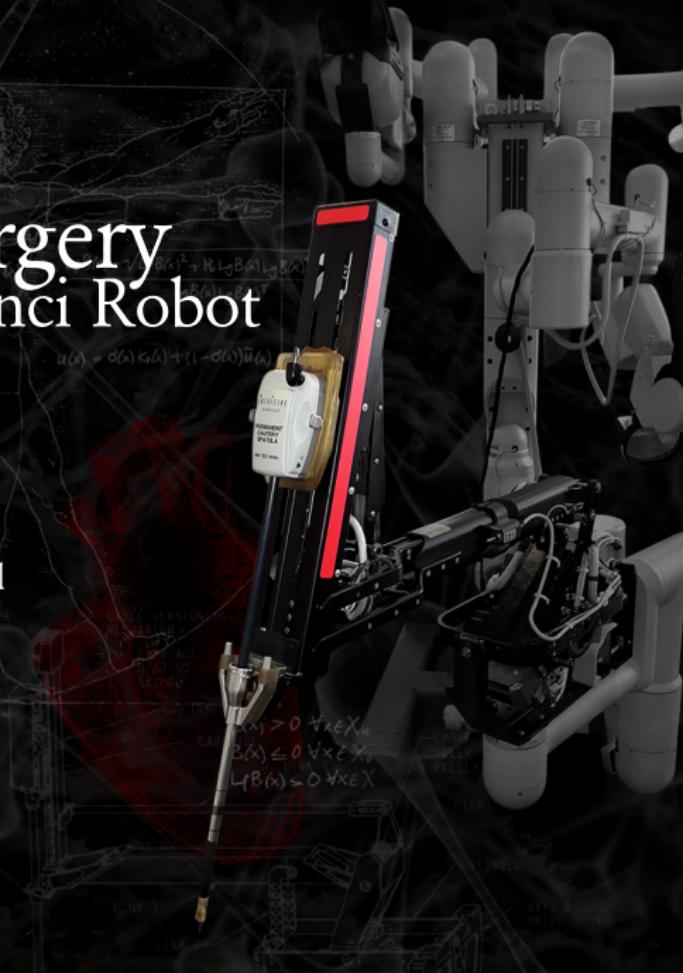


Safety in Automated Surgery with the da Vinci Robot

Christian Kocks Lykkegaard
Britt Louise Jakobsen



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK



Agenda

De næste ca. 30 min.:

- ▶ Baggrund og metoder til at løse problemet (*Britt*)
- ▶ Design af en sikker regulator (*Christian*)
- ▶ Analyse af en arbitrær regulator (*Britt*)
- ▶ Konklusion (*Christian*)

Derudover:

- ▶ Demo i lab som tiden tillader det
- ▶ Diskussion og spørgsmål

1

Agenda

Kirurgirobotik

Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

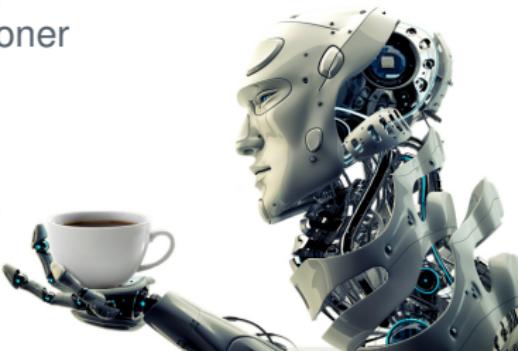
Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

Incitament for projektet

- ▶ Udbredelse og udvikling indenfor kirurgirobotik
- ▶ AAU: Patient-manipulator afkoblet fra master-konsol
- ▶ Kontrollerbare robotled
- ▶ Sikkerhed ved robotoperationer
- ▶ Fremtiden for robotkirurgi
- ▶ Mål med projektet
- ▶ Implementation i ROS
- ▶ To tilgangsvinkler



