



Politechnika
Wroclawska

Współpraca robotów

Wykład 3

Roboty współpracujące – algorytmy sterowania

Robert Muszyński

KCiR, W4, PWr

Copyright © R. Muszyński 2020

Powered by pdfTeX with Beamer

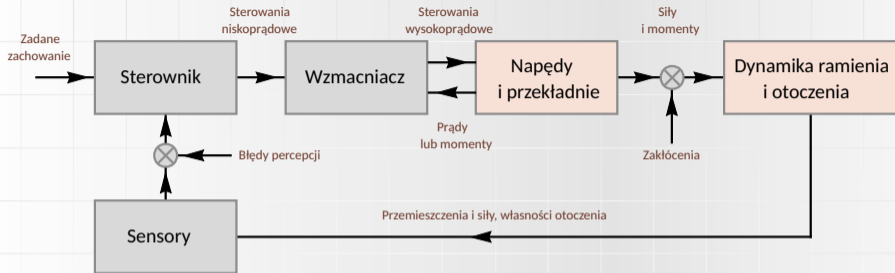




Metody sterowania robotów manipulacyjnych

- ▶ Sterowanie pozycyjne (ruchem) – śledzenie trajektorii/ścieżki (Motion control)
- ▶ Sterowanie siłowe (Force control)
- ▶ Sterowanie pozycyjno-siłowe (hybrydowe) (Motion-force control)
- ▶ Sterowanie impedancyjne (Impedance control)
- ▶ Sterowanie podatne (Compliance control)
- ▶ W przestrzeni przegubowej/zadaniowej
- ▶ Regulacja?
- ▶ Bez sprzężenia zwrotnego / ze sprzężeniem zwrotnym – w układzie otwartym/zamkniętym (open/closed loop – feedforward, feedback),
(ale: z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego, w układzie zamkniętym z pętlą sprzężenia zwrotnego, ze sprzężeniem w przód / w tył)
- ▶ Sygnały wyjściowe sterownika – siła/moment, prądy silników, ale też prędkość, pozycja?

Typowy układ sterowania robota



Typowe założenia

- ▶ Napędy w sposób doskonały zapewniają wymagane siły/momenty
- ▶ Informacja dostarczana przez sensory jest bezbłędna
- ▶ Układ sterowania jest zaimplementowany jako układ ciągły (bez ograniczonego pasma częstotliwości pracy)
- ▶ Wówczas układ sterowania redukuje się do dwóch bloków: obiektu i sterownika



Sterowanie pozycyjne

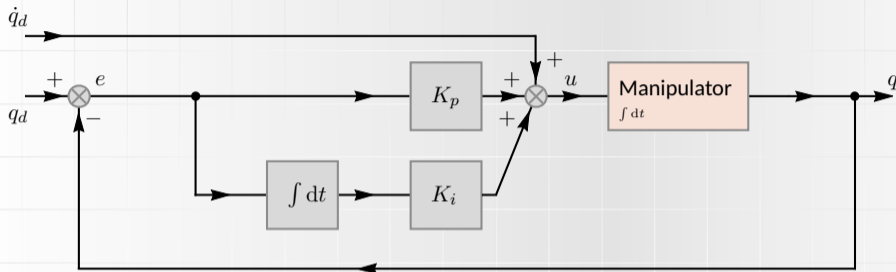
W prostych przypadkach przyjmujemy, że sterownik niskopoziomowy pozwala na bezpośrednie zadawanie prędkości przegubów w miejsce sił/momentów

- ▶ sterowanie przez zadawanie prędkości na niskim poziomie
 - ▶ sterowanie bez sprzężenia zwrotnego
 - ▶ sterowanie do punktu – lokalne regulatory proporcjonalne (P)
 - ▶ śledzenia trajektorii (ze stałą prędkością) – lokalne regulatory proporcjonalno-całkujące (PI); z opcjonalną prekompensacją (feedforward) prędkości
 - ▶ realizowane zarówno w przestrzeni przegubowej jak i zadaniowej

Naturalnie prędkości zadajemy w przestrzeni przegubowej, gdy trzeba w zewnętrznej przeliczamy za pomocą jakobianu odwrotnego

