

Safety in Automated Surgery with the da Vinci Robot

Christian Kocks Lykkegaard
Britt Louise Jakobsen

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

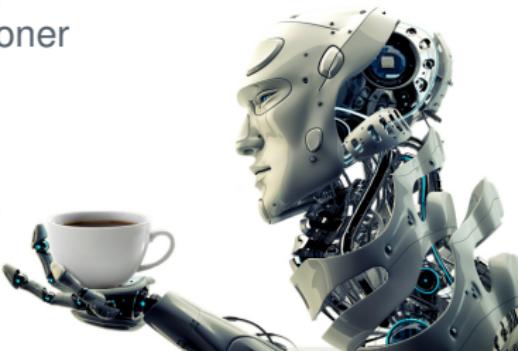
Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

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

Barriercertifikater

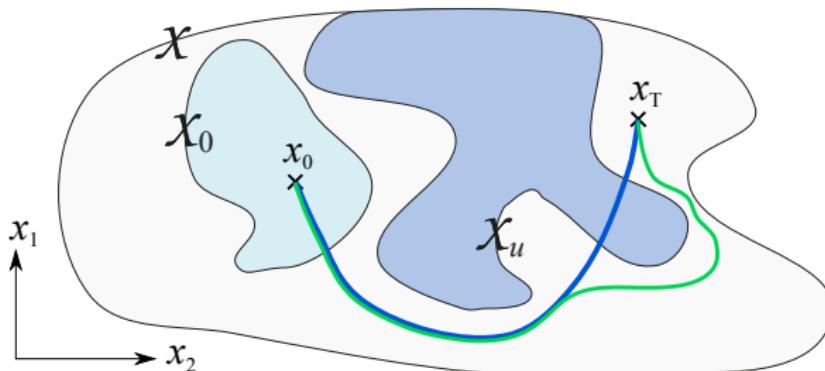
Formelt bevis for garanteret sikkerhed



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

Kontrolbarrierefunktioner (CBF)

Konstruktion af CBF til design af sikkerhedsregulator



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

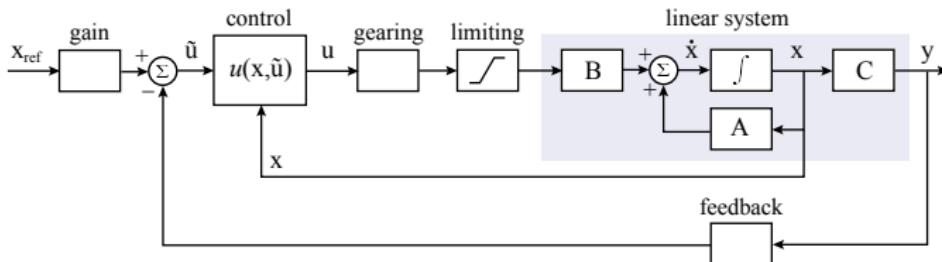
To regulatorer

- ▶ 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



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

Sikkerhed for et 1 dimensionelt system

Det første skridt - instrument slide



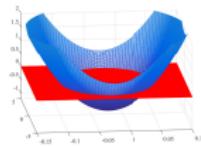
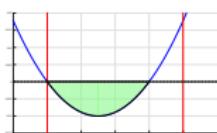
AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

► Model

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

► CBF

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



► Simulering med Forward Euler

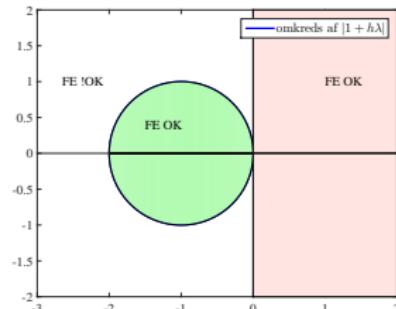
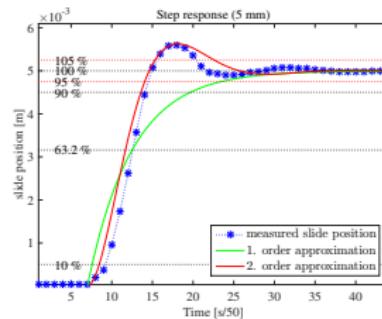
$$\dot{x} = \lambda x$$

