



Kooperative Transport

Uffe Gorm Hansen

Technical Report no. 2004/02

ISSN: 0107-8283

CR Subject Classification: I.2.9, I.2

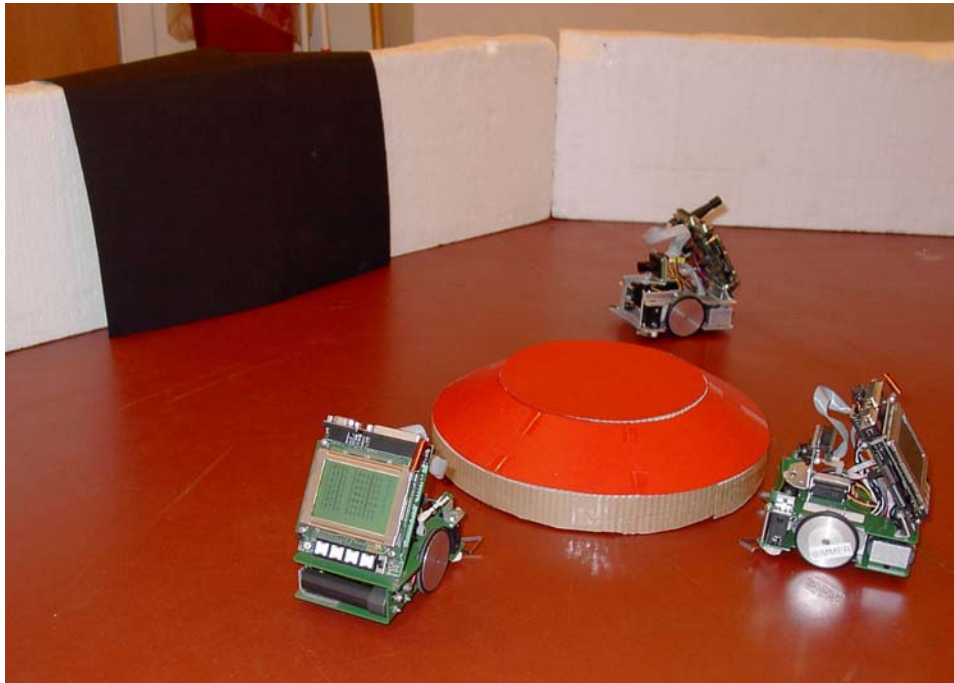
DIKU

University of Copenhagen • Universitetsparken 1
DK-2100 Copenhagen • Denmark

Kooperativ transport

Uffe Gorm Hansen (uffegorm@diku.dk)

Marts 2004



Resumé

Formålet med dette projekt er at foretage en praktisk anvendelse af sværminelligens. Nærmere bestemt at konstruere en passende adfærd for tre ens robotter, der skal samarbejde om at skubbe en rund kasse fra en vilkårlig position i en arena til et målområde placeret på en af arenaens vægge. Det viser sig at være muligt at udføre denne opgave ved at udstyre hver robot med binære sensorer og en adfærd, der kan tilpasses den aktuelle situation. Dette er inspireret af biologisk studier af myrer og deres måde at transportere føde på. Selvom robotterne ikke kan kommunikere samarbejder de på en både robust og overraskende fleksibel måde.

Indhold

1	Indledning	4
2	Sammenfatning	4
2.1	Problemformulering	4
3	Sværmintelligens og adfærdsmodeller	5
3.1	Sværmintelligens	5
3.2	Inspiration fra biologiske systemer	6
3.3	Braitenberg-køretøjer	6
3.4	Subsumption-arkitektur	7
3.5	Sekventiel opgaveløsning for sværmbaserede robotter	8
3.5.1	Model til sekventiel opgaveløsning	8
4	Analyse af adfærdsmodellerne	9
4.1	De basale adfærdsmønstre	9
4.2	Håndtering af flere adfærdsmønstre	9
4.3	Struktur til sekventiel opgaveløsning	10
4.4	Konklusion	10
5	Det sensoriske system	11
5.1	Ortogonale sensorer	11
5.2	Relevante sensorer	12
5.3	Simulerede sensorer	12
5.3.1	Målområde og kassedetektering	12
5.3.2	Berøringsdetektering	13
5.3.3	Cache til de simulerede sensorer	14
5.4	Det færdige sensoriske system	14
6	Specificering af adfærdsmodellen	14
6.1	Den sekventielle opgave	15
6.2	Beslutningstræ til lokalisering af kassen	15
6.3	Tilstandstræ til at opnå kontakt med kassen	16
6.4	Beslutningstræ til at skubbe kassen hen til målet.	16
6.5	Braitenberg-køretøjer	16
6.5.1	Målsøgende Braitenberg-køretøjer	16
6.5.2	Undvigende Braitenberg-køretøj	17
6.5.3	Braitenberg-køretøjer til at undgå stagnering	17
6.6	Konklusion	18
7	Afprøvning	18
7.1	Formål	18
7.2	Afgrænsning	19
7.3	Omgivelser og forsøgsmaterialer	20
7.3.1	Arena	20
7.3.2	Kasse	20
7.3.3	Målområde	20
7.4	Scenarium 1: Eksperimenter med kassestørrelse	22
7.4.1	Forventninger	22
7.4.2	Forsøgsopstillinger og kørsler	22
7.4.3	Konklusion	22
7.5	Scenarium 2: Eksperimenter med startplaceringer, kasse og målområde	23
7.5.1	Forventninger	23

7.5.2	Forsøgsopstillinger og kørsler	23
7.5.3	Konklusion	25
7.6	Scenarium 3: Eksperimenter med antal robotter og kassevægt	25
7.6.1	Forventninger	25
7.6.2	Forsøgsopstillinger og kørsler	25
7.6.3	Konklusion	26
7.7	Konklusion på afprøvning	27
8	Mulige udvidelser	27
A	Litteratur	29
B	Billeder fra afprøvningen	30
C	Kørsler	32
C.1	Scenarium 1: Eksperimenter med kassestørrelse	32
C.2	Scenarium 2: Eksperimenter med startplaceringer, kasse og måloområde	32
C.3	Scenarium 3: Eksperimenter med antal robotter og kassevægt	33
D	Specifikation af Eyebots	34

1 Indledning

At transportere genstande og føde fra et sted til et andet er en konstant udfordring for både dyr og mennesker. Udfordringen bliver markant større, hvis et enkelt individ ikke selv magter at flytte den ønskede genstand, enten fordi den er for stor eller for tung. Det kræver, at flere individer arbejder sammen på en fornuftig måde. I en tidsalder, hvor robotter har gjort deres indtog, er det interessant at lade dem prøve at løse denne klassiske transportopgave.

2 Sammenfatning

Dette er besvarelsen af bacheloropgaven til kurset Dat 2B udbudt på Datalogisk Institut på Københavns Universitet i foråret 2003. Formålet med opgaven er at foretage en praktisk anvendelse af sværminelligens. Nærmere bestemt at konstruere en passende adfærd for tre ens robotter, der skal samarbejde om at skubbe en kasse til et målområde.

Inspirationskilden til opgaven har været en artikelserie på syv artikler af Kube og Zhang ([1],[2],[3], [4], [5], [6] og [7]), der gennem 90'erne løste forskellige transportopgaver med en gruppe af specialbyggede robotter. De inspirerer til at undersøge teoretiske adfærdsmodeller, der har paralleller til biologiske systemer og som involverer helt grundlæggende adfærdsmønstre.

Konstruktionen af en passende adfærd til robotterne gik over alt forventning. Helt konkret løse de tre robotter forskellige variationer af transportopgaven på under tre minutter i over 86 procent af de 68 udførte kørsler. Under kørslerne viste der sig markante sammenhænge mellem kassens størrelse, vægt og startplacering samt robotternes antal og startplaceringer. Flere robotter og en større kasse resulterede i en hurtigere og mere stabil flytning af kassen.

Der opstod en samarbejdende adfærd mellem robotterne. Det meste af tiden skubbede de side om side til kassen hen mod målområdet, men nogle gange valgte den ene robot i stedet at skubbe den første robot bagpå med det samme resultat!

2.1 Problemformulering

Målet med opgaven er at konstruere et program, der gør det muligt for en gruppe af tre Eyebots (se appendiks D for specifikationer) at løse følgende transportopgave (i gennem resten af opgaven refereret til som **transportopgaven**):

Transportopgave En rund kasse skal skubbes fra en vilkårlig position i en arena til et målområde placeret på en af arenaens vægge. Vægten af kassen kan justeres således, at der kræves en eller to robotter til at flytte kassen.

Inspireret af Kube og Zhangs artikler skal robotterne overholde følgende krav:

- De skal samarbejde om at løse nedenstående transportopgave uden at kommunikere med hinanden.
- Robotterne skal samarbejde ved at have det samme mål.

- De skal alle være udstyret med samme adfærdsmønstre og burde derfor i princippet være tre identiske robotter.
- De skal basere deres adfærd på binære sensorer, der for eksempel indikerer om kassen kan ses eller ej.

I gennem opgaven vil der fokuseres på undersøgelse og analyse af grundlæggende adfærdsmønstre. Desuden vil den fysiske afprøvning af robotterne prioriteres højt for at undersøge robotternes samarbejdende egenskaber.

Læseren forventes at være bekendt med datalogiske principper svarende til en bachelorgrad på datalogi. Forskellige engelske termer fra artiklerne er i det omfang det er muligt oversat til danske begreber.

De teoretiske aspekter af sværminelligens og adfærdsmønstre beskrives i afsnittet ”Sværminelligens og adfærdsmønstre”. I det næste afsnit ”Analyse af adfærdsmønstre” analyseres de teoretiske modeller og en model for robotternes adfærd vælges. Derefter analyseres det sensoriske system i afsnittet ”Det sensoriske system”, hvor en passende struktur til sensorbehandling vælges.

Den valgte adfærdsmodel konkretiseres i afsnittet ”Specificering af adfærdsmønstre” således, at robotterne kan udføre transportopgaven. Så følger afsnittet ”Afprøvning” om det eksperimentielle arbejde og til sidst vil mulige udvidelser af programmet beskrives i afsnittet ”Mulige udvidelser”.

3 Sværminelligens og adfærdsmønstre

For at kunne vælge en passende adfærdsmodel til robotterne gennemgås først begrebet sværminelligens og udfordringer ved at basere en løsningsmetode på en gruppe af uafhængige robotter. Derefter vender vi os mod naturens verden og biologiske eksempler på sværminelligens. Herefter dannes et overblik over relevante teoretiske modeller i de følgende to afsnit. En model for autonome køretøjer kaldet ”Braitenberg Vehicles” præsenteres. Efterfulgt af en arkitektur for strukturering af flere forskellige adfærdsmønstre (Subsumption-arkitektur). Til sidst forklares en relevant model af Kube og Zhang til løsning af sekventielle opgaver for sværmbaserede robotter.

3.1 Sværminelligens

Begrebet **sværminelligens** kan defineres som en intelligent opførsel, der opstår ved en gruppe af autonome agents interaktioner mellem hinanden og omgivelserne ([8]). De enkelte agenter kan have enkle adfærdsmønstre, men idet der arbejdes i flok vil mere komplekse adfærdsmønstre opstå. Fordelene ved denne form for intelligens, består i at systemet kan tilpasse sig ændringer i omgivelserne og kan fortsætte med at virke, selvom enkelte robotter fejler ([8]). Systemet er med andre ord fleksibelt og robust. Der er dog også udfordringer ved en sværmbaseret tilgang til løsning af diverse problemer. Eric Bonabeau nævner tre af de grundlæggende ([8] s. 271–272):

1. Problemet med at programmere enkelte robotter, således at en overordnet opgave løses fornuftigt.

2. Hvor kompleks adfærd skal de enkelte robotter have? Skal de for eksempel kunne lære eller kun reagere instinktivt?
3. Det er ikke 100 procent pålideligt eller deterministisk. Hvad sker når uventede ting opstår i omgivelserne?

