

# Sikkerhed i Automatiseret kirurgi med da Vinci-robotten

Christian Kocks Lykkegaard  
Britt Louise Jakobsen



AALBORG UNIVERSITET



# 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

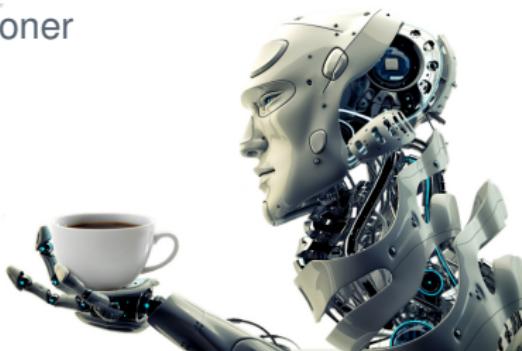
Sikkerhed i 3D

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
  - ▶ Sikkerhedsregulator
  - ▶ Sikkerhedsverificering



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  $\mathcal{X}_u$

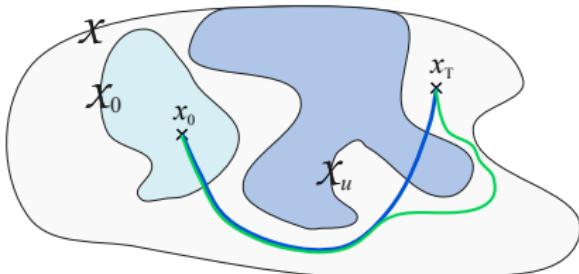
## Barriercertifikat

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

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

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

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



Agenda

Kirurgirobotik

3 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

## Definition af CBF

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

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

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

## Barrierefunktions certifikat

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

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

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

- 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  $\mathcal{X}_u$

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

4

- Agenda
- Kirurgirobotik
- Barrierefunktions certifikater
- 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 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  
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



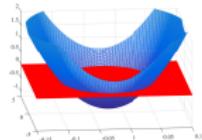
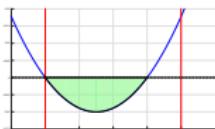
AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## ► Model

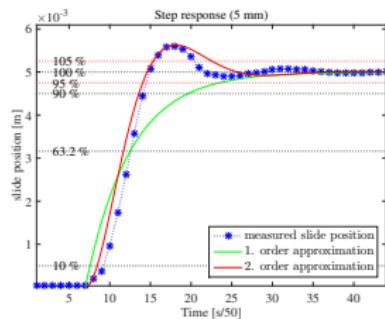
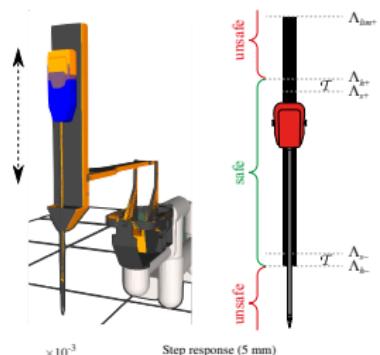
- vigtig da  $k_0(\mathbf{x})$  er model baseret
  - 1. orden: Opnå erfaring
  - 2. orden: Observer krævet
    - Selv for et simplet system eskalerer kontrol topologien hurtigt.

## ► 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  $L_g B(\mathbf{x}) \neq 0 \forall \mathbf{x}$



Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

6 Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

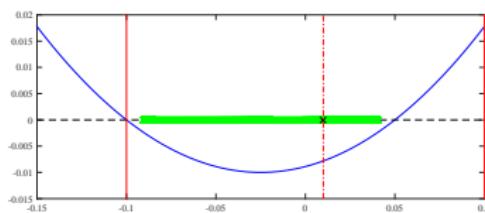
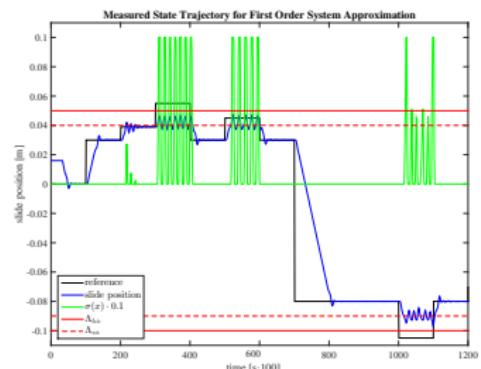
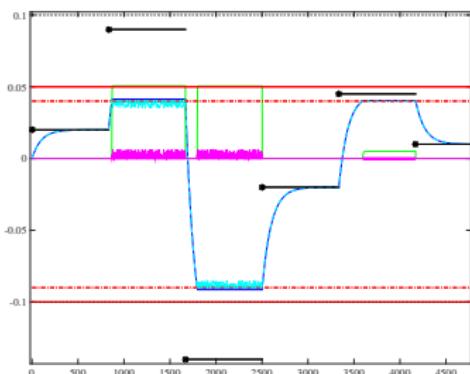
Konklusion

