



Slutrapport

23. december 2019
Proj.nr.2005509
MAPH/JUSS

Adaptiv robotstyring

Projektets formål og resultat

Formål Projektet havde til formål at udvikle en fleksibel robotplatform, der kunne gøre robotteknologi lettere tilgængelig for medarbejderen på gulvet således, at et synergisk samarbejde kan opstå til gavn for medarbejderen og industrien. I denne arbejdsopgave udvikledes styringsystemer og algoritmer, som gør den enkelte maskine/robot fleksibel i forhold til variationerne i det input, den modtager.

Opnået effekt af projektet Projektet har bidraget til igangsættelsen af en bred vifte af nye automatiseringsprojekter som bygger på fleksible robotceller med intelligente styringer. Grundlæggende elementer fra projektet indgår i mange af disse efterfølgende projekter, mens de mere banebrydende bidrag endnu ikke er modnet tilstrækkeligt og i stedet viser mulige veje fremad. Intelligente styringer, som i høj grad er i stand til at tilpasse sig variation, vil bidrage til et forbedret arbejdsmiljø, forbedre udbyttet, udnyttelsen af produktionsudstyret, og muliggøre automatisering af nye processer.

Resultat versus formål opdelt på bruger, sektor og samfund Slagteriernes medarbejdere vil overgå til en overvågnings- og instruktørrolle som indebærer oplæringen og afhjælpning af robotcellerne. Det betyder et mindre fysisk belastende arbejde med fokus på specifikation af godt slagte(robot)håndværk. Det vil betyde, at slagteribranchen får lettere ved at tiltrække og fastholde nye medarbejdere. Det forbedrede arbejdsmiljø vil også mindske samfundets omkostninger i forbindelse med nedslidning og sygdom. Slagteriindustrien styrkes igennem forbedret udnyttelse af råvarerne samt øget automatisering.

Oplæg til videre arbejde Dele af projektets resultater indgår i nuværende projekter og kan indgå i fremtidige projekter. Andre dele er ikke på et anvendeligt niveau og bør videreudvikles i forbindelse med forskningsorienterede projekter såsom resultatkontrakter og lign.

Beskrivelse af løsningen

Beskrivelse af funktionsprincip *Oplæring af styringer fra eksempler:* Det relevante produkt affotograferedes med 3D kamera. En eller flere personer, med ekspertise indenfor den givne slagteproces, præsenteredes for 3D optagelserne igennem et sæt Virtual Reality briller. Her var der mulighed for at orientere sig i scenen og placere et virtuelt robotværktøj således, at opgaven forventedes at kunne løses. Afhængigt af variationen og sværhedsgraden af den givne proces indsamledes omkring

1000 eksempler. Disse eksempler blev benyttet af en læringsalgoritme, som finder sammenhængen mellem scenen og den ønskede værktøjsplacering.

Selv-lærende styringer:

Som alternativ til læring fra eksempler kan oplæring af styringer ske igennem "trial and error", som har den fordel, at læringen ikke begrænses af antallet og korrektheden af menneskeskabte eksempler. Desværre har denne tilgang en række udfordringer, som har betydet, at projektets resultater kun har kunnet produceres i et simuleret eksperiment.

Beskrivelse af mekaniske del-systemer *Oplæring af styringer fra eksempler:*
Denne del af projektet har gjort brug af en robotcelle, som blev konstrueret i forbindelse med "Multifunktionsrobotter" og "Augmented Cellular Meat Production".

Selvlærende styringer:

Der er bygget en stiksaltningssimulation til indsamling af nøjagtige data til grundlag for konstruktion af stiksaltningssimulation.

Beskrivelse af elektriske del-systemer Dataindsamling skete med et 3D kamera og et Virtual Reality system, som bringer instruktøren ind i en 3D verden sammen med de indsamlede data. Billeddata behandlede af en laptop, som kommunikerer med robotens controller.

