

Industriell reglerteknik: Föreläsning 12

Martin Enqvist

Reglerteknik
Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet

Föreläsningar

1	Sekvensstyrning: Funktionsdiagram, Grafcet.
2	Grundläggande reglerteori i diskret tid.
3	Modellering. Design av regulatorer.
4	Framkoppling från referenssignal. PID-regulatorn.
5	PID-regulatorn. Implementering av regulatorer.
6	Regulatorer i drift. Olinjära regulatorer.
7	Regulatorstrukturer.
8	Regulatorstrukturer. MPC: Grundprincip, problemformulering.
9	MPC: Problemformulering, referensföljning, I-verkan.
10	MPC: Stabilitet.
11	Gästföreläsning
12●	MPC: Tolknings. Sammanfattning.

Modellbaserad prediktionsreglering – MPC (forts.)

Repetition: MPC

Minimeringsproblem i MPC:

$$\min_{u_{min} \leq u \leq u_{max}} \sum_{j=0}^{N-1} \|z(k+j)\|_{Q_1}^2 + \|u(k+j)\|_{Q_2}^2$$

$u(k+j)$, $j = 0, 1, \dots, N-1$ ändligt antal fria variabler (styrsignalsekvensen)

N = prediktionshorisont (designvariabel)

Repetition: MPC-algoritm

MPC-algoritm:

1. Mät $x(k)$ (eller skatta med observatör utifrån mätningar av $y(k)$).
2. Räkna ut styrsignalssekvensen $u(k+j)$, $j = 0, 1, \dots, N-1$. genom att lösa MPC-minimeringsproblemet .
3. Ställ ut första elementet $u(k)$ i styrsignalssekvensen.
4. Tidsuppdatering, $k := k + 1$.
5. Repetera från steg 1.

Repetition: Kompakt beskrivning

Kompakt beskrivning av målfunktionen:

$$(\mathcal{F}x(k) + \mathcal{G}U)^T \mathcal{M}^T \mathcal{Q}_1 \mathcal{M} (\mathcal{F}x(k) + \mathcal{G}U) + U^T \mathcal{Q}_2 U$$

MPC-minimeringsproblemet formulerat som ett kvadratisk programmeringsproblem (QP-problem):

$$\min_U \frac{1}{2} U^T (\mathcal{G}^T \mathcal{M}^T \mathcal{Q}_1 \mathcal{M} \mathcal{G} + \mathcal{Q}_2) U + (\mathcal{G}^T \mathcal{M}^T \mathcal{Q}_1 \mathcal{M} \mathcal{F}x(k))^T U$$

$$\text{bivillkor } A_u U \leq b_u$$

Repetition. . .

MPC-algoritmen kan modifieras för att få:

- Referensföljning
- Integralverkan
- Hantering av generella bivillkor (t.ex. på den styrda signalen z)

Stabiliteten kan garanteras vid

- MPC med sluttillståndsbivillkor ($x(k + N) = 0$)
- MPC med sluttillståndsstraff (extraterm $\|x(k + N)\|_P^2$ i målfunktionen)

Överordnad MPC-reglering

I många fall används inte enbart MPC för att styra ett system, utan MPC-regulatorn styr systemet indirekt via ett antal enklare regulatorer.

Observationer:

- Utsignalerna från MPC-regulatorn är då referenssignaler till de enkla regulatorerna.
- Det finns typiskt inga bivillkor på dessa signaler.
- Bivillkoren på de verkliga styrsignalerna måste tas omhand på samma sätt som bivillkor på z .
- De enkla regulatorerna måste ingå i modellen som MPC-regulatorn använder.