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

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

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

white



Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

6 Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

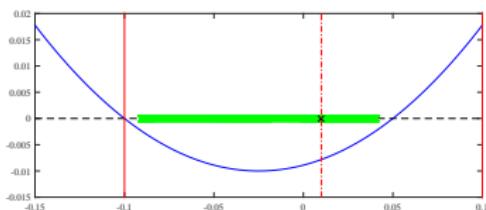
Sikkerhedsverifikation

Sikkerhed for et 1 dimensionelt system

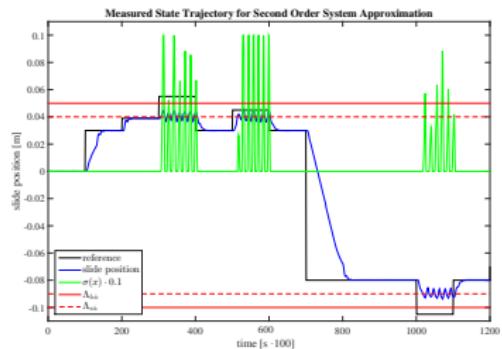
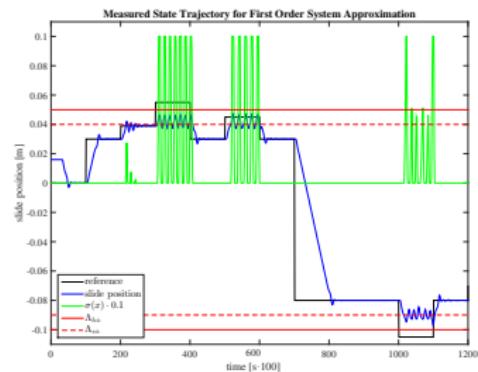
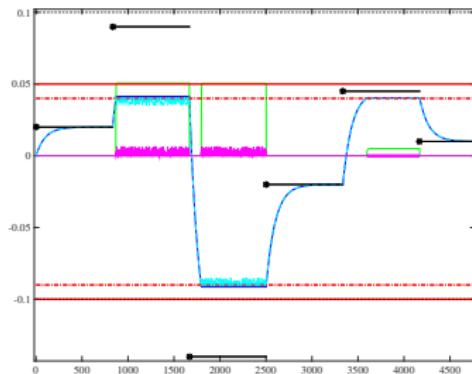
Resultater og erfaring



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

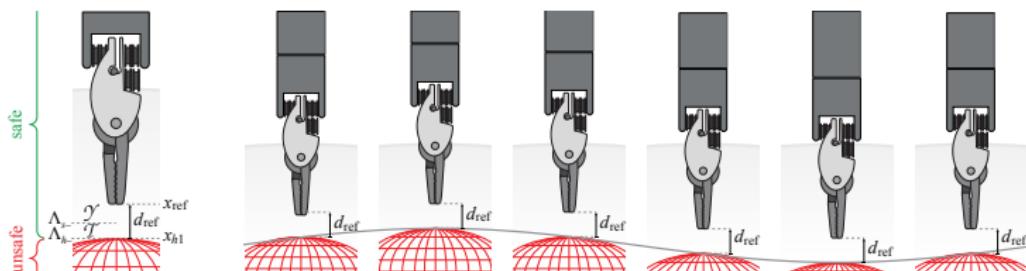
Sikkerhed for et dynamisk system

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)



