University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

COLLABORATIVE ROBOTICS CENTRE

robolab

Virtualne omejitve

Matjaž Mihelj

Univerza v Ljubljani,

Fakulteta za elektrotehniko,

matjaz.mihelj@fe.uni-lj.si,

(01) 4768 373

www.robolab.si, www.cobotic.si

robolab

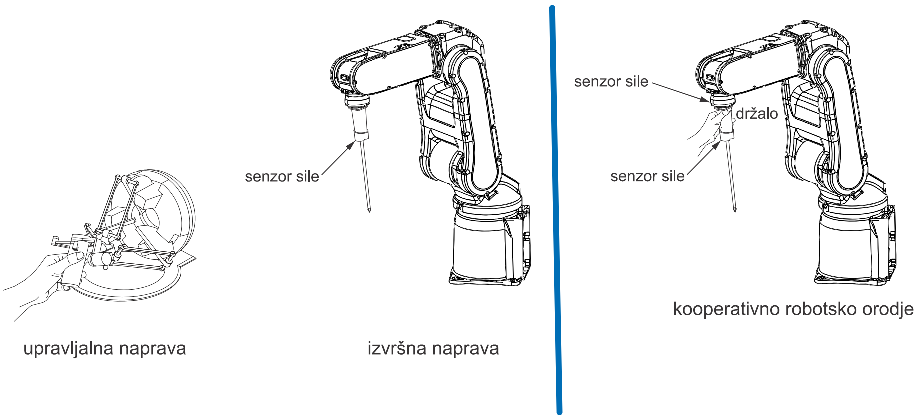
Virtualne omejitve industrijskih robotov

Prostor, ki ga robot ne sme zapustiti — Prostor, v katerega robot ne sme vstopiti — Virtualni „strop"

Vir: Yaskawa, Development Industrial Robots

robolab

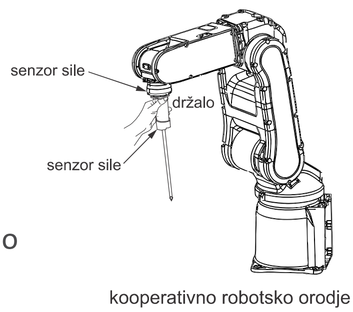
Teleoperacijski sistem / kooperativno robotsko orodje



robolab

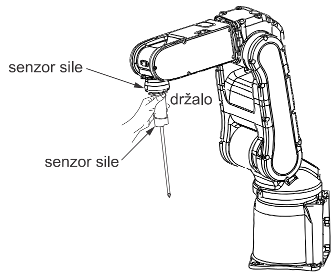
Samozaporni sistemi

- samozaporen mehanizem
- togi segmenti
- senzor sile
- aktivno admitančno vodenje
- visoka natančnost, ki omogoča mikromanipulacijo
- filtriranje tresljajev (tremor) operaterja
- virtualne omejitve



Nesamozaporni sistemi

- nesamozaporen mehanizem
- togi segmenti
- senzor sile (lahko tudi brez)
- impedančno vodenje
- filtriranje tresljajev (tremor) operaterja
- virtualne omejitve



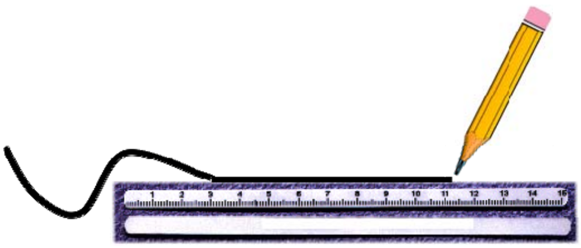
kooperativno robotsko orodje

Virtualne omejitve

- NISO mehanske omejitve robotskega sistema ali okolja, s katerim je robot v stiku
- SO programsko generirane omejitve gibanja
  - v teleoperacijskih sistemih,
  - v kooperativnih sistemih vodenja,
  - pri sodelujočih robotih.
- SO del regulacijskega sistema in so superponirane na fizično okolje v delovnem prostoru robota
- njihov namen je
  - omejiti delovno območje robota,
  - usmerjati ali omejiti gibe operaterja
- uporabljajo se v nalogah, ki zahtevajo
  - ločljivost in natančnost robota ter
  - človekove sposobnosti odločanja

