Robotika: Řízení robotů

Vladimír Petrík

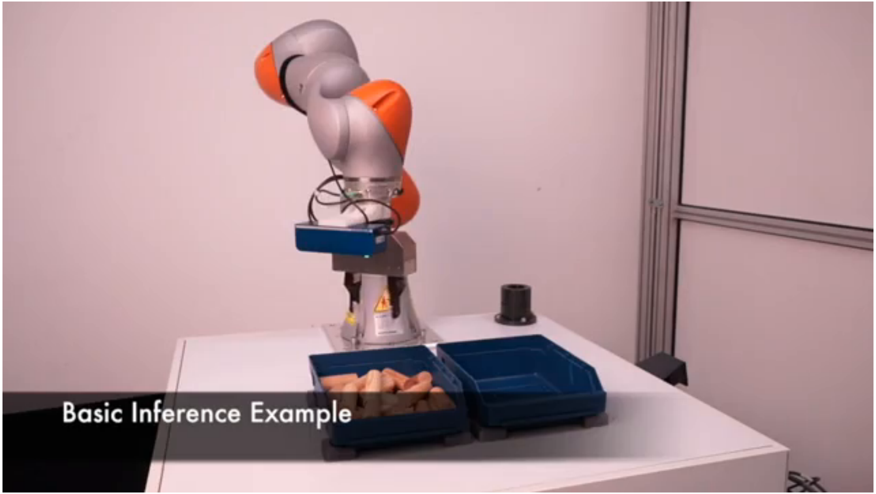
vladimir.petrik@cvut.cz

3.1.2022

Motivace[1]

[1] Zdroj videa: https://www.youtube.com/watch?v=E_VrZvpvH5E

Motivace[2]



[2] Zdroj videa: https://www.youtube.com/watch?v=dCChL1UiZy8

Motivace[3]

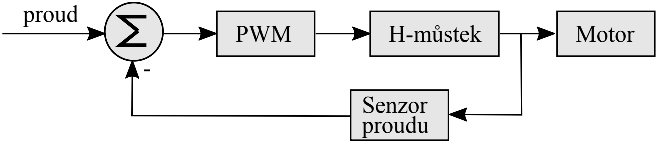
[3] Zdroj videa: https://www.youtube.com/watch?v=sR6oF2PpVno

Cíle řízení

- Řízení pohybu
- Řízení síly
- Hybridní řízení

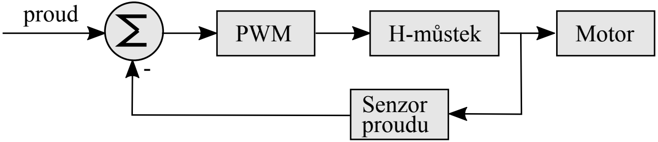
Jak motor ovládá kloub?

- Pro kvalitní motory platí vztah: $\tau_{\text{motor}} = k_T i$
  - τ_{motor} je moment vyvinutý motorem
  - k_T je momentová konstanta motoru (motor torque constant)
  - i je ovládaný proud
- Pokud můžeme ovládat proud, můžeme ovládat přímo moment/sílu motoru?



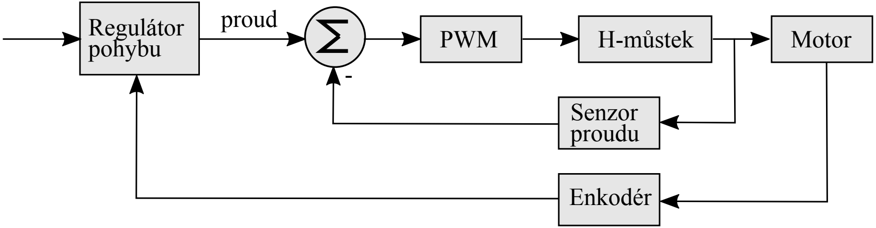
Jak motor ovládá kloub?

- Pro kvalitní motory platí vztah: $\tau_{\text{motor}} = k_T i$
  - τ_{motor} je moment vyvinutý motorem
  - k_T je momentová konstanta motoru (motor torque constant)
  - i je ovládaný proud
- Pokud můžeme ovládat proud, můžeme ovládat přímo moment/sílu motoru?
- Většinou **NE**
  - Většina robotů je poháněná malými motory, které jsou zpřevodované
  - Dynamické vlastnosti převodů jsou těžko simulovatelné (tření, vibrace)
  - Jednoduchý vztah mezi proudem a momentem pak neexistuje
    - moment roste monotónně s proudem
- Zpětnovazební řízení je nezbytné