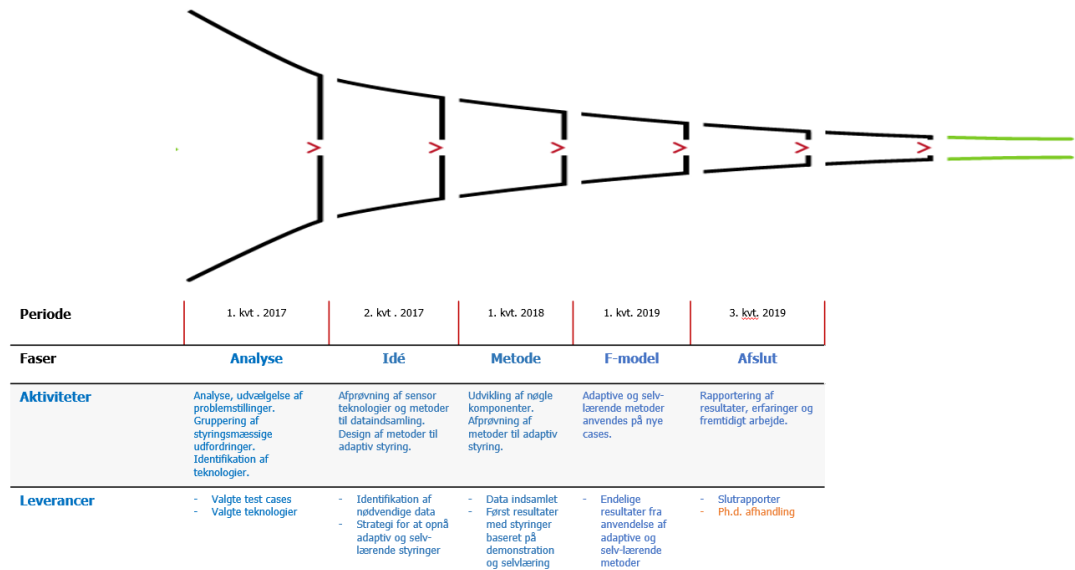
Beskrivelse af software Alt softwaren blev bygget op omkring Robot Operating System (ROS). Virtual Reality delen blev udviklet ved brug af Unity3d. Læringsalgoritmerne blev implementeret i Tensorflow og bygger på deep learning.

Testresultater

SAT test *Oplæring af styringer fra eksempler:*
Systemet kan evalueres på to måder; afprøvning i cellen, hvor resultatet blev bedømt af en slagter eller ved sammenligning med menneskeskabte demonstrationer af korrekt værktøjsplacering. Systemet blev anvendt til klipning af ører. En tidlig udgave af styringen blev afprøvet i robotcellen, hvor 11 ører blev klippet og undergik slagteteknisk vurdering. 8 ud af 11 blev vurderet til at være af acceptabel kvalitet. Senere versioner af styringen er ikke blevet afprøvet i cellen, men blev evalueret imod menneskeskabte demonstrationer. Her viste det sig, at værktøjet i gennemsnit placeres 0.8cm fra den menneskelige placering med en afvigelse i orientering lidt under 5 grader. Det er en forbedring i forhold til de 1.5cm, som var afvigelsen for styringen, som blev brugt ved test i cellen. Gennemsnittet blev målt over 148 demonstrationer.

Afviselser fra oprindelig kravspecifikation Ingen kravspecifikation. Formålet var at undersøge mulighederne ved de seneste metoder til oplæring af styringer igennem en række test cases.

Projekthistorik **Projektets historie opdelt efter innovationsmodellens faser og med tidslinje**



Økonomi

Projektregnskab

Se generel projektregnskabsrapport.

Evaluering

Læring af teknisk karakter

Projektet har givet erfaring med opbygning af komplekse robotsystemer, brugen af Virtual Reality, udnyttelsen af læringsalgoritmer, og brugen af 3D billeddata.