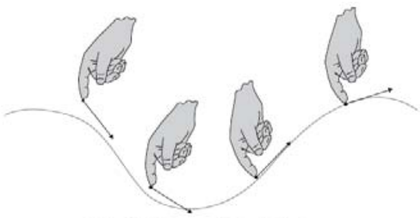
Virtualne omejitve

- abstraktna senzorna informacija superponirana na povratno senzorno informacijo iz okolja, s katerim je v stiku izvršna naprava teleoperacijskega sistema ali kooperativni robotski sistem

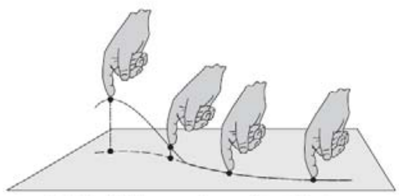


Virtualne omejitve

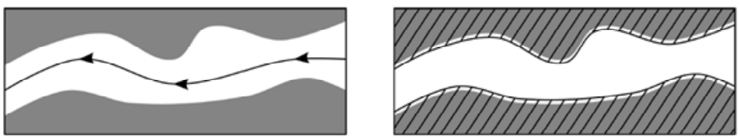
- usmerjevalne
- omejevalne

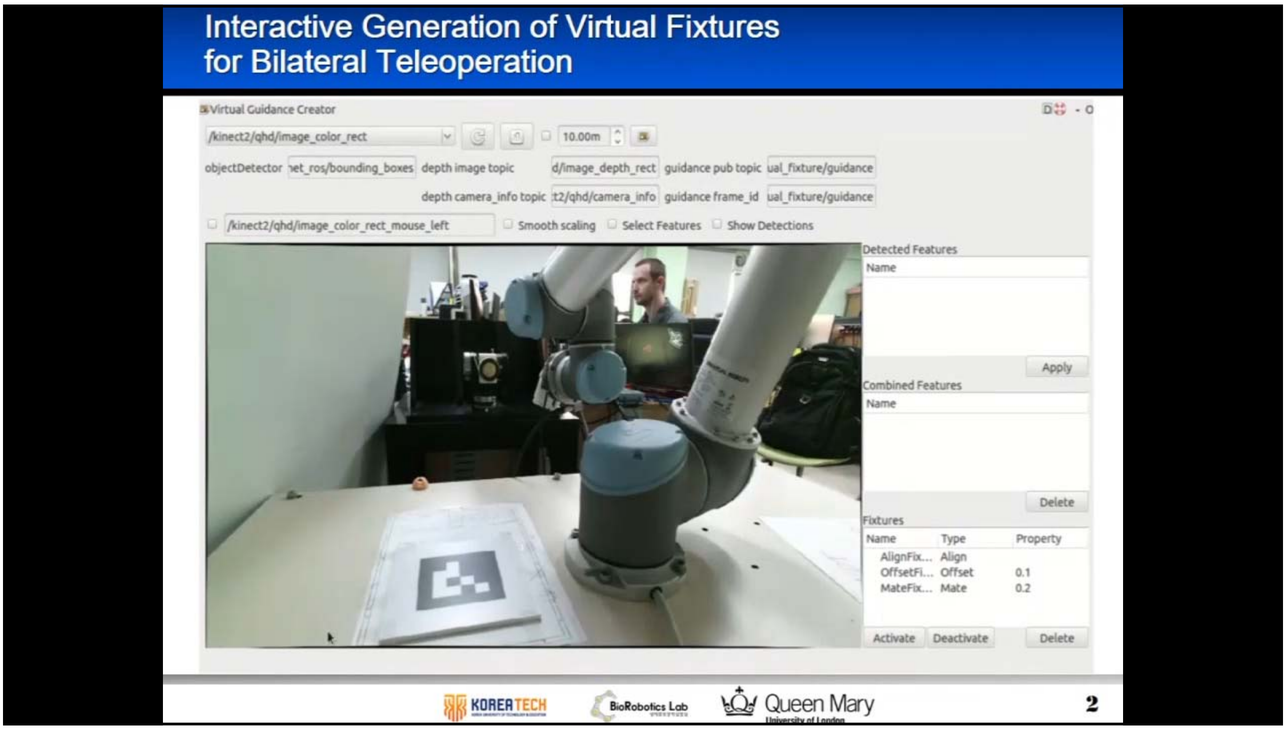


(a) Guidance virtual fixture