Regulator proporcjonalno-całkujący z prekompensacją prędkości

(PI Feedback Controller with Velocity Feedforward)



$$u(t) = \dot{q}_d + K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (1)$$

Komentarze

- Prekompensacja „przyspiesza” proces sterowania



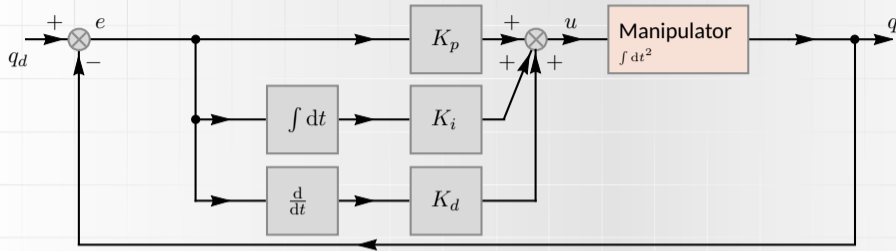
Sterowanie pozycyjne

W ogólności przyjmuje się, że sterownik niskopoziomowy pozwala na bezpośrednie zadawanie sił/momentów w przegubach manipulatora

- ▶ sterowanie przez zadawanie sił/momentów na niskim poziomie
 - ▶ śledzenie trajektorii
 - ▶ lokalne regulatory proporcjonalno-całkująco-różniczkujące (PID)
 - ▶ algorytm obliczanego momentu – sterowanie w oparciu o model dynamiki
 - ▶ realizowane zarówno w przestrzeni przegubowej jak i zadaniowej

Zasadniczo algorytmy można podzielić na te, działające w oparciu o przybliżenie liniowe i te, działające w oparciu o dokładną linearyzację

Regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący



$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \dot{e}, \quad e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (2)$$

Komentarze

- ▶ Często K_i przyjmuje się równe zero - zbyt duże prowadzi do niestabilności
- ▶ Można konstruować w oparciu o przybliżenie liniowe modelu dynamiki



Algorytm obliczanego momentu (linearyzacji przez sprzężenie zwrotne)

(Computed Torque Control)

Równanie dynamiki manipulatora

$$Q(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u \quad (3)$$

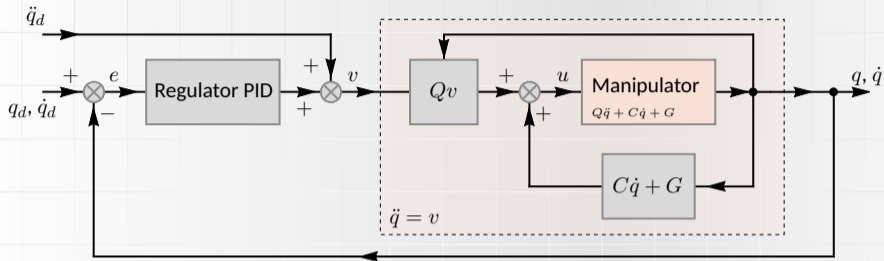
gdzie $Q(q)$ – macierz bezwładności, $C(q, \dot{q})$ – macierz sił odśrodkowych i Coriolisa, $G(q)$ – wektor sił/momentów potencjalnych, q – wektor zmiennych przegubowych, u – siły/momenty zewnętrzne (sterujące) oddziałujące w przegubach.

Wówczas algorytm obliczanego momentu dany jest wzorem

$$\begin{cases} u = Q(q)v + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \\ v = \ddot{q}_d + K_p e + K_i \int e dt + K_d \dot{e} \end{cases} \quad (4)$$

gdzie v – nowe sterowanie (zlinearyzowane), $e = q_d - q$ – błąd sterowania, q_d – trajektoria zadana, K_p , K_i , K_d – parametry regulatora.

Algorytm obliczanego momentu



Komentarze

- ▶ Dobrze się sprawdza, jeśli mamy dobry model – w innym przypadku użycie modelu w sterowaniu może tylko zaszkodzić
- ▶ Złożony obliczeniowo, problem z realizacją w czasie rzeczywistym – uproszczenia w postaci np. regulatora PD z kompensacją grawitacji, który bardzo dobrze się sprawdza, a jest znacznie prostszy



Algorytm obliczanego momentu w przestrzeni zadaniowej

Równanie dynamiki manipulatora w przestrzeni przegubowej

$$Q(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u. \quad (5)$$

Analogicznie, równanie dynamiki manipulatora w przestrzeni zadaniowej ma postać

$$\Lambda(q)\dot{\nu} + H(q, \nu) = \tau = J(q)u, \quad (6)$$

gdzie ν - prędkość efektora w przestrzeni zadaniowej, τ - działanie powodujące ruch efektora, zaś algorytm obliczanego momentu w przestrzeni zadaniowej dany jest wzorem

$$u = J^T(q) \left(\Lambda(q) \left(\dot{\nu}_d + K_p e_p + K_i \int e_p dt + K_d \dot{e}_p \right) + H(q, \nu) \right). \quad (7)$$