Disse tre punkter viser tydeligt, at sværmbaseret tilgang kræver omtanke og god forståelse af den opgave, man ønsker at løse. Vi vender os nu mod naturens eksempler på kollektive systemer, der benytter en form for sværminelligens.

3.2 Inspiration fra biologiske systemer

Naturen har ofte vist sig at indeholde forbavsende robuste og effektive løsninger på mange vanskelige problemer. Netop inden for samarbejdende kolonier af autonome væsner findes der gode eksempler på løsning af transportopgaver. For eksempel når myrer skal transportere et stort bytte hjem til kolonien. Kube og Zhang har gennem deres artikler taget udgangspunkt i denne analogi og gennem analyser af studier af myrer fundet frem til forskellige principper, der med fordel kan udnyttes ([1],[2],[3] og [7]).

Et vigtigt koncept inden for biologiske systemer er den indirekte kommunikation, der foregår via omgivelserne, og ikke gennem direkte kommunikation mellem de enkelte individer (på engelsk **stigmergy**). Et godt eksempel forekommer, når hvepse bygger et hvepsebo([8]). De enkelte hvepse afgør, hvor en ny væg skal bygges ved at betragte de omkringbyggede vægge. Disse vægge ændrer sig, eftersom andre hvepse bygger videre på dem. Derved struktureres bygningen af hvepseboet ud fra lokale observationer af omgivelserne. Hvepsene kommunikerer altså indirekte gennem deres omgivelser. Det viser, at direkte kommunikation ikke er nødvendigt for at koordinere en flok af individer, der skal løse en given opgave. I tilfældet med hjemtransport af et stort bytte for myrerne, viser myrerne sig at benytte følgende enkle strategier til at hjemføre af byttet:

- Det nødvendige antal af myrer til at flytte byttedyret skal opnås. De første myrer kalder på andre (eller venter til andre kommer til)
- Placeringen i forhold til den ønskede retning skal være rigtig. Placerer sig så de følger et duftspor mod myretuen
- Flytte byttet tættere på myretuen. Skubber eller trækker i byttet.
- Når byttedyret sidder fast (stagnering). Prøver at ændre kroppsposition, så der trækkes eller skubbes fra en anden vinkel eller slipper byttet og tager fat i byttet fra en anden position.

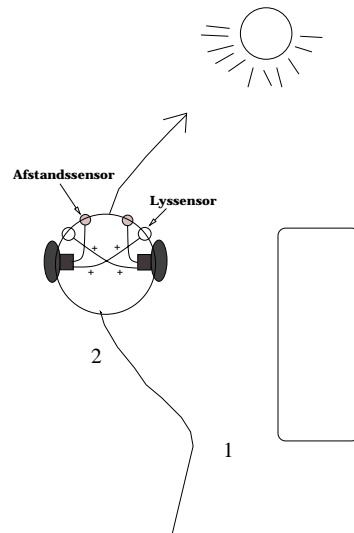
Disse enkle metoder kan benyttes som inspiration og viser også, at myrerne ikke umiddelbart benytter overordnede strategier i en given situation. De benytter de lokale omgivelser som udgangspunkt for deres næste handling.

3.3 Braitenberg-køretøjer

Når den grundlæggende adfærd for robotterne skal modelleres, er det naturligt at betragte den berømte hjerneforsker Valentino Braitenberg

tankeeksperimenter omkring interaktion mellem hjerne og opførsel; de såkaldte "Braitenberg Vehicles" (for fremtiden oversat til **Braitenberg-køretøjer**). De er tænkt som 14 forskellige typer af køretøjer af stigende kompleksitet ([9] kapitel 6). Fælles for dem er simple sammenhænge mellem sensorer og en højre og venstre motor. For de første Braitenberg køretøjer er sensorerne direkte koblet (inhiberende eller exciterende) til motorerne, mens efterfølgende køretøjer har mere komplekse koblinger og påvirkningsfunktioner mellem sensorer og motorer. Det viser sig, at selv meget simple Braitenberg-køretøjer udviser en adfærd, der for en tilskuer virker sofistikeret og levende.

Figur 1 viser et sådan køretøj af type tre, der virker tiltrukket af lys, men samtidig frastødt af afstandssensorer. Dette køretøj vil, når det nærmer sig en forhindring på højre side, sætte farten op på højre hjul. Dette vil medføre, at robotten drejer væk fra forhindringen (position 1 på figuren). Omvendt vil en lyskilde til højre medføre, at robotten sætter farten op på venstre hjul, hvilket vil få robotten til at dreje mod højre (position 2 på figuren). Desto nærmere robotten kommer på lyset desto mere kraft vil tilføres motorerne.



Figur 1: Braitenberg-køretøj af type 3

Dette antyder, at rent instinktive eller reaktive systemer kan udvise nok kompleksitet til at løse den givne transportopgave. Det viser også, at intelligens ikke altid kan "ses" ud fra kompleksiteten af en konstruktion. Det er dog klart, at der skal benyttes flere forskellige typer adfærd for at løse en sekventiel opgave. Måske kan en robot indeholde flere forskellige Braitenberg-køretøjer og skifte mellem dem efter behov?

3.4 Subsumption-arkitektur

Som et alternativ til Braitenberg-køretøjerne beskrives her en helt andet tilgangsvinkel til koblingen mellem sensorer og motorer kaldet **Subsumption-arkitekturen**¹. I 1986 foreslog Rodney Brooks en

¹Subsumption betyder på dansk indordne eller indbefatte

arkitektur ([9] kapitel 7), det kunne lette konstruktionen af robotter, der skulle opnå flere mål og benytte mange sensorer. Modellen består af flere parallelle adfærdsmønstre, der er placeret oven på hinanden i en søjlelignende struktur. Der kan eksempelvis være et adfærdsmønster, der benytter afstandssensorer til at undgå forhindringer og et underliggende adfærdsmønster, der kører fremad medmindre en frontal berøringssensor bliver aktiveret. Ideen med arkitekturen er, at højere adfærdsmønstre kan påvirke dele af lavere adfærdsmønstre på en inhiberende eller exciterende facon.

Subsumption-arkitekturen har visse paralleller med darwinisme i forbindelse med, at de grundlæggende adfærdsmønstre bliver finpudsede, mens flere adfærdsmønstre lægges oven på for at forøge overlevelsessevnen og derved muligheden for at klare mere komplekse udfordringer.

Man kan ikke tale om, at subsumption-arkitekturen er en udvidelse af Braitenberg-køretøjerne, men nærmere en anden måde at opnå kompleks adfærd på. Spørgsmålet er, om modellerne kan kombineres, for eksempel således, at forskellige skiver i subsumption-arkitekturen repræsenteres ved Braitenberg-køretøjer.

3.5 Sekventiel opgaveløsning for sværmbaserede robotter

En robot skal samarbejde med andre robotter uden at forstyrre dem unødvendigt. Den kan i en given situation udvise en passende adfærd, der måske i andre sammenhænge er destruktiv. Ved at opdele løsningen af transportopgaven i flere delopgaver kan robotten fokusere på de adfærdsmønstre, der er relevante for en given delopgave. Kube og Zhang eksperimenterede i deres første artikler ([1],[2] og [3]) kun med robotter, der havde et fælles mål: at skubbe en kasse fra midten til randen af en arena. Den transportopgave kunne opdeles i to trin: finde kassen og køre hen til kassen (når kassen nås, skubber robotten jo til kassen). De havde på daværende tidspunkt ikke fokus på, at opgaven havde en sekventiel struktur og benyttede ingen ressourcer på at modellere det. Dette ændrede sig i deres senere eksperimenter ([4],[6] og [7]), da robotterne nu skulle flytte kassen hen til et målområde og ikke ud til en vilkårlig rand af arenaen. De opdelte denne transportopgave i tre trin. Deres opdeling af transportopgaven kan lettere modificeret (konkretisering af målene og ikke af funktionaliteten) beskrives ud fra følgende tre delmål:

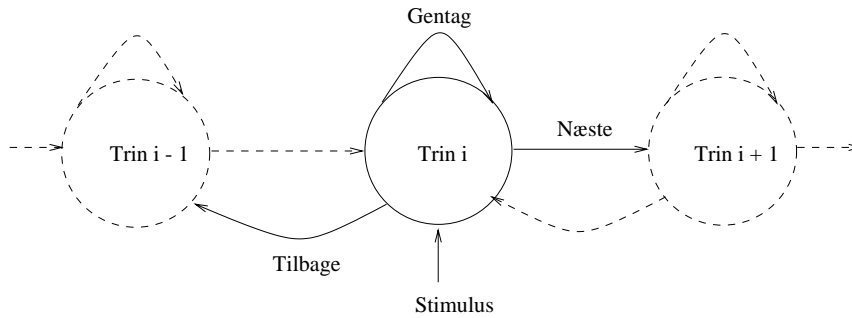
1. Lokaliser kassen
2. Opnå kontakt med kassen
3. Skub kassen hen til målet.

Men hvordan skelnes mellem de tre delmål?

3.5.1 Model til sekventiel opgaveløsning

Beslutningen mellem de tre delmål kan beskrives ved overgangene mellem delmålene, altså ved hjælp af en endelig tilstandsmaskine. Kube og Zhang benytter antagelsen om, at hvert sekventielt trin er baseret på opfyldelsen af det foregående trin. Det vil sige, at det næste delmål først kan opfyldes, når det foregående delmål er opfyldt. Overgangene skal typisk baseres på eksternt stimuli. Eftersom stimuli er af binær karakter

kan en sådan endelig tilstandsmaskine beskrives ved hjælp en række binære variable. Figur 2 viser en sådan tilstandsmaskine.



Figur 2: Tilstandsmaskine til sekventiel opgaveløsning

4 Analyse af adfærdsmodellerne

Vi vælger at opdele struktureringen af adfærdsmønstrene i tre dele, der behandles i hvert sit afsnit. I første afsnit analyseres, hvordan de helt basale adfærdsmønstre, som for eksempel at dreje væk fra forhindringer, skal konstrueres. I næste afsnit vælges en struktur til at vælge den rigtige adfærd blandt flere kandidater. I det efterfølgende afsnit analyseres om Kube og Zhangs model til løsning af sekventielle opgaver kan benyttes. Til sidst konkluderes på den valgte adfærdsmodel og datastruktur.

4.1 De basale adfærdsmønstre

Braitenberg-køretøjer virker som en oplagt base til at håndtere meget basale bevægelsesmønstre, der skal opnå enkle mål. Det smarte ved at benytte Braitenberg-køretøjer er, at det samme køretøj kan være nyttigt i flere forskellige situationer. Køretøjerne er meget fleksible og har adfærd, der spænder fra søgende og undvigende til repeterende adfærd uden eksternt stimuli. Alternativet til Braitenberg-køretøjer er klassisk styrelogik, der typisk er baseret på en masse if... then-sætninger. Eftersom Braitenberg-køretøjerne er tænkt som teoretiske modeller, kunne det være interessant at se dem benyttet i praksis. Vi vælger derfor at lade de grundlæggende adfærdsmønstre være en gruppe af Braitenberg-køretøjer af passende typer. Det betyder, at valget mellem flere adfærdsmønstre i realiteten bliver et valg mellem Braitenberg-køretøjer.

4.2 Håndtering af flere adfærdsmønstre

I dette afsnit udvælger vi en struktur, der ud fra en given situation vælger en passende basal adfærd.

Subsumptionen-arkitekturen er meget interessant og var også det fortrukne valg til håndtering af flere adfærdsmønstre i de første af Kube og Zhangs artikler([1] og [2]). De valgte dog kun at udnytte dele af ideen bag subsumption-arkitekturen, nemlig at kunne undertrykke hele underliggende lag. Arkitekturen kan implementeres fuldstændigt

parallelt. Parallele processer kræver dog et pålideligt styresystem til robotten, hvilket ikke lader sig gøre med de nuværende operativsystemer på robotterne, hvilket erfares i afsnittet ”Programmerings- og implementeringsovervejelser”.