(b) Forbidden-region virtual fixture

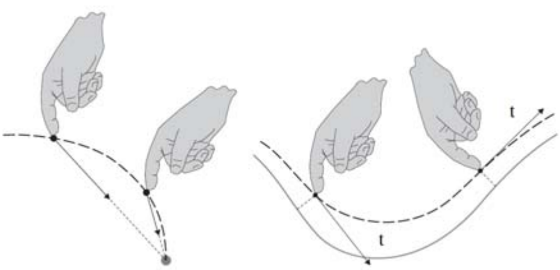




robolab

Usmerjevalne virtualne omejitve

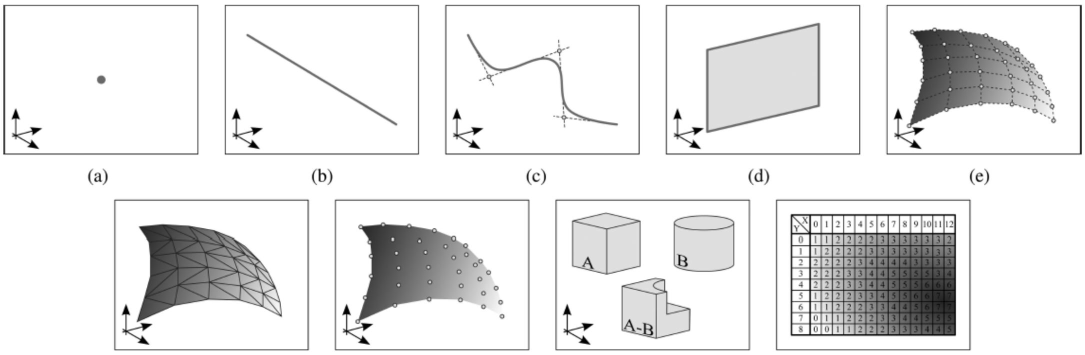
- smer proti točki,
- smer gibanja vzdolž krivulje,
- smer gibanja vzdolž površine virtualne omejitve



(a) Point (b) Curve

robolab

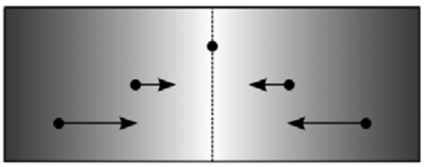
Izvedbe virtualnih omejitev



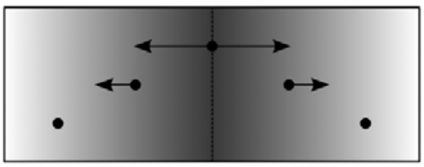
(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) (i)

