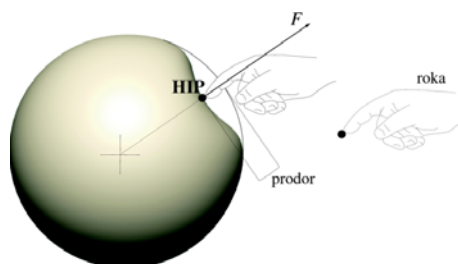


# Prikazovanje dotika

**Matjaž Mihelj**

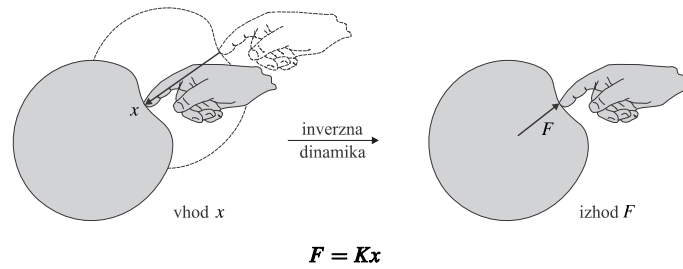
Univerza v Ljubljani,  
Fakulteta za elektrotehniko,  
matjaz.mihelj@fe.uni-lj.si,  
(01) 4768 373  
www.robolab.si, www.cobotic.si

## Izračun sile reakcije



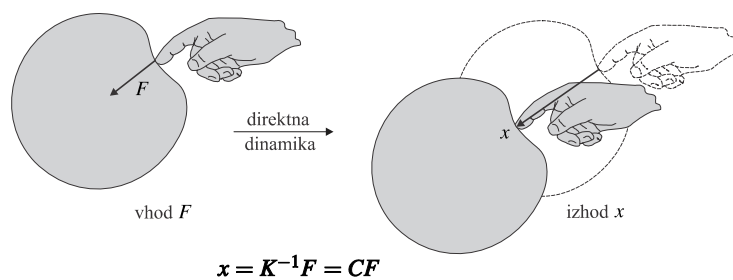
- v praznem prostoru robot ne ovira gibanja
- deformacija objekta je posledica dotika in manipulacije
- fizikalni model in deformacija določata reakcijsko silo

## Impedančni model



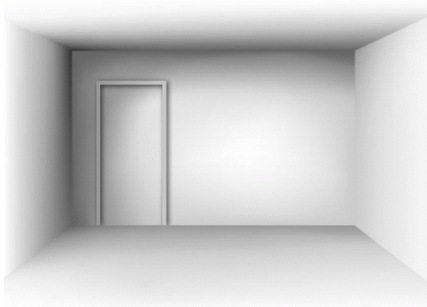
- merimo premik  $x$
- simulacija vrne rezultirajočo silo  $F$
- model togosti  $F = Kx$

## Admitančni model



- merimo silo  $F$  med uporabnikom in haptičnim robotom
- simulacija vrne premik  $x$
- model podajnosti  $x = K^{-1}F$

## Modeliranje praznega prostora in togih objektov

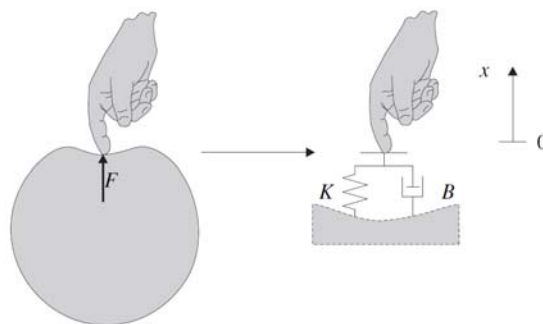


- majhna lastna impedanca haptičnega robota
- aktivna kompenzacija lastne impedance v regulacijskem algoritmu



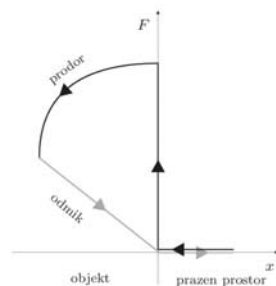
- velika pasovna širina haptičnega robota
- ločljivost in sposobnost generiranja sile
- stabilnost sistema ob dotiku

## Model vzmet-usmerjeni dušilnik



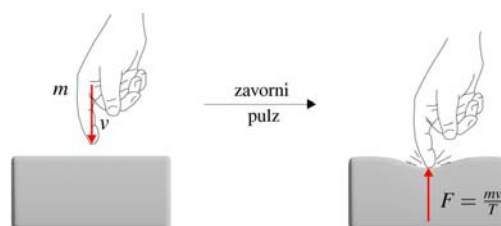
$$F = \begin{cases} 0 & \text{za } x \geq 0 \\ -Kx - B\dot{x} & \text{za } x < 0 \end{cases}$$