Sterowanie siłowe

Wcześniejsze postępowanie zakładało brak kontaktu manipulatora (jego efektor) z otoczeniem – jeśli tak nie jest, powinniśmy uwzględnić działanie pochodzących od otoczenia sił/momentów zewnętrznych

Model dynamiki manipulatora z uwzględnieniem sił/momentów tarcia i zewnętrznych oddziałujących na efektor

$$Q(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + J^T(q)\tau_k = u \quad (8)$$

gdzie $F(\dot{q})$ – wektor sił/momentów tarcia, $J(q)$ – jacobian manipulatora, τ_k – wektor sił/momentów oddziaływania efektora na otoczenie.

Zakładając powolny ruch manipulatora (lub wręcz jego brak) otrzymujemy model

$$G(q) + J^T(q)\tau_k = u. \quad (9)$$

Algorytm sterowania siłowego bez sprzężenia zwrotnego od siły i kompensacją grawitacji

$$u = \tilde{G}(q) + J^T(q)\tau_d \quad (10)$$

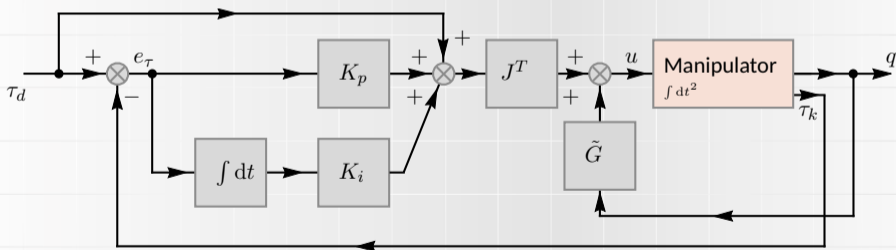
gdzie $\tilde{G}(q)$ – estymata $G(q)$, τ_d – pożądane siły/momenty.

Sterowanie siłowe

Algorytm sterowania siłowego ze sprzężeniem zwrotnym od siły i kompensacją grawitacji

$$u = \tilde{G}(q) + J^T(q) \left(\tau_d + K_p e_\tau + K_i \int e_\tau dt \right), \quad (11)$$

gdzie $e_\tau = \tau_d - \tau_k$ - błąd siły, K_p, K_i - parametry regulatora.



Algorytm sterowania siłowego ze sprzężeniem zwrotnym od siły i kompensacją grawitacji

$$u = \tilde{G}(q) + J^T(q) \left(\tau_d + K_p e_\tau + K_i \int e_\tau dt \right).$$

- ▶ Część całkująca pozwala na kompensację błędów w stanie ustalonym w przypadku niedokładnego skompensowania sił grawitacji
- ▶ Część różniczkująca nie jest stosowana zazwyczaj w takim podejściu, gdyż
 - ▶ sygnały pochodzące z sensorów siły są zazwyczaj mocno zaszumione a różniczkowanie podnosi poziom szumów (konieczne filtrowanie, które z kolei wprowadza opóźnienia)
 - ▶ zastosowany model dynamiki wyliczony dla ciała sztywnego nie uwzględnia dynamiki przenoszenia sił/momentów z przegubów na efektor



Sterowanie siłowe

Jeśli robot nie ma czemu "przeciwdziałać" będzie ustawicznie przyspieszał

Algorytm sterowania siłowego ze sprzężeniem zwrotnym od siły, kompensacją grawitacji i tłumieniem prędkości

$$u = \tilde{G}(q) + J^T(q) \left(\tau_d + K_p e_\tau + K_i \int e_\tau dt - K_t \nu \right), \quad (12)$$

gdzie K_t - współczynnik tłumienia, ν - pożądana prędkość.