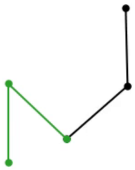
Zpětná vazba polohy

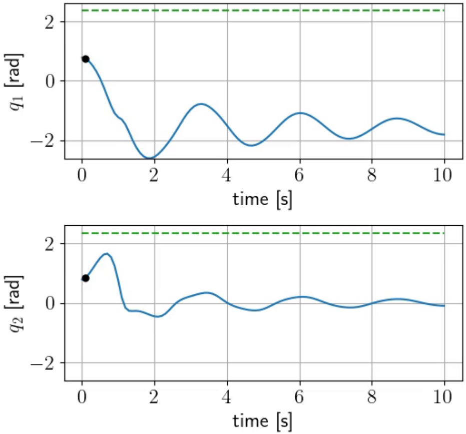
- Potřebujeme senzor: rotační enkodér
  - relativní rychlost $\dot{\boldsymbol{q}}(t)$
  - absolutní poloha $\boldsymbol{q}(t)$
  - levný, odolný a přesný senzor
- Zpětnovazební řízení
  - vstup: očekávaná/referenční trajektorie $\boldsymbol{q}_r(t)$
  - kontrolní signál: proud motoru $\boldsymbol{i}$
  - regulační odchylka: $\boldsymbol{q}_e(t) = \boldsymbol{q}_r(t) - \boldsymbol{q}(t)$
  - cíl: nulová regulační odchylka



Řízení na polohu - nulový proud

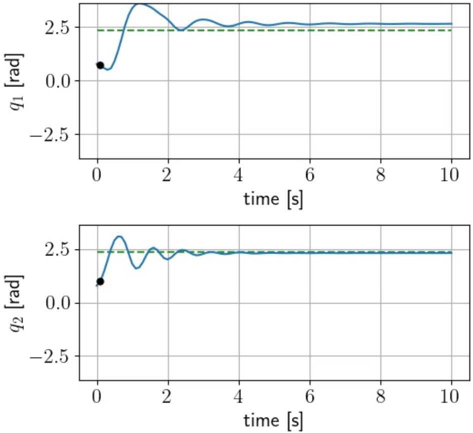
- $i = 0$





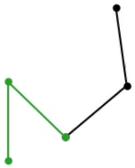
Řízení na polohu - P regulátor

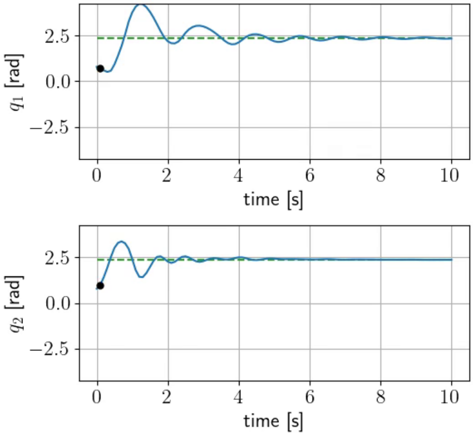
- $\boldsymbol{i} = K_p \boldsymbol{q}_e$



Řízení na polohu - PI regulátor

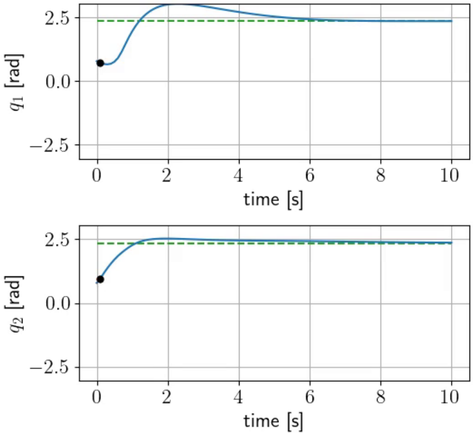
- $\boldsymbol{i} = K_p \boldsymbol{q}_e + K_i \int \boldsymbol{q}_e$





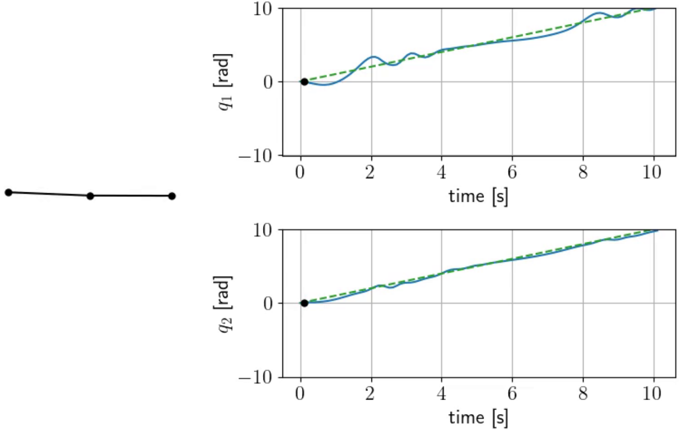
Řízení na polohu - PID regulátor

- $\boldsymbol{i} = K_p \boldsymbol{q}_e + K_d \dot{\boldsymbol{q}}_e + K_i \int \boldsymbol{q}_e$



