

Sikkerhed i Automatiseret kirurgi med da Vinci-robotten

Christian Kocks Lykkegaard
Britt Louise Jakobsen



AALBORG UNIVERSITET



Agenda

2

Agenda

De næste ca. 30 min.:

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

Derudover:

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

Kirurgirobotik

Barrierefertilifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

Robotteknologi indenfor kirurgi

Kirurgirobotten da Vinci



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Incitament for projektet

- ▶ Udbredelse og udvikling indenfor kirurgirobotik
 - fra 1970'erne frem til i dag
- ▶ da Vinci-robotten på AAU
 - ▶ Patient-manipulator afkoblet fra master-konsol
 - ▶ Kontrollerbare robotled



Agenda

3

Kirurgirobotik

Barrierefertilifikater

Kontrolldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

19

Sikkerhed indenfor robotkirurgi

Nu og i fremtiden



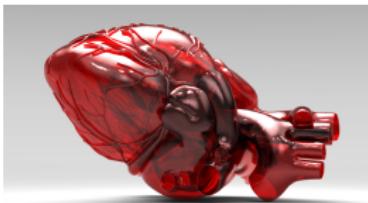
AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Sikkerhed indenfor kirurgi

- ▶ Robotoperation på Aalborg Sygehus
- ▶ Anvendelsesområder
- ▶ Virtuel fikstur af et bankende hjerte

Mål med projektet

- ▶ Sikkerhed og virtuel fikstur
- ▶ To tilgangsvinkler
 - ▶ Sikkerhedsregulator
 - ▶ Sikkerhedsverificering



Agenda

4

Kirurgirobotik

Barrierefertilifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

19

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

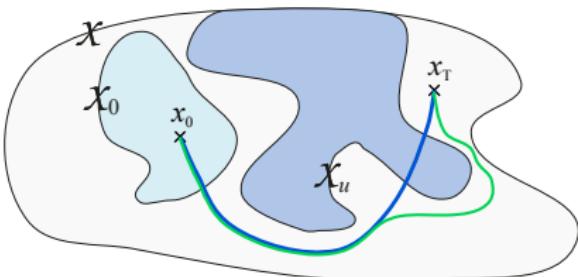
Barriercertifikat

$$B(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}_0$$

$$B(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}_u$$

$$L_{f_{cl}} B(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}$$

- ▶ for systemet $\dot{\mathbf{x}} = f_{cl}$



Agenda

Kirurgirobotik

5 Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

Kontrolbarrierefunktioner (CBF)

Konstruktion af CBF til design af sikkerhedsregulator

Definition af CBF

$$\mathbf{x} \in \mathcal{X}_u \Rightarrow B(\mathbf{x}) > 0$$

$$L_g B(\mathbf{x}) = 0 \Rightarrow L_f B(\mathbf{x}) < 0$$

$$\{\mathbf{x} \in \mathcal{X} \mid B(\mathbf{x}) \leq 0\} \neq \emptyset$$

Barrierefertifikat

$$B(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}_0$$

$$B(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}_u$$

$$L_{f_{cl}} B(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}$$

- for systemet $\dot{\mathbf{x}} = f_{cl}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})u$

Kombination af to regulatorer

- Lineær positionskontrol $\tilde{u}(\mathbf{x})$ indenfor det sikre område \mathcal{X}_0
- Sikkerhedsregulator $k_0(\mathbf{x})$ designet vha. CBF
- Gradvis overgang til sikkerhedsregulator nær \mathcal{X}_u

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

Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefertifikater

6 Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

Tre use-cases

- ▶ Et "simpelt" case i 1D
 - skabe erfaring med CBF's og den anvendte kontrol topologi
- ▶ virtuel fikstur
 - at starte noget virkeligt 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
Barrierefertilifikater
Kontroldesign
7 Design fra CBF's
Sikkerhed i 1D
Virtuel fikstur
Sikkerhed i 3D
Sikkerhedsverifikation
Konklusion

Sikkerhed for et 1 dimensionelt system

Det første skridt - instrument slide

Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

8 Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

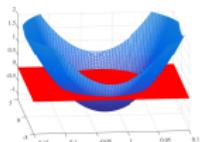
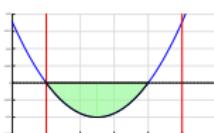
Konklusion