Sterowanie pozycyjno-siłowe

Przy sterowaniu siłowym zakładamy, że efektor manipulatora „wytwarza siłę” we wszystkich wymiarach przestrzeni zadaniowej – typowo istnieją jednakże kierunki, w których może on przemieszczać się swobodnie

Zadanie

Kontrola pozycji we wskazanych kierunkach przestrzeni zadaniowej i siły w pozostałych

Przykłady

- ▶ Otwieranie drzwi – jedyny stopień swobody chwytaka to obrót wokół osi wyznaczonej przez zawiasy drzwi, w pozostałych 5 kierunkach (3 momenty siły i 2 siły leżące w płaszczyźnie drzwi) kontrolujemy siłę/moment
- ▶ Wycieranie tablicy – możliwy jest ruch posuwisty w kierunkach wyznaczonych przez płaszczyznę tablicy i obrotowy wokół osi prostopadłej do niej, w pozostałych 3 kierunkach kontrolujemy siłę/moment

Sterowanie pozycyjno-siłowe

Przyjmując k ograniczeń na prędkość ruchu w przestrzeni zadaniowej, wyrażonych w postaci Pfaffa

$$A(q)\nu = 0, \quad (13)$$

gdzie $A(q) \in \mathbb{R}^{k \times 6}$ – macierz ograniczeń, $q \in \mathbb{R}^n$ – wektor zmiennych przegubowych, ν – wektor prędkości w przestrzeni zadaniowej, oraz model dynamiki robota wyrażony w przestrzeni zadaniowej

$$\Lambda(q)\dot{\nu} + H(q, \nu) = \tau = J(q)u, \quad (14)$$

otrzymujemy model dynamiki z ograniczeniami postaci

$$\underbrace{\Lambda(q)\dot{\nu} + H(q, \nu)}_{\tau_r} + \underbrace{A^T(q)\lambda}_{\tau_k} = \tau, \quad (15)$$

gdzie λ – wektor mnożników Lagrange'a, zaś τ_r to działanie powodująca ruch efektora i τ_k oddziaływanie efektor na otoczenie.



Sterowanie pozycyjno-silowe

Rozwiązując równania (15) otrzymujemy

$$\lambda = (A\Lambda^{-1}A^T)^{-1} (A\Lambda^{-1}(\tau - H) - A\dot{\nu}) \quad (16)$$

i stąd

$$\tau_k = A^T(q)\lambda \quad (17)$$

wyrażające oddziaływanie robota przeciwdziałające ograniczeniom. Podstawienie rozwiązania (16) do równań (15) daje $n - k$ niezależnych równań ruchu postaci

$$P(q) (\Lambda(q)\dot{\nu} + H(q, \nu)) = P(q)\tau \quad (18)$$

z

$$P = I - A^T (A\Lambda^{-1}A^T)^{-1} A\Lambda^{-1}, \quad (19)$$

gdzie I oznacza macierz jednostkową.

Sterowanie pozycyjno-silowe

Z równań (15) mamy

$$\tau = \tau_r + \tau_k = P(q)\tau + (I - P(q))\tau. \quad (20)$$

Interpretacja

- ▶ Macierz $P \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ jest rzędu $6 - k$ i odwzorowuje oddziaływanie manipulatora na podprzestrzeń oddziaływań powodujących ruch efektora w podprzestrzeni stycznej do przestrzeni ograniczeń
- ▶ Macierz $I - P \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ jest rzędu k i odwzorowuje oddziaływanie manipulatora na podprzestrzeń oddziaływań przeciwdziałających ograniczeniom - oddziaływanie efektora na otoczenie
- ▶ Stąd macierz P , nazywana macierzą selekcji, dzieli przestrzeń oddziaływań na część, w której odbywa się sterowanie pozycyjne i na część, w której odbywa się sterowanie siłowe
- ▶ Macierz P może być dobrana arbitralnie



Sterowanie pozycyjno-siłowe

Regulator pozycyjno-siłowy jest odpowiednio zrzutowanym złożeniem regulatora działającego w oparciu o wyrażony w przestrzeni zadaniowej algorytm obliczanego momentu (7) oraz właśnie przedstawionego regulatora siły (11)

$$\tau = (I - P(q))(\text{wyjście regulatora siły}) + P(q)(\text{wyjście regulatora pozycji}), \quad (21)$$

co daje

$$u = J^T(q) \left((I - P(q)) \left(\tau_d + K_{fp}e_\tau + K_{fi} \int e_\tau dt \right) + P(q) \left(\tilde{\Lambda}(q) \left(\dot{\nu}_d + K_{pp}e_p + K_{pi} \int e_p dt + K_{pd}\dot{e}_p \right) + \tilde{H}(q, \nu) \right) \right) \quad (22)$$

gdzie τ_d - pożądane działanie wyrażone w układzie efektora, $\dot{\nu}_d$ - przyspieszenie pożądane wyrażone w układzie efektora, e_τ, e_p - odpowiednio błąd siły i położenia wyrażone w układzie efektora, $K_{fp}, K_{fi}, K_{pp}, K_{pi}, K_{pd}$ - parametry regulatora.