# Sikkerhed for et 1 dimensionelt system

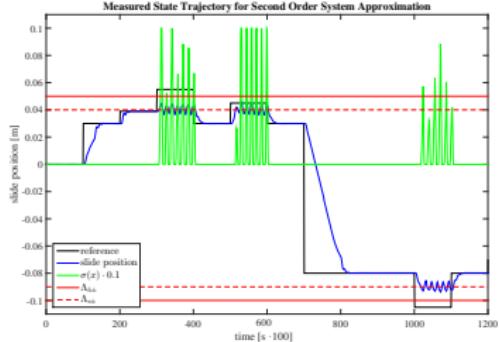
## Resultater og erfaring



AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK



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



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

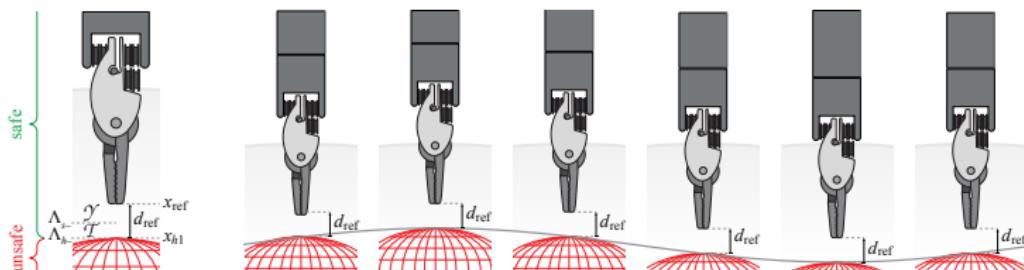
# Sikkerhed for et dynamisk system

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)



8

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

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

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

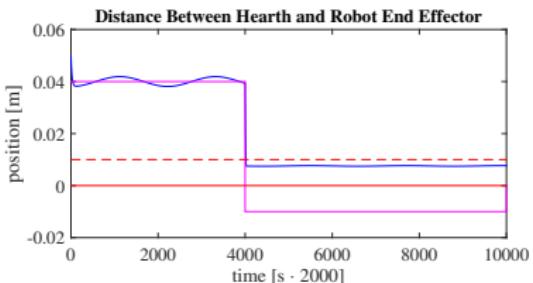
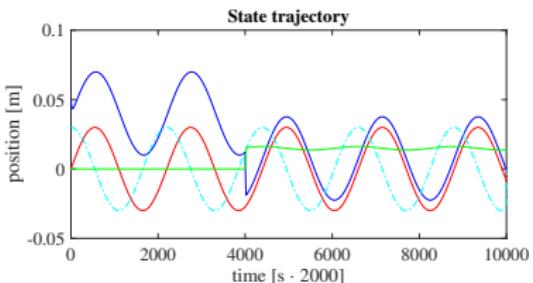


$$B(x) = \tilde{c}(x_{h1} - x_1)$$

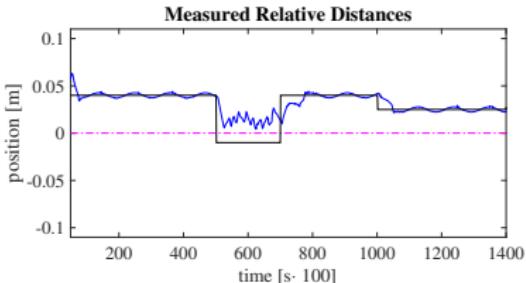
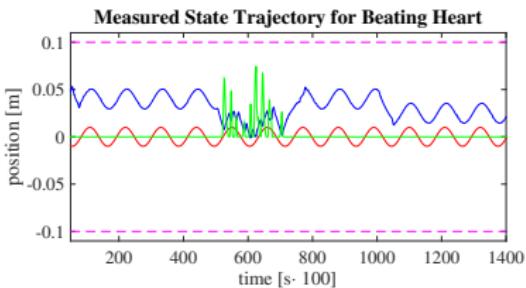
# Sikkerhed for et dynamisk system