## Model vzmet-usmerjeni dušilnik



$$F = \begin{cases} -(Kx + B\dot{x}) & \text{za } x < 0 \wedge \dot{x} < 0 \\ -Kx & \text{za } x < 0 \wedge \dot{x} \geq 0 \\ 0 & \text{za } x \geq 0 \end{cases}$$

## Zavorni pulz



$$F = \frac{\Delta G}{T} = m \frac{v_k - v_{k-1}}{T} = -m \frac{v_{k-1}}{T} \quad \Leftarrow \quad v_k = 0$$

# Zaznana togost

- zaznana togost - razmerje med začetno hitrostjo spremembe sile in hitrostjo gibanja

$$H = \frac{\dot{F}}{\dot{x}}$$

- elastični model stene

$$F = Kx \implies H = \frac{\dot{F}}{\dot{x}} = K$$

- model vzmet-usmerjeni dušilnik

$$F(s) = (Bs + K)x(s)$$

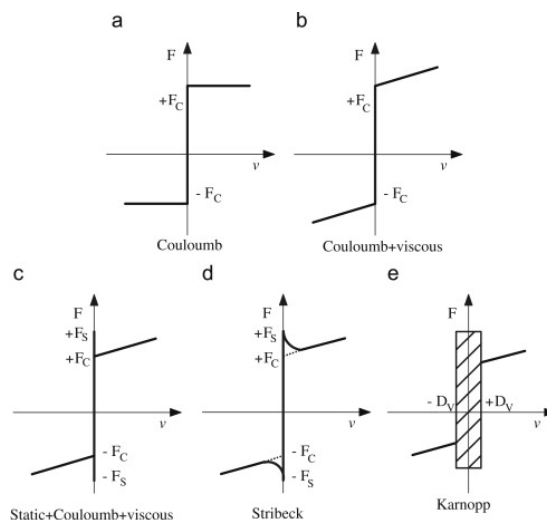
- model dotika in din. model robota

$$F(s) = \frac{a}{s+a}(Bs + K)x(s)$$

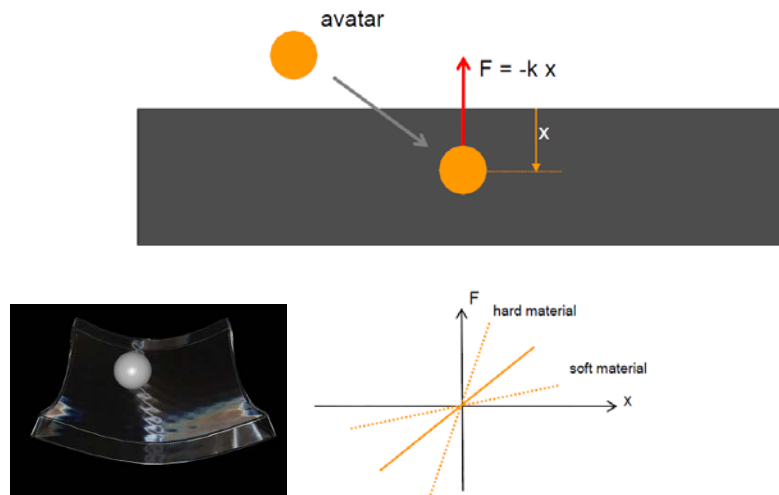
$$\dot{F} = -aF + aB\dot{x} + aKx \quad \dot{F} = aB\dot{x} \implies H = \frac{\dot{F}}{\dot{x}} = aB$$



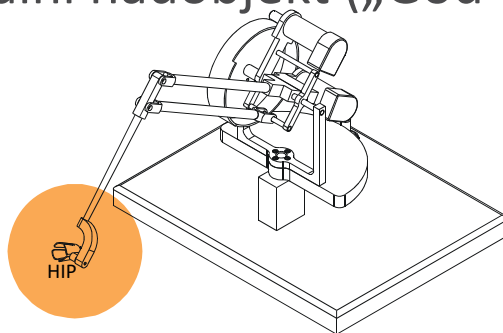
# Modeliranje trenja



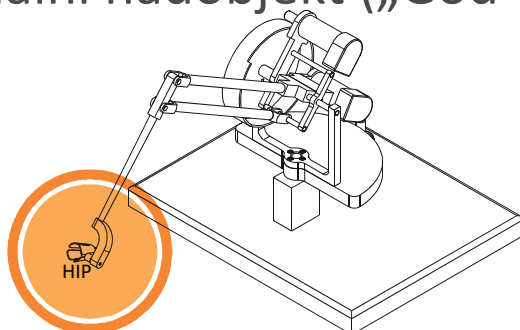
## Impedančni model dotika



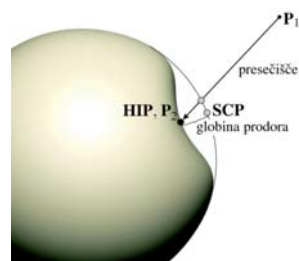
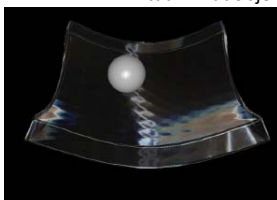
## Virtualni nadobjekt („God-object“)



