



CHALMERS

Petra Ahnell, Tobias Ekdahl, Louise Gertz,
Johannes Lindgren, Martin Marcusson, Torgeir Nordgård

Sträck ut din hand till cobots

Styrning av kollaborativa robotar genom rörelser av arm och hand



Kandidatarbete inom Automation och mekatronik

Examinator: Kristofer Bengtsson

Handledare: Oskar Wigström

Kurskod: EENX15-18-81

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige - 14 maj 2018

Förord

Denna rapport behandlar ett kandidatarbete skrivet på Chalmers tekniska högskola, institutionen för Elektroteknik. Projektet utförs i samarbete med Volvo Trucks under vårterminen 2018.

Vi vill börja med att tacka vår examinator Kristofer Bengtsson för hans engagemang och hjälpsamhet under projektets gång.

Ett stort tack till vår handledare Oskar Wigström som med ett stort engagemang har stöttat och väglett projektgruppen. Oskar har med sin rådgivning hjälpt oss att reda ut allt trassel så vi återigen hittat den röda tråden.

Vi vill också tacka Christian Larsen på Chalmers som bidrog med sin expertis inom robotstyrning. Tack till Ashfaq Hussain på Chalmers som vi konsulterat med frågor om ROS.

Sist men inte minst så vill vi tacka alla dem som deltagit i våra användartester.

Abstract

The study investigates how collaboration between humans and robots should be designed to make the interaction natural to the user. The main objective of the study was to examine how to design a handover of an object, as well as a function controlling the robot using movements of the user's arm. To do this a robot, a sensor armband, a gripper and a motion camera was used. The study presents different strategies for how to perform handovers and robot control using the arm. The different strategies are then analyzed in order to see which functions can be used to achieve the goal as well as possible.

The user tests that have been done to compare the different strategies show that the most natural handover from robot to human was when the user could pull or pry the object from the robot. When torque or force was applied at the end effector of the robot it lets go of said object. When the user hands over an object to the robot, the method that was perceived as the most natural was a method where the rotation of the users arm in a handover was recorded. At a certain level of rotation, the robot detects the human's intention of performing a handover. The results from the user tests show that the handovers that resemble a handover between two people the most, without any additional elements or movements, were perceived as the most natural and effortless to perform.

For the movement and gesture based robot control four control methods, with both unique and shared functions, were developed. These were analyzed with regard to performance, ergonomics and safety. The control was perceived as more natural when more degrees of freedom of the arm was imitated. If the imitation of any of the degrees of freedom fail, the control might be perceived as significantly worse and should therefore be neglected. Moreover, a control method where small movements and brief gestures were used to perform large position and orientation movements was considered to be the most ergonomic. For the users to experience that they are in control it is necessary to be able to stop the robot at any time without delay. In the safety aspect it is important that the robot does not perform any motions that can be perceived as unpredictable.

Sammandrag

I studien undersöks hur samarbetet mellan människa och robot bör utformas så att det upplevs naturligt för användaren. Studiens huvudsakliga mål var att undersöka hur överlämning av föremål, samt hur rörelse- och gestbaserad styrning av en robot, bör utformas. För att göra detta används en uppsättning hårdvara och sensorer i form av en robotarm, ett sensorarmband, en gripklo samt en rörelsekamera. Den erhållna datan används sedan för att skapa en så naturlig interaktion som möjligt mellan människa och robot. Studien presenterar olika strategier för överlämningar och styrning av roboten. De olika strategierna analyseras sedan för att se vilka funktioner som kan användas för att uppnå målsättningen så väl som möjligt.

Användartester utfördes för att jämföra de olika strategierna. Dessa visar att den form av överlämning från robot till människa som upplevdes mest naturlig var när användaren kunde dra eller bända föremålet för att roboten skulle släppa. Vid överlämning från människa till robot var den metod som upplevdes bäst den där armens vridning vid överlämning registrerades. Vid ett tröskelvärde på vridning känner roboten av människans intention att utföra en överlämning. Resultatet från användartesten visar att de överlämningar som mest liknar en överlämning mellan två människor, utan extra delmoment eller rörelser, upplevdes som de mest naturliga och enkla att utföra.

För rörelse- och gestbaserad robotstyrning utvecklades fyra styrningsmetoder med både unika och gemensamma funktioner. Dessa analyserades med avseende på prestanda, ergonomi och säkerhet. Ju fler av armens frihetsgrader som imiteras desto naturligare upplevs styrningen. Om imitationen av någon frihetsgrad inte fungerar, kan dock upplevelsen förvärras till den grad att frihetsgraden istället bör försummas vid styrningen. Vidare ansågs en styrning där små rörelser och kortvariga gester användes för att utföra stora positions- och orienteringsförändringar som mest ergonomisk. För att användarna ska uppleva att de har kontroll under styrningen av roboten är det önskvärt att kunna avbryta den direkt utan fördröjning. Inom säkerhetsaspekten är det viktigt att roboten inte utför rörelser som upplevs oberäkneliga.

