

# Safety in Automated Surgery with the da Vinci Robot

Christian Kocks Lykkegaard  
Britt Louise Jakobsen



AALBORG UNIVERSITY  
STUDENT REPORT



# 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

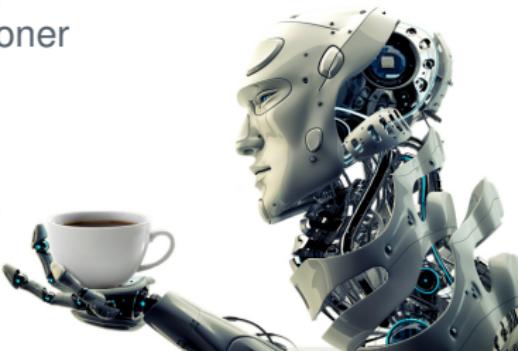
Sikkerhed i 3D

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

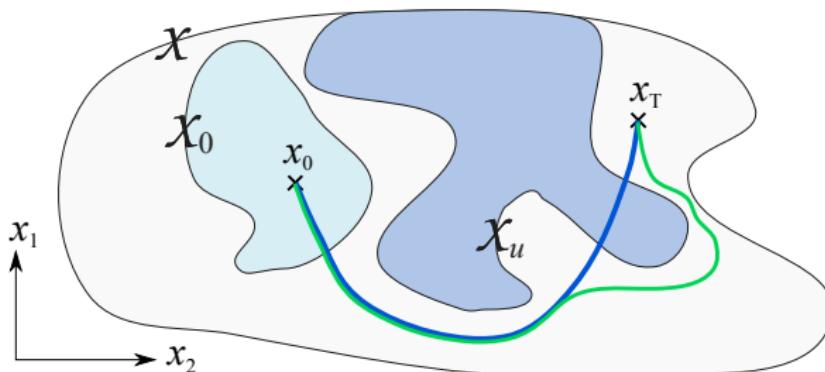
Formelt bevis for garanteret sikkerhed



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

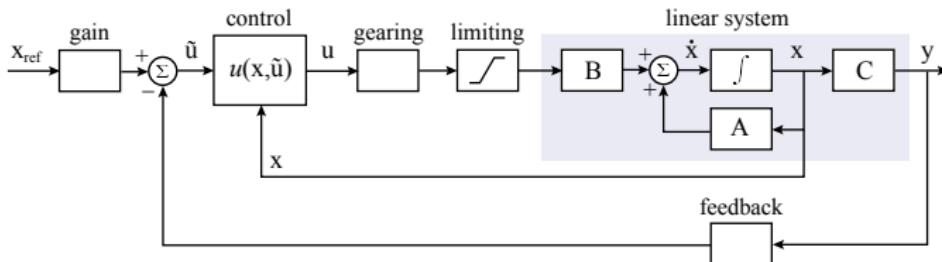
## To regulatorer

- ▶ 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



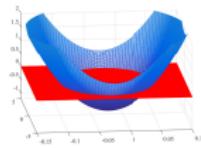
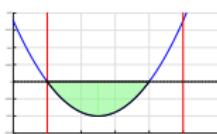
AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## ► Model

- 1. orden: Opnå erfaring
- 2. orden: Observer krævet

## ► CBF

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



## ► Simulering med Forward Euler

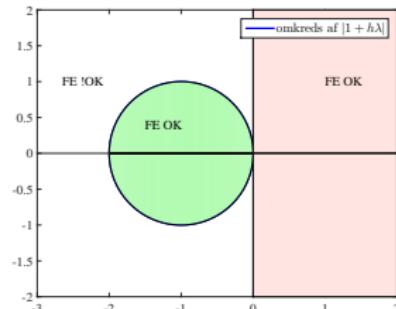
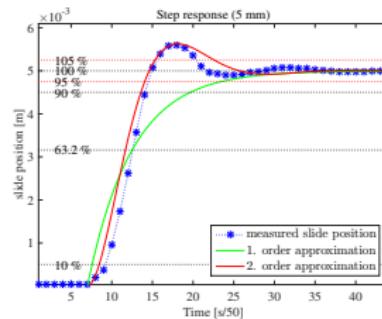
$$\dot{x} = \lambda x$$