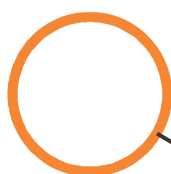
## Virtualni nadobjekt („God-object“)



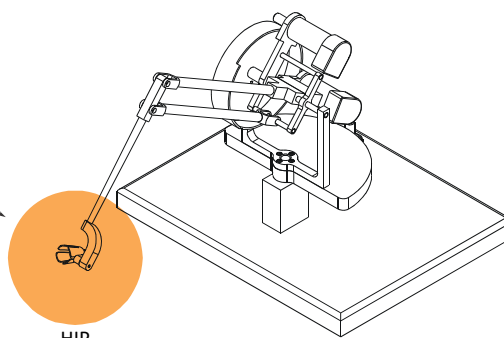
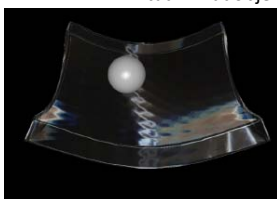
Virtualni nadobjekt



## Virtualni nadobjekt („God-object“)

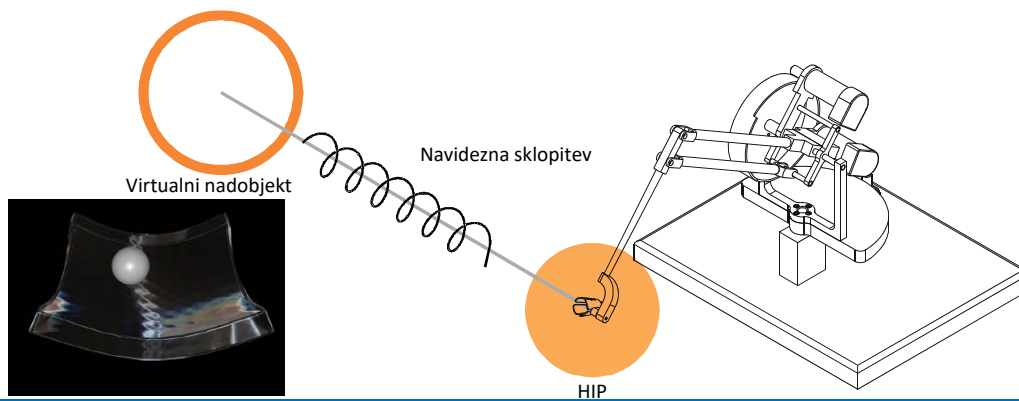


Virtualni nadobjekt



HIP

## Virtualni nadobjekt („God-object“)

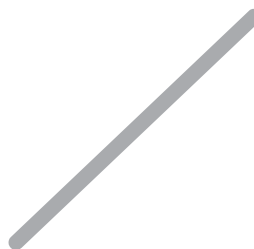


## Virtualni nadobjekt

HIP & Virtualni nadobjekt



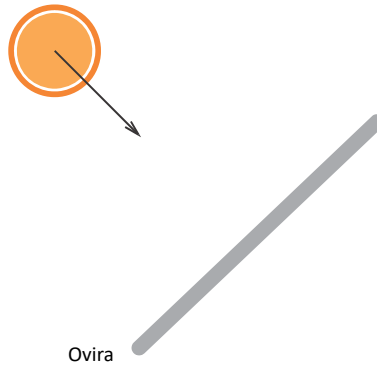
Ovira





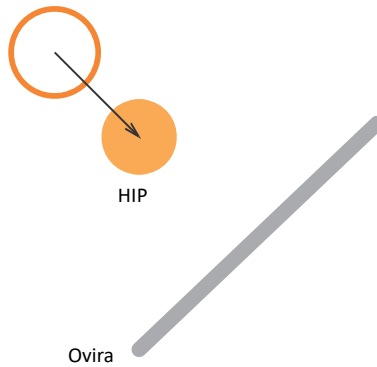
## Virtualni nadobjekt

HIP & Virtualni nadobjekt

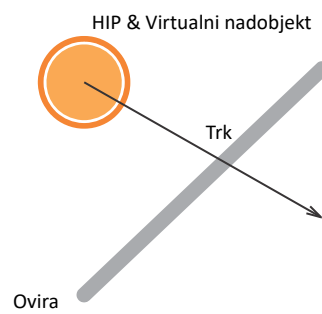