Terminologi

- **Cobot, kollaborativ robot** - Robot som är utvecklad för att jobba i nära samarbete med människor, dessa robotar är inte skilda från människan utan jobbar vid montörens sida.
- **EMG** - Elektromyografi är en teknik som registrerar musklernas elektriska aktivitet.
- **Gripklon** - Syftar på gripklon 2-Finger Adaptive Robot Gripper tillverkad av Robotiq.
- **IMU** - Inertial measurement unit är ett verktyg som mäter acceleration, vinkelhastighet och magnetfält.
- **Myoarmband** - Syftar på Myo Gesture Control Armband, ett armband med EMG- och IMU-sensorer tillverkad av Thalmic Labs.
- **Nod** - I ROS används noder vilket är processer som utför beräkningar.
- **Roboten, robotarmen** - Syftar på den kollaborativa lättviktsroboten LBR iiwa 7, utvecklad av företaget KUKA.
- **ROS** - Robot operating system är en mellanprogramvara för styrning och simulering av robotar.
- **Rörelsekameran** - Syftar på rörelsekameran Xtion Pro Live tillverkad av Asus som kan detektera människors rörelser.
- **Sunrise Workbench** - Sunrise Workbench är KUKAs systemprogramvara för styrning av deras produkter.
- **Topic** - Noderna i ROS kommunicerar med varandra genom olika kanaler, så kallade topics.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Mål	2
1.3	Problemformulering	2
1.4	Avgränsningar	3
2	Teori	5
2.1	Överlämning mellan människor	5
2.2	Ergonomi	6
2.3	Orientering av stel kropp i tre dimensioner	6
3	Hård- och mjukvara	9
3.1	Robot Operating System	9
3.2	Sensorarmband	9
3.3	Kollaborativ robot	10
3.4	Gripklo	11
3.5	Rörelsedetektering	11
4	Utformning av överlämning	13
4.1	Överlämning människa till robot	14

4.2	Överlämning robot till människa.	14
4.3	Systemarkitektur vid överlämningar	16
5	Utformning av armkontrollerad robotstyrning	17
5.1	Armimitation	18
5.2	Armimitation med gripklo	20
5.3	Armjustering	21
5.4	Systemarkitektur vid armkontrollerad robotstyrning	22
6	Användartester av överlämning	23
6.1	Användartest 1	23
6.2	Användartest 2	25
7	Tester av armkontrollerad robotstyrning	29
7.1	Användartest av armkontrollerad robotstyrning	29
7.1.1	Prestanda för armkontrollerad robotstyrning	30
7.1.2	Säkerhet för armkontrollerad robotstyrning	31
7.1.3	Ergonomi för armkontrollerad robotstyrning	32
7.2	Test av utrustning	33
8	Cobots ur ett etiskt perspektiv	37
8.1	Etisk bakgrund	37

8.2	Etisk analys av resultat	38
9	Diskussion	41
9.1	Överlämning	41
9.2	Armkontrollerad robotstyrning	43
9.2.1	Prestanda	44
9.2.2	Säkerhet	45
9.2.3	Ergonomi	46
10	Slutsats	49
A	Sammanställning av användartest 1	I
B	Sammanställning av användartest 2	I
C	Sammanställning av användartest för armkontrollerad robotstyrning	I
D	Guide till uppstart av systemet	I

1 Inledning

Idag sker det en snabb utveckling av autonoma robotar. I takt med denna utveckling ökar även antalet användningsområden för robotar, ett exempel är montering i fabrik. Montering i tillverkningsindustrin är ett område som hittills haft låg automationsnivå. Detta beror på att det ofta ska produceras många olika varianter av en produkt, och då är människor mer flexibla än robotar [1].

Att ha en helt manuell monteringslina är dock inte optimalt. Icke-värdeskapande uppgifter som att hämta och lämna verktyg eller komponenter tar onödig tid från montören. Eftersom dessa aktiviteter inte kräver en människas flexibilitet skulle de kunna utföras av en robot. En robot skulle även kunna hjälpa montören med slitsamma eller farliga uppgifter. På så vis skulle produktionen bli mer effektiv, och montörens arbete skulle bli mer ergonomiskt.

Robotar som är utvecklade för att jobba i nära samarbete med människor kallas för cobots, kollaborativa robotar. De är så säkra att människor kan arbeta sida vid sida med dem, utan avspärrningar. Ytterligare en fördel med cobots, jämfört med andra industrirobotar, är att de är billiga, har låg vikt och är enkla att programmera [2]. Förutom att göra produktionen mer effektiv och montörens arbete säkrare, kan potentiellt produktkvaliteten höjas.