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

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



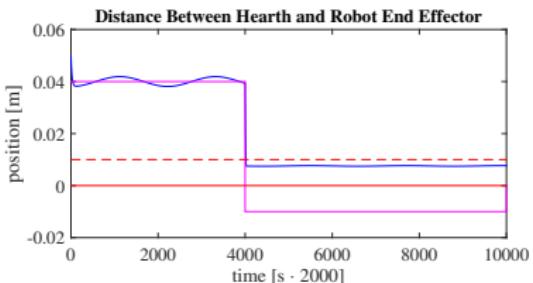
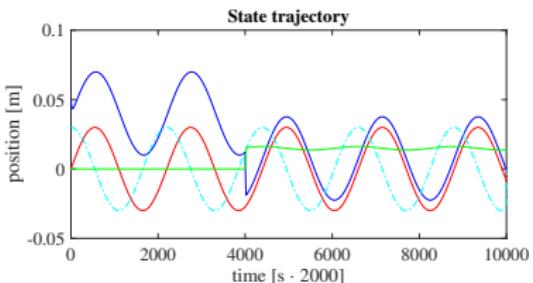
$$B(x) = \tilde{c}(x_{h1} - x_1)$$

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

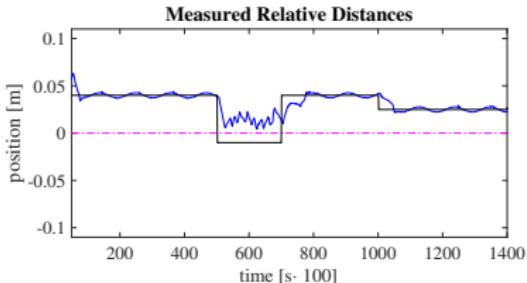
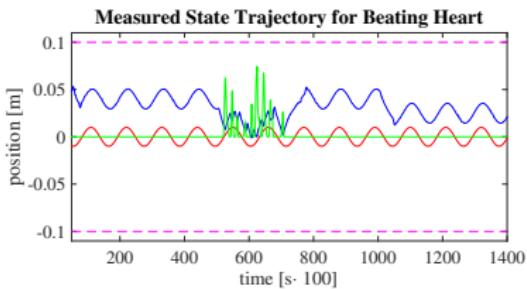
Sikkerhed for et dynamisk system

Resultater

► Simulering



► Implementering



Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

9 Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

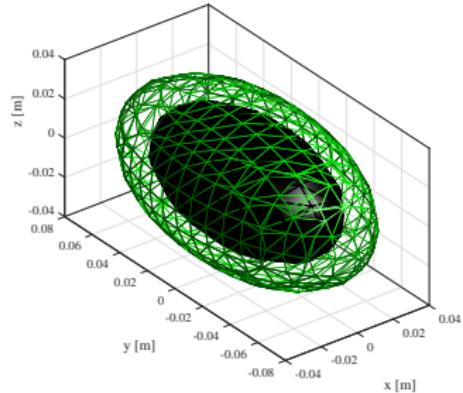
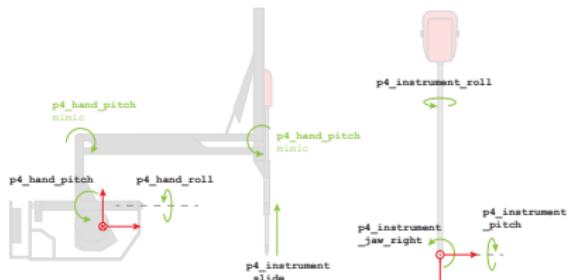
På vej mod noget brugbart



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

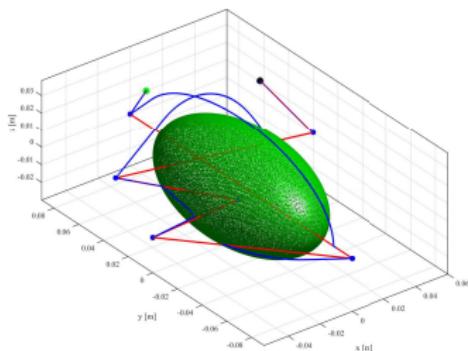
Agenda
Kirurgirobotik
Barrierefcertifikater
Kontroldesign
Design fra CBF's
Sikkerhed i 1D
Virtuel fixture
10 Sikkerhed i 3D
Sikkerhedsverifikation