Læring af samarbejds-mæssig karakter

I forbindelse med projekter af forskningsmæssig karakter skal det sikres, at der er synergier og samarbejde med igangværende projekter. Det vil sikre, at der i højere grad kan fokuseres på forskningsproblemet i stedet for systemudvikling. Samtidigt øges muligheden for vidensdeling og sandsynligheden for at resultaterne kommer i anvendelse.

Hvad skal bringes med videre?

- Metoden til intuitiv oplæring af styringer fra demonstrationer.
- Erfaringer med dataindsamling.
- Fordele og ulemper ved at arbejde med 3D data.
- Muligheder og udfordringer ved selv-lærende metoder.

Hvad skal gøres bedre næste gang?

Endnu større synergi og samarbejde med andre projekter.

Appendix

A1: Oprindelig kravspecifikation

Ikke relevant

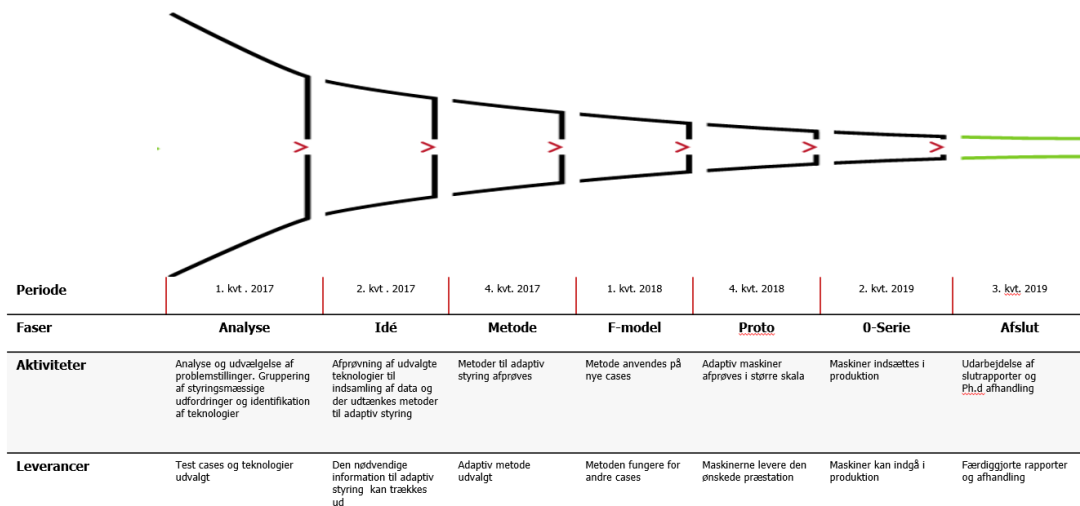
A2: CAD-dokumentation

Ikke relevant

A3: Dokumentation fra SAT test

A4: Oprindelig tidsplan og realiseret tidsplan

Den oprindelige tidsplan, set herunder, blev revideret betydeligt med hensyn til at det var urealistisk at bringe systemer af forskningsmæssig karakter ud i produktionen. Desuden er den med tiden gjort mere specifik. Den realiserede tidsplan er vist under "**Projekthistorik**".



Resultater for metode til oplæring af slagterbotter

Metoden blev primært blevet anvendt til klipning af øre på liggende grise. I tabel 1 fremgår data-grundlaget, som er 355+116+75 grise. Hver gris blev blevet optaget fra en eller flere vinkler.

Name	# Frames	# Unique instances	# From unique view point	# Samples
Train set	545	355	724	1632
Validation set	372	116	158	393
Test set	112	75	148	220

Table 1. Data set statistics.

Sammenlignet med den værktøjsplacering en ekspert ville have valgt havde systemet en gennemsnitlig fejl som ses i tabel 2.

Table 2. MAE for training, validation, and test sets.

Data sets	Position error (std) [m]	Angle error (std) [°]
Training	0.007 (0.003)	2.025 (1.151)
Validation	0.012 (0.010)	6.555 (4.942)
Test	0.008 (0.004)	4.481 (2.692)

Fejlene fra tabel 2 er fordelt som det ses i figur12.