Ligesom Kube og Zhang vender vi os derfor mod **tilstandsmaskiner** og **beslutningstræer**², der begge kan fungere som overliggende lag til flere forskellige Braitenberg-køretøjer. En af ulemperne ved tilstandsmaskiner er den til tider langsommelige konstruktionsproces. Til gengæld er de meget fleksible og kan modellere komplekse beslutningsprocesser. Der kan dog opstå synkroniseringsproblemer mellem omgivelserne og robotens opfattelse af dem givet forkerte sensorindtryk og forkerte tilstandsovergange. Det kan føre til en forkert opfattelse af verden og eventuelt til en længere vandring gennem ikke relevante tilstande. Dette opstår ikke i beslutningstræer, hvor verdensopfattelsen konstant revideres fra toppen. Det kræver dog en gentagende traversering af træet og derved flere sensorindtryk. Beslutningstræet er en delmængde af en tilsvarende endelig tilstandsmaskine, så spørgsmålet er, om ulempen ved den længere traverseringstid, er mindre end den potentielle tilstandsvildfarelse og langsommelige konstruktion af tilstandsmaskinen? Eftersom denne opgave kommer til at bestå af mange eksperimenter med diverse parametre og adfærdsmønstre, vælger vi det binære beslutningstræ, der er lettere at vedligeholde og implementere.

4.3 Struktur til sekventiel opgaveløsning

Opdelingen af transportopgaven i flere delmål blev som før nævnt benyttet i de sidste af Kube og Zhangs artikler. Men er det nødvendigt? Man kan forestille sig, at en struktur baseret på subsumption-arkitekturen kan indeholde alle nødvendige skiver til at håndtere hele opgaven. Det kræver dog en del skiver for at kunne fungere, hvilket kan gøre konstruktionen af lagene ganske uoverskueligt. Så en håndtering af en sekventiel struktur er nødvendig. Den foreslåede model til dette formål er baseret på en endelig tilstandsmaskine. Igen er det muligt at opnå samme resultat med et binært beslutningstræ, idet overgangene mellem de forskellige delmålstilstande er bestemt ved binære sensoraflysninger. Så med samme argumentation som i sidste afsnit bliver den valgte struktur det binære beslutningstræ.

4.4 Konklusion

Robotternes hjerne kommer til at bestå af et binært beslutningstræ, der ud fra diverse binære stimuli beslutter, hvilket Braitenberg-køretøj ud fra en gruppe, der skal være aktivt. Dette gør beslutningsprocessen for robotten let at overskue og eksperimentere med. Det tyder på, at Kube og Zhang også benytter en slags binært søgetræ kamoufleret som en endelig tilstandsmaskine, men det er kun gisninger, da de kun præsenterer få konkrete dele af deres algoritmer.

Vi kan konstatere at robotterne får en reaktiv og instinktiv adfærd. De bygger ingen modeller af deres omverden, men prøver i stedet at

²Et binært træ, hvor hver knude svarer til evaluering af en til flere sensoraflysninger. Bladene i træet repræsenterer alle de tilstande træet kan skelne mellem.

bestemme deres tilstand ud fra sensor aflæsninger. Men før specifikke adfærdsmønstre og beslutningstræ kan opbygges skal robotternes sensoriske system analyseres.

5 Det sensoriske system

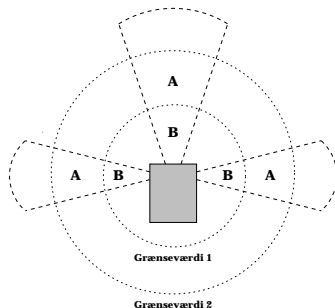
Når autonome robotter bevæger sig rundt i en menneskeskabt fysisk verden er valget af sensorer og de valgte sensorers egenskaber en kompleks udfordring. Det er vigtigt at vælge en sensor, der kan måle egenskaber i omgivelserne på en robust måde og dette kan ikke altid lade sig gøre. Enten fordi, man ikke præcist kender omgivelserne, eller fordi der ikke findes robuste sensorer til at måle alting. I situationer, hvor man har kontrol over det miljø, den autonome robot befinder sig i, vil der derfor forgå en afvejning mellem at vælge en bestemt sensor og tilpasse miljøet, således at denne sensor fungerer robust. Specielt i laboratorieforsøg, hvor miljøet kan skræddersys efter behov, er denne afvejning en vigtig faktor. Da forsøgene i denne opgave foregår på billedlaboratoriet på Datalogisk Institut i København vil dette afsnit beskæftige sig med sensorerne på robotterne og eventuelle krav til de omgivelser, de skal køre rundt i.

Som nævnt i problemformuleringen er et af kravene til det sensoriske system, at hver enkel sensor kun giver et binært svar. Kube og Zhang har opstillet denne hypotese med udgangspunkt i den biologiske verden, hvor det tyder på, at for eksempel myrer udviser adfærd baseret på binære sensoreringer ([1] og [8]). Man kan sige, at sensoren selv udfører den relevante informationsbehandling (måske en grænseundersøgelse) og derved reducerer beslutningsprocessen.

5.1 Ortogonale sensorer

Med ortogonale sensorer menes sensorer, der aflæser forskellige fysiske egenskaber i omgivelserne. Ved at kombinere flere af sådanne sensorer kan sandsynligheden øges for at en bestemt egenskab i omgivelserne fortolkes korrekt. Et eksempel kunne være tryksensorerne i vores pegefinger, der sidder meget tæt på hinanden. Sandsynligheden for, at vores finger berører en ting stiger i takt med at flere af tryksensorerne aktiveres. Ved samtidigt at kikke ned på fingeren, kan vi med en endnu større sandsynlighed vurdere, om fingeren berører noget. Disse to eksempler beskriver meget godt begrebet ortogonale sensorer. At arrangere flere ens sensorer (som for eksempel tryksensorerne i fingeren) geometrisk med ikke overlappende felter eller opdele en sensorernes virkefelter i flere område ved hjælp af grænseværdier, øger sandsynligheden for at en bestemt egenskab i omgivelserne detekteres korrekt. Sensorerne kaldes så delvis ortogonale. Hvis flere sensorer med ikke sammenlignelige virkefelter, som for eksempel øjet og en tryksensor kombineres, kan man tale om ægte ortogonale sensorer.

Styrken ved at benytte ortogonale sensorer bliver nogle gange undervurderet eller måske glemt, hvilket kan skyldes for stor tillid til enkelte sensorer (kamera). Figur 3 illustrerer en robots delvist ortogonale afstandssensorer.



Figur 3: Delvist ortogonale sensorer

5.2 Relevante sensorer

I forbindelse med transportopgaven benytter Kube og Zhang i deres senere artikler følgende sensorer:

Målområdesensor Speciel lyssensor(fotocelle)

Kassesensorer To lyssensorer(fotoceller)

Berøring En tryksensor (foran)

Undvigelser To afstandssensorer (45 grader til højre og venstre)

Bevægelsessensor Triptæller koblet til motorerne

Kube og Zhang benytter specialbyggende robotter, der er tilpassede netop denne ene transportopgave. Vi benytter, som før nævnt, ikke specialbyggede robotter, men Eyebots (se specifikationer i appendiks D), der har tre typer ydre sensorer: Bevægeligt kamera, Triptæller på motorerne(venstre og højre) og tre afstandssensorer(venstre, højre og foran).

5.3 Simulerede sensorer

Der skal undersøges, om det er muligt at simulere tre (målområdesensor,kassesensorer og berøringssensor) af de oprindelige fem sensorer fra en af Kube og Zhangs robotter på en Eyebot. Umiddelbart kan man dele de tre sensorer op i to grupper efter sensortype. Både målområde og kassedetekteringen foregår ved hjælp af lyssensorer, hvilket må siges at ligge tæt på kameraets virkemåde, mens detekteringen af en berøring ikke gør. For begge grupper tager følgende afsnit udgangspunkt i analysen af, hvilket billedbehandlingsværktøj, der løser opgaverne effektivt og enkelt. Det er det et krav, at værktøjet skal have en lav beregningskompleksitet, således, at tidsomkostningen for aflæsning af en sensor bliver så lav som mulig. Herved afskæres muligheden for mere avancerede billedbehandlingsværktøjer som for eksempel Hough-transformationer og lignende.

5.3.1 Målområde og kassedetektering

Forskellen mellem at detektere målområde, kasse og omgivelser er på nuværende tidspunkt ikke defineret. Det medfører, at en detekteringsalgoritme skal kunne tilpasses alt efter hvilken genstand, der ønskes detekteret. Som før nævnt kan denne analyse foretages i

sammenhæng med udformningen af omgivelserne og specifikke krav til omgivelserne vil derfor kunne accepteres.

Når vi arbejder med lavere ordens billedbehandlingsværktøjer, drejer det sig typisk om forskellige former for filtreringer og intensitetsanalyser. Herunder undersøgelser af kanter og farver i billedet. Kanter kan antages at skyldes en dybde eller farveforskel i et givent område. Ved at kombinere dette med en kantfølgingsalgoritme kan man, givet klare kanter i et billede, opnå en vis fornemmelse for omridset af diverse genstande i kameraets synsfelt. Altså en slags segmentering af billedet.

En anden form for segmentering kan opnås ved intensitetsanalyser af de tre grundfarver i farveformatet RGB (rød, grøn og blå). Dette kan også udbygges med en forholdsanalyse mellem farverne, der typisk vil give et mere stabilt udtryk for farven i et bestemt område. Kantdetekteringen og farveanalysen kan også kombineres for at give et endnu mere sandsynlig estimat. De to metoder er ikke helt ortogonale, hvis vi bruger analogien fra sensorerne, da de begge er baseret på intensitetsværdier, men er alligevel så forskellige, at de i kombination forstærker hinanden. Spørgsmålet er, om omgivelserne lader sig påvirke i en sådan grad, at en af metoderne er tilstrækkelig?

Hvis det kan lade sig gøre at variere farven mellem målområde, kasse, Eyebots og omgivelserne i en sådan grad, at de er klart adskillelige, kan en enkelt farveanalyse vise sig at være robust og kraftfuld nok. Lysforholdene i Billedlaboratoriet er kontrollable og farven af målområde og kasse også kan bestemmes frit, derfor virker farveanalyse til at være et oplagt valg. Antallet af billedfelter (pixels), der opfylder et givent farveforhold, kan optælles i et valgfrit rektangulært område af billedet. Denne optælling af felter kan ved hjælp af en grænseværdi netop give et binært svar på, om en given genstand er i synsfeltet for robotten.

5.3.2 Berøringsdetektering

At vurdere afstande i et todimensionalt billede er en vanskelig disciplin og kræver en del komplekse værktøjer. Problemet ved mange afstandsmetoder, der baserer sig på todimensionalt billeder er, at de er meget upræcise og kræver ekstern databehandling. Man kan argumentere for, at berøringsdetektering er et specialtilfælde af afstandsvurdering, hvilket burde gøre metoderne enklere.

En anden tilgangsvinkel er at benytte den forreste afstandssensor til at give en fornemmelse for, om en genstand kommer tættere på. Hvis man kombinerer dette med en undersøgelse af en genstand, der vokser i synsfeltet, kan kontakt med enkelte genstande måske forudsiges. Dette er dog for usikkert i forbindelse med større genstande som vægge, hvor en markant forstørrelse i billedfeltet ikke er synlig. Vi kræver en forholdsvis nøjagtig detektering af berøring, da robotten ellers kan blive ødelagt ved voldsomme sammenstød.

Umiddelbart findes der ingen robuste billedbehandlingsmetoder, der kan detektere berøring på en enkel og hurtig måde. Specielt ikke fordi robotterne befinder sig i et miljø med andre robotter, vægge, målområde og en kasse. Så konklusionen er, at hvis en berøringssensor er en betingelse for, at transportopgaven kan løses, kræver det en udbygning af de tre Eyebots med berøringssensorer. På Kube og Zhangs robotter findes der kun en berøringssensor foran, men for at berøringssystemet

kan være anvendeligt for andre projekter, er det bedst at montere to. En foran skråt til højre og en skråt til venstre. Når begge er aktiverede, svarer det til en frontal berøring.