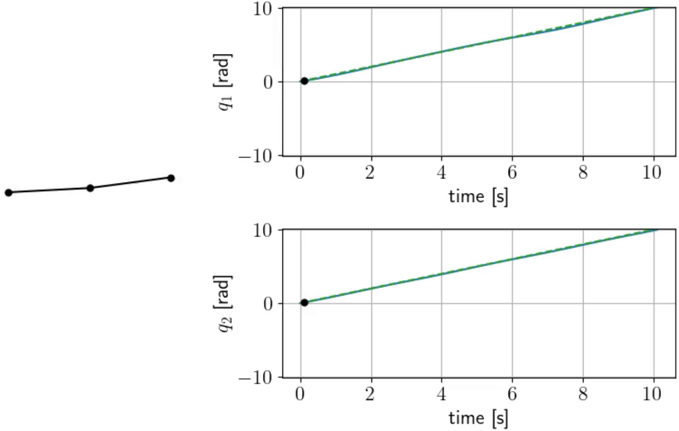
Řízení na polohu - sledování trajektorie P

- $\boldsymbol{i} = K_p \boldsymbol{q}_e(t) = K_p \left(\boldsymbol{q}_r(t) - \boldsymbol{q}(t) \right)$



Řízení na polohu - sledování trajektorie PID

- $\boldsymbol{i} = K_p \boldsymbol{q}_e(t) + K_d\left(\dot{\boldsymbol{q}}_r(t) - \dot{\boldsymbol{q}}(t)\right) + K_i \int \boldsymbol{q}_e(t)$



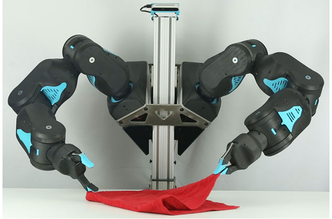
- Integrační složka nezajistí nulovou regulační odchylku pro libovolnou trajektorii

PID řízení na polohu

- PID
  - čeká na chybu, kterou pak kompenzuje
  - díky I-složce dosáhneme nulovou regulační odchylku pro jednu polohu
  - ne však pro libovolnou trajektorii
- Přidání modelu do kontrolní smyčky
  - lze dosáhnout lepších regulačních vlastností
  - pokud ovládáme proud, musíme identifikovat model
  - pokud ovládáme momenty, můžeme použít fyzikální model
  - většina průmyslových robotů neumí řídit momenty/síly
    - výrobce pro nás nastaví regulátor polohy
    - nelze použít pro spolupráci člověk/robot

Řízení momentů/sil

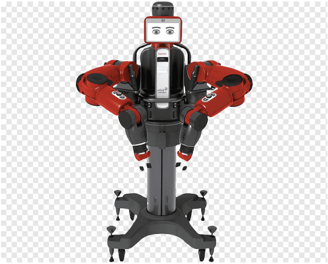
- Roboti řízení na momenty jsou stále častější
- Jak ale dosáhnout řízení momentů?
  - nepoužívat velké převody (vztah proudu a momentu pak bude jednodušší)
    - Barrett WAM (kabelový přenos sil/momentů)
    - Berkeley Blue (moderní motory v kloubech)

Řízení momentů/sil

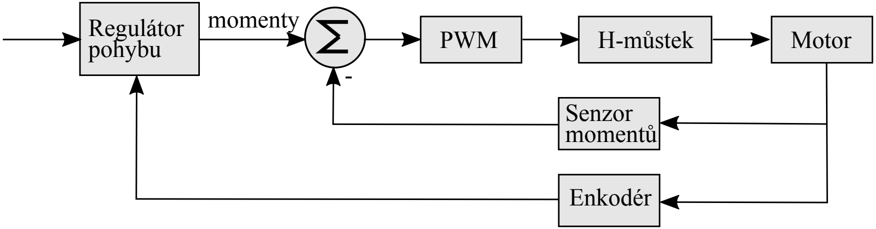
- Roboti řízení na momenty jsou stále častější
- Jak ale dosáhnout řízení momentů?
  - nepoužívat velké převody (vztah proudu a momentu pak bude jednodušší)
    - Barrett WAM (kabelový přenos sil/momentů)
    - Berkeley Blue (moderní motory v kloubech)
  - dodatečný senzor na měření momentu
    - Kuka IIWA
    - Franka Panda Emika
    - Baxter





