Samo-nastavljivo vodenje z DMC-jem in proporcionalnim regulatorjem

Matija Arh, Igor Škrjanc
Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
Tržaška cesta 25, 1000 Ljubjana
matija.arh@fe.uni-lj.si, igor.skrjanc@fe.uni-lj.si

Self-tuning control with DMC and proportional regulator

With use of self-tuning we can design process control faster and simpler as with use of classical designing methods. Additionally to faster design time one of major benefits is that the operator, who uses this algorithm, can be less experienced and does not need huge amount of knowledge about theory of process control.

In this article we will present self-tuning of advanced predictive control method with auxiliary P-controller. It is well known that P-controller does not provide best control since it can not reach desired set point if it differs from the one it was designed for. But we can archive faster response time with it and then we can design better controller which deals with steady state error for this new system.

With auxiliary controller we archive faster step response, which is used for DMC. This approach is suitable only for stable processes or stable systems with P-controller

Kratek pregled prispevka

S samo-nastavljanjem dosežemo, da lahko vodenje za proces načrtamo hitreje in predvsem enostavneje, kot s klasičnimi metodami načrtovanja vodenja. Poleg hitrejšega načrtovanja je ena izmed velikih prednosti ta, da je lahko operater, ki uporablja tak pristop, manj izkušen oziroma ne potrebuje veliko znanja o teoriji vodenja.

V tem članku bomo opisali samo-nastavljanje sodobne napovedne metode vodenja s pomožnim P-regulatorjem. Kot je znano P-regulator ne daje najboljših rezultatov, saj v ustaljenem stanju vedno ostaja regulacijski pogrešek, če proces ni v delovni točki za katero je bil načrtan. Lahko pa s P-regulatorjem pohitrimo odziv procesa, nato pa na tem novem sistemu načrtamo boljši regulator, ki odpravlja tudi pogrešek v ustaljenem stanju.

S pomožnim regulatorjem tako pohitrimo odziv na stopničasto vzbujanje, katerega posnetek potrebuje DMC. Seveda je takšen pristop primeren le za stabilne procese oziroma stabilne sisteme s P-regulatorjem.

1 Uvod

Samo-nastavljanje regulatorjev ima že dolgo zgodovino in za skoraj za vsak algoritem vodenja se najde več metod za samo-nastavljanje. Ideja je v glavnem poenostaviti proces uglaševanja vodenja, kar v glavnem vodi do manjših stroškov zagona in vzdrževanja takšnega sisteam.

V tem članku bomo predstavili metodo za samonastavitev algoritma DMC s pomožnim P-regulatorjem. Z dodatno zanko želimo skrajšati čas nastavitve algoritma, pokazale pa so se še nekatere druge dobre lastnosti predstavljenega pristopa.

2 MPC

Vodenje s pomočjo modela (MPC-model predictive control), včasih imenovano tudi vodenje z drsečim horizontom (RHC-Receding Horizon Control), se razvija že od konca sedemdesetih. Takrat je Richalet v [1] poročal o prvi industrijski aplikaciji modelno napovednega vodenja.

Do danes poznamo vrsto algoritmov, ki spadajo v družino MPC in se lahko uporabijo za vodenje najrazličnejših procesov, vsem pa je skupna eksplicitna uporaba modela procesa za napoved izhoda procesa s pomočjo katerega se izračuna regulirni signal.

Glavna ideja vodenja s pomočjo modela, kot je predstavljeno v [2], je:

- Uporaba modela procesa za napoved izhoda procesa v prihodnosti.
- Izračun regulirnega signala na način, da se minimizira cenilka (optimizacija).
- Na vhod procesa se vodi samo prva izračunana vrednost regulirnega signala nakar se ob naslednjem trenutku vzorčenja postopek ponovi.