Agenda

2 Kirurgirobotik

Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

Barriercertifikater

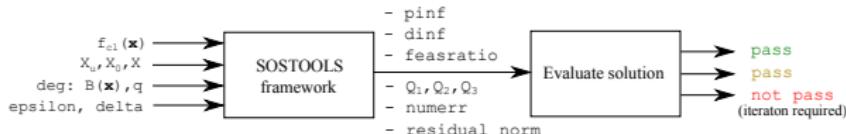
Formelt bevis for garanteret sikkerhed



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Definition af sikkerhed

- ▶ Systemets tilstande er i \mathcal{X}
- ▶ Usikre tilstande er i $\mathcal{X}_u \subset \mathcal{X}$ og sikre tilstande i $\mathcal{X}_0 \subseteq \mathcal{X} \setminus \mathcal{X}_u$
- ▶ Nulniveaukurven af $B(\mathbf{x})$ danner barriere mellem \mathcal{X}_0 og \mathcal{X}_u



- 3 Agenda
- Kirurgirobotik
- Barriercertifikater
- Kontroldesign
- Design fra CBF's
- Sikkerhed i 1D
- Virtuel fixture
- Sikkerhed i 3D
- Sikkerhedsverifikation
- Konklusion

Kontrolbarrierefunktioner (CBF)

Konstruktion af CBF til design af sikkerhedsregulator



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

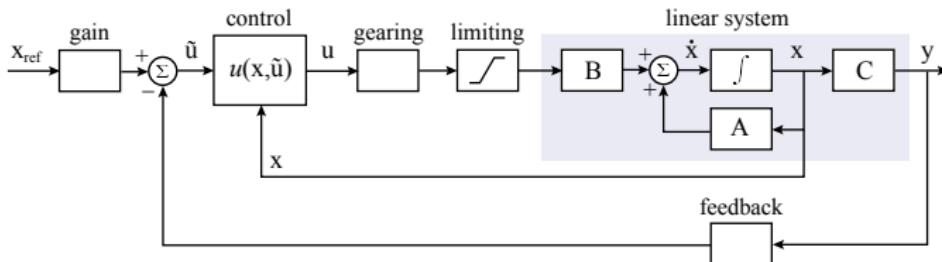
To regulatorer

- ▶ Lineær positionskontrol indenfor det sikre område \mathcal{X}_0
- ▶ Gradvis overgang til sikkerhedsregulator nær \mathcal{X}_u
- ▶ Designet vha. CLF så krav til sikkerhed bliver opfyldt

$$u(\mathbf{x}, \tilde{u}) = \sigma(\mathbf{x})k_0(\mathbf{x}) + (1 - \sigma(\mathbf{x}))\tilde{u}(\mathbf{x})$$

4

- Agenda
- Kirurgirobotik
- Barrierefertifikater
- Kontroldesign
- Design fra CBF's
- Sikkerhed i 1D
- Virtuel fixture
- Sikkerhed i 3D
- Sikkerhedsverifikation
- Konklusion



Design fra CBF's

Use-cases og fælles udfordringer



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Tre use-cases

- ▶ Et "simpelt" case i 1D
 - skabe erfaring med CBF's og den anvendte kontrol topologi
- ▶ Virtual fixture
 - at starte noget virkelig anvendeligt
- ▶ Operationer i 3D rummet
 - undgå at bringe vitale områder i fare



Fælles udfordringer

- som vi møder som de første i Danmark

- ▶ Konstruktion af CBF's
 - som at lede efter Lyapunov funk.
- ▶ Kontrol topologi
- ▶ Implementering på da Vinci med ROS



- Agenda
Kirurgirobotik
Barrierefcertifikater
Kontroldesign
5 Design fra CBF's
Sikkerhed i 1D
Virtuel fixture
Sikkerhed i 3D
Sikkerhedsverifikation
Konklusion