5.3.3 Cache til de simulerede sensorer

En simuleret sensor kan forventes at kræve noget beregningstid. Dette kan skyldes, at sensoren skal benytte billedbehandling eller måske fordi, at den er afhængig af andre simulerede sensorer. For eksempel kunne man forestille sig en simuleret sensor, der fortalte, om man kunne se kassen. Denne sensor ville kalde to simulerede sensorer, der undersøgte om kassen kunne ses til venstre og/eller højre. Senere kunne et Braitenberg-køretøj benytte sig af de samme to sensorer til at vurdere, om den skulle køre ligeud eller dreje mod kassen til højre eller venstre. I dette tilfælde ville en cache kunne mindske billedbehandlingstiden for at undersøge, om kassen kan ses på venstre og højre side af billedet. Cachen skal være baseret på de fysiske sensorer, idet en aflæsning af de fysiske sensorer skal forælde de tidligere beregnede resultater.

5.4 Det færdige sensoriske system

De relevante aspekter af det sensoriske system er nu blevet undersøgt for at kunne løse transportopgaven. Resultatet er, at det sensoriske system består af et fysisk og et simuleret lag. I det fysiske lag foretages alle sensoraflæsningerne for de forskellige fysiske sensorer. Aflæsningerne benyttes i det simulerede lag, hvor der benyttes grænseundersøgelser for at give binære resultater. Flere simulerede sensorer kan derfor tage udgangspunkt i den samme måling fra en fysisk sensor, for eksempel et billede fra kameraet. En simuleret sensor kan også benytte resultater fra andre simulerede sensorer. Det simulerede lag er også udstyret med en cache, således at eventuelle gentagne kald til en simuleret sensor, kan besvares hurtigere.

Berøringssensorer er på nuværende tidspunkt ikke indbygget i de tre Eyebots, hvilket er påkrævet for, at transportopgaven kan løses. Så før afprøvningen starter er det et krav, at disse sensorer bliver monteret.

6 Specificering af adfærdsmodellen

Efter de indledende teoretiske overvejelser er tiden nu kommet til at konkretisere beslutningstræet og konstruere en gruppe af Braitenberg-køretøjer. Denne konkretisering er i nogen grad et resultat af en forfiningsproces gennem flere indledende afprøvninger af diverse adfærds mønstre (Braitenberg-køretøjer), men er også inspireret af Kube og Zhangs sidste tre artikler ([4], [5] og [7]) og den fysiske udformning af de tre Eyebots. Målet er, at den færdige robot skal have en samlet adfærd, der er flydende og løser den givne transportopgave på en robust måde. Desuden skal voldsomme sammenstød mellem robotterne undgås, da de er skrøbelige og værdifulde. I gennem de næste afsnit kan man med fordel benytte figur 5 side 18, der viser det færdige beslutningstræ.

6.1 Den sekventielle opgave

Hovedopgaven for beslutningstræet er at skelne mellem de tre delmål, således af opgaven kan løses sekventielt. De tre delmål er som før beskrevet

1. Lokaliser kassen
2. Opnå kontakt med kassen
3. Skub kassen hen til målet.

Overgangene mellem de tre delmål kan opnås ved at undersøge om kassen kan ses og om der er kontakt med den. Det er vigtigt, at der undersøges, om der er kontakt med kassen og ikke bare et andet objekt. Så ved at benytte to simulerede sensorer kan der skelnes mellem de tre delmål.

6.2 Beslutningstræ til lokalisering af kassen

Når kassen skal lokaliseres, er det vigtigt, at robotten har en samlet adfærd, der gennemløber et helt område uden at undlade specifikke steder. For eksempel kunne det ske, at robotten fulgte væggene langs randen af arenaen hele vejen rundt uden på nået tidspunkt at køre igennem det inderste område.

Der findes mange strategier for udforskning af ukendte områder. Vi er mest interesserede i lokale strategier, der med udgangspunkt i de nære omgivelser beslutter sig for en handling. Problemet med en sådan lokal strategi er, at et område ikke gennemløbes systematisk. Det gennemkøres i stedet på en kaotisk måde præget af mange tilfældigheder. Ved at tilføje tilfældige retningsskift med en periodisk frekvens, for eksempel hvert andet sekund, opnås en adfærd, der som oftest vil køre ligeud, men samtidig udforsker omgivelserne (BK: SøgKasse) ³.

Hvis robotten er kørt ind i en ting forfra, vil berøringssensorerne blive aktiveret. Der kan dog opstå situationer, hvor sensorerne ikke aktiveres, fordi robotten er kørt skævt ind på en genstand. Men i kombination med en bevægelsessensor, der måler, om robotens hjul drejer rundt, kan en sådan situation godt detekteres. Derfor er disse to ortogonale sensorer ideelle til at undersøge om robotten er kørt ind i noget. Kube og Zhang benytter ikke en bevægelsessensor i deres senere artikler, da deres robotter er cylinderformede og derfor aldrig kommer skævt ind på noget. Hvis robotten er stødt ind i noget, vil en kort baglæns kørsel, så godt som altid løse problemet (BK: Bak).

Selvom robotten ikke er kørt fast, er der stadig den mulighed, at den kan se forhindringer ved hjælp af sine afstandssensorer. Dem kan den bruge til at dreje væk fra forhindringerne for at opnå en mere glidende kørsel. Kube og Zhang skelner mellem forhindringer, der er tæt på og længere væk. Det kan bruges til at afgøre, hvor skarpt der skal drejes væk, hvilket vi også vil benytte i et undvigende Braitenberg-Køretøj (BK: Undvige). I teorien kan dette simple køretøj finde vej gennem en kringlet vej med vægge langs siderne, idet der konstant foregår fremadrettede undvigende manøvrer.

³Når et nyt adfærdsmønster (Braitenberg-køretøj) bliver beskrevet navngives det ”BK: Navn”

6.3 Tilstandstræ til at opnå kontakt med kassen

At køre hen til kassen har en del til fælles med at finde kassen. Der skal tages højde for sammenstød og forhindringer før der kan styres mod kassen. At tage højde for sammenstød kan foretages på samme måde som i forrige afsnit. Derimod kan der opstå problemer, når man prøver at undgå omkringliggende forhindringer. Dette er specielt relevant, hvis man prøver at placere sig ved siden af en anden robot, der allerede skubber til kassen. Benyttes den sædvanlige undvigelsesprocedure vil robotten prøve at undgå den skubbende robot, hvilket vil føre til, at den kommer så skævt ind på kassen, at den også vil undvige den. Den store forskel mellem placeringen på afstandssensorerne på Kube og Zhangs robotter og de tre Eyebots gør, at dette problem ikke opstår i samme grad i deres eksperimenter. Derfor vælges undvigelsesadfærd helt fra i denne struktur. Så hvis robotten ikke er kørt fast, skal der styres hen mod kassen (BK: TilKasse).

6.4 Beslutningstræ til at skubbe kassen hen til målet.

Når robotten har kontakt med kassen, er det kun interessant, om den kan se målområdet eller ej. Hvis den kan se målområdet, skal den skubbe til kassen (BK: Skub). Hvis ikke, skal den prøve at finde en ny fri position på kassen (BK: RePos). Bemærk er robotten kun foretager en repositionering og ikke en drejning, som nævnt under myrerne i afsnittet under biologiske systemer. Det er fordi flokken af robotter er meget lille, hvilket gør anvendelsen af flere repositioneringsstrategier for overflødig.

6.5 Braitenberg-køretøjer

I gennem de tre sidste afsnit er der blevet nævnt seks forskellige adfærdsmønstre, der ønskes i funktion. Disse adfærd skal konstrueres ved hjælp af passende Braitenberg-køretøjer. Illustrationer af de færdigt konstruerede køretøjer findes i figur 6 på side 19. De ønskede køretøjer kan opdeles i tre klasser efter deres formål: målsøgende, undvigende og stagneringsundgåede. Både de målsøgende og undvigende køretøjer skal køre kontinuert, mens køretøjerne for stagneringsundgåelse skal køre diskret, det vil sige køre et stykke tid uden hensyn til det sensoriske system. Hvis ikke det foregik diskret, ville robotten ikke nå langt nok væk til at undgå en repeterende adfærd.

6.5.1 Målsøgende Braitenberg-køretøjer

SøgKasse Kører fremad med periodiske retningskift enten til højre eller venstre. Dette opnås med et Braitenberg-køretøj uden sensorer med en statisk spænding på motorerne, der driver den fremad og med en periodisk dæmpende knude koblet til både venstre og højre motor.

TilKasse Kører fremad og drejer mod kassen ved at benytte højre og venstre kassesensor. Braitenberg-køretøjet har den højre kassesensor koblet forstærkende til venstre motor og omvendt for den venstre. Desuden har den en statisk spænding på begge motorer for konstant at drive den fremad.

Skub Kører fremad og benytter berøringssensorerne til at dreje ind mod en genstand ved kontakt. Dette køretøj har berøringssensorerne koblet omvendt på med en forstærkende effekt og har samtidigt en konstant fremadgående spænding på motorerne.

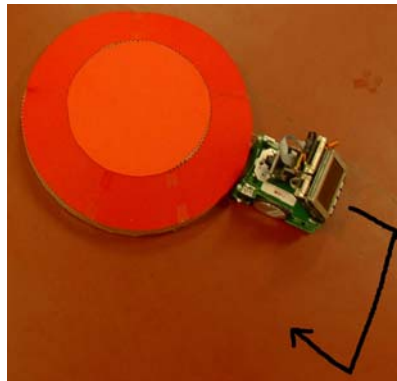
6.5.2 Undvigende Braitenberg-køretøj

Undvige Drejer væk fra forhindringer ved at bruge venstre, frontale og højre sensor til forhindringer langt væk og venstre og højre sensor til forhindringer tæt på. Det er ikke helt enkelt at forbinde de fem sensorer, således at der drejes passende væk i alle situationer. Ved at tage en sensor af gangen kan det ønskede adfærd dog godt opnås. Hvis sensorerne, der måler forhindringer længere væk, kobles meget forstærkende på deres respektive motorer, vil robotten undvige en forhindring til venstre ved at sætte farten op i venstre motor. Hvis den venstre og højre sensor, der detekterer forhindringer tæt på, tilsluttes omvendt med en negativ effekt, vil en forhindring tæt til venstre få højre motor til at køre baglæns. Dette vil resultere i at robotten drejer på stedet væk fra den nærliggende forhindring. Til sidst tilsluttes den frontale sensor til forhindringer længere væk med negativ effekt til højre motor. Dette gøres fordi den frontale sensor ikke er placeret midt på en Eyebot, men til venstre. Når der ingen forhindringer er i nærheden står robotten stille. Af den grund kaldes et køretøj af denne type med et antropomorft udtryk for sky og nervøs ("timid").

6.5.3 Braitenberg-køretøjer til at undgå stagnering

Bak Kører baglæns og svinger væk fra berøring ved at benytte venstre og højre berøringssensorer. Den konstante bagudgående spænding forstærkes ved de modsat koblede berøringssensorer.