Pri napovednem vodenju s pomočjo modela z algoritmom skušamo optimizirati vrednost regulacijskega signala tako, da minimiziramo kriterijsko funkcijo. Kriterijska funkcija običajno upošteva predvideni regulacijski signal v dolžini horizonta vodenja in napovedani signal izhoda procesa (izhod modela) v dolžini napovednega horizonta. Vrednosti izhoda modela napovemo na podlagi preteklih meritev izhoda procesa in preteklih vrednosti vhodnega signala v proces. V skupino algoritmov vodenja MPC sodi tudi algoritem vodenja z matriko dinamičnega odziva (DMC).

3 DMC

Algoritem vodenja z matriko dinamičnega odziva (DMC-Dynamic Matrix Control) sta Cutler in Ramaker predstavila v [3]. Algoritem uporablja linearen model odziva na stopničasto vzbujanje in optimizira kriterijsko funkcijo, ki upošteva vsoto kvadratov razlike med napovedanim izhodom procesa in referenčno trajektorijo ter uteženo vsoto kvadratov sprememb regulirnega signala:

$$J=\sum_{j=1}^{N_P}\left(\hat{y}(k+j|k)-w(k+j)\right)^2+\lambda\sum_{j=1}^{N_C}\left(\Delta u(k+j+1)\right)^2 \qquad (1)$$

kjer je $\hat{y}(k+j|k)$ napovedana vrednost izhoda procesa, $w(k+j)$ je vrednost referenčne trajektorije, $\Delta u(k+j+1)$ napovedana sprememba regulacijskega signala in sta N_P in N_C napovedni horizont in horizont vodenja.

Z uporabo linearnega modela odziva na stopničasto vzbujanje se lahko napovedani izhod procesa zapiše kot matrično množenje matrike dinamičnega odziva in spremembami napovedanega regulirnega signala z upoštevanjem prostega odziva:

$$\boldsymbol{\hat{y}}=\boldsymbol{G}\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\Delta}}+\boldsymbol{f} \qquad (2)$$

kjer je $\boldsymbol{\hat{y}}$ vektor napovedanih vrednosti izhoda procesa, $\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\Delta}}$ je vektor napovedanih sprememb vhoda v proces in $\boldsymbol{f}$ vektor prostega odziva (odziv kakršen bi bil, če se vhod v proces ne bi spreminjal).

Na ta način lahko izračunamo optimalen regulirni signal z linearno kombinacijo preteklih vrednosti, kot rešitev problema najmanjših kvadratov[2]. Regulacijski lahko zakon zapišemo kot:

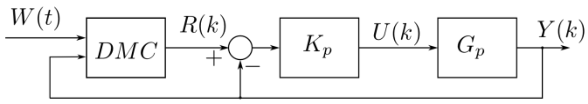
$$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\Delta}}=(\boldsymbol{G}\boldsymbol{G}^{\boldsymbol{T}}+\lambda\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{G}^{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{w}-\boldsymbol{f}) \qquad (3)$$

kjer je matrika $\boldsymbol{G}$ matrika dinamičnega odziva sestavljena iz vrednosti modela odziva na stopničasto vzbujanje, $\boldsymbol{w}$ je vektor referenčnega signala, $\boldsymbol{f}$ je vektor prostega odziva.

Na ta način dobimo za horizont vodenja v naprej sprememb vhodnega signal v proces, vendar upoštevamo samo prvega, v naslednjem intervalu vzorčenja pa ponovno izračunamo optimalne spremembe vhoda v proces.

4 DMC s pomožnim P-regulatorjem

Če je proces stabilen lahko že s preprostim testom zanj načrtamo P-regulator, s katerim pohitrimo odziv sistema. Nato pa za ta novi sistem izvedemo samo-nastavljanje DMC-ja. Tako dobimo regulacijsko shemo, kot je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Bločna shema

Algoritem nastavljanja poteka tako, da najprej pripeljemo sistem v ustaljeno stanje v bližino delovne točke in podlagi dinamike izhodnega signala procesa nastavimo ojačenje P-regulatorja. Nato posnamemo odziv na stopničasto vzbujanje za proces s P-regulatorjem in tega uporabimo za nastavitev DMC-ja.