robolab

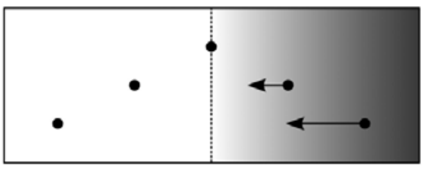
Privlačne in odbojne omejitve



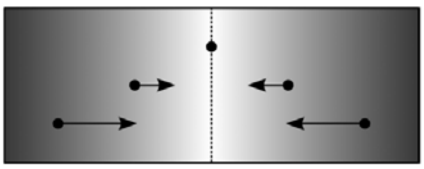
Privlačna omejitev



Odbojna omejitev



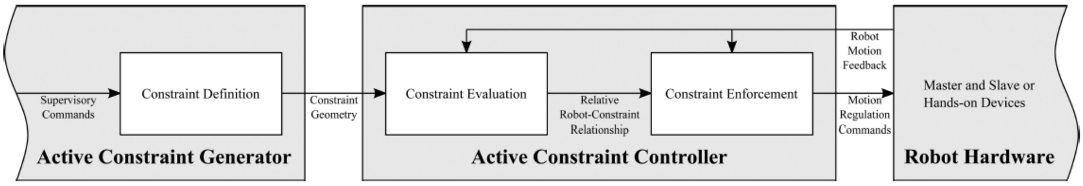
Enostranska omejitev



Dvostranska omejitev

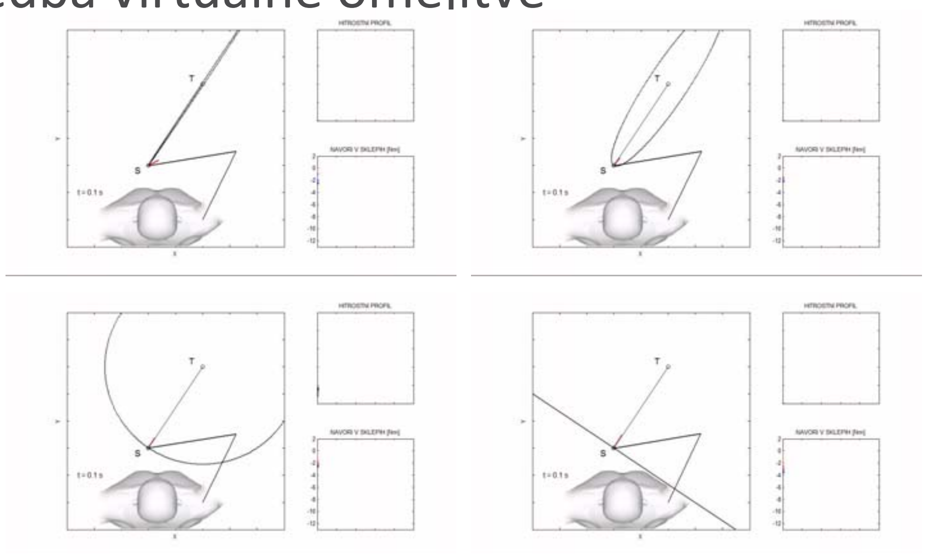
robolab

Izvedba omejitve



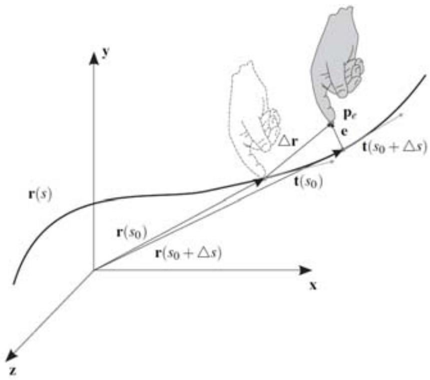
robolab

Izvedba virtualne omejitve



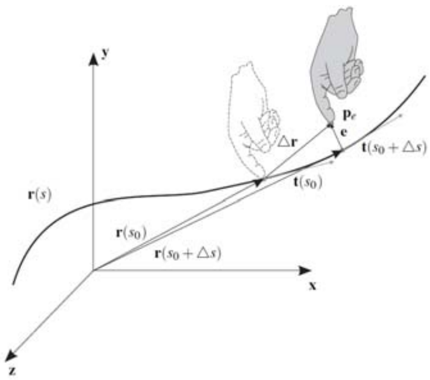
Povzeto po: Doktorska disertacija Matjaž Zadravec

Tangenta in najbližja točka na krivulji



- krivulja $\mathbf{r}(s)$ definirana na intervalu $s \subset [s_s, s_e]$
- nima singularnosti na intervalu $u \subset [s_s, s_e]$
- položaj vrha robota $\mathbf{p}_e = (x_e, y_e, z_e)$

Tangenta in najbližja točka na krivulji

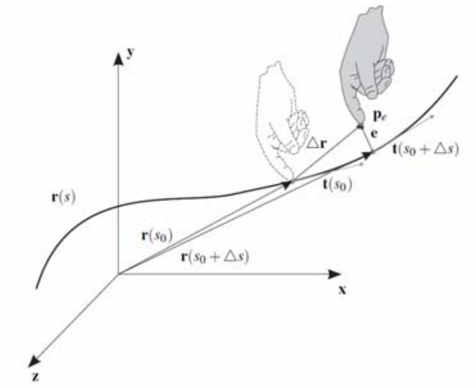


$$\mathbf{p}_e = \mathbf{r}(s_0) + \triangle\mathbf{r} = \mathbf{r}(s_0 + \triangle s) + \mathbf{e}$$