Dessa fördelar gör att allt fler företag ser möjligheter i ett samarbete mellan människa och robot [2]. Ett av företagen som visar intresse av att införa cobots i produktionslinan är Volvo Trucks [3]. Det förutspås en stor produktvariation i och med införandet av elektriska motorer och hybrider. Enligt Volvo Trucks är det lättare att undvika fel om det finns möjlighet ta hjälp av robotar som är programmerade med information om vilka delar som ska till varje specifik lastbil [3]. Detta blir allt viktigare när antalet olika varianter ökar. I dagsläget ser företaget på cobots som en bättre lösning än att helt automatisera produktionslinan. Vid en helautomatiserad lösning kan ett fel i en robot leda till stopp i hela produktionsflödet. Med cobots kan däremot människan kompensera för felet tills problemet är löst. Detta ger mer flexibilitet vid oförutsedda händelser.

Cobots skulle således bidra till en mer effektiv produktion, men för att detta ska vara realiserbart måste människa och robot kunna jobba sida vid sida. Två forskare på ämnet skriver: "Det finns många utmaningar gällande utformning av algoritmer och design när robotarna går in i den oförutsägbara, människocentrerade och tidskritiska miljön för slutmontering" [4]. Utmaningarna är inte enbart tekniska utan grundas till en stor del i förståelse av det mänskliga beteendet. En otillräcklig behandling av mänsklig påverkan i systemet är ofta en grundläggande orsak till misslyckande vid teknikutveckling [5]. Människan är oförutsägbar och talar ett annat språk än roboten, därför behöver fungerande metoder för kommunikation mellan robot och människa utvecklas.

1.1 Syfte

I den här studien undersöks möjligheterna till interaktion med och styrning av en kollaborativ robot med hjälp av arm- och handrörelser. Specifikt undersöks två olika situationer.

Den första situationen är när ett föremål ska överlämnas från människa till robot eller tvärtom, och den andra är när roboten ska styras kontinuerligt. Fokus ligger på hur samarbetet kan ske på ett sätt som känns naturligt för användaren. Studien är ett underlag som kan användas och utvecklas inom olika områden vad gäller samarbete mellan människa och robot.

1.2 Mål

Målet för studien är utveckling och utvärdering av strategier för hur interaktion mellan robot och människa kan se ut. Interaktionen sker genom att människan gör olika rörelser och gester med armen och handen. Dessa rörelser och gester översätts till kommandon som skickas till roboten. Roboten signalerar till människan när den är redo att utföra en uppgift. Det övergripande målet för all interaktion med roboten är att det ska kännas naturligt för människan; att samarbetet med roboten ska vara så likt som möjligt att samarbeta med en annan person. De kriterier som ska uppfyllas är att roboten ska kunna:

- Överlämna ett föremål till användaren.
 - Roboten ska detektera när människan har fått grepp om föremålet, och då släppa det.
 - Människan ska känna sig trygg i att föremålet inte kommer att tappas under överlämningen.
- Ta emot ett föremål från användaren.
 - Roboten ska förmedla till människan när den är redo att ta emot föremålet.
- Följa och efterlikna människans arm- och handrörelser, så att människan kan använda robotarmen som sin egen för att utföra en rörelse.
 - Människan ska kunna styra positionen hos robotens slutled.
 - Människan ska kunna styra orienteringen hos robotens slutled.

1.3 Problemformulering

Roboten måste förstå vad människan vill och människan måste förstå vad roboten kommer att göra. Detta problem har delats upp i följande tre delproblem: detektering av människans intention, tolkning av input från sensorer och utförande av avsedd handling.

Det första delproblemet, detektering av människans intention, handlar om på vilket sätt människan och roboten samverkar. För att en människa och en robot ska kunna samarbeta med flyt krävs det att båda parterna förstår den andras intentioner, precis som när två människor samarbetar [6]. En central del är att förmedla till roboten när människan är redo att ta emot ett föremål, samt att lämna över det. Fokus ligger på rörelsebaserade kommandon. För att välja lämpliga rörelser som är naturliga att använda studeras människans beteende. Studien utreder även på vilket sätt människor signalerar sina intentioner

till varandra och hur detta kan appliceras på en robot. Vad som känns naturligt är en högst subjektiv upplevelse. Därför presenteras användarstudier där de olika metoderna för överlämning och robotstyrning utvärderas.