Če so nam znani približni parametri odprto-zančnega procesa, lahko iz zahteve za delovno točko Y_{00} in skok ΔY ocenimo vrednosti v ustaljenem stanju in potreben skok reference:

$$R_{00} = \frac{U_{00}}{K_p} + Y_{00} \tag{4}$$

$$\Delta R = \frac{1 + K_p K_{G_p}}{K_p K_{G_p}} \Delta Y \tag{5}$$

kjer je K_{G_p} enosmerno ojačanje procesa. Če parametri niso znani natančno, bomo odziv na stopničasto vzbujanje pomerili v nekoliko drugačni delovni točki, kar pa pri linearnih sistemih nima vpliva na dinamiko regulatorja.

Ojačenje P-regulatorja smo nastavili na podlagi dinamike prehoda v ustaljeno stanje z nastavitvenimi pravili Ziegler-Nichols [4, str 136]:

$$K_p = \frac{1}{a} \tag{6}$$

kjer je a razdalja na ordinatni osi med začetno vrednostjo signala in presečiščem tangente v prevojni točki z abscisno osjo na diagramu odziva. Ojačenje P-regulatorja smo dejansko nastavili na nekoliko bolj zadržano vrednost: $K_p = 1/(3a)$ za zagotavljanje boljše stabilnosti in robustnosti notranje zanke.

5 Zaščita pred integralskim pobegom

Algoritem DMC v postopku izračuna regulirnega signala izračuna vektor prostega odziva, to je odziv kakršen bi bil, če bi v tistem trenutku izhod regulatorja postavili na vrednost v delovni točki. Ta odziv je odvisen samo od preteklih vrednosti regulirnega signala:

$$f(k+n) = y_m(k) + \sum_{i=1}^{N} (g_{n+i} - g_i) \Delta r(k-i) \tag{7}$$

kjer je $y_m(k)$ trenutna vrednost izhoda procesa, g_i so vrednosti odziva na stopničasto vzubjanje, N število vzorcev po katerih se odziv na stopničasto vzbujanje ustali, $\Delta r(k-i)$ so pretekle spremembe regulirne veličine, $f(k+n)$ pa je napovedana vrednost prostega odziva za n-ti vzorec v naprej. V primeru da DMC izračuna vrednost, ki krši omejitve je smiselno, da regulator za izračun napovedanega prostega odziva v naslednjem intervalu vzorčenja upošteva vrednost, ki je dejansko bila pripeljana na proces.

Smiselno je, če $R(k) = R_{00} + r(k)$ omejimo že v regulatorju na takšen način, da ne pride do kršitev omejitev aktuatorja. V našem primeru je kršenje omejitev aktuatoja odvisno tudi od pomožnega P-regulatorja, zato je smiselno, da se omejitve v DMC-ju spreminjajo dinamično. Tako kot P-regulator k regulirnemu signalu, prispeva tudi DMC, zato smo prispevek P-regulatorja ustrezno upoštevali pri omejitvah in tako dobili omejitev za DMC v trenutnem intervalu vzorčenja.

$$R_{max}(k) = \frac{U_{max} - U_{00}}{K_p} + Y(k) \tag{8}$$

$$R_{min}(k) = \frac{U_{min} - U_{00}}{K_p} + Y(k) \tag{9}$$

$$\Delta R_{min}(k) = \frac{\Delta U_{min}}{K_p} + \Delta Y(k) \tag{10}$$

$$\Delta R_{max}(k) = \frac{\Delta U_{max}}{K_p} + \Delta Y(k) \tag{11}$$

6 Rezultati

Opisani način samo-nastavljanja in vodenja smo preizkusili simulacijsko, kakor smo tudi preizkusili zaščito pred integralskim pobegom.