Sikkerhed for et 1 dimensionelt system

Det første skridt - instrument slide



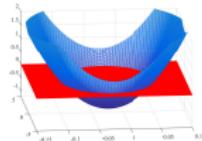
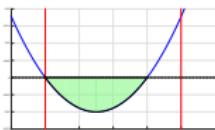
AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

► Model

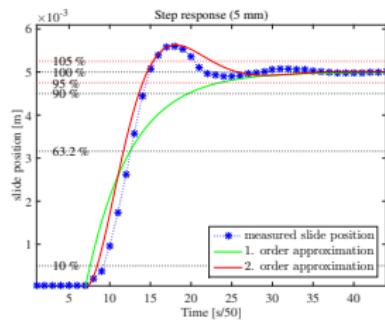
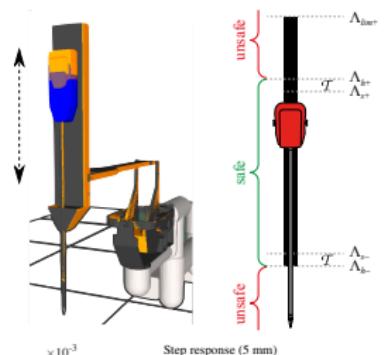
- vigtig da $k_0(\mathbf{x})$ er model baseret
 - 1. orden: Opnå erfaring
 - 2. orden: Observer krævet
 - Selv for et simplet system eskalerer kontrol topologien hurtigt.

► CBF

- parabel for 1. orden
- paraboloid for 2. orden



- Fremgangsmåde for CBF:
 - $B(\mathbf{x}) > 0$ på \mathcal{X}_u og $B(\mathbf{x}) \leq 0$ på \mathcal{X}_0
 - Forsøg at få $L_g B(\mathbf{x}) \neq 0 \forall \mathbf{x}$



6

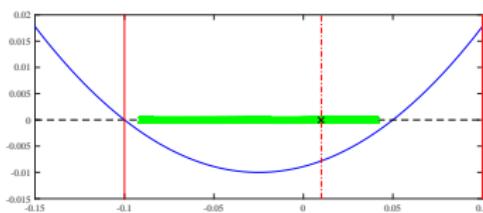
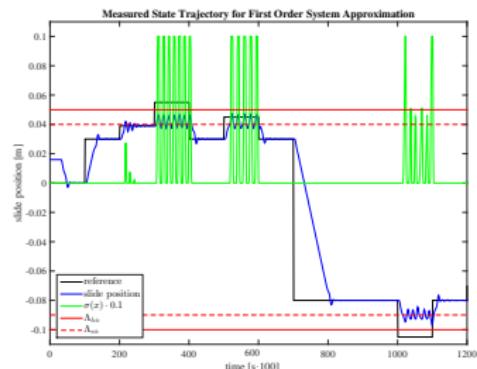
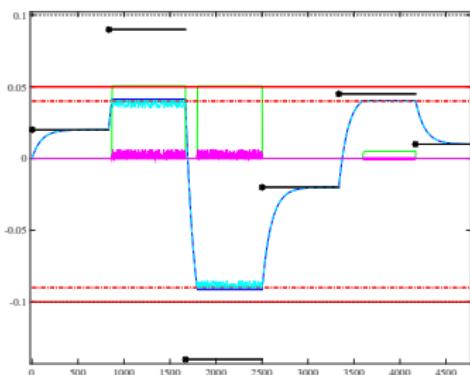
- Agenda
- Kirurgirobotik
- Barriercertifikater
- Kontroldesign
- Design fra CBF's
- Sikkerhed i 1D
- Virtuel fixture
- Sikkerhed i 3D
- Sikkerhedsverifikation
- Konklusion