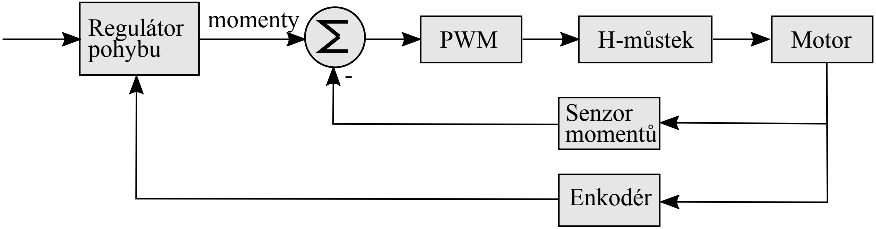
Řízení na polohu při silové zpětné vazbě

- Můžeme použít PID řízení stejně jako při řízení proudu
  - vstup: očekávaná/referenční trajektorie $\boldsymbol{q}_r(t)$
  - kontrolní signál: momenty motorů $\boldsymbol{\tau}$
  - regulační odchylka: $\boldsymbol{q}_e(t) = \boldsymbol{q}_r(t) - \boldsymbol{q}(t)$
  - cíl: nulová regulační odchylka

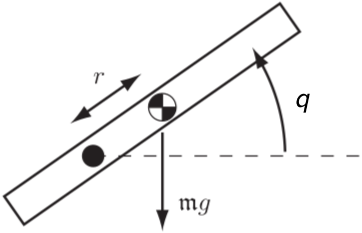


Řízení na polohu při silové zpětné vazbě

- Můžeme použít PID řízení stejně jako při řízení proudu
  - vstup: očekávaná/referenční trajektorie $\boldsymbol{q}_r(t)$
  - kontrolní signál: momenty motorů $\boldsymbol{\tau}$
  - regulační odchylka: $\boldsymbol{q}_e(t) = \boldsymbol{q}_r(t) - \boldsymbol{q}(t)$
  - cíl: nulová regulační odchylka
- Můžeme ale využít i dynamický model robota
  - dopředné řízení
  - reagujeme na chybu předtím, než nastane



Dynamický model - 1D[4]



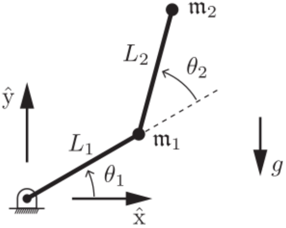
- $\tau = M\ddot{q} + mgr\cos q$
  - M - setrvačnost kolem osy rotace
  - m - hmotnost
  - g - gravitační zrychlení
  - r - vzdálenost od osy rotace k těžišti
- Diferenciální rovnice pohybu: jaký moment musíme vyvinout, abychom docílili daného zrychlení
- Žádné tření - často ho aproximujeme pomocí $b\dot{q}$
- Rovnice se často vyjadřuje ve tvaru: $\tau = M\ddot{q} + h(q, \dot{q})$
- Funkce $h(\cdot)$ obsahuje vše, co nezávisí na zrychlení

[4] Obrázek z Lynch&Park: Modern Robotics

Dynamický model pro n stupňů volnosti

- $\boldsymbol{\tau} = M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$
  - M - je matice $n \times n$ a závisí na konfiguraci robota
  - zrychlení jednoho kloubu závisí na pozici, rychlosti a momentu jiných kloubů
- Jak spočítat hodnoty parametrů rovnice pohybu?
  - **Musíme znát dynamické vlastnosti jednotlivých ramen**
  - Newton-Eulerova formulace
  - Lagrangova formulace dynamiky
- Lagrangova metoda je efektivní pro symbolické výpočty
- Pro otevřené řetězce existuje efektivní numerický rekurzivní výpočet

Příklad rovnice pohybu



$$
\begin{aligned}
\tau_1 \quad &= \quad \left(\mathfrak{m}_1 L_1^2 + \mathfrak{m}_2(L_1^2 + 2L_1L_2\cos\theta_2 + L_2^2)\right)\ddot{\theta}_1 \\
&\quad + \mathfrak{m}_2(L_1L_2\cos\theta_2 + L_2^2)\ddot{\theta}_2 - \mathfrak{m}_2L_1L_2\sin\theta_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\
&\quad + (\mathfrak{m}_1 + \mathfrak{m}_2)L_1 g\cos\theta_1 + \mathfrak{m}_2 g L_2\cos(\theta_1 + \theta_2), \\
\tau_2 \quad &= \quad \mathfrak{m}_2(L_1L_2\cos\theta_2 + L_2^2)\ddot{\theta}_1 + \mathfrak{m}_2L_2^2\ddot{\theta}_2 + \mathfrak{m}_2L_1L_2\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 \\
&\quad + \mathfrak{m}_2 g L_2\cos(\theta_1 + \theta_2).
\end{aligned}
$$