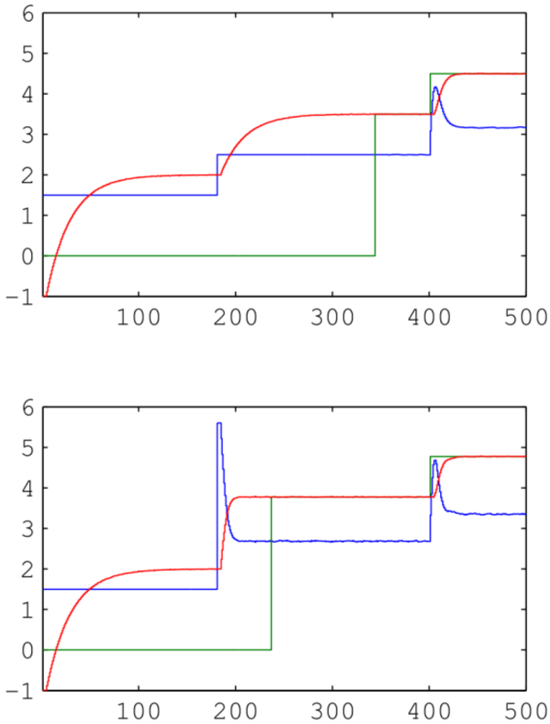
Za simulacijo smo uporabili model prvega reda z ojačenjem 1,5 in časovno konstanto 5 s. Model procesa smo diskretizirali z metodo zadrževalnika ničtega reda s časom vzorčenja 0,2 s. Simulacijskemu modelu smo dodali še 3 vzorce zakasnitve. Za horizont vodenja in napovedni horizont za DMC algoritem smo uporabili 20 in 30 % dolžine posnetka odziva na stopničasto vzbujanje. Utež λ pa smo izbrali 2 za simulacijo brez pomožnega P-regulatorja in 5 za simulacijo z njim, to pa zato ker P-regulator vnese nekaj agresivnosti v vodenje in je lahko zato zunanja zanka milejša.

6.1 Samo-nastavljanje

Na sliki 2 je prikazan potek vhodnega in izhodnega signala simuliranega procesa. Zgoraj je prikazan potek z uporabo DMC algoritma, spodaj pa DMC-ja s pomožnim P-regulatorjem. Z rdečo barvo je narisan izhodni signal in z modro vhodni ter referenca je narisana z zeleno. Vidimo lahko, da se postopek nastavljanja regulatorja očitno pohitri. Posnetek odziva na stopničasto vzbujanje za uporabo v DMC algoritmu v primeru brez uporabe P-regulatorja traja približno 160 vzorcev, v primeru z P-regulatorjem pa približno 80.

6.2 Kakovost vodenja

Na sliki 3 je prikazana primerjava vodenja procesa na spremembo reference in stopničasto



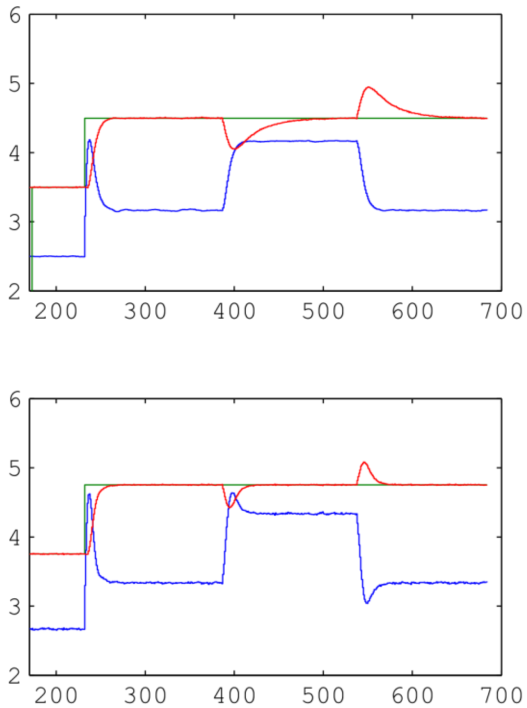
Slika 2: Primerjava nastavljanja brez in z dodatnim P-regulatorjem

motnjo na vhodu procesa. Vidi se, da v obeh primerih proces podobno dobro sledi spremembi reference, ki se zgodi pri 230. vzorcu, pri reguliranju v primeru stopničaste motnje (380. vzorec) pa daje DMC z uporabo P-regulatorja (spodaj) precej boljši rezultat kot sam DMC (zgoraj).