Komentarze

- ▶ W jaki sposób oszacować ograniczenia, którym podlega efektor manipulatora?
 - ▶ Co się będzie działo, gdy robot oddziałuje siłą w innych (nieco) kierunkach niż założono?
 - ▶ W jaki sposób uwzględnić dynamikę obiektów na które oddziałuje efektor, gdy zaczną się one przemieszczać (np. otwierane drzwi)?
 - ▶ Jak dobrać nastawy regulatorów liniowych?
-
- ▶ Użyć działających w czasie rzeczywistym estymatorów identyfikujących aktualne kierunki działania sił.
 - ▶ Kosztem jakości działania wybrać małe wzmocnienia w pętli sprzężenia zwrotnego, co uczyni regulator pozycji „miękkim”, zaś regulator siły „bardziej tolerancyjnym” na błędy siły.
 - ▶ Zapewnić manipulatorowi „odpowiednią” podatność, przez zapewnienie elastyczności w przegubach/ramionach.



Sterowanie impedancyjne

Inne problemy w realizacji sterowania pozycyjno-siłowego

- ▶ Niedokładności w określeniu położenia efektora względem otoczenia
- ▶ Zmiana własności dynamicznych manipulatora po dojściu efektora do sztywnej powierzchni
- ▶ Opóźnienia w torze regulacji

Panaceum i analogie

- ▶ Zastosowanie sterowania podatnego – impedancyjnego
- ▶ Analogia układów mechanicznych do elektrycznych (analogia prędkość-napięcie, analogia prędkość-prąd)
- ▶ W układach elektrycznych napięcie wywołuje przepływ prądu zależnie od impedancji elektrycznej układu
- ▶ W układach mechanicznych siła wywołuje przemieszczenie (prędkość) zależnie od „impedancji mechanicznej” układu



Sterowanie impedancyjne a sterowanie pozycyjne i siłowe

- ▶ Przypadek idealnego sterowania pozycyjnego odpowiada układowi o dużej impedancji: zaburzenia siły powodują niewielkie zmiany w ruchu manipulatora
- ▶ Przypadek idealnego sterowania siłowego odpowiada układowi o małej impedancji: zaburzenia ruchu manipulatora powodują niewielkie zmiany siły, z jaką oddziałuje
- ▶ W sterowaniu impedancyjnym zadaniem manipulatora jest odwzorowanie zachowania układu masy ze sprężyną i tłumikiem o zadanych parametrach:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f,$$

gdzie m oznacza bezwładność, b jest tłumieniem, zaś k sztywnością

- ▶ Popularnym, uproszczonym przypadkiem sterowanie impedancyjnego jest sterowania sztywnością (podatnością), w którym robot ma zachowywać się jak „wirtualna sprężyna”

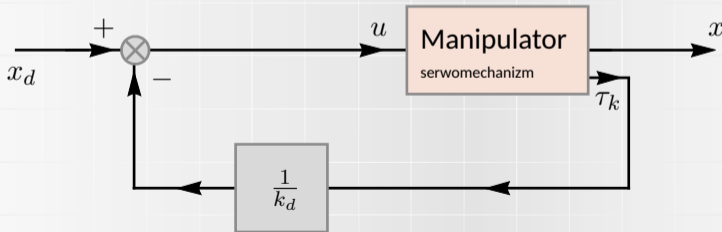


Regulator sztywności bazujący na położeniu

Algorytm modyfikacji sztywności

$$u = x_d - \frac{1}{k_d} \tau_k, \quad (23)$$

gdzie x_d - pożądane położenie, τ_k - zmierzone oddziaływanie na otoczenie, k_d - żądana sztywność. Sterowaniem u jest pozycja zadawana manipulatorowi.

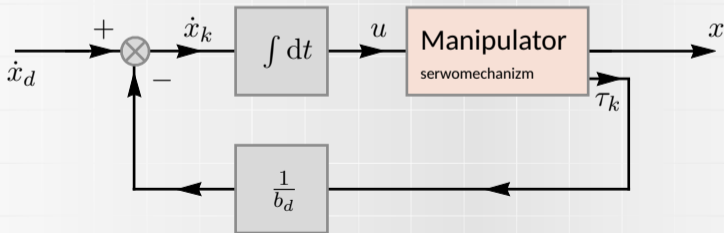


Regulator tłumienia bazujący na położeniu

Algorytm modyfikacji tłumienia

$$u = \int \left(\dot{x}_d - \frac{1}{b_d} \tau_k \right) dt, \quad (24)$$

gdzie \dot{x}_d – pożądana prędkość ruchu, τ_k – zmierzone oddziaływanie na otoczenie, b_d – żądane tłumienie. Sterowaniem u jest pozycja zadawana manipulatorowi.