- znan parameter s_0
- neznan, vendar majhen inkrement $\triangle s$

Tangenta in najbližja točka na krivulji

robolab



$$\mathbf{p}_e = \mathbf{r}(s_0) + \triangle\mathbf{r} = \mathbf{r}(s_0+\triangle s) + \mathbf{e}$$

$$\mathbf{r}(s_0+\triangle s) = \mathbf{r}(s_0) + \triangle\mathbf{r} - \mathbf{e}$$

$$\mathbf{r}(s_0+\triangle s) = \mathbf{r}(s_0) + \frac{\triangle s}{1!}\mathbf{r}'(s_0) + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots.$$

$$\mathbf{r}(s_0) + \frac{\triangle s}{1!}\mathbf{r}'(s_0) + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots = \mathbf{r}(s_0) + \triangle\mathbf{r} - \mathbf{e}$$

$$\frac{\triangle s}{1!}\mathbf{r}'(s_0) + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots = \triangle\mathbf{r} - \mathbf{e}$$

$$\triangle s\mathbf{r}'(s_0) = \triangle\mathbf{r} - (\mathbf{e} + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots)$$

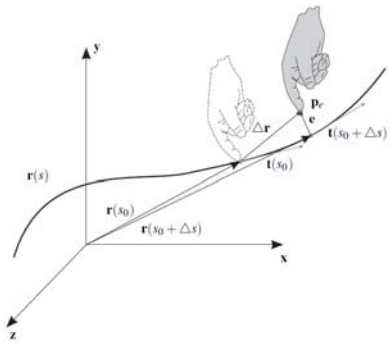
$$\triangle s\mathbf{r}'(s_0)\cdot\mathbf{r}'(s_0) = \mathbf{r}'(s_0)\cdot\triangle\mathbf{r} - \mathbf{r}'(s_0)\cdot(\mathbf{e} + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots)$$

$$\triangle s\|\mathbf{r}'(s_0)\|^2 = \mathbf{r}'(s_0)\cdot\triangle\mathbf{r} - \mathbf{r}'(s_0)\cdot(\mathbf{e} + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots)$$

$$\triangle s = \frac{\mathbf{r}'(s_0)}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|^2}\triangle\mathbf{r} + \frac{\mathbf{r}'(s_0)}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|^2}(\mathbf{e} + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots)$$

Tangenta in najbližja točka na krivulji

robolab



$$\boxed{\begin{gathered}\triangle s = \frac{1}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|}\mathbf{t}\cdot\triangle\mathbf{r}\\ \triangle s_e = \triangle s_{e,p} + \triangle s_{e,d}\end{gathered}}$$

$$\triangle s = \frac{\mathbf{r}'(s_0)}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|^2}\triangle\mathbf{r} + \frac{\mathbf{r}'(s_0)}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|^2}(\mathbf{e} + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots)$$

- enotski tangencialni vektor vzdolž trajektorije

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{r}'(s_0)}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|}$$

$$\triangle s = \frac{1}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|}\mathbf{t}\cdot\triangle\mathbf{r} + \frac{1}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|}\mathbf{t}\cdot(\mathbf{e} + \frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots)$$

$$\triangle s = \frac{1}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|}\mathbf{t}\cdot\triangle\mathbf{r} + \triangle s_{e,p} + \triangle s_{e,d}$$

- napaka zaradi neortogonalnosti vektorjev **t** in **e**

$$\triangle s_{e,p} = \frac{1}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|}\mathbf{t}\cdot\mathbf{e}$$

- napaka zaradi Taylorjeve aproksimacije

$$\triangle s_{e,d} = \frac{1}{\|\mathbf{r}'(s_0)\|}\mathbf{t}\cdot(\frac{\triangle s^2}{2!}\mathbf{r}''(s_0) + \ldots)$$

robolab

Estimacija najbližje točke na krivulji

Initialize
$s_0 = s_s,\ \triangle s_0 = 0$

for $i \in \{1, \ldots \infty\}$
calculate increment $\triangle s$ *for i-th step*