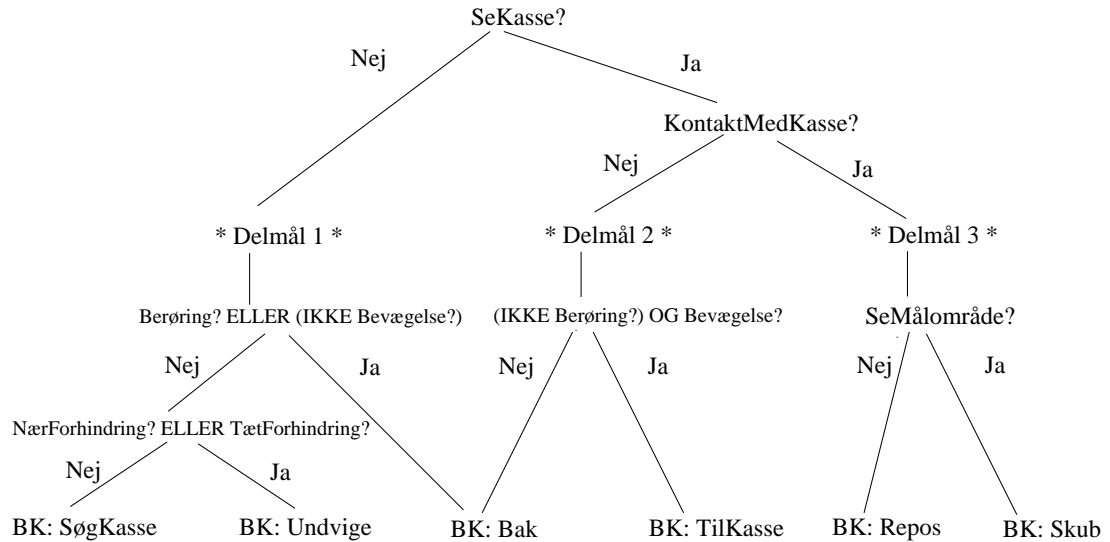
RePos Kører baglæns i et mønster, der flytter robotten ca 10 cm til venstre for den nuværende position. Dette mønster opnås ved flere sekventielle diskrete bevægelser og sker uden påvirkning fra sensorer.



Figur 4: BK: RePos - Braitenberg-køretøj til omplacering i forhold til kassen. Adfærdens udføres ved hjælp af fire diskrete bevægelser; bak, drej på stedet til venstre, kørsel frem og drej på stedet til højre

6.6 Konklusion

Kombinationen af beslutningstræ og Braitenberg-køretøjer har vist sig at gøre konstruktionen af en robotthjerne til en overskuelig opgave. Det er nu op til den senere afprøvningsfase at undersøge, om den fundne struktur kan løse transportopgaven på en robust måde samtidig med, at robotterne bevæger sig flydende rundt i arenaen.



Figur 5: Beslutningstræ for den enkelte robot. Ved hjælp af binære sensorer besluttes hvilket Braitenberg-køretøj, der skal benyttes i det givne øjeblik. De tre delmål svarer til trin i den sekventielle opgave; lokaliser kassen, opnå kontakt med kassen og skub kassen hen til målet. Bemærk at det samme Braitenberg-køretøj (BK: Bak) benyttes til at undgå stagnering både i delmål 1 og 2

7 Afprøvning

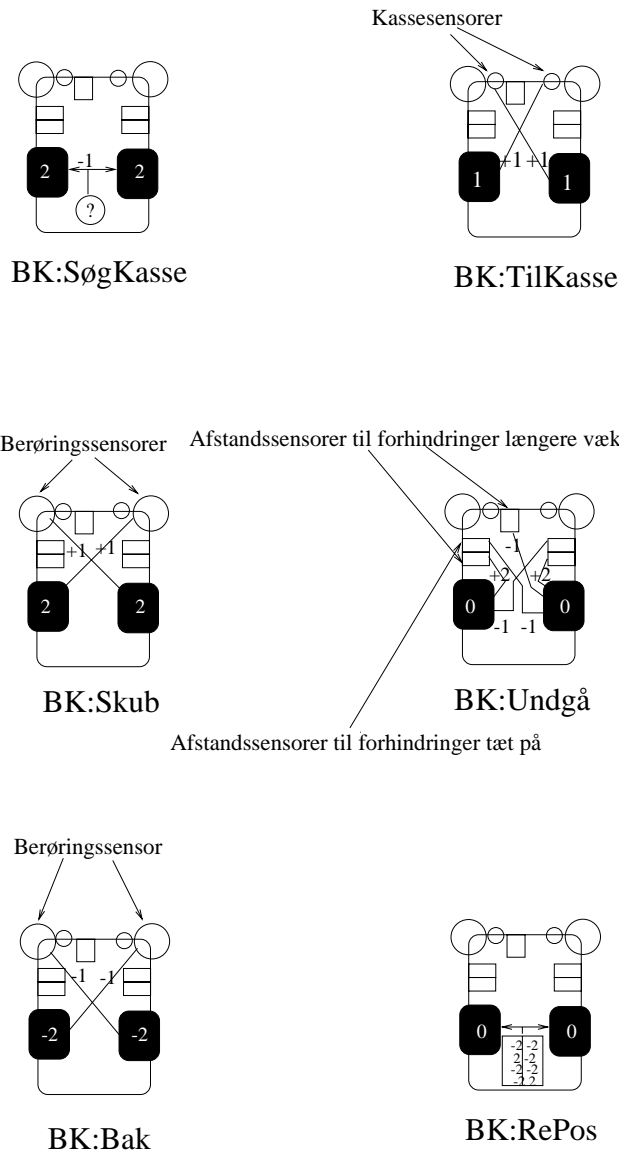
Med udgangspunkt i det opstillede beslutningstræ og de 6 Braitenberg-køretøjer skal der foretages en ekstern afprøvning af programmet. Hvilket betyder at programmet undersøges ved at fortage kørsler med robotterne i et fysisk miljø. I Kube og Zhangs artikler gennemføres ikke større afprøvninger, så dette afsnit baserer sig ikke på deres artikler. I appendiks B ses billeder fra afprøvningen.

7.1 Formål

Det vigtigste i denne afprøvning er at sandsynliggøre, at de tre Eyebots programmeret med det opstillede beslutningstræ kan løse den givne transportopgave. Desuden ønskes sammenhænge mellem følgende fem forsøgsparametre undersøgt:

Kasse Størrelse, vægt og startplacering

Robotter Antal og startplaceringer



Figur 6: De seks anvendte Braitenberg-køretøjer set ovenfra. Hvert hjul (de sorte kasser) har tilknyttet en værdi, der repræsenterer den elektriske spænding, der tilføres hjulet. Spændingen kan påvirkes ved aktiveringen af udvalgte sensorer. Disse påvirkninger er illustreret ved streger mellem sensorer og hjul, samt tilknyttede værdier. Hvis det ene hjul har en negativ spænding, mens det andet har en positiv, drejer robotten på stedet.

7.2 Afgrænsning

Med fem forsøgsparametre og utallige kombinationsmuligheder afgrænses afprøvningen til at bestå af tre scenarier. Hvert scenarium undersøger en delmængde af de mange variationer af forsøgsparametre.

Scenarium 1 Eksperimenter med kassestørrelse

Scenarium 2 Eksperimenter med startplaceringer af kasse og målområde

Scenarium 3 Eksperimenter med antal robotter og kassevægt

Hvert scenarium består af flere forsøgsopstillinger med flere kørsler. For at begrænse tidsforbruget for de enkelte kørsler indføres en tidsgrænse på tre minutter fra forsøget starter til kassen skal være i berøring med målområdet. Bliver tidsgrænsen overskredet tæller forsøget som ikke gennemført (180+ sekunder). Desuden registreres tidsintervallet fra start til første kontakt mellem en robot og kassen.

7.3 Omgivelser og forsøgsmaterialer

Som nævnt under afsnittet omkring sensorer er et godt sammenspil med det sensoriske system og omgivelserne vigtigt for at opnå et pålideligt system. Derfor er omgivelserne og forsøgsmaterialerne udformet, således at de er enkle og lette at detektere. Her følger nu en kort gennemgang af omgivelserne og de brugte materialer.

7.3.1 Arena

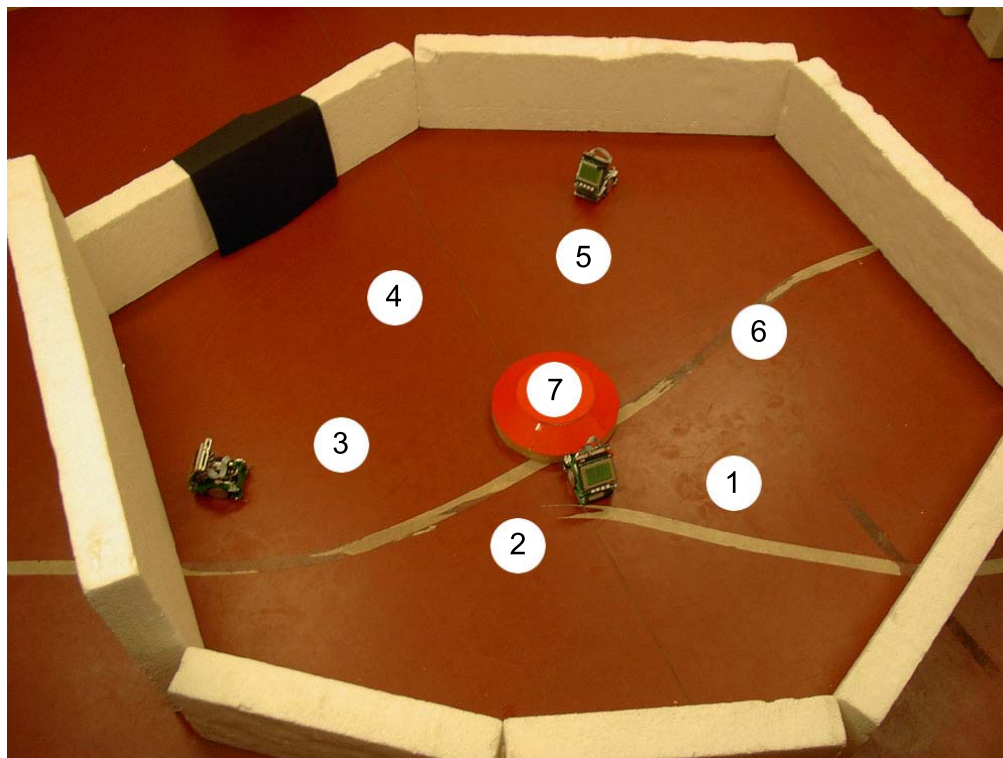
Arenaen er beliggende i Billedlaboratoriet, Datalogisk Institut for Københavns Universitet. Den er opbygget med hvide skumplastvægge, der er holdt sammen med stærk tape. Arenaen er formet som en sekskant med en diameter på omkring de 2,2 meter. Lysforholdene er konstante i rummet (det svinger med frekvensen på elnettet), eftersom alt dagslys er skærmet af og fire lysstofrør er eneste lyskilder. I figur 7 er arenaen vist med nummererede startpositioner, der benyttes af både robotter og kasse.

7.3.2 Kasse

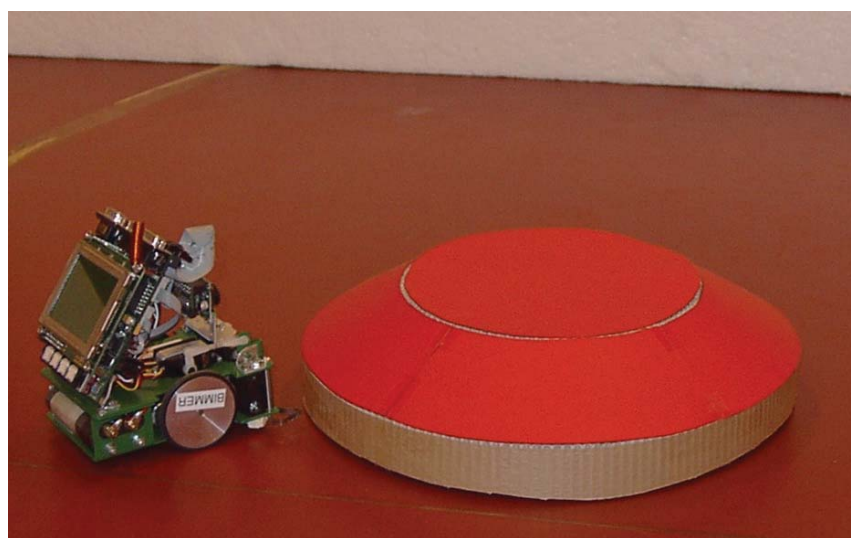
Udformningen af kassen skal opfylde en række krav. Størrelsen og vægten skal kunne varieres, samtidig med at kassen skal være let at detektere helt tæt på. Dette er opnået ved at benytte oprullet bølgepap i forskellige tykkelser gående fra 3 til 7,5 cm beklædt med en skråtstillet kappe af rødt pap. Højden af kassen er tilpasset (7,5 cm) således, at alle robotter kan se kassen samtidigt med at kunne se over den. Dette gøres så et bagvedliggende målområde kan detekteres. Det skråstillede pap gør, at den røde farve let detekteres af robotterne ligegyldig hvor i arenaen, de befinder sig. I midten af kassen er formet en skål, der kan fyldes med diverse småting for at regulere vægten. Vægten er tilpasset således, at der kræves en (let kasse) eller to (tung kasse) robotter til at flytte kassen. Den lille udgave af kassen har en diameter på 32 cm, mens den store udgave har fået omrullet ekstra bølgepap, således at diameteren er forøget med 5 cm.