Exempel: Överordnad MPC-reglering: Bivillkor i Matlab

```

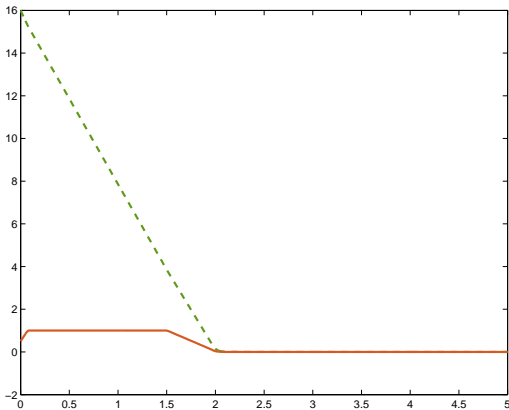
Mt=[1 0 0 0;
    0 1 0 0;
    K1 0 1 0;
    0 K2 0 1];
Dz=[0 0;0 0;-K1 0;0 -K2];
zu=[20;1;10;8];
zl=[-10;-.5;-10;-8];
Mtblock=blockrepeat(Mt,N);
Dzblock=blockrepeat(Dz,N);
Azu=Mtblock*S+Dzblock;
bzu=repmat(zu,N,1)-Mtblock*H*x;
Azl=-Mtblock*S-Dzblock;
bzl=repmat(-zl,N,1)+Mtblock*H*x;
Ar=[eye(N*m);-eye(N*m)];    %(ubounds innehåller gränser för r)
br=[repmat(ubounds(:,2),N,1);repmat(-ubounds(:,1),N,1)];
A=[Ar;Azu;Azl];
b=[br;bzu;bzl];

```

Exempel: Överordnad MPC-reglering

Tanknivåer vid överordnad MPC-reglering kombinerat med PI-reglering.

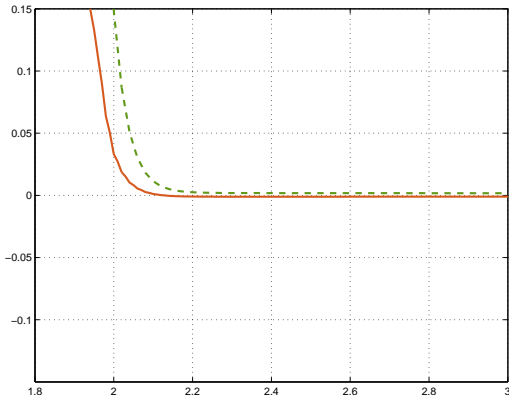
Nivån i tank 1 (**grönt, streckat**) och i tank 2 (**rött, heldraget**).



Exempel: Överordnad MPC-reglering...

Inzoomade tanknivåer vid överordnad MPC-reglering kombinerat med PI-reglering.

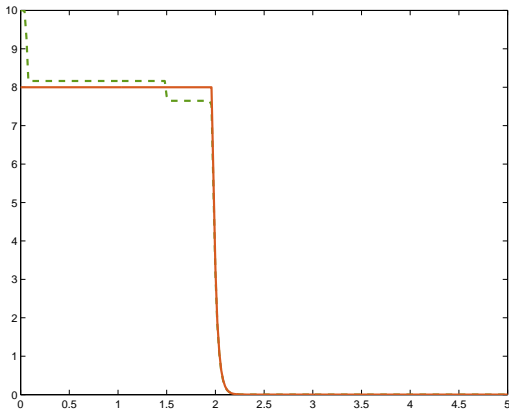
Nivån i tank 1 (**grönt, streckat**) och i tank 2 (**rött, heldraget**). [För snabb insvängning i tank 2!]



Exempel: Överordnad MPC-reglering...

Styr signaler vid överordnad MPC-reglering kombinerat med PI-reglering.

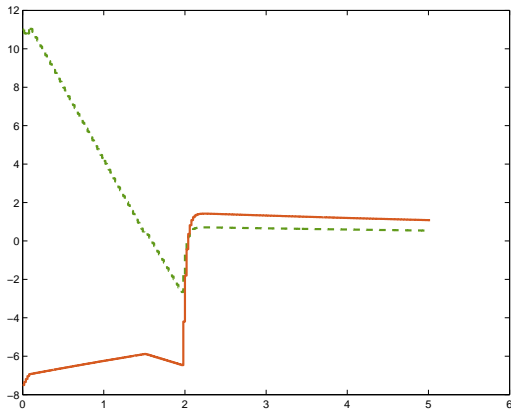
Signal till pump 1 (**grönt, streckat**) och till pump 2 (**rött, heldraget**).



Exempel: Överordnad MPC-reglering...

Referenssignaler till
PI-regulatorerna vid
överordnad MPC-reglering
kombinerat med PI-reglering.

Signal till PI-regulator 1
(**grönt, streckat**) och till
PI-regulator 2 (**rött,
heldraget**).