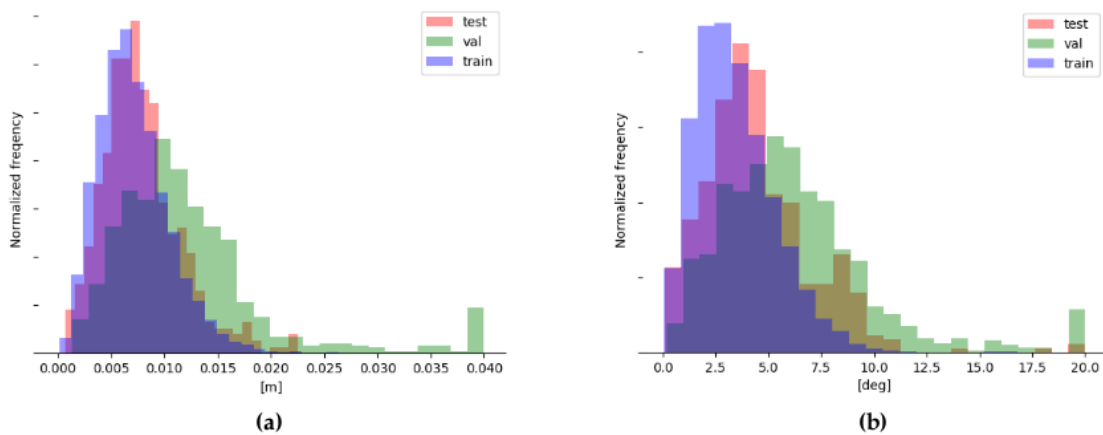
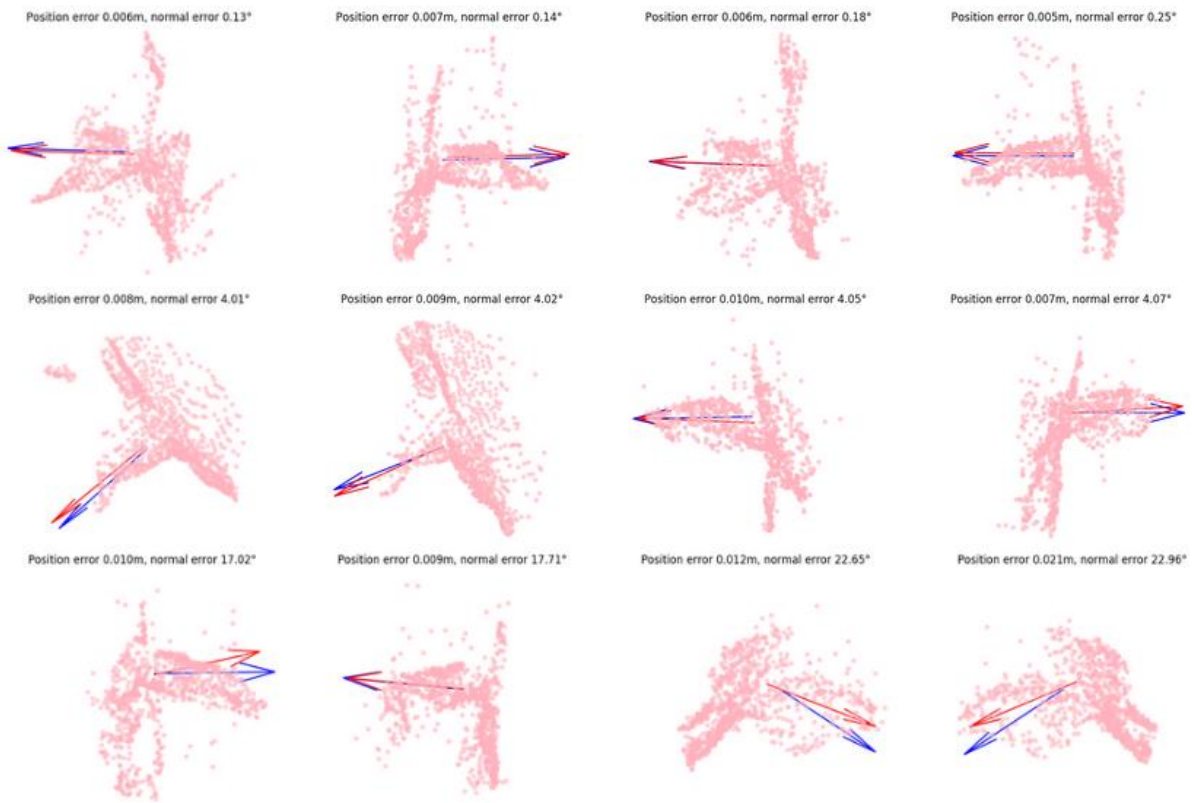