## Virtualni nadobjekt

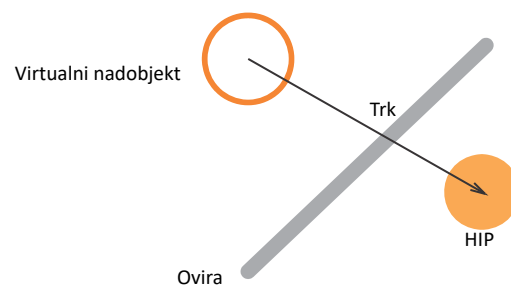
Virtualni nadobjekt



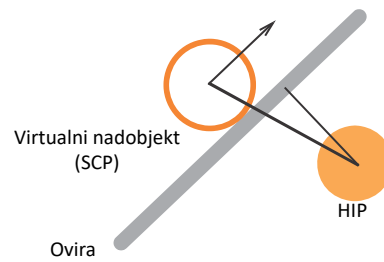
## Virtualni nadobjekt



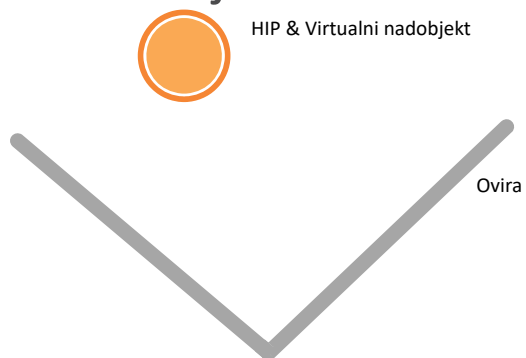
## Virtualni nadobjekt



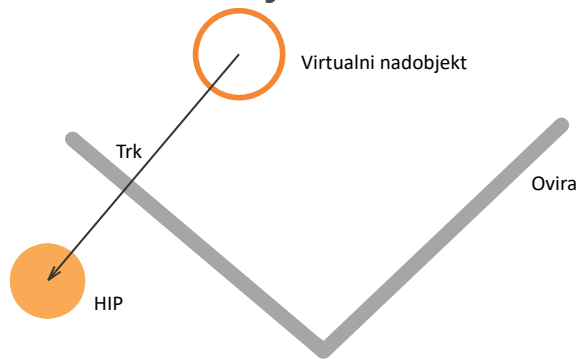
## Virtualni nadobjekt



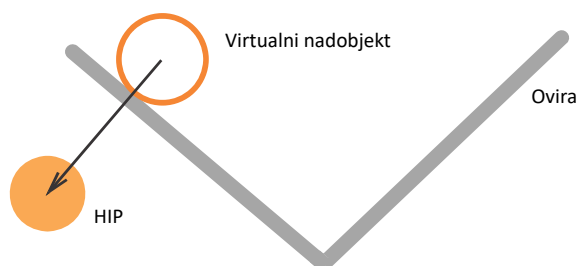
## Virtualni nadobjekt



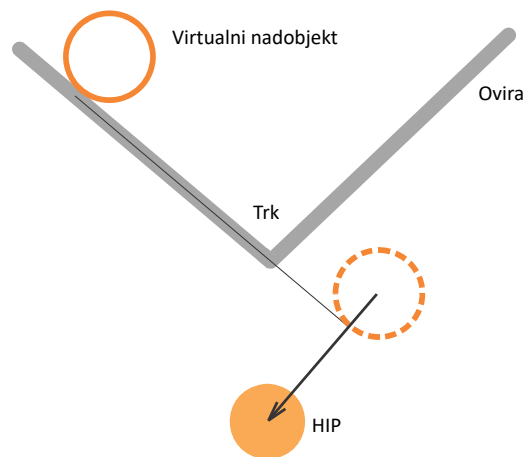
## Virtualni nadobjekt



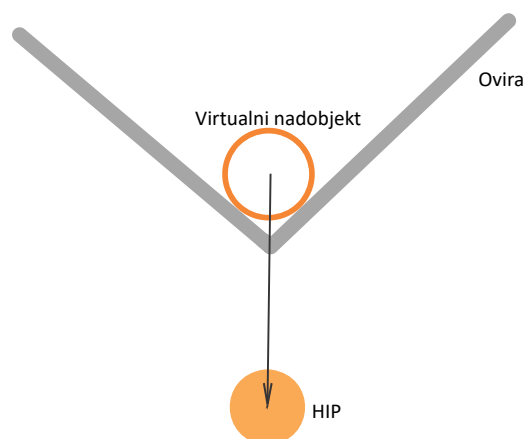
## Virtualni nadobjekt



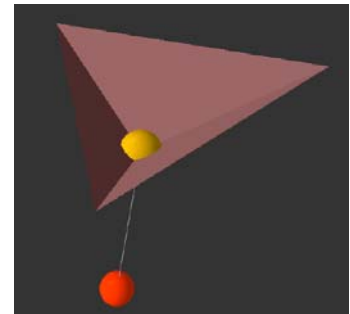
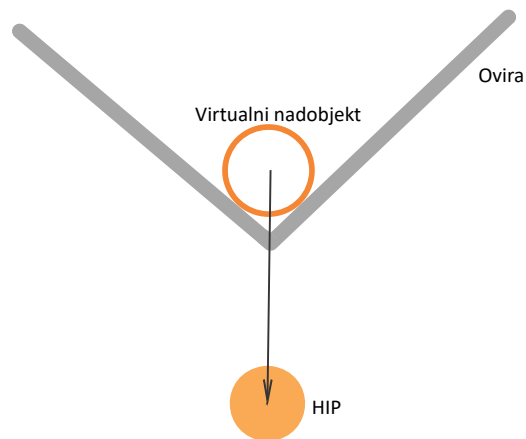
## Virtualni nadobjekt