7.3.3 Målområde

Ved at gøre en del af en væg sort opnås et let genkendeligt målområde. Dette gøres ved hjælp af sort pap. Målområdet placeres under alle afprøvninger på den samme væg, fordi arenaen er symmetrisk udformet. Områdets størrelse varieres ikke gennem kørslerne for at begrænse antallet af forsøgsparametre.



Figur 7: Arena med syv nummererede startpositioner. Kassen skal opnå kontakt med målområdet, hvilket er det sorte pap i øverste venstre hjørne af arenaen.



Figur 8: Eyebot og kasse. Diameteren på kassen kan varieres ved at omrulle ekstra bølgepap. De skrå sider gør det lettere for Eyebotens kamara at detektere den røde farve.

7.4 Scenarium 1: Eksperimenter med kassestørrelse

I dette scenarium undersøges de to forskellige kassestørrelser samtidig med, at startpositionerne for robotterne varieres. Følgende forsøgsparametre er holdt konstante: kassevægt (tung), startplacering af kasse (i midten - position 7) og antal af robotter (tre).

7.4.1 Forventninger

Vi forventer, at den større kontaktflade for den store kasse, vil gøre det lettere for robotterne at samarbejde om at flytte den, idet målområdet så kan ses fra flere positioner omkring kassen. Dette vil omvendt føre til en højere repositioneringstid på grund af de flere positioner. Samlet forventes en hurtigere og mere stabil løsning for den store kasse i forhold til den lille.

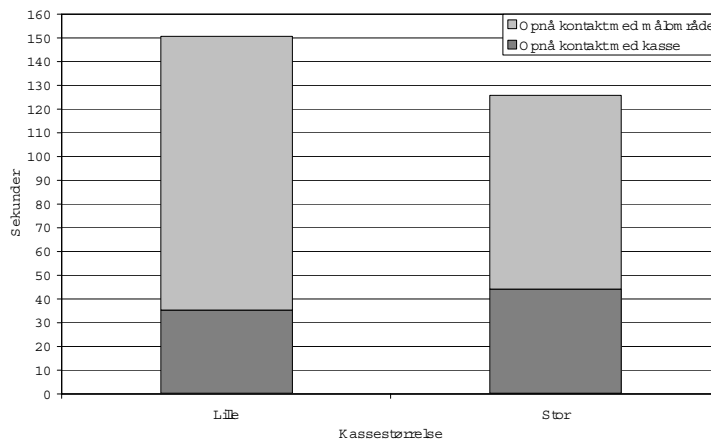
7.4.2 Forsøgsopstillinger og kørsler

For begge kasser er der arbejdet med tre forskellige startkonfigurationer af robotterne, der hver er blevet kørt to gange. I alle konfigurationer er robotterne placeret med front væk fra kassen. I første konfiguration er alle robotterne placeret ved siden af hinanden på position 1. I anden konfiguration er de placeret på position 1, 2 og 6 for at opnå mere spredning, mens de i tredje konfiguration er placeret helt spredt på position 1, 3 og 5. I appendiks C.1 findes en oversigt over de 12 kørsler. I figur 9 ses en sammenligning af den gennemsnitlige tid for alle konfigurationer for den første berøring af kassen og den samlede til kassen berørte målområdet for den lille og store kasse.

Det kan ses af figuren, at det gennemsnitligt tager længere tid at opnå kontakt med den store kasse. Dette kan skyldes, at kassen har en større risiko for at blive detekteret som forhindring gennem afstandssensorerne på grund af den forøgede diameter. Kassedetekteringen er jo uforandret, da den røde kappe på kassen ikke er ændret. Men når kassen først er berørt er tiden det tager robotterne at repositionere sig og skubbe kassen hen til målet mindre end for den lille kasse. Det tyder på at det er lettere for robotterne at placere sig passende omkring kassen. En ting der underbygger denne teori er mere stabile løsningstider for den store kasse. Dette ses ikke af grafen, men direkte i afprøvningsresultaterne. Den samlede løsningstid er gennemsnitlig hurtigere for den store end for den lille kasse. For alle forsøg havde robotterne en del mindre sammenstød og konflikter i forbindelse med placeringen omkring kassen. I nogle tilfælde resulterede det i at den en eller måske begge robotter mistede kontakten med kassen. Dette var også skyld i det ene mislykkede forsøg (180+ sekunder) på den lille kasse.

7.4.3 Konklusion

Dette scenarium viste en god overensstemmelse mellem forventninger og resultat. Det tyder på at en større kasse er lidt mere besværlig at finde, men er hurtigere at skubbe til målområdet på grund af de flere placeringsmuligheder rundt om kassen. I alt løste robotterne transportopgaven i 92 procent af kørslerne.



Figur 9: Scenarium 1: Sammenligning af den gennemsnitlige tid for kørsler med den lille og store kasse. Fælles for kørslerne er en tung kassevægt, startplacering af kassen(i midten - position 7) og benyttelse af tre robotter.

7.5 Scenarium 2: Eksperimenter med startplaceringer, kasse og målområde

I dette scenarium eksperimenteres med forskellige startplaceringer af kasserobotter, kasse og målområde. Eftersom arenaen er rimelig symmetrisk placeres målområdet på den samme væg. Det benyttes en lille let kasse og tre robotter i alle kørsler.

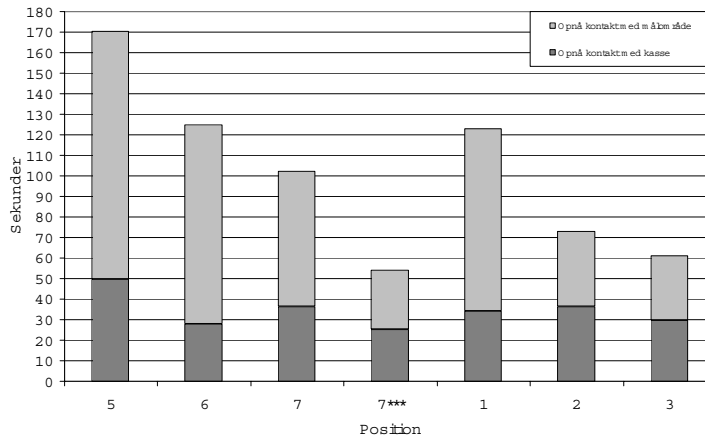
7.5.1 Forventninger

Vi forventer at det tager omtrent den samme tid for robotterne at komme i kontakt med kassen uanset i hvilken position den befinder sig i. Den midterste position bør dog have den laveste kontakttid, da afstanden fra kassen til alle vægge er ens. Vi forventer også at en startplacering af kassen til højre for målområdet (position 5 og 6) tager længere tid for robotterne at gennemføre end for de spejlvendte positioner (position 2 og 3) eftersom robotternes repositionering sker med uret.

7.5.2 Forsøgsopstillinger og kørsler

I kørslerne er arbejdet med seks forskellige startplaceringer af kassen; position 4 foran målområdet er ikke taget med. Til hver startplacering af kassen er der to konfigurationer af robotplaceringer. I den første placeres alle robotter i positionen længst væk fra kassen, men robotterne spredes i den anden konfiguration. I begge konfigurationer placeres robotterne med front mod væggen. Hver konfiguration er kørt to gange for hver startplacering af kassen. Eneste udtagelse er tre kørsler med kassen placeret i midten (position 7), hvor der er valgt tre alternative

placeringer. Dette giver i alt 26 kørsler, der kan findes i appendiks C.2. I figur 10 ses en sammenligning af de 6 forskellige positioner med tiden for den første berøring og den samlede løsningsetid. Bemærk at en ekstra søjle med en startplacering for kassen i midten (position 7*) er medtaget. Disse data stammer fra det tredje scenarium, men også relevante i denne sammenhæng.



Figur 10: Scenarium 2: Sammenligning af den gennemsnitlige tid for kørsler med forskellige startpositioner af kasse. Fælles for kørslerne er den lille og lette kasse og benyttelsen af tre robotter.

Figuren viser at startplaceringen af kassen har stor betydning for den samlede løsningsetid af transportopgaven. Startposition 5,6 og 1 har markant højere gennemsnitlige løsningstider end startposition 1, 2 og 7. Dette skyldes uden tvivl, at robotterne bruger mere tid på at placere sig, således at målområdet kan ses over kassen. Robotterne oplever dog i nogen grad problemer med at placere sig rundt om kassen, hvis den er for tæt på en af væggene. Dette skyldes at adfærden, der styrer repositioneringen, er statisk og ikke tager højde for omkringliggende forhindringer såsom vægge. Løsningstiden for en startplacering af kassen i midten (position 7) afhænger i højere grad af robotternes placering, hvilket tydeligt er illustreret ved resultaterne fra scenarium 3. Eneste forskel mellem disse to resultater er nemlig startplaceringerne af robotterne.

Som det også kan ses af figuren er tiden til den første kontakt svingende i omegnen mellem 30 og 40 sekunder, hvilket kan skyldes tilfældighederne i de præcise startplaceringer af robotterne. I forbindelse med søgningen efter kassen har robotterne en meget interessant og markant adfærd. De bevæger sig næsten hele tiden med uret. Dette sker selvom deres søgning bliver styret af tilfældige retnings skift med faste intervaller. Denne adfærd bunder i udformningen af det undvigende

Braitenberg-køretøj, der har en tendens til at dreje mod højre, når en forhindring detekteres lige foran den. Dette forklares ved den venstre placering af den frontale afstandssensor. Denne pudsige adfærd kan også forklare, hvorfor tiden til den første kontakt ikke er markant mindre for kassen i midten (position 7), da robotterne har tendens til at søge langs væggene.

7.5.3 Konklusion

Der er en god overensstemmelse mellem de forventede og de eksperimentielle præstationer. Kassens placering i forhold til målområdet har også en tydelig sammenhæng med den samlede løsnings- og transporttid af transportopgaven. En placering til højre for målområdet giver mere omplaceringstid for robotterne. Startpositionerne for robotterne betyder meget for den samlede løsnings- og transporttid i det tilfælde hvor kassen er placeret i midten (position 7). En interessant mod-uret-kørende adfærd er opdaget når robotterne søger efter kassen, mens en mere problemfyldt adfærd er opdaget ved placering rundt om kassen, når denne ligger tæt på en væg. Samlet set klarede robotterne transportopgaven i omkring 92 procent af kørslerne.

7.6 Scenarium 3: Eksperimenter med antal robotter og kassevægt

I dette scenarium undersøges forholdet mellem antal af robotter og vægten af kassen, samtidigt med at placeringerne af robotterne varieres. Den lille kasse benyttes med fast placering midt i arenaen (position 7).