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}'(s_{i-1})$$
$$\mathbf{t}_i = \frac{\mathbf{r}'_i}{\|\mathbf{r}'_i\|}$$
$$\triangle \mathbf{r}_i = \mathbf{p}_{e,i} - \mathbf{r}_i$$
$$\triangle s_i = \frac{1}{\|\mathbf{r}'_i\|}\mathbf{t} \cdot \triangle \mathbf{r}_i$$
$$s_i = s_{i-1} + \triangle s_i$$

if $s_i > s_e$, *then* $s_i = s_e$
if $s_i < s_s$, *then* $s_i = s_s$

calculate error term $\triangle s_e$ *for increment* $\triangle s_i$

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{p}_{e,i} - \mathbf{r}(s_i)$$
$$\triangle s_e = \frac{1}{\|\mathbf{r}'_i\|}\mathbf{t} \cdot \mathbf{e}_i + \frac{1}{\|\mathbf{r}'_i\|}\mathbf{t} \cdot \left(\frac{\triangle s_i^2}{2}\mathbf{r}''(s_{i-1})\right)$$

if $\triangle s_e$ *too large, reiterate step i with new value of* s_i *instead of* s_{i-1}
$s_{i-1} = s_i$
else continue with step (i+1)

robolab

Usmerjevalne omejitve - impedančno vodenje

- polje sil v smeri želene točke ali vzdolž krivulje
- usmerjevalna virtualna omejitev deluje kot točkovni privlak

- 1) privlačna sila: model vzmet-dušilnik

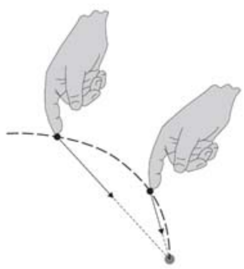
$$\mathbf{F}_{vf,attraction} = K\mathbf{d} - B\dot{\mathbf{p}}_e$$
$$\mathbf{d} = \mathbf{p}_d - \mathbf{p}_e$$

- 2) privlačna sila: model z omejitvijo sile

$$\mathbf{D}(\mathbf{d}) = \begin{cases} \mathbf{d} & \text{if } \|\mathbf{d}\| < d_{max} \\ \frac{\mathbf{d}}{\|\mathbf{d}\|} d_{max} & \text{if } \|\mathbf{d}\| \geq d_{max} \end{cases}$$

$$K(t) = \begin{cases} K\frac{t}{\tau} & \text{if } t < \tau \\ K & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$

$$\mathbf{F}_{vf,attraction} = K(t)\mathbf{D}(\mathbf{d}) - B\dot{\mathbf{p}}_e$$


(a) Point

Usmerjevalne omejitve - impedančno vodenje

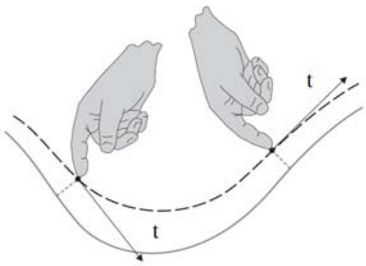
- sila vzdolž trajektorije ($\mathbf{u}$ enotski vektor v smeri tangente v najbližji točki na krivulji)

$$\mathbf{F}_{vf,tangent} = f_t F_{max} \mathbf{u}$$

$$f_t(t) = \begin{cases} \frac{t}{\tau} & \text{if } t < \tau \\ 1 & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$

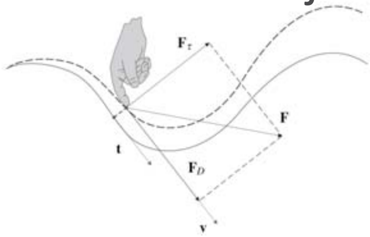
- skupna sila usmerjevalne virtualne omejitve

$$\mathbf{F}_{vf} = \mathbf{F}_{vf,attraction} + \mathbf{F}_{vf,tangent}$$



(b) Curve

Usmerjevalne omejitve - admitančno vodenje



- manipulator je tipično tog
- merimo silo interakcije $\mathbf{F}$ in jo razstavimo v
  - silo v želeni smeri $\mathbf{F}_D$
  - silo v prepovedani smeri $\mathbf{F}_\tau$
- sila virtualne omejitve

$$\mathbf{F}_{vf} = \mathbf{F}_D + k_\tau \mathbf{F}_\tau$$

$k_\tau \in [0,1]$ admitančno razmerje

- izračunana hitrost vrha manipulatorja

$$\mathbf{v} = \alpha(\mathbf{F}_D + k_\tau \mathbf{F}_\tau)$$

$b = \frac{1}{\alpha}$ dušenje virtualne omejitve

- toga virtualna omejitev $k_\tau = 0$
- mehka virtualna omejitev $k_\tau \neq 0$