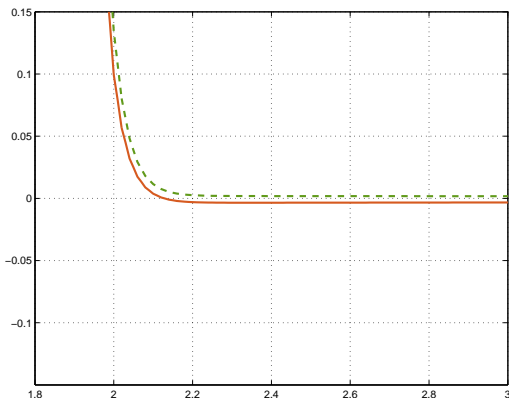


Exempel: Överordnad MPC-reglering...

Inzoomade tanknivåer vid överordnad MPC-reglering kombinerat med PI-reglering.

Nu mindre vikt på nivån i tank 2.

Nivån i tank 1 (**grönt, streckat**) och i tank 2 (**rött, heldraget**). [Rätt snabbhet hos insvängningen i tank 2!]

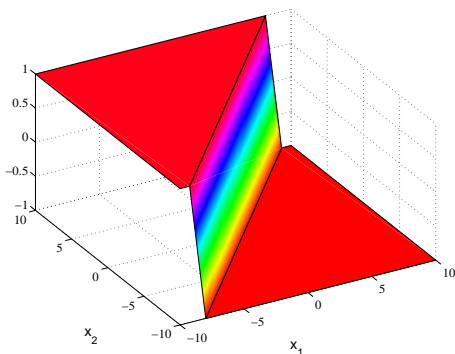


Explicit MPC

- MPC-återkoppling: $u(k) = f(x(k))$ (Hur ser f egentligen ut?)
- f : styckvist affin och kontinuerlig
- Lösningsrymden kan delas upp i ett ändligt antal polytopiska områden på vilka f är lika med *en* affin funktion
- Idé: Förberäkna f offline. (\Rightarrow Slipper att lösa QP-problem online)

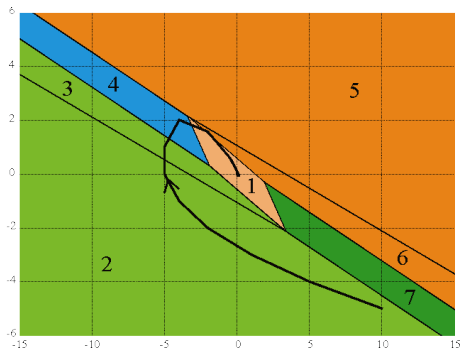
Exempel: Explicit MPC

En styckvist affin lösning för en dubbelintegrator:



Exempel: Explicit MPC

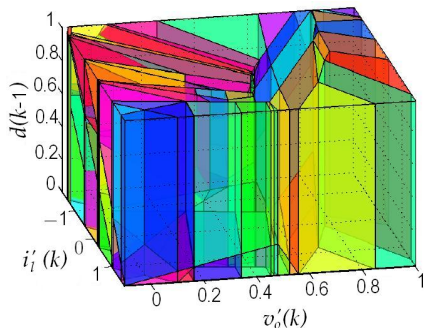
En (annan) indelning av lösningsrymden för en dubbelintegrator



(Från Alberto Bemporads websida:
<http://www.dii.unisi.it/~bemporad/>)

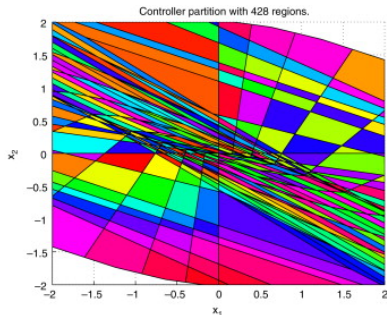
Exempel: Explicit MPC

Ett exempel på explicit MPC i en elektroniktillämpning:



(Från <http://www.cs.kuleuven.be/cwis/research/twr/teaching/prop2007/T929.shtml>)

Ett annat exempel:



(Från Wen, C., Ma, X. and Ydstie, B. E. Analytical expression of explicit MPC solution via lattice piecewise-affine function. *Automatica* 45(4): 910-917, 2009.)