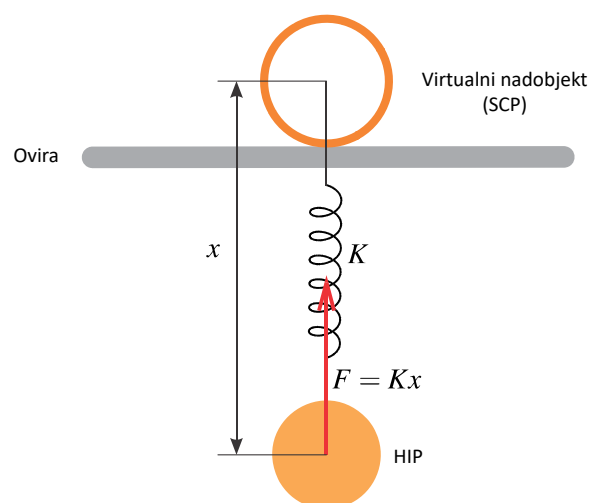
## Virtualni nadobjekt



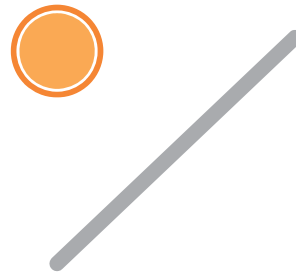
## Virtualni nadobjekt



## Virtualni nadobjekt

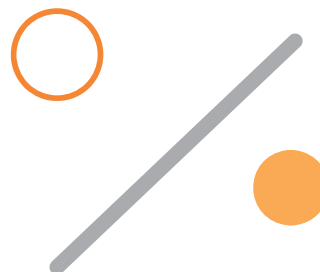


## Virtualni nadobjekt – algoritem



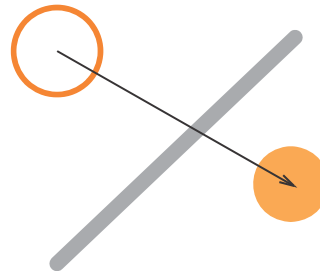
## Virtualni nadobjekt – algoritem

- Branje lege haptičnega robota



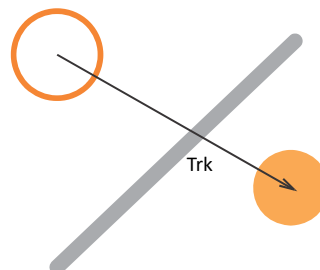
## Virtualni nadobjekt – algoritem

- Branje lege haptičnega robota
- Izračun segmenta med HIP in nadobjektom



## Virtualni nadobjekt – algoritem

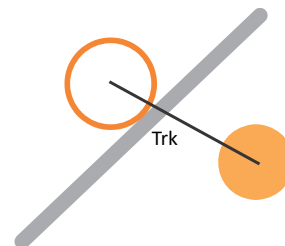
- Branje lege haptičnega robota
- Izračun segmenta med HIP in nadobjektom
- Detekcija trka segmenta z objekti





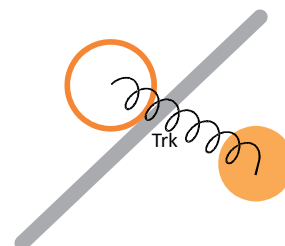
## Virtualni nadobjekt – algoritem

- Branje lege haptičnega robota
- Izračun segmenta med HIP in nadobjektom
- Detekcija trka segmenta z objekti
- Določitev nove lege nadobjekta



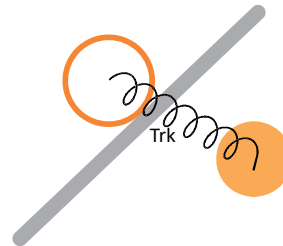
## Virtualni nadobjekt – algoritem

- Branje lege haptičnega robota
- Izračun segmenta med HIP in nadobjektom
- Detekcija trka segmenta z objekti
- Določitev nove lege nadobjekta
- Izračun reakcijske sile



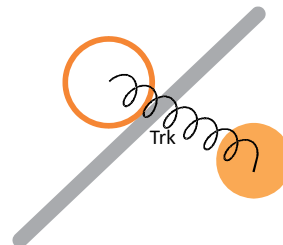
## Virtualni nadobjekt – algoritem

- Branje lege haptičnega robota
- Izračun segmenta med HIP in nadobjektom
- Detekcija trka segmenta z objekti
- Določitev nove lege nadobjekta
- Izračun reakcijske sile
- Apliciranje sile s haptičnim robotom