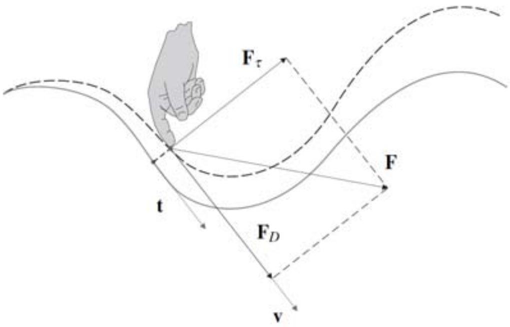
Pasivna virtualna omejitev

- vzdržuje gibanje vzdolž želene smeri
- dovoljuje odstopanje od želene trajektorije
- projekcija sile uporabnika na tangento na krivuljo (sila v želeni smeri)

$$F_D = \mathbf{t} \cdot \mathbf{F} \qquad \mathbf{F}_D = \mathbf{t}F_D$$

- izračun sile v prepovedani smeri

$$\mathbf{F}_\tau = \mathbf{F} - \mathbf{F}_D$$



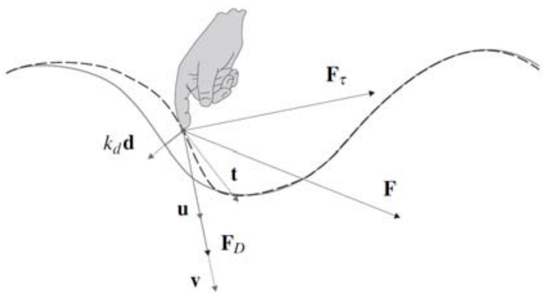
Aktivna virtualna omejitev

- virtualna omejitev vodi gibanje nazaj na želeno trajektorijo

$$\mathbf{d} = \mathbf{r}(s) - \mathbf{p}_e$$
$$\mathbf{U} = \mathbf{t} + k_d\mathbf{d} \qquad \mathbf{u} = \frac{\mathbf{U}}{\|\mathbf{U}\|}$$

- izračun sil v želeni in prepovedani smeri

$$F_D = \mathbf{u} \cdot \mathbf{F} \qquad \mathbf{F}_D = \mathbf{u}F_D \qquad \mathbf{F}_\tau = \mathbf{F} - \mathbf{F}_D$$



Omejevalne virtualne omejitve

- delujejo kot varnostni mehanizem,
- omejujejo delovni prostor robota, ki deluje v dotiku z okolico,
- implementiramo jih lahko
  - kooperativnem robotskem sistemu (na edinem robotu),
  - v teleoperacijskem sistemu
    - na izvršni napravi (najbolj primerna izvedba),
    - na upravljalni napravi,
    - na upravljalni in izvršni napravi (izboljša zaznave operaterja),
- virtualne omejitve so lahko izvedene v obliki
  - impedance (navidezna stena izvedena z algoritmom vzmet-usmerjeni dušilnik),
  - admitance.

Admitančna izvedba virtualne omejitve

- admitančno vodenje

$$\mathbf{v} = \alpha(\mathbf{F}_D + k_\tau \mathbf{F}_\tau)$$

- najprej določimo silo v prepovedani smeri; n je normala na mejo prepovedanega območja

$$F_\tau = \begin{cases} \mathbf{F}\cdot\mathbf{n} & \text{if} \quad \mathbf{F}\cdot\mathbf{n} < 0 \\ 0 & \text{if} \quad \mathbf{F}\cdot\mathbf{n} \geq 0 \end{cases}$$

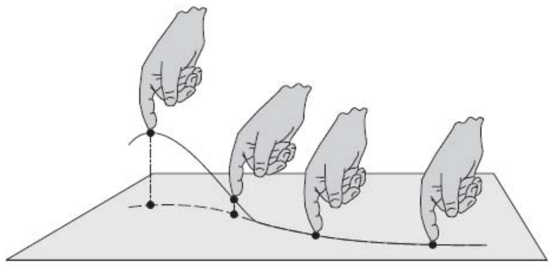
$$\mathbf{F}_\tau = \mathbf{n}F_\tau$$

- sila v dovoljeni smeri

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F} - \mathbf{F}_\tau$$

- toga virtualna omejitev $k_\tau = 0$

$$\mathbf{v} = \alpha\mathbf{F}_D$$



Active Constraints/Virtual Fixtures: A Survey