► Model

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

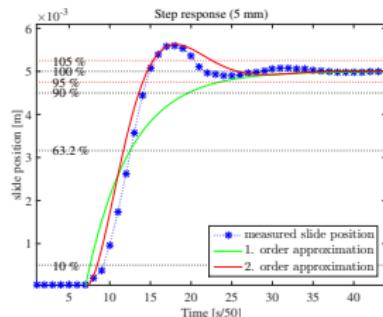
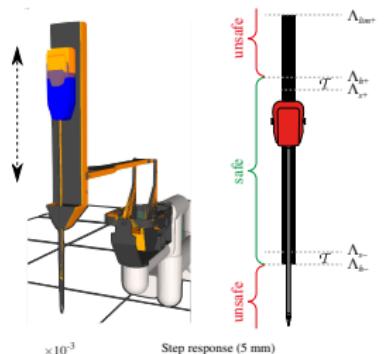
► CBF

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



► Fremgangsmåde for CBF:

- $B(x) > 0$ på \mathcal{X}_u og $B(x) \leq 0$ på \mathcal{X}_d
- Forsøg at få $L_g B(x) \neq 0 \quad \forall x$



Sikkerhed for et 1 dimensionelt system

Resultater og erfaring



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

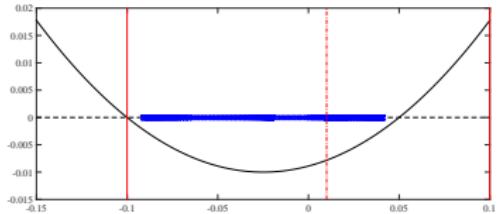
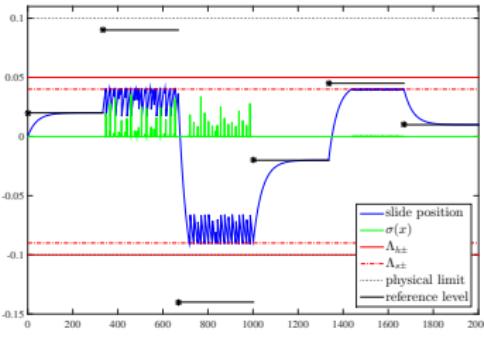
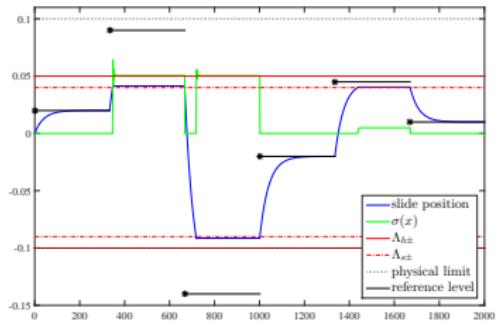
9 Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

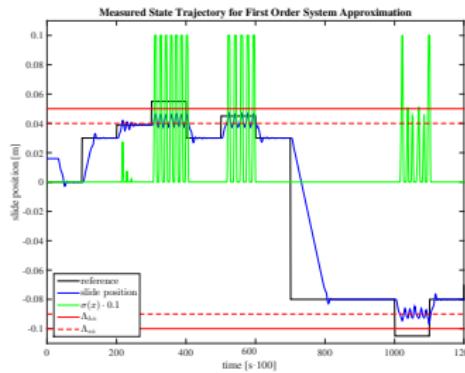
Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion



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

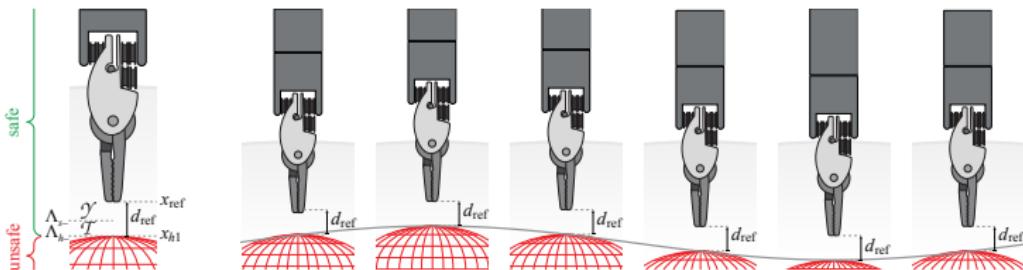


Sikkerhed for et dynamisk system

Indledende udvikling til at opnå virtuel fikstur

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

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



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

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

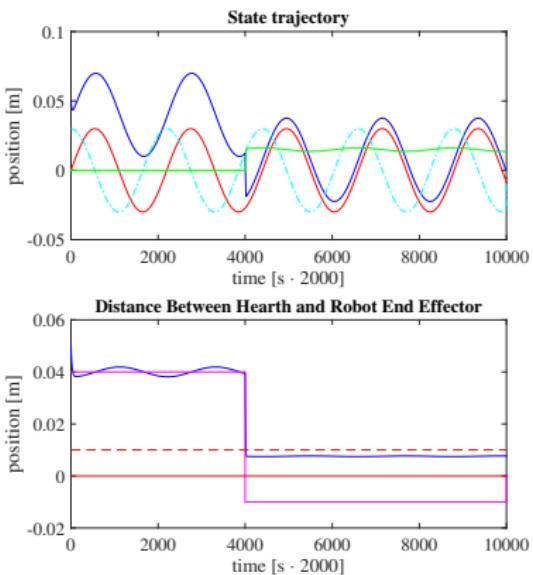


$$B(x) = \tilde{c}(x_{h1} - x_1)$$

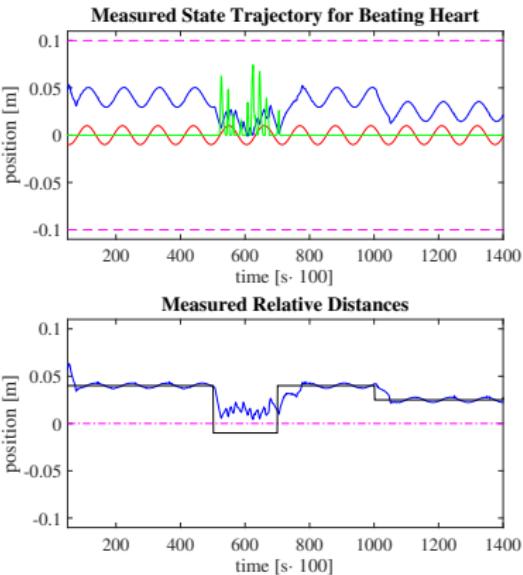
Sikkerhed for et dynamisk system

Resultater

► Simulering



► Implementering



Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

11 Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

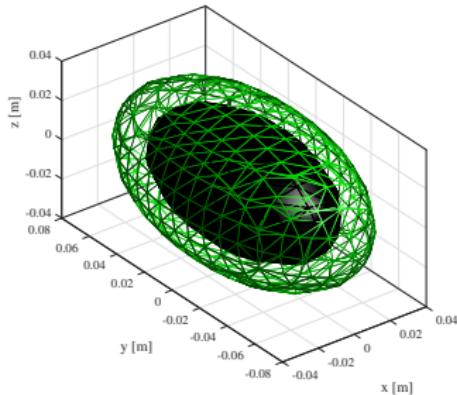
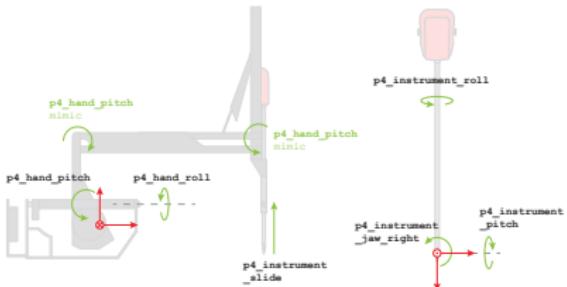
Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

På vej mod noget brugbart

- ▶ Lineær model
 x , y og z er uafhænginge
- ▶ Kontrol topologi
identisk med 1D systemet
- ▶ Kortlægge kinematik
modifisering til DH og IK solver
- ▶ Kinematiske solvere
- ▶ Definere CBF i 3D

▶ Algoritme: (rate 100 Hz)

1. Aflæs 6 vinkler fra sensor
2. Konverter 6D til 3D (FK solver)
3. Beregn $L_f B(\mathbf{x})$ og $L_g B(\mathbf{x})$
4. Beregn $k_0(\mathbf{x})$, $\sigma(\mathbf{x})$ og $\tilde{u}(\mathbf{x})$
6. Beregn kontrol signal $u(\tilde{u}, \mathbf{x})$
7. Konverter 3D til 6D (IK solver)
8. Juster output
9. Send outputs low level kontrol



Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

12 Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

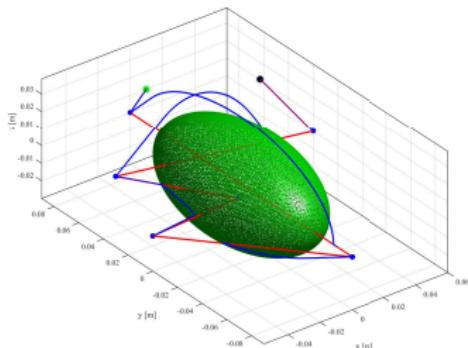
Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

Resultater

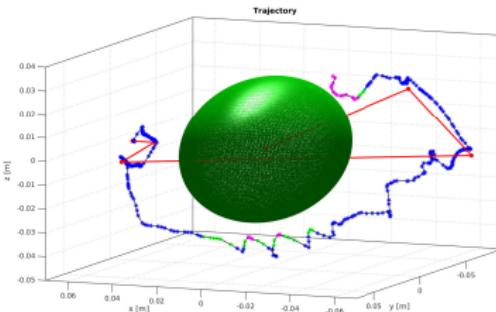


AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

► 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

Barrierefertilifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

13

19

SOSTOOLS

- ▶ Metodisk måde at søge barriercertifikat 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



Agenda

Kirurgirobotik

Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

14 Sikkerhedsverifikation

Konklusion

Anvendelse af Putinars Positivstellensatz

Barriercertifikat-søgning med SOSTOOLS



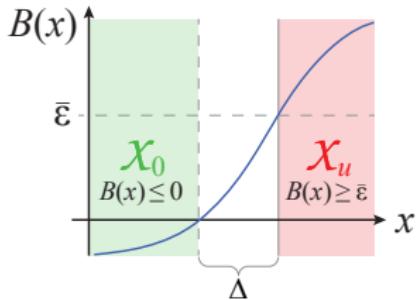
AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Barriercertifikat

$$B(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}_0$$

$$B(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}_u$$

$$L_{f_{cl}} B(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}$$



Omformulering af barriercertifikat

$$-B(\mathbf{x}) \geq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}_0 \quad \Leftarrow \quad -B(\mathbf{x}) - \sum q_j g_j \in \Sigma[\mathbf{x}]$$

$$B(\mathbf{x}) - \bar{\epsilon} \geq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X}_u \quad \Leftarrow \quad B(\mathbf{x}) - \bar{\epsilon} - \sum q_j g_j \in \Sigma[\mathbf{x}]$$

$$-L_{f_{cl}} B(\mathbf{x}) \geq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{X} \quad \Leftarrow \quad -L_{f_{cl}} B(\mathbf{x}) - \sum q_j g_j \in \Sigma[\mathbf{x}]$$

Agenda

Kirurgirobotik

Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

15

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

19

Konklusion

Har vi flyttet noget?

- ▶ **Et naturligt ønske:**
 - Sikkerhed og virtuel fikstur
- ▶ **Opdelt løsningsstrategi:**
 - Design og Analyse
 - Success i begge tilgange
- ▶ Sikkerhed kan garanteres
- ▶ virtual fixture kan opnås
- ▶ 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

Barrierefertilifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

16 Konklusion

19

Konklusion

Konklusion på design tilgangen

► Relativt intuitiv designprocedure

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



17

Konklusion

19

Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefertilifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

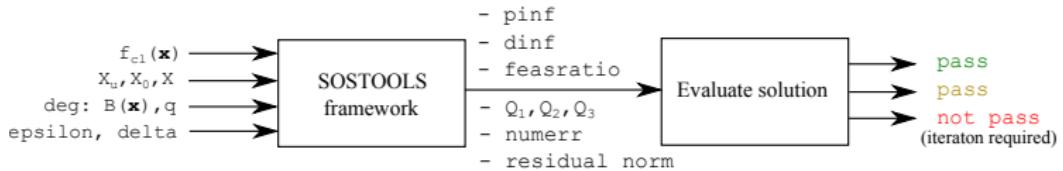
Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

konklusion på analyse tilgangen

- ▶ Global (SOS) til lokal (Putinars 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

Fremtidigt arbejde

Vi er ikke stærkere end det svageste led i kæden

- ▶ Kompleksitet af barrierefunktioner
- ▶ Robust/fejl-tolerent kontrol
- ▶ Inkorporere integralvirkning
 - 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
- ▶ 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

Barrierefertilifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fikstur

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

19 Konklusion

Demo