Dynamické úlohy

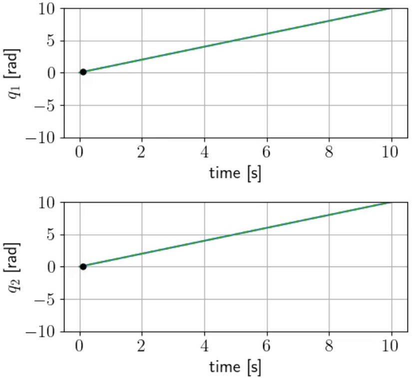
- Přímá dynamická úloha
  - Cíl: najdi zrychlení $\ddot{\boldsymbol{q}}$
  - Vstup: $\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \boldsymbol{\tau}$
  - $\ddot{\boldsymbol{q}} = M^{-1}(\boldsymbol{q})\,(\boldsymbol{\tau} - h(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}))$
  - *Jak se bude robot pohybovat, pokud aplikujeme dané momenty?*
- Inverzní dynamická úloha

Dynamické úlohy

- Přímá dynamická úloha
  - Cíl: najdi zrychlení $\ddot{\boldsymbol{q}}$
  - Vstup: $\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \boldsymbol{\tau}$
  - $\ddot{\boldsymbol{q}} = M^{-1}(\boldsymbol{q})\,(\boldsymbol{\tau} - h(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}))$
  - *Jak se bude robot pohybovat, pokud aplikujeme dané momenty?*
- Inverzní dynamická úloha
  - Cíl: najdi momenty $\boldsymbol{\tau}$
  - Vstup: $\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}}$
  - $\boldsymbol{\tau} = M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$
  - *Jaké momenty musíme aplikovat, abychom docílili danou trajektorii?*

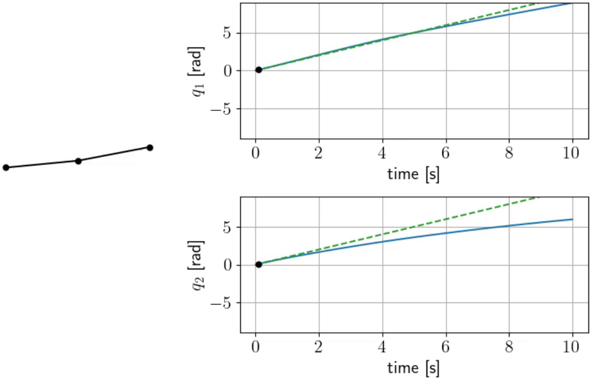
Jak můžeme využít dynamický model pro řízení?

- Dopředné řízení pro sledování trajektorie $(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}})$
- Vyřešíme inverzní dynamickou úlohu $\boldsymbol{\tau}(t) = \hat{M}(\boldsymbol{q}(t))\ddot{\boldsymbol{q}}(t) + \hat{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{q}(t), \dot{\boldsymbol{q}}(t))$
  - $\hat{M}(\cdot), \hat{\boldsymbol{h}}$ jsou odhady skutečných parametrů
  - aplikováním momentů bude robot sledovat požadovanou trajektorii
    - pokud jsou naše odhady přesné
    - pokud je počáteční stav přesný

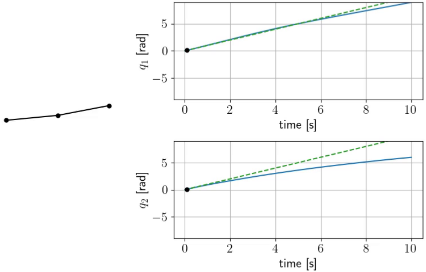


Jak můžeme využít dynamický model pro řízení?

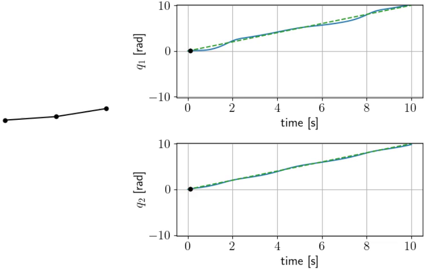
- Dopředné řízení pro sledování trajektorie $(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}})$
- Vyřešíme inverzní dynamickou úlohu $\boldsymbol{\tau}(t) = \hat{M}(\boldsymbol{q}(t))\ddot{\boldsymbol{q}}(t) + \hat{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{q}(t), \dot{\boldsymbol{q}}(t))$
  - $\hat{M}(\cdot), \hat{\boldsymbol{h}}$ jsou odhady skutečných parametrů
  - aplikováním momentů bude robot sledovat požadovanou trajektorii
    - pokud jsou naše odhady přesné, **chyba v aproximaci tření** $b = 2$ vs $b = 1.9$
    - pokud je počáteční stav přesný