Figure 12. (a) Distribution of position prediction errors. (b) Distribution of normal vector prediction errors.

Herunder ses en række sammenligninger mellem system(rød) og ekspert(blå). Øverste række viser eksempler med lille forskel, midterste række eksempler på en typisk forskel, og nederste række eksempler på de værste tilfælde.



En tidlig version af systemet blev afprøvet i robotcellen. Herunder følger et eksempel.

Hvad kameraet ser



Igangværende klip

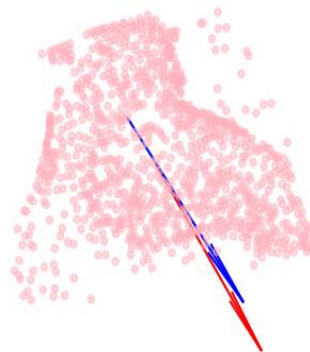


Resultat af klip



Sammenligning mellem system(rød) of ekspert(blå)

pig2_left, position error 0.043m, normal error 4.34°



Metoden er så småt blevet anvendt i andre cases. Her er systemet baseret på meget små data-mængder og resultaterne er derfor kun foreløbige. Hængende grise betyder en ekstra variation og

derfor skal datamængderne øges betydeligt, før der kan opnås samme performance som for liggende grise.

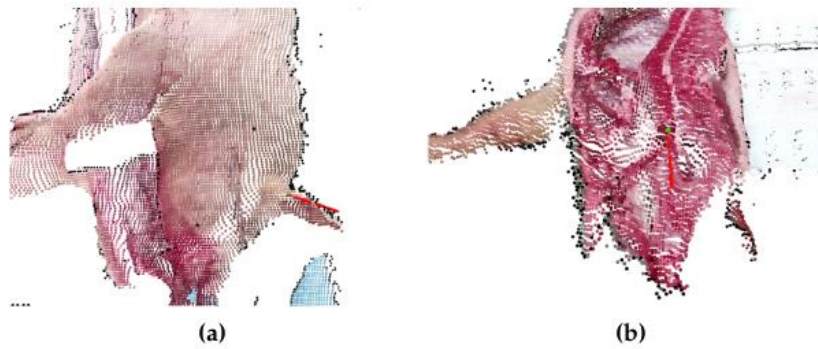


Figure 17. (a) Ear cutting on hanging pigs. (b) Head cutting on laying pig. In both cases the wanted 5-DoF cutting plane is illustrated using a green dot and a red normal vector.

Table 5. Prediction error for hanging pigs.

Data sets	# Samples	Position error (std) [m]	Angle error (std) [$^{\circ}$]
Training	565	0.026 (0.048)	3.251 (1.887)
Validation	107	0.033 (0.022)	13.982 (18.999)
Test	104	0.034 (0.019)	12.051 (11.206)

Table 6. Prediction error for principal cut needed for head removal.

Data sets	# Samples	Position error (std) [m]	Angle error (std) [$^{\circ}$]
Training	188	0.003 (0.002)	0.362 (0.229)
Validation	64	0.013 (0.007)	4.566 (2.460)
Test	64	0.012 (0.006)	3.241 (1.775)