Exempel: Explicit MPC

Ett exempel där en optimal MPC-regulator approximeras:

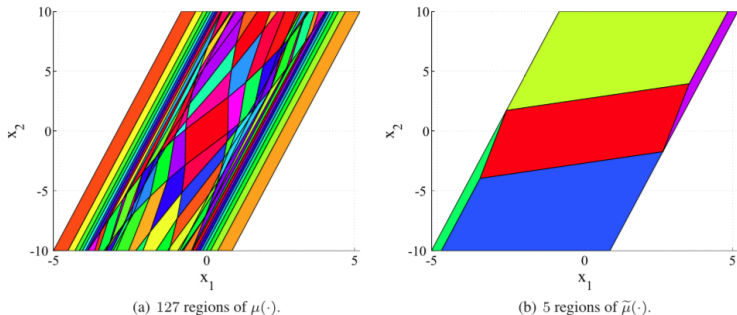


Figure 2. Regions of the complex controller $\mu(\cdot)$ and of the approximate feedback $\tilde{\mu}(\cdot)$.

(Från: Holaza, J., Takacs, B., Kvasnica, M. and Di Cairano S. Nearly optimal simple explicit MPC controllers with stability and feasibility guarantees. *Optimal Control Applications and Methods* 46:667-684, 2015.)

Sammanfattning

Överordnad MPC-reglering:

- MPC kan användas för att generera referenssignaler till enklare regulatorer och på så sätt få dem att samverka mer effektivt
- Modellen i MPC-regulatorn blir då en modell både av det styrda systemet och av de enklare regulatorerna

Explicit MPC:

- Förberäkna lösningen till MPC-problemet (så att man slipper att lösa QP-problem online)
- De resulterande regulatorerna kan dock bli väldigt komplexa och approximationer kan därför vara nödvändiga

Industriell reglerteknik – en kort sammanfattning

Mål

Målet med kursen är att förmedla kunskaper om de reglertekniska metoder som är vanligt förekommande i industrin.

Tre teman i kursen:

- Sekvensstyrning
- Design, implementering och drift av en regulator
- Multivariabel reglering (regulatorstrukturer och MPC)

Desutom: Kompletterande reglertekniska verktyg (tidsdiskret reglerteori och modellering av industriella system)

Sekvensstyrning

Programmering (& modellering):

- Funktionsdiagram (Grafcet)
- Reläscheman

Implementering: PLC-system

Nyckelbegrepp: övergång, steg, övergångsvillkor, handling

Samplad reglering

Tidsdiskreta regulatorer kan fås på två sätt:

- Vid en tidsdiskret implementering av en tidskontinuerlig regulator (som approximeras mha. Eulers metod eller Tustins formel)
- Vid tidsdiskret reglerdesign baserad på en samplad version av den tidskontinuerliga systembeskrivningen (t.ex. zoh-sampling)

Grundläggande tidsdiskret reglerteori

- Sampling av systembeskrivning
- Styr- och observerbarhet
- Överföringsfunktion
- Poler och nollställen
- Impulssvar
- Frekvensfunktion
- Stabilitet
- Rotort
- Nyquistkriteriet

Modellering av industriella system

- Processmodeller
- Stegsvarexperiment
- Självsvängningsexperiment
- Självsvängningsexperiment med relä

Design av regulatorer

- Regulatorer med interna modeller (IMC) (Idé: Återkoppla från modellfelen)
- Smithprediktorn (Idé: Kompensera för tidsfördröjningen i systemet, specialfall av IMC)
- Framkoppling från referenssignal (Idé: Ställ ut "rätt" styrsignal direkt)

PID-regulatorn

Modificeringar:

- Approximativ D-del
- Parallellform, serieform
- Modificering av referenssignalen

Inställningsregler för PID-regulatorer

Välj regulatorparametrar med hjälp av:

- IMC
- Lambdatrimning
- Ziegler-Nichols regler (två varianter)
- Specificering av punkt på nyquistkurvan
- Placering av dominerande poler (Åström-Hägglunds regler, två varianter)

Implementering av regulatorer

- Tidsdiskret approximation mha. Eulers metod eller Tustins formel
- Hantering av integratoruppvridding
- Stötfria övergångar vid mod- eller parameterbyten
- Regulatorkod

Regulatorer i drift

Övervakning med hjälp av:

- Harris index
- Spektralanalys
- IAE-baserat index (IAE = Integrated Absolute Error)
- Stattins index

Olinjära regulatorer

- Regulatorer med väljare (Idé: Växla mellan olika regulatorer som har olika uppgifter)
- Parameterstyrning (Idé: Låt regulatorparametrarna vara funktioner av någon/några mätbara signaler)
- Fuzzy control (Idé: Översätt verbalt definierade styrlagar)