7.6.1 Forventninger

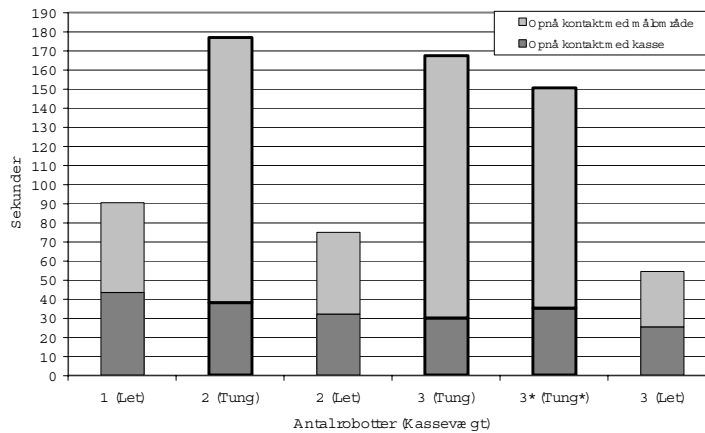
Vi forventer, at første berøring sker hurtigere gående mod en grænseværdi desto flere robotter der findes i arenaen. Grænseværdien er bestemt af hvor hurtigt en robot kan køre mod en væg og lige tilbage igen. Desuden forventes det også, at tiden fra første kontakt til kassen er i berøring med målet, reduceres i takt med, at antallet af robotter stiger.

7.6.2 Forsøgsopstillinger og kørsler

I kørslerne arbejdes der med to vægte af kassen og en, to eller tre robotter. De fem af kombinationerne, undtagen den ene robot med den tunge kasse, undersøges med tre forskellige startkonfigurationer af robotterne. I den første konfiguration er alle robotterne startende på position 1. I den anden konfiguration er de placeret helt spredt på position 1, 4 og 6, mens de i sidste konfiguration er placeret tæt på målområdet på position 3, 4 og 5 for at give gode placeringsproblemer rundt om kassen. For alle tre konfigurationer gælder det at robotterne placeres med front mod væggen. Hver konfiguration er kørt to gange, hvilket giver et samlet antal af 30 kørsler, der kan ses i appendiks C.3.

I figur 11 ses en sammenligning mellem kørselstiderne for de 5 forskellige kombinationer af robotantal og kassevægt. Ydermere er vist data fra det første scenarium ($3^*/2^*$), der også findes relevant i dette scenarium.

Af figuren kan ses, at der er en tendens til at den første kontakt mellem robot og kasse skabes tidligere desto flere robotter, der deltager.



Figur 11: Scenarium 3: Sammenligning af den gennemsnitlige tid for kørsler med kombinationer af robotantal og kassevægt. Fælles for kørslerne er en let kasse placeret i midten af arenaen (position 7)

Tendensen er dog ikke helt tydelig, hvilket også viser tilfældighederne i den kassesøgende adfærd og i navigeringen i arenaen. I gennemsnit opnås der kontakt med kassen i de første 30 til 40 sekunder. Det tyder på, at opgaven løses hurtigere for både den lette og tunge kasse, når antallet af robotter øges. Dog er forskellen ikke specielt markant mellem en og to robotter for den lette kasse, når først kontakten med kassen er opnået. Ved kørslerne med den tunge kasse opstod der en del konflikter mellem robotterne. De havde svært ved at placere sig rundt om kassen, hvilket betød, at de til tider skubbede hinanden væk fra den. Dette skyldes, at robotterne er for aggressive, når de har fået øje på kassen, og at adfærd, der omplacere dem rundt om kassen ikke er ideel. Disse problemer blev dog løst af robotterne på en overraskende og interessant måde. I stedet for at skubbe direkte på kassen skubbede den ene robot gentagne gange bag på den anden! En slags rygskubning, der virkede helt efter hensigten, omend lidt langsommere end når de stod ved siden af hinanden. For den tunge kasse var tidsgrænsen på 180 sekunder dog et problem i flere af kørslerne. Med to robotter blev opgaven kun løst to gange, mens tre robotter klarede opgaven en gang mere. Dette kunne være undgået med en mere løs tidsgrænse, men illustrerer tydeligt de førnævnte problemer.

7.6.3 Konklusion

Vi fik de resultater vi forventede, men med den tunge kasse blev transportopgaven ikke løst så flydende, som det kunne være ønsket. Spørgsmålet er om det ikke skyldes, at to og tre robotter er i underkanten for at løse en opgave, der kræver kraften fra to robotter.

Det kunne være interessant at se, hvorledes fire robotter havde klaret det. Tiden det tager for en robot at komme i kontakt med kassen, kan nedsættes jo flere robotter, der benyttes, hvilket har forholdsvis stor betydning for en let kasse. Hvad angår robotternes adfærd virker den kassesøgende adfærd lidt for aggressiv og den repositionerende adfærd for ufleksibel. Dette ændrer dog ikke ved at transportopgaven blev løst af både to og tre robotter for den tunge kasse. Samlet set løste robotterne i 86 procent af kørslerne transportopgaven.

7.7 Konklusion på afprøvning

De tre scenarier har belyst forskellige sammenhænge mellem kassens størrelse, vægt og startplacering samt robotternes antal og startplaceringer. De forskellige opstillede hypoteser angående disse sammenhænge blev bekræftet. Så man kan konkludere, at jo flere robotter og større kasse, des større er sandsynligheden for, at transportopgaven løses hurtigere og mere robust. Løsningstiden afhænger af kassens placering i arenaen; en placering til højre for målområdet vil gøre løsningstiden længere, mens en placering i midten eller til venstre for målområdet vil gøre løsningstiden kortere. Løsningstiden afhænger også af robotternes startplaceringer, specielt hvis kassen er placeret midt i arenaen.

Den tunge kasse viste sig at synliggøre visse problemer med robotternes adfærd. Specielt adfærden, der omplacerer robotten i forhold til kassen, viste sig at være lidt for ufleksibel i forbindelse med andre robotter og arenaens vægge. Robotterne løste dog dette problem med en højst overraskende rygskubbende adfærd både i situationer med en let og tung kasse.

De forskellige scenarier sandsynliggør i høj grad, at den opstillede kontrolstruktur fungerer efter hensigten og lader flere robotter løse et fælles transportproblem uden at kommunikere indbyrdes.

8 Mulige udvidelser

Afprøvningen påviste nogle uhensigtsmæssigheder ved enkelte dele af robotternes adfærd. Den statiske adfærd, der omplacerer en robot i forhold til kassen skal nok begrænses i omfang, således at den ikke tager så lang tid og bruger ikke så meget plads. En ting, der ikke tages højde for i det nuværende system er en sandsynlighedsvurdering af sensorernes aflæsninger. Her kunne en statistisk model, som Kalmann filtrering, benyttes som ramme til at foretage denne vurdering.

Hvis man ønskede at indføre en form for læring i systemet, kunne det gøres ved at robotterne skulle indse, at kassen skulle hen til målområdet. Her kunne "reinforcement learning", hvor robotterne fik point, når kassen blev flyttet korrekt, med fordel benyttes.

Hele grundstrukturen i det udviklede program åbner muligheden for helt andre sekventielle opgaver. Man kunne forestille sig et rødt og et blåt målområde en lille bold og to hold af robotter. Det ene hold skulle skubbe bolden over i det blå målområde og omvendt. Det er en simpel form for robotfodbold, der kun kræver få ændringer i de simulerede sensorer for kasse- og målområdedetekteringen. Samt en eventuel

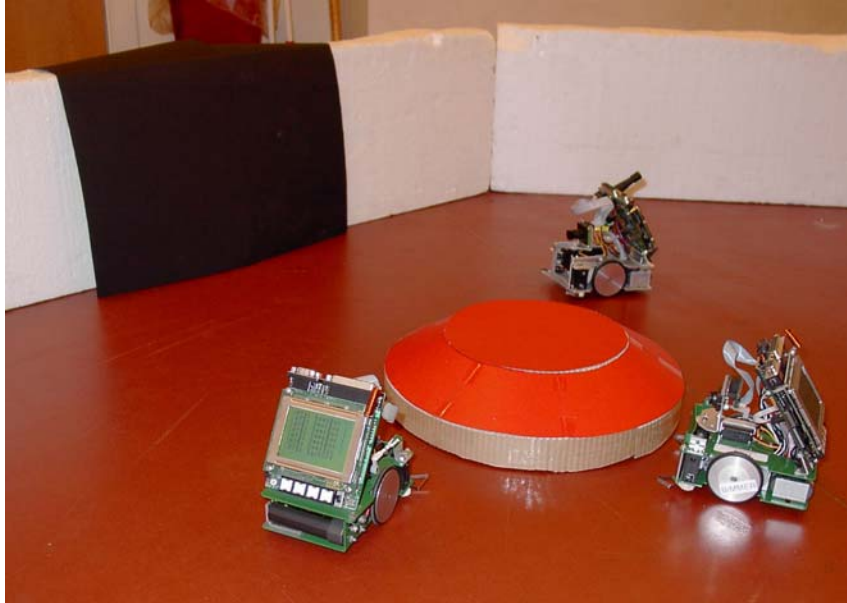
ændring i den søgende adfærd, der måske sørger for at robotterne holder sig tæt ved deres eget målområde!

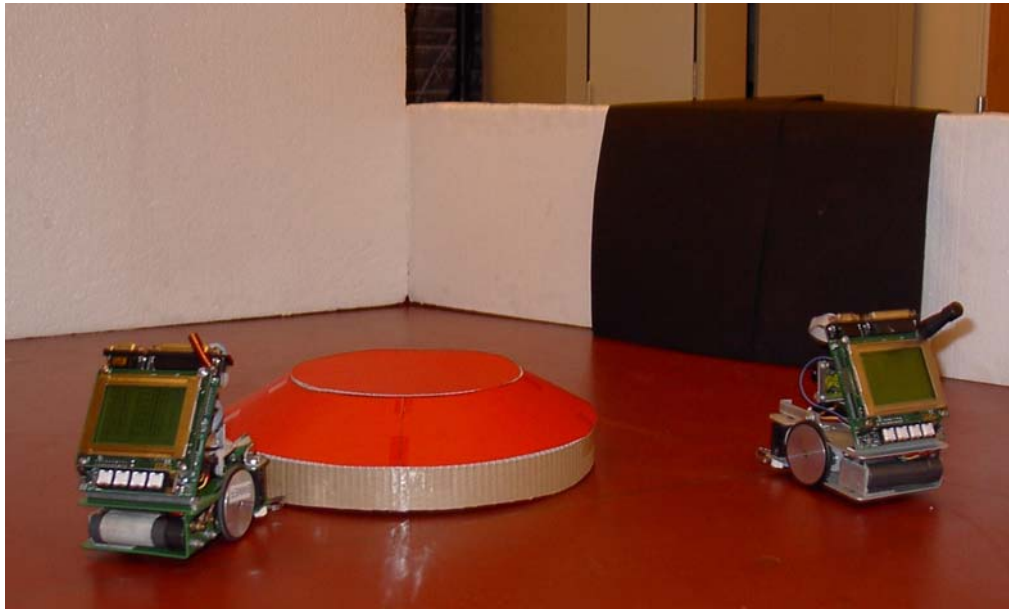
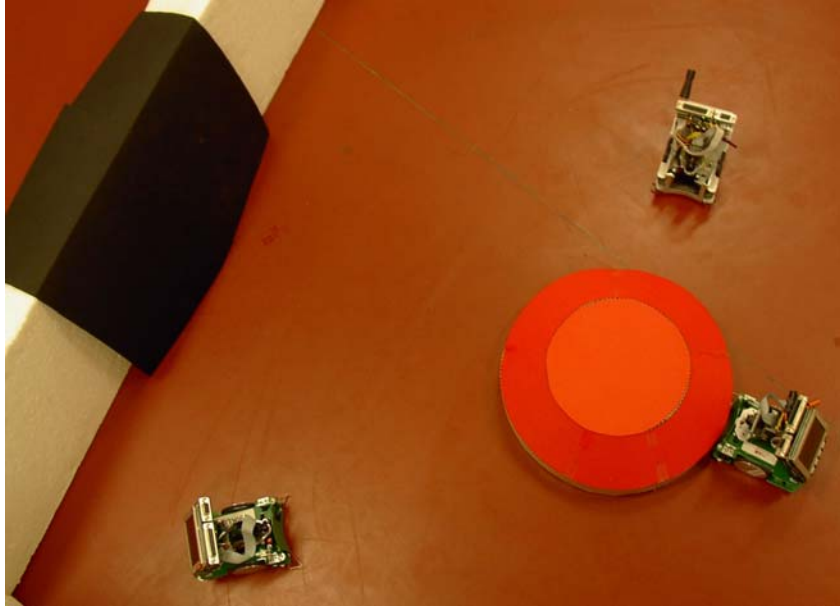
A Litteratur