$$\dot{x} = \frac{x_n - x_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} = \frac{x_n - x_{n-1}}{h} = \lambda x_{n-1}$$

$$x_n = x_{n-1}(1 + h\lambda) = x_0(1 + h\lambda)^n$$

$$\Rightarrow |1 + h\lambda| > 1 \text{ ustabil}$$

white



Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

6 Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

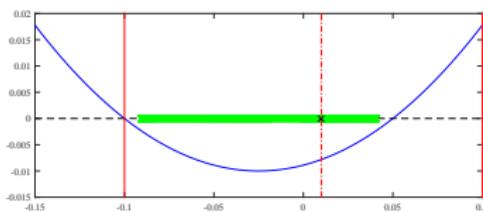
Konklusion

# Sikkerhed for et 1 dimensionelt system

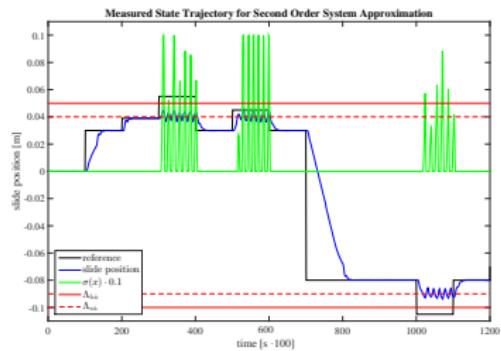
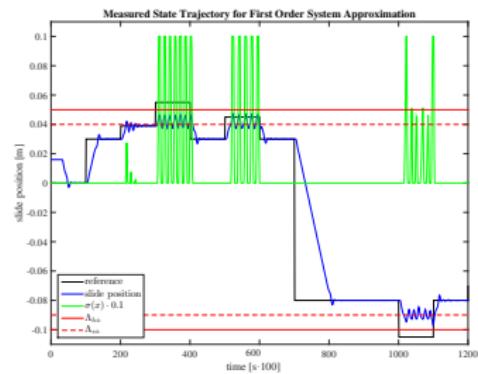
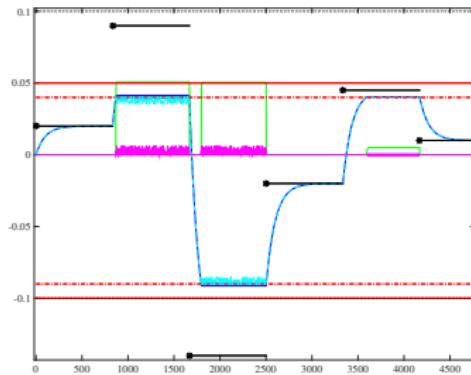
## Resultater og erfaring



AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK



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



Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

7 Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

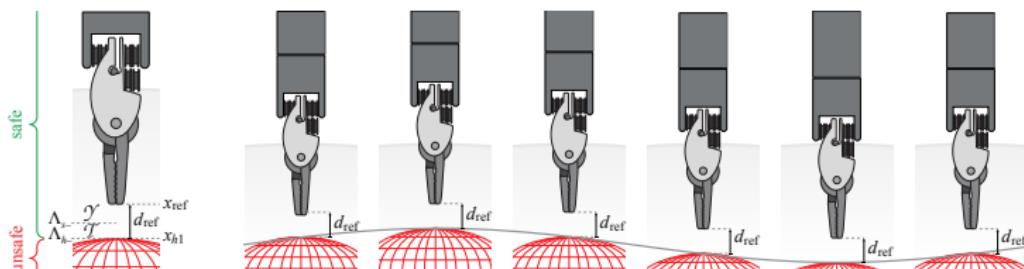
# Sikkerhed for et dynamisk system

Indledende udvikling til at opnå virtual fixture



AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

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



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

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



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

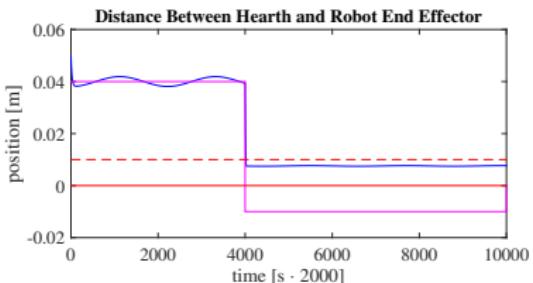
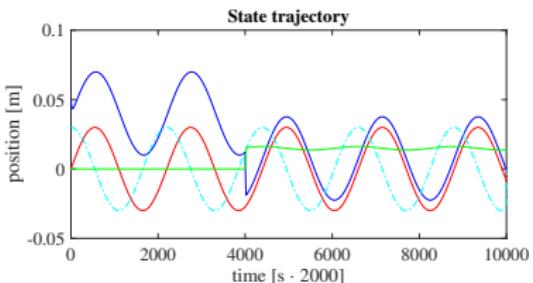
8

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

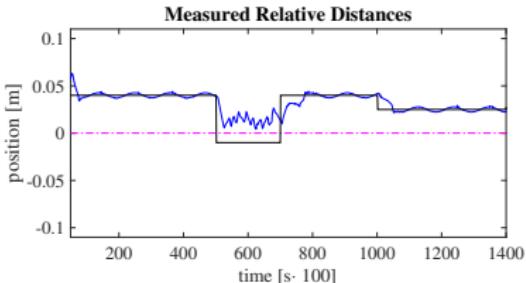
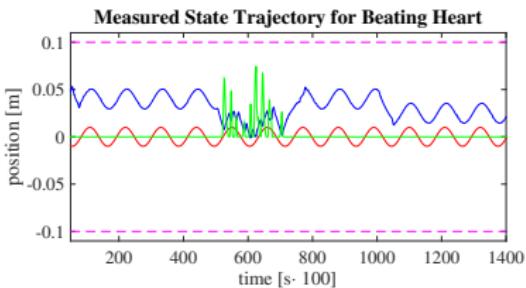
# Sikkerhed for et dynamisk system

## Resultater

### ► Simulering



### ► Implementering



9

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

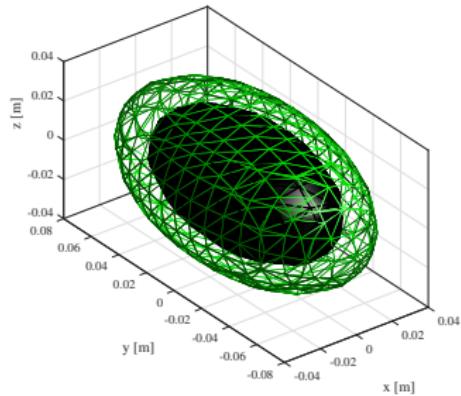
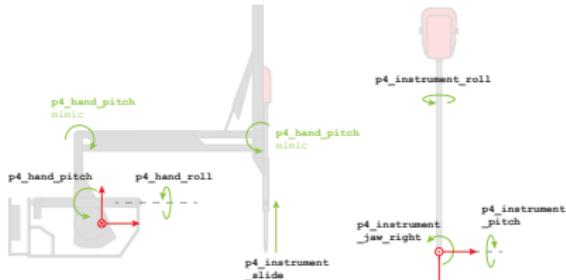
# Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

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

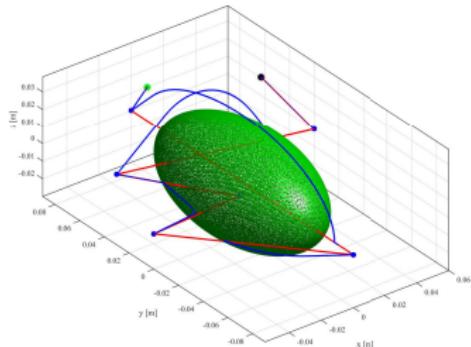
# Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