Sikkerhed for et 1 dimensionelt system

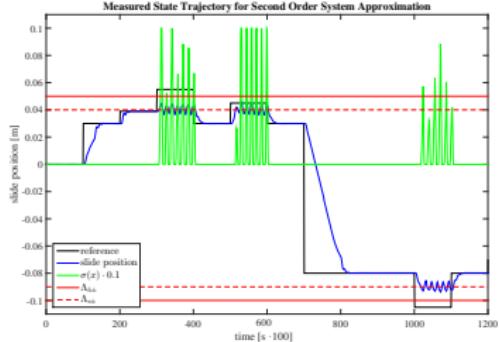
Resultater og erfaring



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK



$$\blacktriangleright k_0(\mathbf{x}) = -\frac{a + \sqrt{a^2 + \kappa^2 b b^T}}{b b^T} b^T$$



- Agenda
Kirurgirobotik
Barrierefcertifikater
Kontroldesign
Design fra CBF's
7 Sikkerhed i 1D
Virtuel fixture
Sikkerhed i 3D
Sikkerhedsverifikation
Konklusion

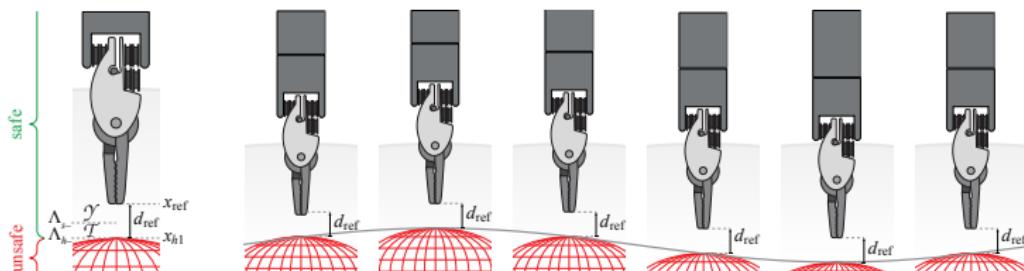
Sikkerhed for et dynamisk system

Indledende udvikling til at opnå virtual fixture



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

- ▶ Lægen skal opleve hjertet som stillestående - i en sikker afstand
- ▶ Modeller hjertet som en sinus bevægelse (Dr. Poulsen)



$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -1/\tau & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_h & 0 \\ 0 & -\omega_h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_{h1} \\ x_{h2} \\ d_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/\tau \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$u = \bar{N}x_{ref} - \mathbf{K}x_1 = \bar{N}(x_{h1} - x_1) - \mathbf{K}x_1 = \bar{\mathbf{K}}x$$



$$B(x) = \tilde{c}(x_{h1} - x_1)$$

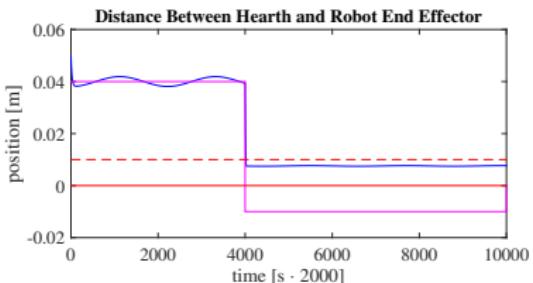
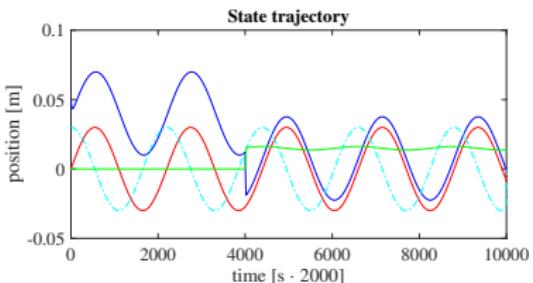
8

- Agenda
- Kirurgirobotik
- Barriereforskrifter
- Kontroldesign
- Design fra CBF's
- Sikkerhed i 1D
- Virtuel fixture
- Sikkerhed i 3D
- Sikkerhedsverifikation
- Konklusion