Litteratur

- [1] Ronald C. Kube og Hong Zhang. Collective robotic intelligence. pages 460–468, 1992.
- [2] Ronald C. Kube og Hong Zhang. Collective robotics: from social insects to robots. *Adaptive Behaviour*, 1994, 2(2):189–218, 1992.
- [3] C. Kube og H. Zhang. Stagnation recovery behaviours for collective robotics, 1994.
- [4] C. Kube og H. Zhang. The use of perceptual cues in multi-robot box-pushing, 1996.
- [5] C. Kube. Collective robotics: From local perception to global action, 1997.
- [6] Ronald C. Kube og Hong Zhang. Task modelling in collective robotics. *Auton. Robots*, 4:53–72, 1997.
- [7] Ronald C. Kube og Eric Bonabeau. Cooperative transport by ants and robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 30(Issue 1/2):85–101, 2000. ISSN: 0921-8890.
- [8] Guy Theraulaz Eric Bonabeau, Marco Dorigo. *Swarm Intelligence - From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, 1999.
- [9] Rolf Pfeifer og Christian Scheier. *Understanding Intelligence*. The MIT Press, 1999.

B Billeder fra afprøvningen





C Kørsler

C.1 Scenarium 1: Eksperimenter med kassestørrelse

Id	Kasse-vægt	Kasse-størrelse	Kasse-position	Antal robotter	Robot-placering	Kontakt (sek)	Kontakt-Mål (sek)	Mål (sek)
1.1	Tung	Lille	7	3	1, 1, 1	30	30	60
1.2	Tung	Lille	7	3	1, 1, 1	33	+180	+180
1.3	Tung	Lille	7	3	1, 2, 6	25	120	145
1.4	Tung	Lille	7	3	1, 2, 6	35	130	165
1.5	Tung	Lille	7	3	1, 3, 5	53	87	140
1.6	Tung	Lille	7	3	1, 3, 5	34	145	179
1.7	Tung	Stor	7	3	1, 1, 1	20	15	35
1.8	Tung	Stor	7	3	1, 1, 1	24	69	93
1.9	Tung	Stor	7	3	1, 2, 6	36	106	142
1.10	Tung	Stor	7	3	1, 2, 6	26	116	142
1.11	Tung	Stor	7	3	1, 3, 5	62	116	178
1.12	Tung	Stor	7	3	1, 3, 5	95	68	163

C.2 Scenarium 2: Eksperimenter med startplaceringer, kasse og målområde

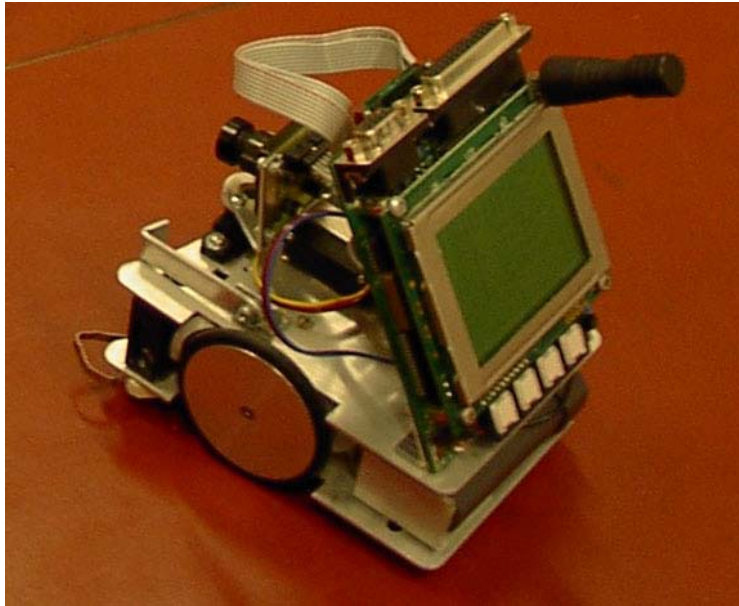
Id	Kasse-vægt	Kasse-størrelse	Kasse-position	Antal robotter	Robot-placering	Kontakt (sek)	Kontakt-Mål (sek)	Mål (sek)
2.1	Let	Lille	1	3	4, 4, 4	29	77	106
2.2	Let	Lille	1	3	4, 4, 4	23	79	102
2.3	Let	Lille	1	3	2, 4, 6	25	97	122
2.4	Let	Lille	1	3	2, 4, 6	59	103	162
2.5	Let	Lille	2	3	5, 5, 5	26	46	72
2.6	Let	Lille	2	3	5, 5, 5	50	40	90
2.7	Let	Lille	2	3	1, 3, 5	37	45	82
2.8	Let	Lille	2	3	1, 3, 5	32	16	48
2.9	Let	Lille	3	3	6, 6, 6	33	38	71
2.10	Let	Lille	3	3	6, 6, 6	25	69	94
2.11	Let	Lille	3	3	2, 4, 6	28	12	40
2.12	Let	Lille	3	3	2, 4, 6	32	7	39
2.13	Let	Lille	5	3	2, 2, 2	35	120	155
2.14	Let	Lille	5	3	2, 2, 2	95	+180	+180
2.15	Let	Lille	5	3	2, 4, 6	40	99	139
2.16	Let	Lille	5	3	2, 4, 6	28	84	112
2.17	Let	Lille	6	3	3, 3, 3	37	78	115
2.18	Let	Lille	6	3	3, 3, 3	31	78	109
2.19	Let	Lille	6	3	1, 3, 5	15	75	90
2.20	Let	Lille	6	3	1, 3, 5	28	80	108
2.21	Let	Lille	7	3	4, 4, 4	21	95	116
2.22	Let	Lille	7	3	4, 4, 4	19	+180	+180
2.23	Let	Lille	7	3	5, 5, 5	46	21	67
2.24	Let	Lille	7	3	5, 5, 5	35	40	75
2.25	Let	Lille	7	3	1, 3, 5	72	28	100
2.26	Let	Lille	7	3	1, 3, 5	25	32	57

C.3 Scenarium 3: Eksperimenter med antal robotter og kassevægt

Id	Kassevægt	Kassestørrelse	Kasseposition	Antal robotter	Robotplacering	Kontakt (sek)	Kontakt-Mål (sek)	Mål (sek)
3.1	Let	Lille	7	3	1	50	10	60
3.2	Let	Lille	7	3	1	35	15	50
3.3	Let	Lille	7	3	3	31	87	118
3.4	Let	Lille	7	3	3	68	107	175
3.5	Let	Lille	7	3	5	45	23	68
3.6	Let	Lille	7	3	5	30	40	70
3.7	Let	Lille	7	3	1, 1	37	58	95
3.8	Let	Lille	7	3	1, 1	21	9	30
3.9	Let	Lille	7	3	2, 6	31	35	66
3.10	Let	Lille	7	3	2, 6	20	40	60
3.11	Let	Lille	7	3	3, 5	50	30	80
3.12	Let	Lille	7	3	3, 5	32	85	117
3.13	Let	Lille	7	3	1, 1, 1	27	15	42
3.14	Let	Lille	7	3	1, 1, 1	22	11	33
3.15	Let	Lille	7	3	2, 4, 6	43	32	75
3.16	Let	Lille	7	3	2, 4, 6	25	49	74
3.17	Let	Lille	7	3	3, 4, 5	17	39	56
3.18	Let	Lille	7	3	3, 4, 5	17	28	45
3.19	Tung	Lille	7	3	1, 1	25	21	46
3.20	Tung	Lille	7	3	1, 1	37	+180	+180
3.21	Tung	Lille	7	3	2, 6	22	+180	+180
3.22	Tung	Lille	7	3	2, 6	55	+180	+180
3.23	Tung	Lille	7	3	3, 5	41	92	133
3.24	Tung	Lille	7	3	3, 5	47	+180	+180
3.25	Tung	Lille	7	3	1, 1, 1	20	+180	+180
3.26	Tung	Lille	7	3	1, 1, 1	21	144	165
3.27	Tung	Lille	7	3	2, 4, 6	25	77	102
3.28	Tung	Lille	7	3	2, 4, 6	25	98	123
3.29	Tung	Lille	7	3	3, 4, 5	68	+180	+180
3.30	Tung	Lille	7	3	3, 4, 5	20	145	165

D Specifikation af Eyebots

Disse oplysninger er taget fra:
<http://www.ee.uwa.edu.au/braunl/eyebot/>.



Main Features

- 25MHz 32bit Controller (Motorola 68332)
- 1MB RAM
- 512KB ROM (for system + user programs!)
- 2 motor drivers
- Background debugging module
- 1 parallel port
- 2 serial ports
- 8 digital inputs
- 8 digital outputs
- 8 analog inputs
- 16 timing processor I/Os (programmable as input or output)
- Single compact PCB, almost same size as old EyeBot
- Interface for color and grayscale camera allows real time on-board image processing (depending on image size and complexity of operation)
- Large graphics LCD (128x64 pixels)
- 4 input buttons
- Reset button, power switch
- Speaker for audio output
- Microphone for audio input
- Battery level indication

Extensions to previous version

- Motor drivers for 2 DC motors included in board (L293D)
- Background debugger BDM circuit included in board
- "Plug-and-play" connectors for motors, sensors, camera and serial port 6 infrared sensors, 2 bumper sensors, 6 free analog inputs
- No special download cable required: 9pin RS232 extension cable
- Wireless communication system integrated

Connectors for Actuators and Sensors

- Digital camera
- 2 DC motors with encoders
- 12 servos
- 6 infrared-sensors (or 6 free digital inputs)
- 2 bumpers (or 2 free digital inputs)
- 6 free analog inputs

Options

- Digital color camera (CMOS), 80x60 pixels, 24bit color
- Wireless communication modul for EyeBot and PC

Electrical Characteristics

- Voltage requirement
 - required: between 7 V and 12 V DC
 - normally: 7.2 V
- Power consumption
 - EyeBot controller only: 235 mA
 - EyeBot controller with EyeCam CMOS camera: 270 mA
- Runtime with 1350 mAh, 7.2 V Li-Ion rechargeable battery (approx.)
 - 4 - 5 hours EyeBot controller only
 - 1 - 2 hours EyeBot controller with SoccerBot robot and camera, constantly driving and sensing, depending on program and speed
- Power limitation
 - total power limit is 3 A
 - a 3 A fuse prohibits damage through higher current or wrong polarity
 - can drive servos up to 3 A each
 - can drive DC motors up to 1 A each

Physical Characteristics

- EyeBot controller
 - size: 10.6 cm x 10.0 cm x 2.8 cm (width x height x depth)
 - weight: 190 g
- EyeCam camera
 - size: 3.0 cm x 3.4 cm x 3.2 cm
 - weight: 25 g
- Battery, Li-Ion, rechargeable
 - size: 6.9 cm x 3.8 cm x 1.9 cm
 - weight: 90 g
- SoccerBot mobile robot (incl. battery and camera)
 - size: 12.5 cm x 9.0 cm x 15.0 cm
 - weight: 915 g