## Resultater

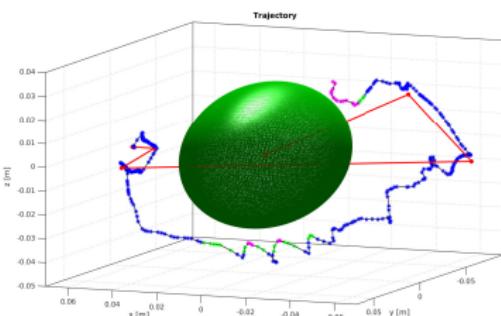


AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

### ► 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

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

11

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Konklusion

# Sikkerhedsverifikation

Omformulering af definition for barrierefcertifikat

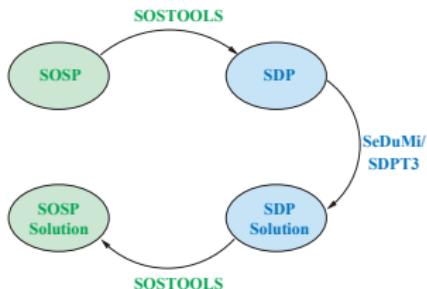
## SOSTOOLS

- 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



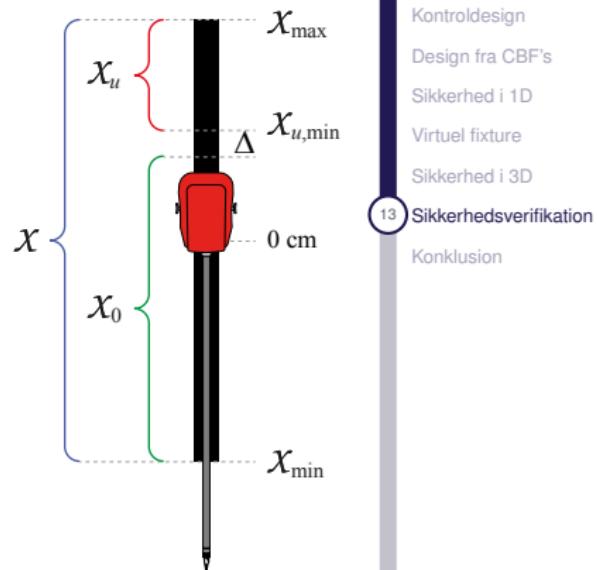
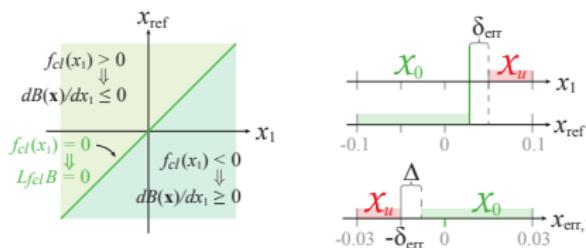
AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## 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
- ▶ Interfacing gennem ROS er klargjort + kortlægning af den kinematiske kæde og IK.
- ▶ En stejl læringskurve er brudt
  - det er et projekt der kan arbejdes videre på



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
  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

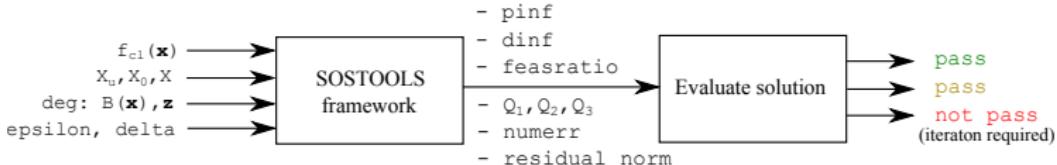
# Konklusion

konklusion på analyse tilgangen



AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

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



- ▶ Frameworket kan udvides til  $n$ -dimensioner
- ▶ **Anvendelse:** Forstå betydningen af  $\Delta$ ,  $\epsilon$ ,  $g_j$  og  $\deg$ .
- ▶ **Budskab:** Når en grøn løsning er fundet - Stop
- ▶ **Udvidelse i dimensioner:** Definere nye  $g$  og  $q$ -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