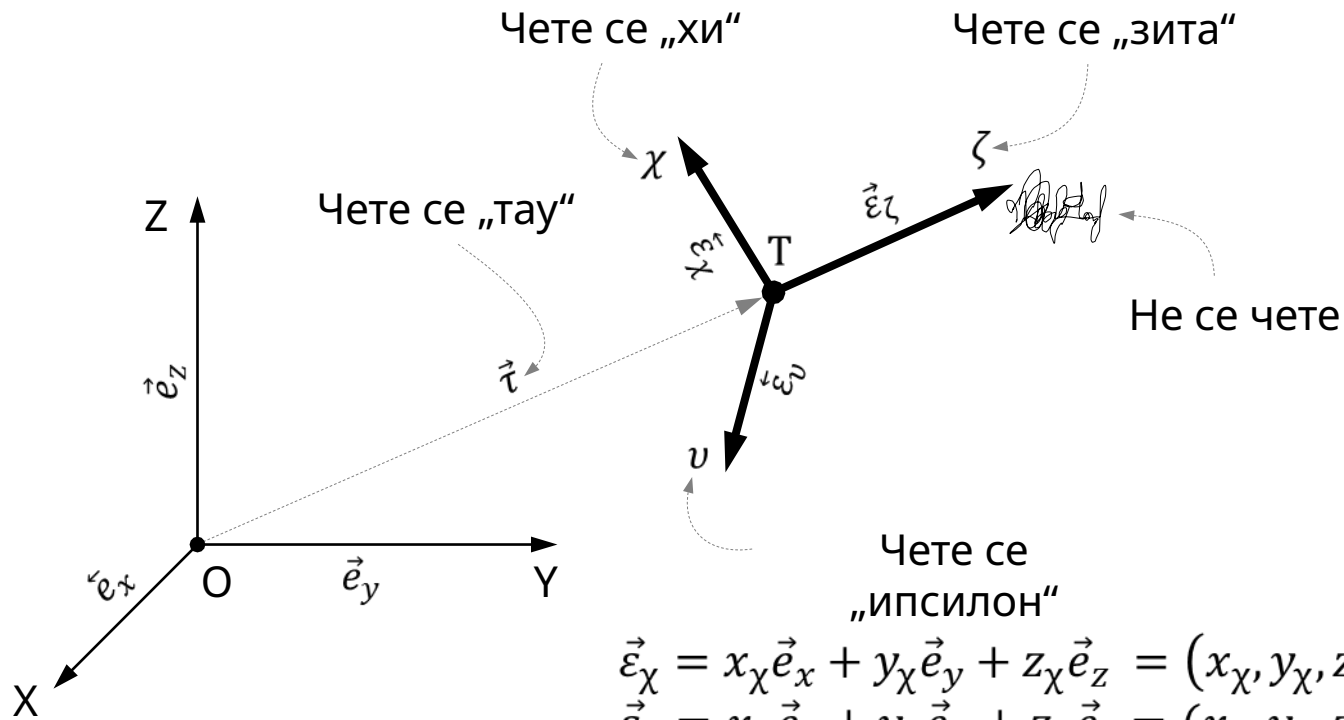
- Всяка костенурка си има ЛКС, която се ползва за въртене и придвижване

## Преобразуване на координатни с-ми

- Има обект или движение в една ортонормирана координатна с-ма
- Трябва да се изрази в друга с-ма
- Използва се координатната система като трансформационна матрица

## Пример с координатни системи

- Глобална  $Oxyz$  и локална  $Txyz$



$$\vec{\epsilon}_\chi = x_\chi \vec{e}_x + y_\chi \vec{e}_y + z_\chi \vec{e}_z = (x_\chi, y_\chi, z_\chi)$$

$$\vec{\epsilon}_\nu = x_\nu \vec{e}_x + y_\nu \vec{e}_y + z_\nu \vec{e}_z = (x_\nu, y_\nu, z_\nu)$$

$$\vec{\epsilon}_\zeta = x_\zeta \vec{e}_x + y_\zeta \vec{e}_y + z_\zeta \vec{e}_z = (x_\zeta, y_\zeta, z_\zeta)$$

$$\vec{\tau} = x_\tau \vec{e}_x + y_\tau \vec{e}_y + z_\tau \vec{e}_z = (x_\tau, y_\tau, z_\tau)$$



ЗАЩО

Y

СЕ ЧЕТЕ **ИГРЕК?**

отговор:

на латински: **i Graeca /и: грек/**

в превод: гръцко „и“

## Построяване на матрицата

- Разполагат се 3<sup>me</sup> оси и началото на ЛКС
- Матрицата има супер сладки свойства

$$M = \begin{pmatrix} x_{\chi} & x_{\upsilon} & x_{\zeta} & x_{\tau} \\ y_{\chi} & y_{\upsilon} & y_{\zeta} & y_{\tau} \\ z_{\chi} & z_{\upsilon} & z_{\zeta} & z_{\tau} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow$   
 $\vec{\varepsilon}_{\chi} \quad \vec{\varepsilon}_{\upsilon} \quad \vec{\varepsilon}_{\zeta} \quad \vec{\varepsilon}_{\tau}$