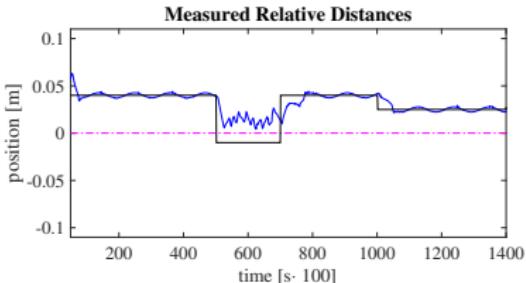
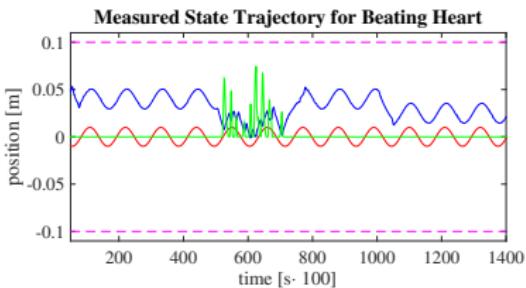
Sikkerhed for et dynamisk system

Resultater

► Simulering



► Implementering



9

- Agenda
- Kirurgirobotik
- Barrierefcertifikater
- Kontroldesign
- Design fra CBF's
- Sikkerhed i 1D
- Virtuel fixture
- Sikkerhed i 3D
- Sikkerhedsverifikation
- Konklusion

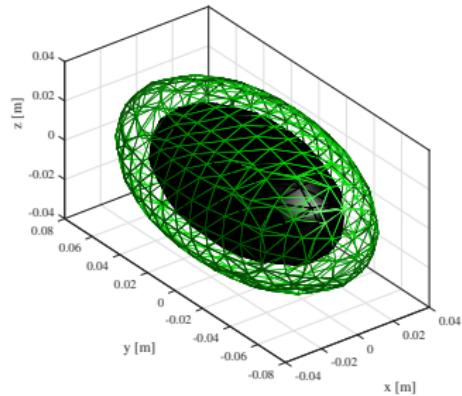
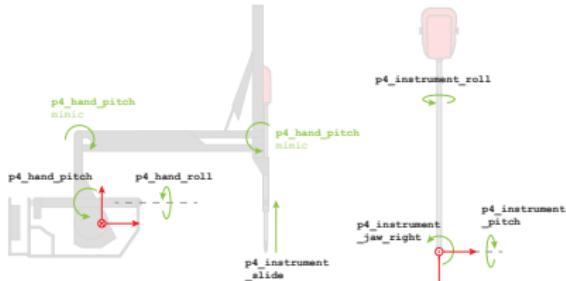
Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

På vej mod noget brugbart



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

- ▶ Linear model hvor x , y og z er uafhænginge
- ▶ Kontrol topologi er identisk med 1D systemet
- ▶ Kortlægge og modifisere den kinematiske kæde
- ▶ Anvende kinematiske solvere (KDL)
- ▶ Definere CBF i 3D



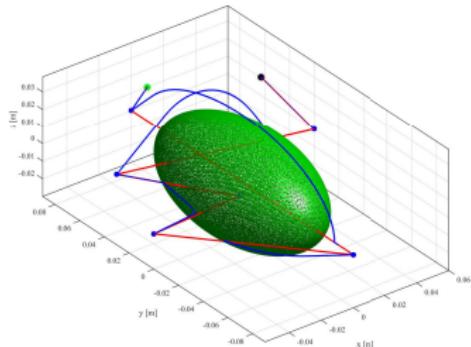
10

Agenda
Kirurgirobotik
Barrierefcertifikater
Kontroldesign
Design fra CBF's
Sikkerhed i 1D
Virtuel fixture
Sikkerhed i 3D
Sikkerhedsverifikation
Konklusion