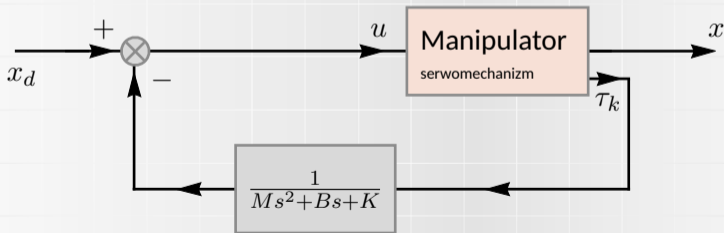


Regulator impedancyjny bazujący na położeniu

Algorytm sterowania impedancyjnego

$$u = x_d - \frac{1}{Z_d} \tau_k, \quad (25)$$

gdzie x_d - pożądane położenie, τ_k - zmierzone oddziaływanie na otoczenie, Z_d - żądana impedancja. Sterowaniem u jest pozycja zadawana manipulatorowi.

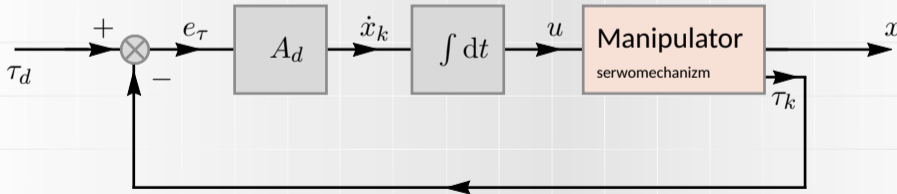


Regulator admitancyjny jako przykład regulatora siły

Algorytm sterowania admitancyjnego

$$u = \int A_d (\tau_d - \tau_k) dt, \quad (26)$$

gdzie τ_d - pożądana siła oddziaływania, τ_k - zmierzone oddziaływanie na otoczenie, A_d - żądana admitancja. Sterowaniem u jest pozycja zadawana manipulatorowi.





Sterowanie impedancyjne/admitancyjne

Celem sterowania impedancyjnego jest odwzorowanie zachowania manipulatora w przestrzeni zadaniowej zgodnego z równaniem

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = \tau_k, \quad (27)$$

gdzie $x \in \mathbb{R}^n$ jest konfiguracją manipulatora wyrażoną w przestrzeni roboczej, M , B , K dodatnio określonymi macierzami opisującymi zachowanie robota, zaś τ_k jest siłą na niego oddziałującą.

Zachowanie (27) może zostać osiągnięte na dwa sposoby:

- ▶ regulator na podstawie pomiaru położenia efektora $x(t)$ wylicza siły/momenty w przegubach manipulatora tak, by wytwarzały one siłę $-\tau_k$ na efektorze. Ten rodzaj postępowania jest nazywany *sterowaniem impedancyjnym* – regulator implementuje funkcję przejścia $Z(s)$ z ruchów na siły.
- ▶ regulator w reakcji na siły mierzone na efektorze steruje położeniem manipulatora. Ten rodzaj postępowania jest nazywany *sterowaniem admitancyjnym* – regulator implementuje funkcję przejścia $Y(s)$ z sił na ruchy.

Sterowanie impedancyjne

Regulator impedancyjny implementuje prawo sterowania postaci

$$u = J^T(q) \left(\underbrace{\tilde{\Lambda}(q)\ddot{x} + \tilde{H}(q, \dot{x})}_{\text{kompensacja dynamiki ramienia}} - \underbrace{(M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx)}_{\tau_k} \right). \quad (28)$$

Komentarze

- ▶ Algorytm wymaga bezpośredniego pomiaru położenia, prędkości i przyspieszenia efektora
- ▶ Ponieważ pomiar przyspieszenia jest zazwyczaj mocno zaszumiony w algorytmie rezygnuje się z kompensacji bezwładności $\tilde{\Lambda}(q)$ i przyjmuje $M = 0$ (manipulatory sterowane impedancyjnie zazwyczaj charakteryzują się małą masą)
- ▶ Częstokroć przyjmuje się założenie o ruchu z małymi prędkościami i człon $\tilde{H}(q, \dot{x})$ zastępuję kompensatorem grawitacji
- ▶ Problemem może być symulacja „sztywnych” obiektów (wysokie wzmocnienia w połączeniu z błędami pomiarowymi, kwantyzacją, opóźnieniami mogą prowadzić do wzbudzania drgań czy też braku stabilności)