Dopředné × zpětnovazební řízení



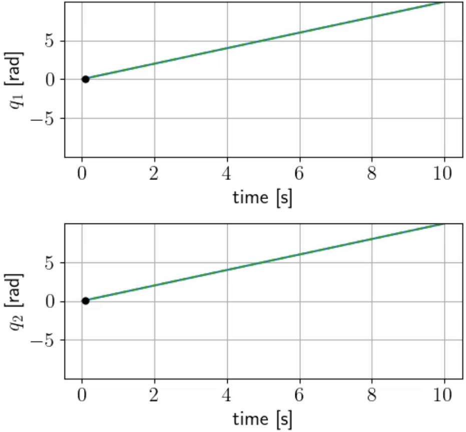
- Dopředné řízení
  - model není přesný
  - dopředné řízení nereaguje na šum z prostředí
  - nečeká na chybu (generuje kontrolní signál s předstihem)
- Zpětnovazební řízení
  - začne reagovat až když vznikne chyba (požadovaný stav je jinde než současný)
  - reaguje na šum z prostředí
- Kombinace dopředného a zpětnovazebního řízení
  - dopředné pro včasnou kompenzaci (nelineární) dynamiky
  - zpětnovazební pro kompenzaci nemodelovaných jevů/nepřesností



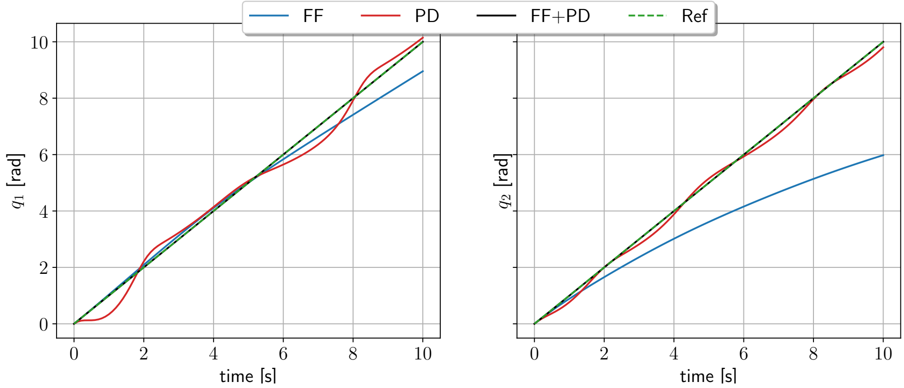
Kombinace dopředného a zpětnovazebního řízení

- $\boldsymbol{\tau} = \hat{M}(\boldsymbol{q})\left(\ddot{\boldsymbol{q}}_r + K_p \boldsymbol{q}_e + K_d \dot{\boldsymbol{q}}_e\right) + \hat{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$
  - $\boldsymbol{q}_e = \boldsymbol{q}_r - \boldsymbol{q}$
  - kompenzace nelineární dynamiky pomocí $\hat{\boldsymbol{h}}$
  - lineární dopředná složka $\hat{M}(\boldsymbol{q})\left(\ddot{\boldsymbol{q}}_r\right)$
  - lineární zpětnovazební složka $\hat{M}(\boldsymbol{q})\left(K_p \boldsymbol{q}_e + K_d \dot{\boldsymbol{q}}_e\right)$
  - K_p, K_d jsou často ve tvaru $k_p I, k_d I$
  - integrační složka je často vynechaná
- Regulátor znám jako:
  - Feedforward plus feedback linearizing controller
  - Inverse dynamics controller
  - Computed torque controller

Kombinace dopředného a zpětnovazebního řízení

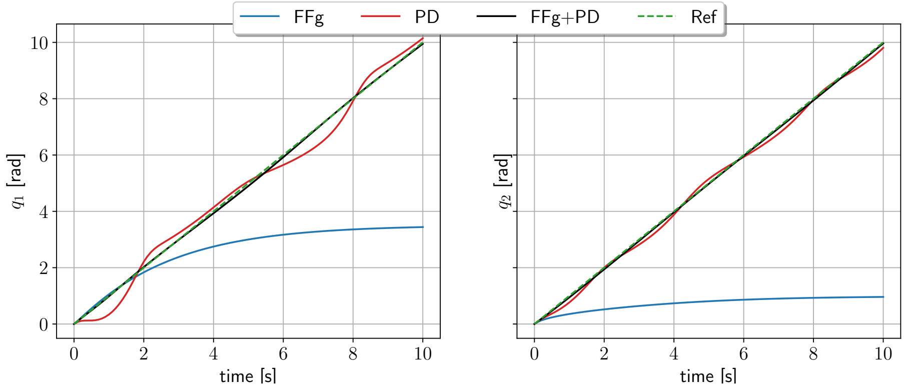


Kombinace dopředného a zpětnovazebního řízení



Zanedbání dynamiky vyšších řádů

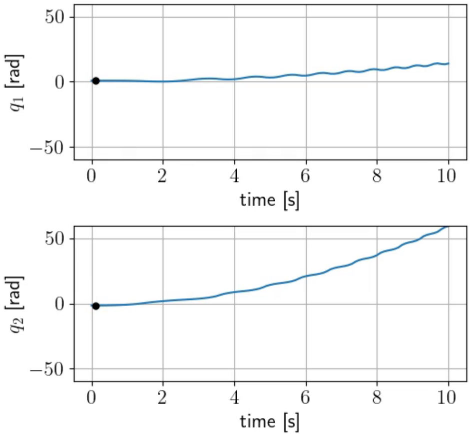
- Často neznáme (všechny) dynamické parametry
- Robot se pohybuje pomalu a můžeme zanedbat dynamiku vyšších řádů
- $\boldsymbol{\tau} = K_p \boldsymbol{q}_e + K_d \dot{\boldsymbol{q}}_e + \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q})$
  - kompenzace gravitace $\hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q})$