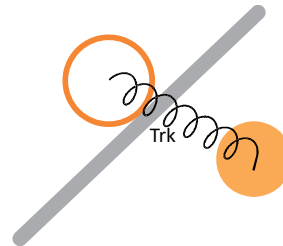
## Virtualni nadobjekt – algoritem

- Branje lege haptičnega robota
- Izračun segmenta med HIP in nadobjektom
- Detekcija trka segmenta z objekti
- Določitev nove lege nadobjekta
- Izračun reakcijske sile
- Apliciranje sile s haptičnim robotom
- Apliciranje sile v navideznem okolju in izračun novih leg objektov



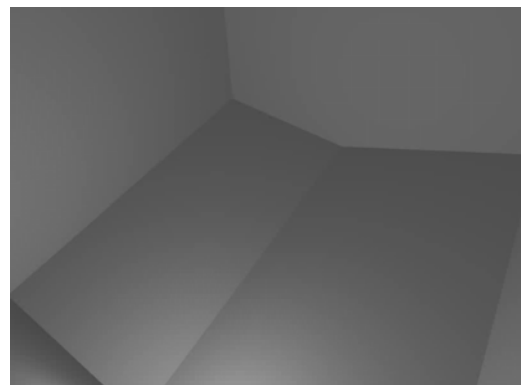
## Virtualni nadobjekt – algoritem

- Branje lege haptičnega robota
- Izračun segmenta med HIP in nadobjektom
- Detekcija trka segmenta z objekti
- Določitev nove lege nadobjekta
- Izračun reakcijske sile
- Apliciranje sile s haptičnim robotom
- Apliciranje sile v navideznem okolju in izračun novih leg objektov



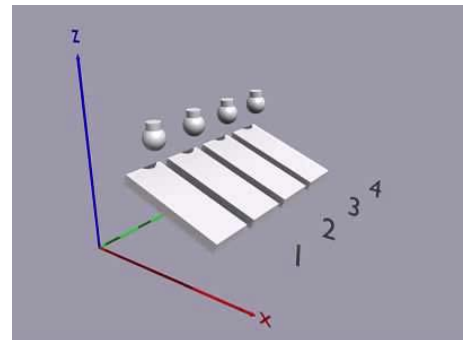
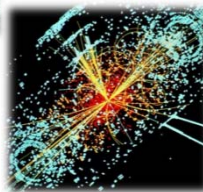
## Dinamika navideznih okolij

- interakcija ni omejena na negibne objekte
- objekti lahko ob dotiku translirajo in rotirajo
- dinamika gibanja objektov prevlada nad togostjo objektov
- osnove dinamike togih objektov izhajajo iz robotike

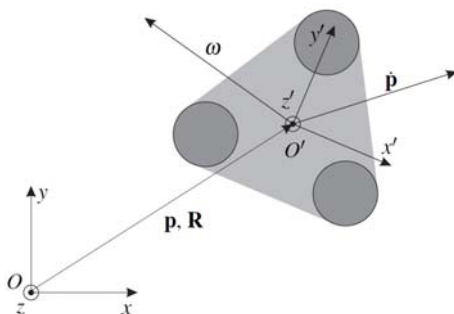


## Fizikalni modeli za opis dinamike

- Statični svet
- Poenostavljena fizika
- **Newtonova fizika**
- Neklasična fizika



## Translacija in rotacija telesa



$$\mathbf{v}(t) = \dot{\mathbf{p}}(t) = \frac{d\mathbf{p}(t)}{dt}$$

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_0 + \int_0^t \mathbf{v}(\xi) d\xi$$

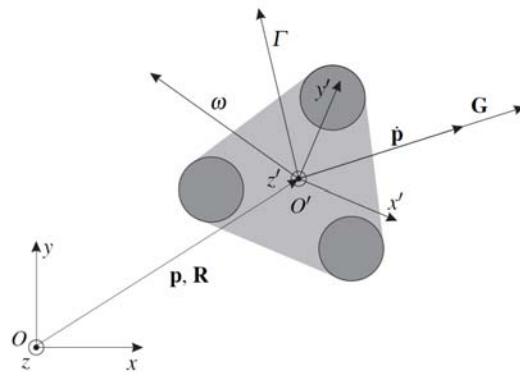
$$\dot{\mathbf{R}}(t) = \boldsymbol{\omega}^*(t) \mathbf{R}(t)$$

$$\boldsymbol{\omega}^*(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z(t) & \omega_y(t) \\ \omega_z(t) & 0 & \omega_x(t) \\ -\omega_y(t) & \omega_x(t) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{q}(t) = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\omega}}(t) \otimes q(t)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}(t) = [0 \ \omega_x(t) \ \omega_y(t) \ \omega_z(t)]^T$$