Sterowanie admitancyjne

Regulator admitancyjny na podstawie bieżącego stanu (x, \dot{x}) i mierzonej siły τ_k wylicza wymagane przyspieszenia efektora

$$\ddot{x}_d = M^{-1}(\tau_k - B\dot{x} - Kx) \quad (29)$$

i stąd pożądane przyspieszenia w przegubach

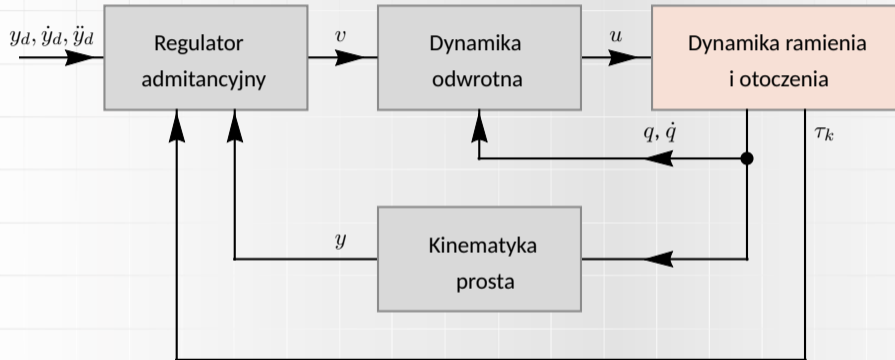
$$\ddot{q}_d = J^{-1}(q)(\ddot{x}_d - \dot{J}(q)\dot{q}) \quad (30)$$

służą do wyliczenia wymaganych sterowań (sił/momentów) w przegubach.

Komentarze

- ▶ Algorytm bywa stosowany w uproszczonej wersji, gdy symulujemy tylko sprężynę lub tłumik
- ▶ W celu poprawy zachowania algorytmu pomiary siły mogą zostać poddane filtracji dolnoprzepustowej
- ▶ Problemem może być symulacja obiektów o małej masie (gdy to nieduże siły prowadzą do dużych przyspieszeń, co znów może prowadzić do braku stabilności)

Kompletny regulator admitancyjny w przestrzeni zadaniowej





Sterowanie podatne – przykłady rozwiązań

Sposoby uzyskiwania podatności

- ▶ Metody aktywne – przez pomiar „zewnętrznych zachowań” (czujniki siły/momentu, dotykowe, kamery)
- ▶ Metody pasywne – przez dostosowanie „zachowania robota” (ograniczenie sił/momentów, zmianę „impedancji” manipulatora – algorytm sterowania, elastyczność przegubów/ramion, napędy o zmiennej impedancji)



Sterowanie podatne – przykłady rozwiązań

- ▶ **Detekcja kontaktu na potrzeby robotów serwisowych**
(H. Je, J. Baek, M. Lee, „*Current based Compliance Control Method for Minimizing an Impact Force at Collision of Service Robot Arm*”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Pusan National University, Korea Południowa, 2011)
 - ▶ wykrywanie kontaktu bez użycia dodatkowych czujników

- ▶ **Zastosowanie czujnika siły do sterowania siłowego**
(L. Baptista, J. Sousa, J. Sa da Costa, „*Predictive Force Control of Robot Manipulators in Nonrigid Environments*” w Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control, ARS International, Universidade de Lisboa, Portugalia, 2007)
 - ▶ wykrywanie kontaktu z użyciem czujnika siły
 - ▶ zastosowano ideę sterowania predykcyjnego
 - ▶ zaimplementowaną z wykorzystaniem logiki rozmytej

- ▶ Robot COMPI
 - ▶ Projekt *COMPI Compliant Robot Arm*, German Research Center for Artificial Intelligence GmbH, Universität Bremen, Niemcy
 - ▶ „*COMPI: Robot arm with compliant control*”, YouTube 2015



German
Research Center
for Artificial
Intelligence

COMPI

Compliant Robot Arm

System Description

The robotic arm COMPI is composed of six rotational joints. Each of them is controlled by a FPGA, which implements different control modes. In particular, this system is used as platform to research dynamic control approaches.

Such control strategies play an important role for force- or torque-based tasks, e.g. in the field of Human-Robot-Interaction. The obtained results are continuously transferred to other robotic systems, which have similar kinematic structures as sub-system.