## Свойство

- Връзка на произволен елемент между ГКС и ЛКС:

$$M \times (\text{глобален\_елемент}) = \text{локален\_елемент}$$

$$M \times (\text{локален\_елемент\_в\_ЛКС})$$

$$= \text{локален\_елемент\_в\_ГКС}$$

## Примери

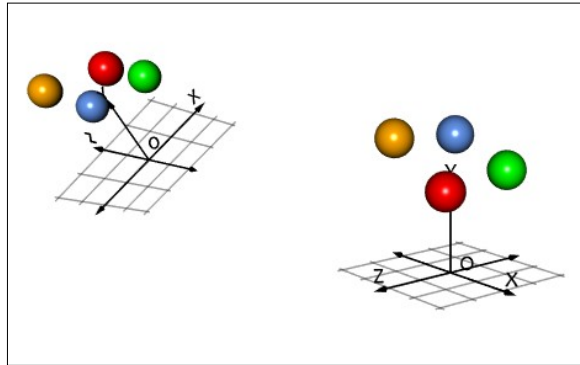
- $M \vec{e}_x = \vec{\varepsilon}_\chi$  или  $MO = T$

- $M \vec{\varepsilon}_{\zeta, \text{ЛКС}} = M \times (0,0,1) = (x_\zeta, y_\zeta, z_\zeta) = \vec{\varepsilon}_{\zeta, \text{ГКС}}$

(Т.е. обект/движение в ЛКС може да се проектира в ГКС чрез умножение с  $M$ )

# Експеримент с две координатни системи

- Топат се топки вертикално в едната
- Получава се топането им в другата



# Обхождане на скелет

## Създаване

- Всяка става си има ЛКС и всяка кост към нея е дефинирана спрямо нея
- Няма интерес към това коя става как е завъртяна

## Обхождане

- Преминава се от една ЛКС към друга чрез умножение на матрици

# Реализация с трансформации

# Скелети с трансформации

## Три еквивалентни подхода

- Скелети с костенурка
- Скелети с ЛКС
- Скелети с трансформации

## Защото

- Всеки преход от една към друга координатна система  
е умножение с матрица



# Наблюдателност

- Матрицата от ЛКС има пълна 3D трансляция и ротация
- Създадена е без тригонометрична борба

$$M = \begin{pmatrix} x_{\chi} & x_{\upsilon} & x_{\zeta} & x_{\tau} \\ y_{\chi} & y_{\upsilon} & y_{\zeta} & y_{\tau} \\ z_{\chi} & z_{\upsilon} & z_{\zeta} & z_{\tau} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

# Обхождане на скелет

## Създаване

- За всяка става има матрица
- Няма интерес към това коя става как е завъртяна и къде е в пространството

## Обхождане

- Координатите на кост спрямо основната става става чрез умножение на всички ставни матрици до нея

съществително

глагол

# Модел направен от студент

- Движението е чрез трансформации
- Само основни трансформации, чиито матрици се умножават в реално време



"Blue Marine"

[http://youtu.be/mLILOUjQqY  
E](http://youtu.be/mLILOUjQqYE)

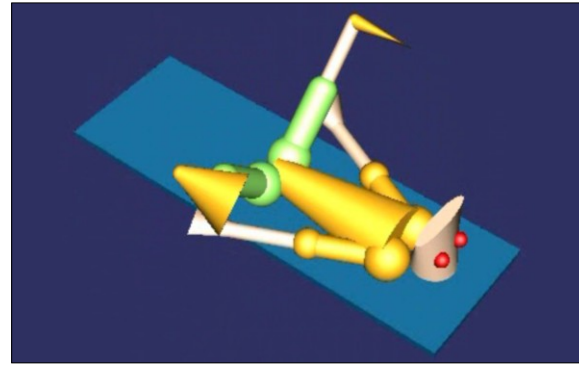
# Други примери с трансформации

- Чаша с генетични деформации
- Упражнения по аеробика



"A mug with a DNA"

<http://youtu.be/KJb3U576am4>



"Aerobics"

<http://youtu.be/6U-Hg-LiFLY>

Въпроси?

# Повече информация

**AGO2**                    стр. 141-146

**PARE**                    стр. 175-192

## А също и:

- Degrees of Freedom

[http://www.robotics.utexas.edu/rrg/learn\\_more/low\\_ed/dof/](http://www.robotics.utexas.edu/rrg/learn_more/low_ed/dof/)

- Articulated Robots

<http://www.princeton.edu/~stengel/MAE345Lecture2.pdf>

- OpenGL:Tutorials:Basic Bones System

[http://content.gpwiki.org/index.php/OpenGL:Tutorials:Basic\\_Bones\\_System](http://content.gpwiki.org/index.php/OpenGL:Tutorials:Basic_Bones_System)

Край