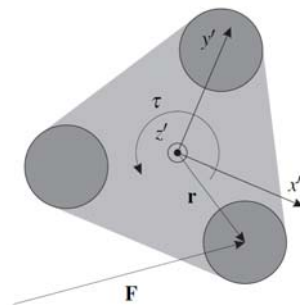
## Gibalna in vrtilna količina



$$\mathbf{G}(t) = M\mathbf{v}(t)$$

$$\mathbf{\Gamma}(t) = \mathbf{I}(t)\boldsymbol{\omega}(t)$$

## Sile in navori



$$d\mathbf{G}(t) = \mathbf{f}(t)dt$$

$$\frac{d\mathbf{G}(t)}{dt} = \dot{\mathbf{G}}(t) = M\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{f}(t)$$

$$\mathbf{G}(t) = \mathbf{G}_0 + \int_0^t \mathbf{f}(\xi)d\xi$$

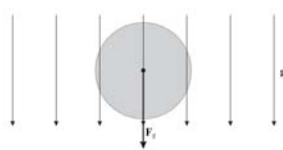
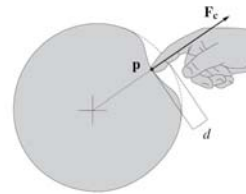
$$d\mathbf{\Gamma}(t) = \boldsymbol{\tau}(t)dt$$

$$\frac{d\mathbf{\Gamma}(t)}{dt} = \dot{\mathbf{\Gamma}}(t) = \boldsymbol{\tau}(t)$$

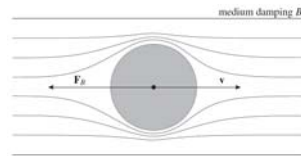
$$\mathbf{\Gamma}(t) = \mathbf{\Gamma}_0 + \int_0^t \boldsymbol{\tau}(\xi)d\xi$$

## Sile in navori na telo

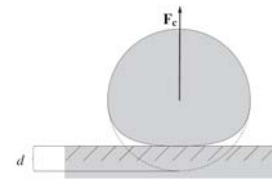
- Interakcija z uporabnikom
- Polje sil (gravitacija)
- Interakcija z medijem (viskozno dušenje)
- Interakcija z objekti
- Virtualni pogoni