Regulatorstrukturer

- Framkoppling från störning (Idé: Kompensera för störningar redan innan de har givit fel i utsignalen)
- Kaskadreglering (Idé: Utnyttja en extra mätsignal i en inre, snabb reglerkrets)
- Kvotreglering (Idé: Håll kvoten mellan två processvariabler konstant mha. reglering)
- Mitthållningsreglering (Idé: Fördela regleruppgifterna så att ett snabbt och noggrant ställdon oftast ligger i mitten av sitt arbetsområde)
- Split-range-reglering (Idé: Dela upp arbetsområdet mellan två ställdon)

Modellbaserad prediktionsreglering (MPC)

- Idé: Utnyttja modellens prediktionskraft och optimera styrsignalen online
- Fördelar: Kan hantera olika typer av bivillkor, flera in- och utsignaler, intuitiv metod
- Nackdel: Beräkningskrävande (kan ibland undvikas med explicit MPC)
- Utvidgningar: Referensföljning, integralverkan, stabilitetsgarantier, etc.

Tentamen

Tentamen

- 4 timmars datortentamen
- Sekvensstyrning examineras *ej* på tentan
- Godkäntgräns: 23 poäng (av 50 möjliga)

Tentamen...

Tillåtna tentamenshjälpmedel:

- Industriell reglerteknik - Kurskompendium
- Reglerteknik - Grundläggande teori av T. Glad & L. Ljung (grundkursboken)
- Tabeller
- Miniräknare
- Dator med Matlab och de filer som har distribuerats på lektionerna (se lektionswebsidan).

"Normala inläsningsanteckningar" i kursböckerna är tillåtna men däremot inte att skriva in lösningar till uppgifter, teorisammanfattningar etc.

Tentamen...

Ej tillåtet:

- Övriga delar av kursmaterialet (övningskompendium, laborationshandledningar, föreläsningssanteckningar, etc.) får inte tas med vid tentamen.
- Det är inte tillåtet att skriva in lösningar till uppgifter, teorisammanfattningar, etc. i kursböckerna, tabellerna eller i miniräknaren.
- Egna filer med lösningar till lektions- och laborationsuppgifter får inte tas med vid tentamen.
- Kommunikation med andra personer och informationshämtning via nätverket eller Internet är inte tillåtet under tentamen.

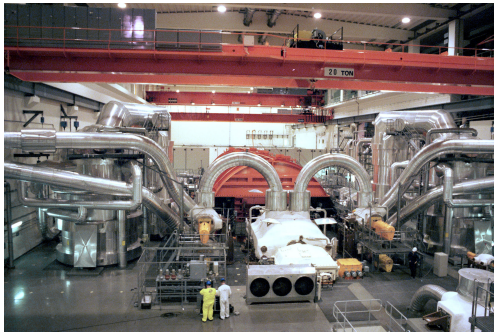
Allmänna tips

- Anmäl dig till tentan!
- Testa att Matlab fungerar som det ska och att du vet hur man skriver ut *före* tentan.
- Spara kommandosekvenser i filer.
- Skriv ut filer, simulinkscheman och figurer regelbundet under tentan och kom ihåg att signera allt så att det syns att det är dina utskrifter.
- Lämna in utskrifter av koden även om den inte fungerar.
- Tänk på att tentan är till för att du ska visa vad du kan, inte för att vi ska få reda på lösningarna på några uppgifter. Skriv tydliga motiveringar, enbart kod räcker inte!

Exjobb i reglerteknik

Exempel på exjobb

Daniel Rosell:
Modelling and simulation of
the pressure control system in
a nuclear power plant



Exempel på exjobb...

Lena Persson:

Diagnosis of stiction in control valves
for condition based maintenance



Exempel på exjobb...

Patrik Grylin, Mårten Hedborg:
Active noise control of a forest
machine cabin



Exempel på exjobb...

Lovisa Jansson, Amanda Nilsson:
Evaluation of model-based design
using rapid control prototyping on
forklifts



Exempel på exjobb...

Andreas Westerlund:
Sensor-based trajectory planning in
dynamic environments



Exempel på exjobb...

Andreas Gising:

MALLS – Mobile automatic launch and landing station for VTOL UAVs

Henrik Salomonsson & Björn Saläng:

Vision based pose estimation for autonomous helicopter landing



Tack för visat intresse!

**Lycka till på tentan,
och med resten av studierna!**

www.liu.se