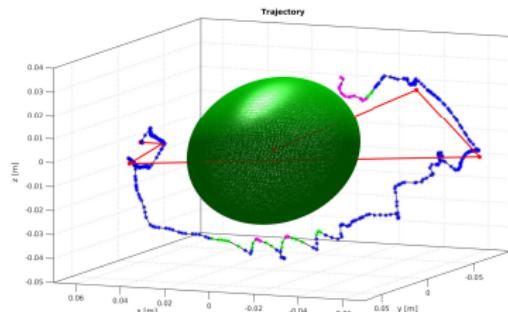
Sikkerhed i det 3 dimensionelle rum

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

Barriercertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

11

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Sikkerhedsverifikation

Omformulering af definition for barrierefcertifikat

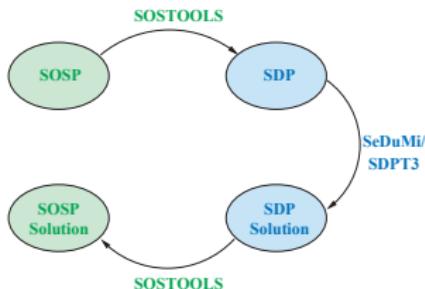
SOSTOOLS

- ▶ 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



Agenda

Kirurgirobotik

Barrierefcertifikater

Kontroldesign

Design fra CBF's

Sikkerhed i 1D

Virtuel fixture

Sikkerhed i 3D

Sikkerhedsverifikation

Barriercertifikat-søgning med SOSTOOLS

Sikkerhedsverifikation af lukketsløjfesystem



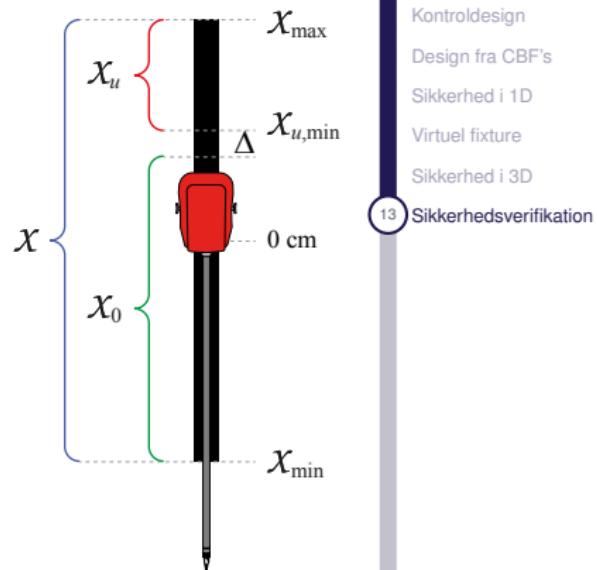
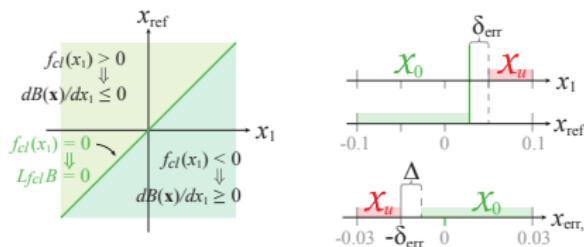
AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Slide: 1.ordens-approksimering

- ▶ Nul-reference
- ▶ Referenceinterval

Slide: beskrevet ved fejtilstand

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



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

13

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

Konklusion

Konklusion på design tilgangen



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

- ▶ Relativ intuitiv design procedure
 1. Lav model
 2. Konstruer CBF udfra fysiske forhold
 3. Specificer ε sådan at \mathcal{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

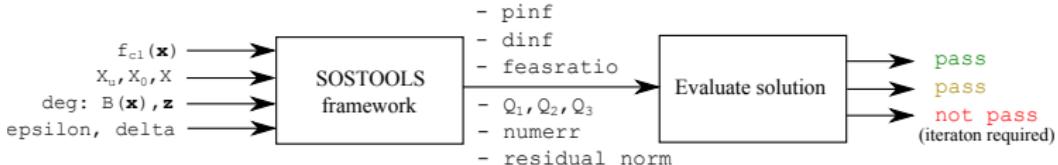
Konklusion

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 Δ , ϵ , 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

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

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

Demo