$$\mathbf{f}_g = M\mathbf{g}$$

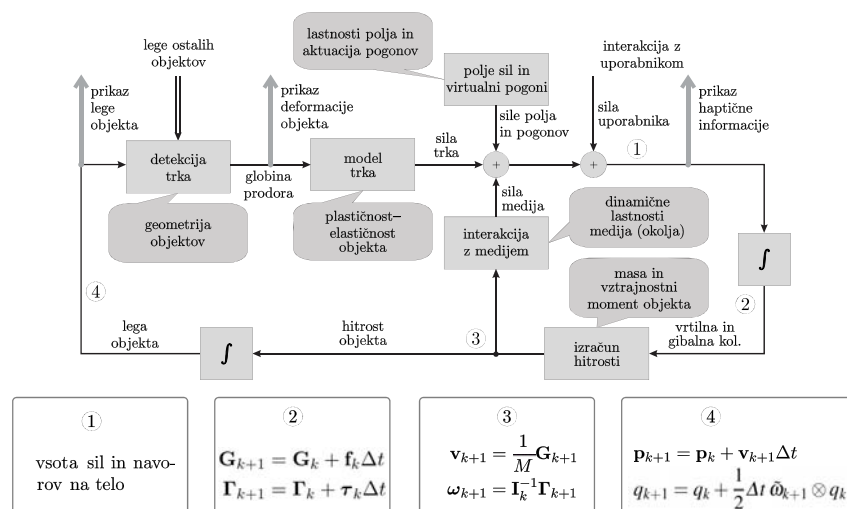


$$\mathbf{f}_b = -b\mathbf{v}$$

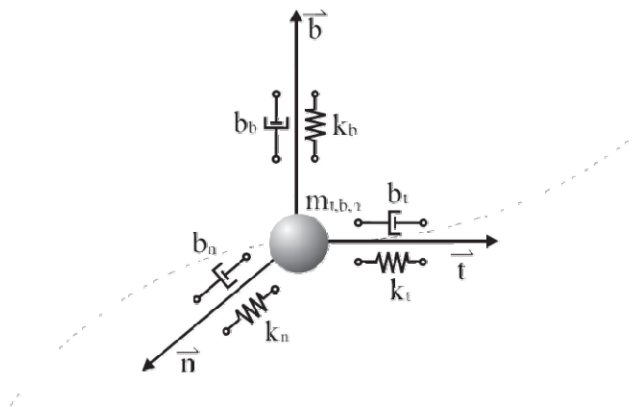


$$\mathbf{f}_c = k d \mathbf{n}$$

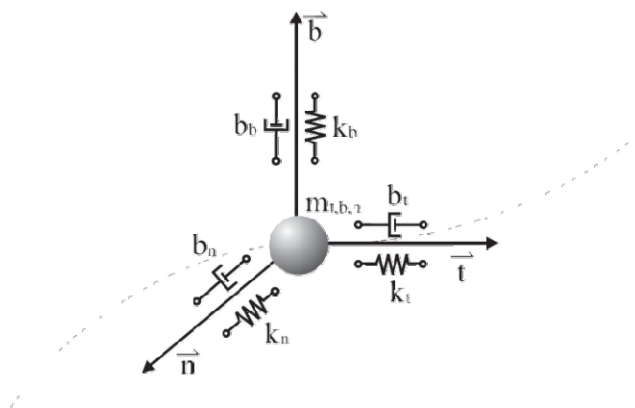
## Izračun dinamike



## Model navideznega okolja



## Model navideznega okolja



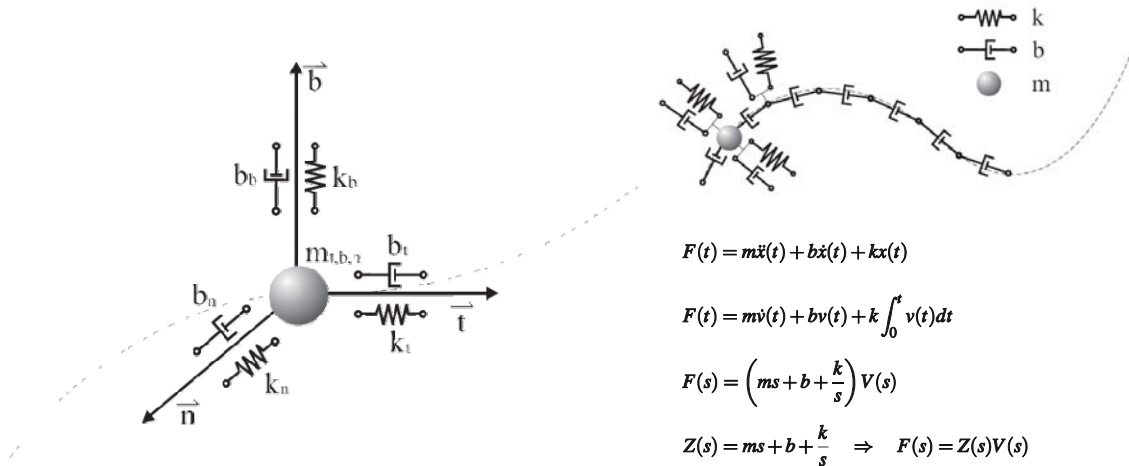
$$F(t) = m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t)$$

$$F(t) = m\dot{v}(t) + b v(t) + k \int_0^t v(t) dt$$

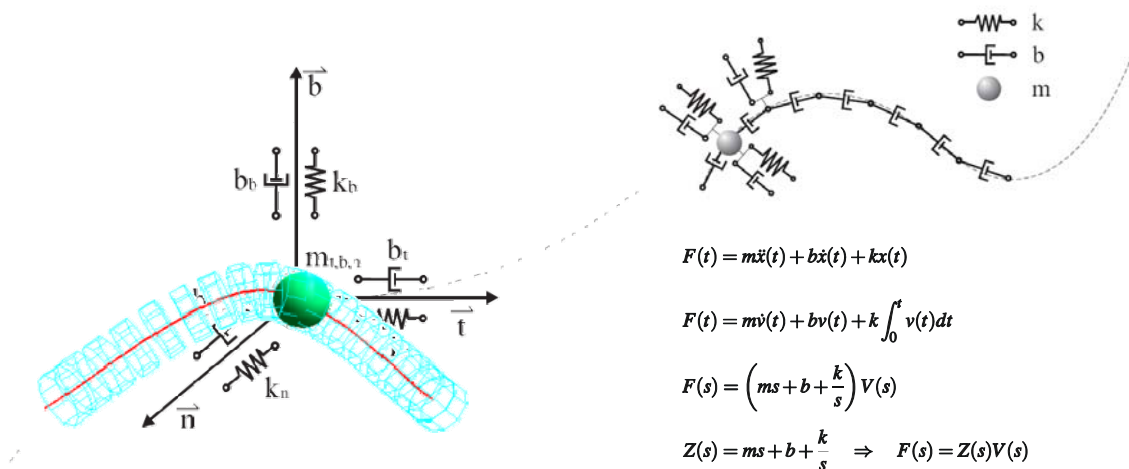
$$F(s) = \left( ms + b + \frac{k}{s} \right) V(s)$$

$$Z(s) = ms + b + \frac{k}{s} \Rightarrow F(s) = Z(s)V(s)$$

## Model navideznega okolja



## Model navideznega okolja





# Haptična interakcija