Technical Details

6-DOF Arm:

- Size: ca. 94 cm x 15 cm x 6.5 cm
- Mass: ca. 4.75 kg
- Payload: ca. 2 kg
- Sensors: Joint positions (absolute and incremental); motor phase currents
- Six rotational joints: BLDC Drives, 1:100 Harmonic Drive Transmission

Self-adaptive gripper

- Adapts to various object shapes
- Sensors: Time-of-Flight camera, RGB-camera, 4 tactile sensor pairs, 5 position sensor, motor current
- Control of gripping force, opening angle, and velocity via FPGAs

Each actuator controlled by one FPGA

- In-house developed joint electronics
- Control of position, velocity, and motor current
- Different mode for higher level controllers
- Switching and re-configuration during runtime
- Intelligent intervention of controller ensures limitation of all control variables in every mode of operation
- Integrated friction identification and compensation

Torque-based higher controller

- Based on identified dynamical model of the arm
- Compensation of non-linear effects such as gravity and friction
- Allows compliant control of the arm position.



Robot arm handles objects for a human

Application: Assistance of humans in manual tasks in production or other environments; force-based control tasks

Projects: *HybridCITra*
Hybrid Social Teams for Long-Term Collaboration in Cyber-Physical Environments (09/2014 - 09/2016)
BeStiles
Behavior for Mobile Manipulation (09/2012 - 07/2016)



Compliant Behavior: Robot arm tracks trajectory (A), reacts compliantly to temporary deflection by hand (B) and continues trajectory tracking (C)

Contact:
DFKI GmbH & Universität Bremen
Robotics Innovation Center
Director: Prof. Dr. Frank Klotzner
Phone: +49 421 - 578 45 4100
E-mail: robotik@dfki.de
Website: www.dfki.de/robotics



Universität Bremen



Sterowanie podatne – przykłady rozwiązań

▶ Konstrukcja napędów z elastycznościami

(Y. Dong, T. Ren, D. Wu, K. Chen, „*Compliance Control for Robot Manipulation in Contact with a Varied Environment Based on a New Joint Torque Controller*”, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Tsinghua University w Pekinie, Chiny, 2020)

- ▶ elastyczne napędy, dedykowany układ sterowania niskopoziomowego

▶ Zadanie wymagające wspólnego operowania na obiektach

(A. Cherubini, R. Passama, A. Crosnier, A. Lasnier, Ph. Fraise, „*Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction*”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Université de Montpellier, PSA Peugeot Citroën, Francja, 2016)

- ▶ na potrzeby stanowiska do montażu przegubów homokinetycznych
- ▶ współpraca wymaga operowania na przegubie człowieka równocześnie z kobotem
- ▶ układ sterowania z generatorem trajektorii nominalnych

Sterowanie podatne – przykłady rozwiązań

- ▶ Detekcja intencji i impedancji człowieka

(, „*Bayesian Estimation of Human Impedance and Motion Intention for Human–Robot Collaboration*”, 2019)

- ▶ z wykorzystaniem adaptacyjnego regulatora impedancyjnego i sieci neuronowych
- ▶ modyfikacja trajektorii pożądaných na podstawie intencji człowieka ocenianych za pomocą estymatora bayesowskiego

- ▶ Sterowanie egzozkieletem

(A. Khan, D. Yun, K. Zuhaib, J. Iqbal, R. Yan, F. Khan, C. Han, „*Estimation of Desired Motion Intention and Compliance Control for Upper Limb Assist Exoskeleton*”, International Journal of Control, Automation and Systems, Hanyang University, Korea Południowa, Nanyang Technological University, Singapur, CMH Lahore, Pakistan, 2017)

- ▶ założona ustawiczna współpraca ramienia z człowiekiem
- ▶ zastosowane adaptacyjne sterowanie impedancyjne
- ▶ i ekstremalne uczenie maszynowe do estymacji intencji

Zagadnienia pokrewne

- ▶ Sterowanie predykcyjne
- ▶ Sterowanie rozmyte
- ▶ Sterowanie adaptacyjne
- ▶ Sterowanie odporne
- ▶ Sterowanie z uczeniem iteracyjnym, ze wzmocnieniem itp.
- ▶ Pasywna podatność mechaniczna i manipulatory elastyczne
- ▶ Napędy o zmiennej impedancji
- ▶ Planowanie ruchu
- ▶ Detekcja otoczenia, unikanie przeszkód
- ▶ Rozpoznawanie obiektów
- ▶ Rozpoznawanie intencji, zachowań
- ▶ Interfejsy
- ▶ Teleoperacja
- ▶ Systemy wielorobotowe