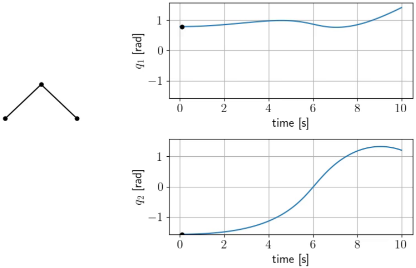
Řízení síly

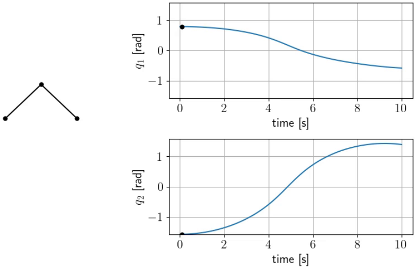
- Cílem je aplikovat sílu pomocí chapadla
  - tlačit do stolu
  - zavírat prsty chapadla
- Během aplikování síly se pohybujeme málo nebo vůbec $\rightarrow$ zanedbáme dynamiku vyšších řádů
- $\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q}) + J^\top(\boldsymbol{q})\mathcal{F}_r$
  - J - jakobián
  - $\mathcal{F}_r$ - požadovaná síla/moment chapadla
- Co se stane s objektem na který aplikujeme konstantní sílu?

Konstantní moment chapadla

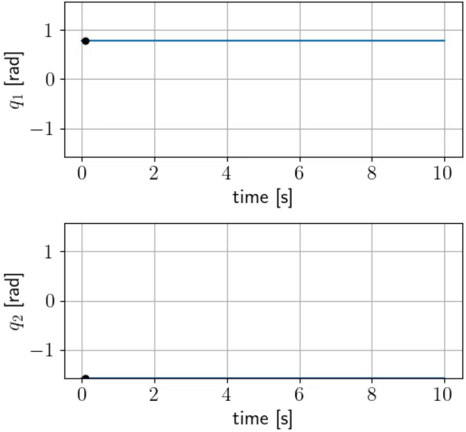


Konstantní síla chapadla

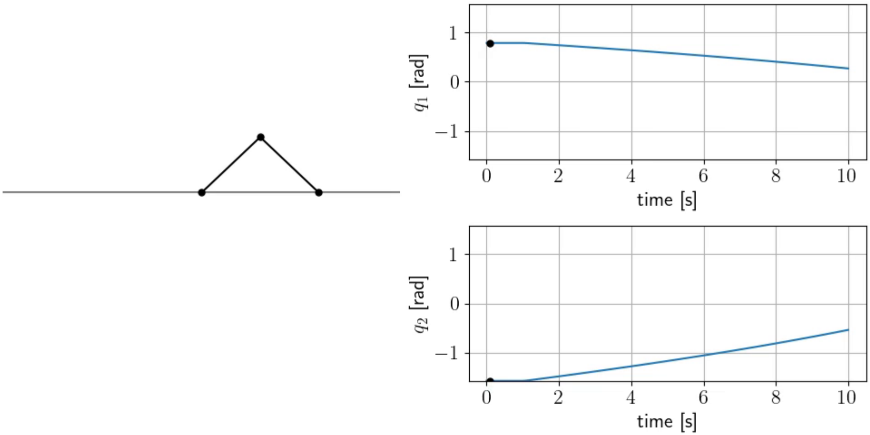




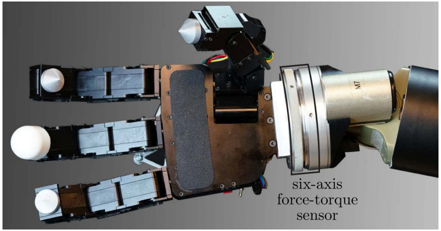
Tlačení proti stolu



Tlačení proti stolu - šum

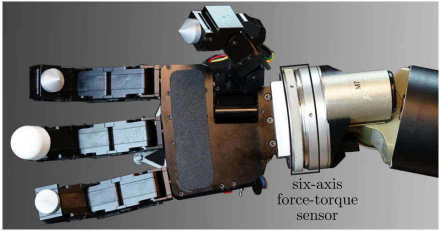


Dodatečný senzor



- Předchozí model vyžaduje
  - přesný model pro kompenzaci gravitace
  - přesný interní regulátor pro dosažení momentů
- Můžeme ale použít další zpětnou vazbu
- Externí senzor sil a momentů namontován mezi chapadlo a robota
- $\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q}) + J^{\top}(\boldsymbol{q})\left(\mathcal{F}_r + K_{fp}\mathcal{F}_e\right)$