## Resultater

### ► Simulering



### ► Implementering



9

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

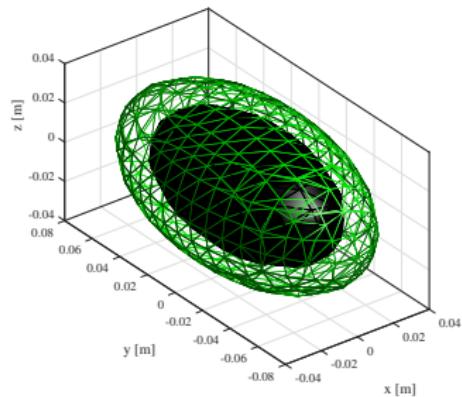
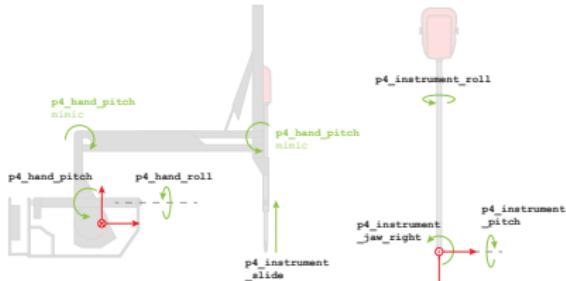
# Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

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



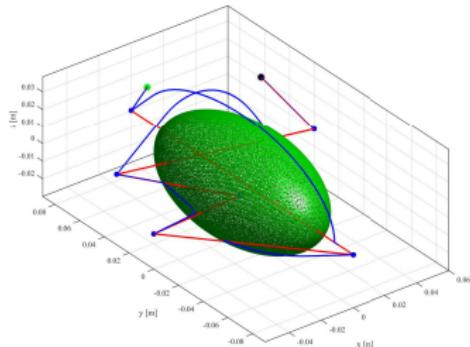
10

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

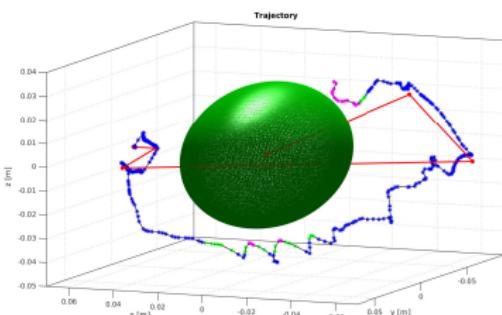
# Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

## 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



AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## 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



12

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

# Barriercertifikat-søgning med SOSTOOLS

Sikkerhedsverifikation af lukketsløjfesystem



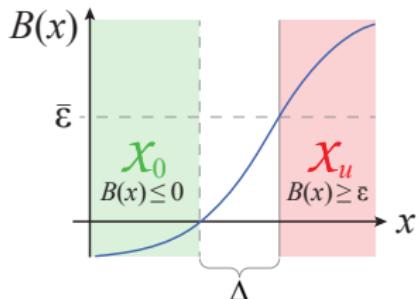
AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## 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 fixture
- Sikkerhed i 3D
- 13 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  $\epsilon$  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

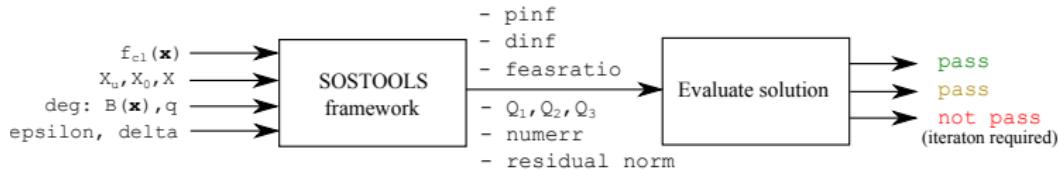
15 Konklusion

# 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  $\Delta$ ,  $\epsilon$ ,  $g_j$  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



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