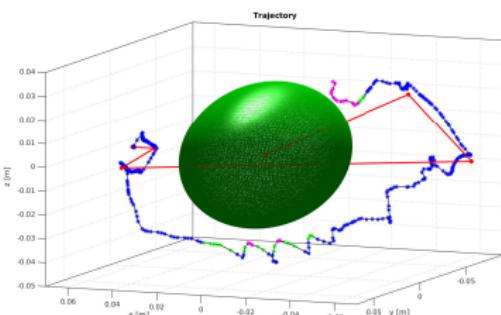
Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

Resultater

► Simulering



► Implementering



- Finder setpoints i \mathcal{X}_0
- Undgår \mathcal{X}_u selvom setpoint er sikker
- Finder steady state i nærmeste sikre område

- Samme karakteristik som simulering
- En smule upræcis
- IK-solver finder ulogisk løsning - dog en løsning

Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

11

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

Sikkerhedsverifikation

Omformulering af definition for barrierefcertifikat

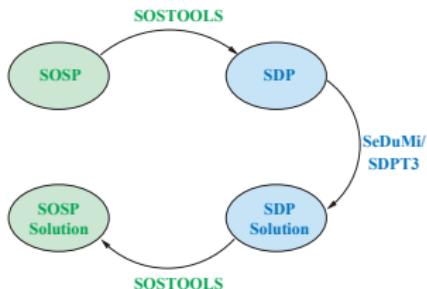
SOSTOOLS

- ▶ Metodisk måde at søge barrierefcertifikat for et system og dermed sikkerhedsvalidere det
- ▶ Kræver omformulering til sum of squares (SOS) problem

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m f_j^2(\mathbf{x}) = \mathbf{z}^T \mathbf{Q} \mathbf{z} \in \Sigma[\mathbf{x}]$$

Putinars Positivstellensatz

- ▶ Gør det muligt at definere funktionens fortegn på de forskellige regioner



Barriercertifikat-søgning med SOSTOOLS

Sikkerhedsverifikation af lukketsløjfesystem



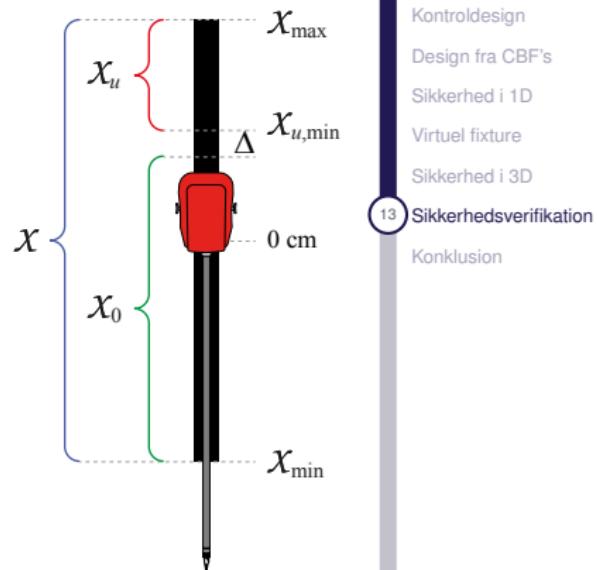
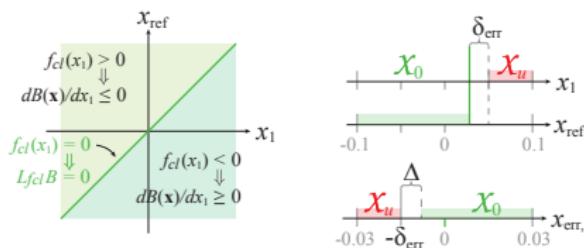
AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Slide: 1.ordens-approksimering

- ▶ Nul-reference
- ▶ Referenceinterval

Slide: beskrevet ved fejtilstand

- ▶ 1.ordens-approksimering
- ▶ 2.ordens-approksimering



13

- Agenda
- Kirurgirobotik
- Barriercertifikater
- Kontroldesign
- Design fra CBF's
- Sikkerhed i 1D
- Virtuel fixture
- Sikkerhed i 3D
- Sikkerhedsverifikation
- Konklusion

Konklusion

Har vi flyttet noget?