Dodatečný senzor

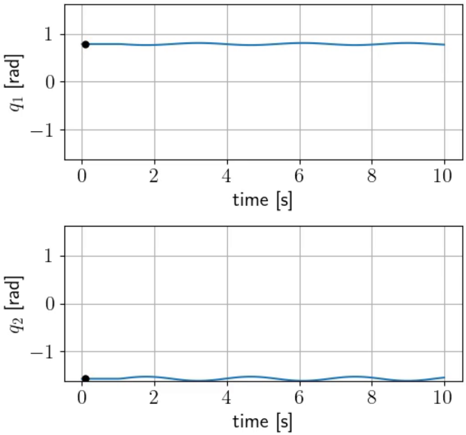


- Předchozí model vyžaduje
  - přesný model pro kompenzaci gravitace
  - přesný interní regulátor pro dosažení momentů
- Můžeme ale použít další zpětnou vazbu
- Externí senzor sil a momentů namontován mezi chapadlo a robota
- $\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q}) + J^{\top}(\boldsymbol{q})\left(\mathcal{F}_r + K_{fp}\mathcal{F}_e\right)$
- Pomůže nám dodatečný senzor před posunem způsobeným šumem?

Hybridní řízení

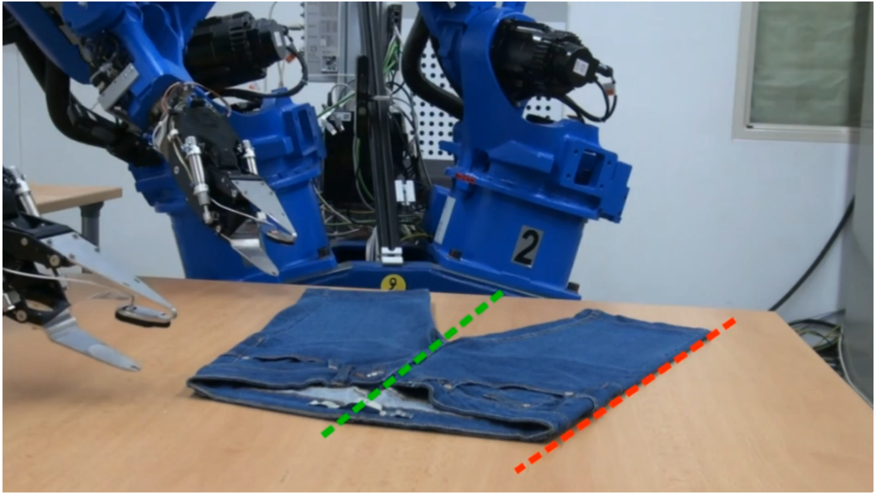
- Některé stupně volnosti budeme řídit na polohu, některé na sílu
- Základní mechanické omezení: nemůžeme ovládat sílu i pohyb ve stejné ose zároveň
- $\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q}) + J^\top(\boldsymbol{q})\left(PK_pX_e + (I-P)\mathcal{F}_r\right)$
  - P - matice určující stupně volnosti ovládané na pohyb
    - např. $P_{2D} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
  - X_e - vzdálenost aktuální a referenční polohy v Kartézském prostoru
    - pozor na rotace, nemůžeme použít jenom odečítání
    - $D = X^{-1}X_r$
    - chyba pozice je v posledním sloupci matice D
    - chyba rotace se získá pomocí Rodriguesova vzorce z rotační matice transformace D
- Řízení se může rozšířit o PID, dodatečné znalosti kontaktů, externí senzor, . . .

Hybridní řízení



Kontakt bez silového řízení

- Co když nemáme silové řízení a chceme být v kontaktu?
- Pasivní poddajnost - pružina



Závěr

- Existují různé cíle řízení
  - Řízení na polohu/trajektorii
  - Řízení síly
  - Hybridní řízení
  - Neprobrané impedanční/admitační řízení
- Pro každý stupeň volnosti můžeme ovládat sílu nebo pohyb
- Bez zpětné vazby bychom potřebovali dokonalý model
- Dopředný (dynamický) model zjednoduší řízení a zlepší kvalitu
  - Přímá dynamická úloha (spočti zrychlení)
  - Inverzní dynamická úloha (spočti momenty)
- Získat dynamické parametry není snadné
  - kompenzujeme alespoň gravitaci
  - pokud se nepohybujeme rychle, tak je kompenzace gravitace dostatečná