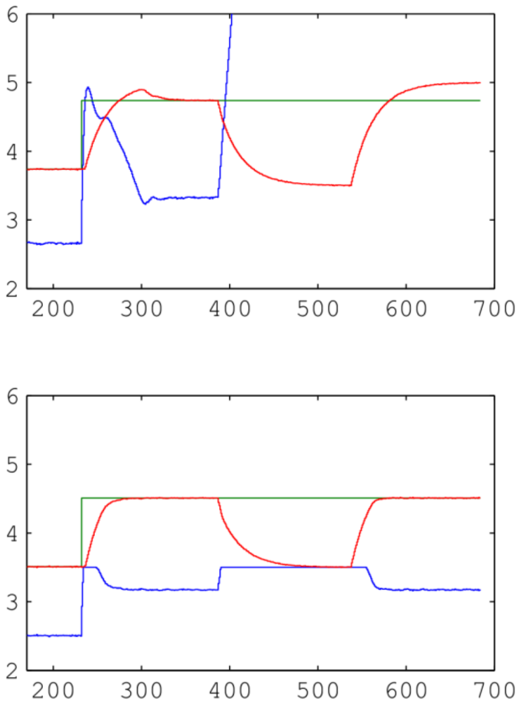
6.3 Integralski pobeg

Na sliki 4 je prikazan potek signalov s katerih se vidi učinek zaščite pred integralskim pobegom. Uporabljena je bila zgornja omejitev na regulirnem signalu vrednosti 4. Najprej se pri približno 230. vzorcu spremeni referenca, nato od približno 380 do 530. vzorca pulzna motnja na vhodu simuliranega procesa.

Vidimo lahko da z uporabo predlagane zaščite pred integralskim pobegom očitno izboljšamo delovanje regulatorja v delovni točki, ki zahteva regulirni signal blizu omejitve.



Slika 3: Primerjava vodenja brez in z dodatnim P-regulatorjem



Slika 4: Primerjava brez in z uporabo zaščite pred integralskim pobegom

7 Zaključek

Kot je bilo pokazano lahko z uporabo pomožnega regulatorja precej skrajšamo čas samo-nastavljanja DMC-ja. Potrebno pa je omeniti, da je pohitritev precej odvisna od razmerja časovne konstante s periodo vzorčenja. Pri relativno hitrih procesih, ni moč doseči tako očitne pohitritve.

Poleg pohitritve časa nastavljanja, smo s predlaganim postopkom skrajšali posnetek odziva na stopničasto vzbujanje, kar pripomore k manjši računski zahtevnosti DMC algoritma. Ta na začetku izračuna inverz matrike katere dimenzije so direktno odvisne od dolžine posnetka, nato pa v vsakem koraku uporabi dve matrični množenji, katerih dimenzije so prav tako odvisne od dolžine posnetka na stopničasto vzbujene. Ker ima osnovno množenje in inverzija matrik računsko zahtevnost $O(n^3)$ to lahko bistveno skrajša čas izračuna trenutnega regulirnega signala.

Glavna prednost predlaganega pristopa k samo-nastavljanju je torej krajši čas nastavitve algoritma vodenja in manjša računska zahtevnost algoritma, slabost pa potreba po poznavanju približnih parametrov modela procesa.

Zahvala

Kompetenčni center za sodobne tehnologije vodenja delno financirata Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost, kulturo in šport ter Evropska unija (EU), in sicer iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

[1] *J. Richalet, A. Rault, J. Testud, J. Papon, Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes*, Automatica, vol. 14, no. 5, pp. 413–428, 1978.

[2] *E. F. Camacho, C. Bordons, Model predictive control.* Springer-Verlag London, 1988.

[3] *C. R. Cutler, A. Morshedi, J. Haydel, An industrial perspective on advanced control*, AIChE annual meeting, (Washing-ton, DC), 1983.

[4] *K. J. Åströmn T. Hägglund, PID controllers: Theory, Design, and Tuning*, Instrument Society of America, 1995