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

- ▶ **Et naturligt ønske:**
 - Sikkerhed og virtual fixture
- ▶ **Opdelt løsningsstrategi:**
 - Design og Analyse
- ▶ Sikkerhed kan garanteres
- ▶ virtual fixture kan opnås
- ▶ Success i begge tilgange
 - design og analyse
- ▶ Interfacing gennem ROS er klargjort + kortlægning af den kinematiske kæde og IK.
- ▶ En stejl læringskurve er brudt
 - der kan arbejdes videre på projektet



Agenda

Kirurgirobotik

Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

14 Konklusion

Konklusion

Konklusion på design tilgangen



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

- ▶ Relativ intuitiv design procedure
 1. Lav model
 2. Konstruer CBF ud fra fysiske forhold og beregn Lie afledede
 3. Specificer ϵ sådan at T er "tilpas"
 4. Design en vilkårlig controller i det sikre område
 5. Kombiner "sikker" og "usikker" controller
- ▶ Kreativitet er nødvendigt når en CBF skal konstrueres
- ▶ Brug når der er et fysisk forhold til tilstandene
- ▶ Brugbar og behagelig fremgangsmåde



Agenda

Kirurgirobotik

Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

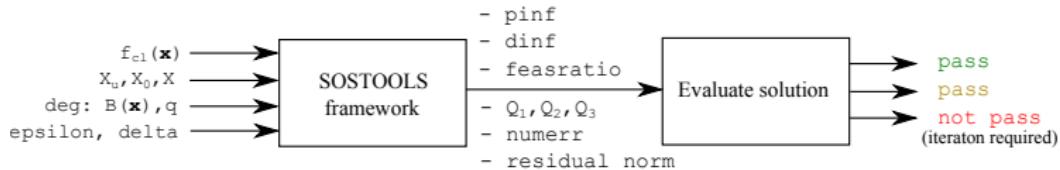
15 Konklusion

Konklusion

konklusion på analyse tilgangen

- Agenda
 - Kirurgirobotik
 - Barrierefcertifikater
 - Kontroldesign
 - Design fra CBF's
 - Sikkerhed i 1D
 - Virtuel fixture
 - Sikkerhed i 3D
 - Sikkerhedsverifikation
- 16 Konklusion

- ▶ Global (SOS) til lokal (putinar positivstellensatz)
- ▶ Et framework er udviklet



- ▶ **Anvendelse:** Forstå betydningen af Δ , ϵ , g_j og \deg .
- ▶ **Budskab:** Når en grøn løsning er fundet - Stop
- ▶ **Udvidelse i dimensioner:** Trivielt, men der skal defineres nye intervaller for g polynomier
- ▶ Abstrakt teori er analyseret, anvendt sammen med SOSTOOLS og en guide er udarbejdet

Fremitidigt arbejde

Vi er ikke stærkere end det svageste led i kæden



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

- ▶ Kompleksitet af barrier funktioner
- ▶ Robust/fejl-tolerent kontrol
- ▶ Inkorporere Integral virkning
 - især tydeligt ved det dynamiske system
- ▶ End effector orientering
 - Sikre sikkerhed for rammen
- ▶ Trajektorie planlægning
 - hvis springet mellem x og x_{ref} er for stort
- ▶ Tachometer kan blive "forvirret"
- ▶ Skræddersy IK solver
- ▶ Øge sampling rate til 2 kHz
 - UDP i stedet for TCP/IP
- ▶ Monte Carlo simulering ved brug af SOSTOOLS framework



Agenda

Kirurgirobotik

Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

17 Konklusion

Demo