Nästa delproblem tar upp hur människans rörelser kan översättas till kommandon som roboten tar emot. För att detta ska kunna göras måste människans rörelser beskrivas digitalt. Detta görs med hjälp av sensorer. Det är viktigt att sensorerna kan samla in den information som behövs för att identifiera människans arm- och handrörelser med säkerhet. Den här rapporten presenterar en uppsättning sensorer som uppfyller detta.

Det sista delproblemet, utförande av avsedd handling, tar vid när roboten tolkat människans intention och ska utföra handlingen. Roboten är programmerad så att en passande rörelse utförs vid rätt kommando. Här ligger fokus vid styrning av roboten och design av rörelsen som utförs. Rörelsen är utformad på ett sådant sätt att samarbetet mellan människa och robot är effektivt och naturligt. Om roboten rör sig för snabbt eller har ett oförutsägbart rörelsemönster kan människan känna sig hotad eller uppleva att den saknar kontroll över situationen. I så fall finns det risk för att människan betar sig oförutsägbart, vilket kan förvärra situationen ytterligare. Detta skulle varken resultera i ett effektivt eller naturligt samarbete.

1.4 Avgränsningar

Studien är en fallstudie som undersöker hur samarbete mellan en människa och en kollaborativ robot kan se ut. De fall som studeras är överlämning av ett föremål mellan människa och robot samt hur roboten kan styras av människans rörelser. Fokus ligger på situationen då en montör assisteras av en robot vid montering. Fallen har valts med generaliserbarhet i åtanke. Resultaten kan därför tänkas vara applicerbar inom andra områden där människa och robot samverkar.

Roboten som används i systemet är en industriell kollaborativ robot av modell LBR iiwa. Den befinner sig i en testmiljö på Chalmers. Enkla säkerhetsfunktioner används, som att det krävs ett aktiverat "dödmansgrepp" för att köra roboten. Människan kommunicerar med roboten genom olika arm- och handrörelser. För att detektera dessa används ett sensorarmband, en rörelsekamera samt robotens vridmoment-sensorer.

2 Teori

Under detta kapitel redovisas den teori som studien bygger på. Detta innefattar överlämning mellan människor, ergonomi och orientering av stel kropp i tre dimensioner. Dessa teoretiska grundstenar var studiens utgångspunkt och användes vid utformning av de strategier och metoder som utvecklades.

2.1 Överlämning mellan människor

För att kollaborativa robotar ska kunna användas i stor skala krävs det att även människor som inte är specialister med expertkunnande ska kunna interagera med och styra en sådan robot. Områden där ett naturligt samarbete mellan människa och robot är viktigt finns inte bara inom produktion, utan även inom vården eller i hemmet där roboten kan fungera som en assistent. Varken montörer, vårdpersonal eller majoriteten av människor brukar vara utbildade inom programmering och styrning av robotar. Att lära sig ett sådant system kan vara komplicerat och tidskrävande. För att kollaborativa robotar ska nå en stor marknadsgrupp är det därför lämpligt att utforma en metod som även icke-expert kan använda.

Människor oavsett utbildning och tidigare erfarenheter brukar vara bra på att kommunicera och interagera med andra människor med hjälp av språk och icke-verbala tecken. Därav kan mycket vinnas på att använda den befintliga kommunikationsförmågan som människor besitter. Detta kan utnyttjas genom att bygga robotar som inte kräver att människan ska anpassa sig efter roboten, utan istället styrs av kommandon som faller naturligt för människan [7].

Kunskap om hur människor överlämnar föremål till varandra kan användas i vägledande ändamål för att utforma en robot-människa överlämning som känns naturlig. I en studie utförd i samarbete mellan Università Degli Studi di Parma och Carnegie Mellon University iakttas överlämningar mellan människor [8]. Vid överlämningar förlitar människan sig till en stor del på situationens sammanhang samt kommunikationstecken från den andra individen. Kommunikationstecken kan vara verbala eller ickeverbala och används för att ytterligare informera om vad, när och hur överlämningen ska ske. Ofta är avsikten att göra en överlämning fastställd långt tidigare än den faktiska överlämningen sker. Studien visade att intentionen att göra en överlämning kunde förutses tidigare i 89 procent av fallen. Därmed är det mycket viktigt att roboten kan signalera till människan huruvida den är redo för överlämning eller inte.

För att kommunicera att överlämningen kunde genomföras användes olika kommunikationstecken. Det var vanligt att givaren sträckte ut handen med föremålet i mottagarens riktning, typiskt gjordes denna rörelse endast med en hand fastän föremålet ibland bars med två händer innan överlämningen. Genom att släppa ena handen strax innan överlämningstillfället signalerade givaren att överlämningen snart skulle ske. Mottagaren signalerade ofta att den var redo genom att sträcka fram handen mot givaren och stänga handen och öppna den igen i en greppande rörelse.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att människor till en stor del förlitar sig på situationens sammanhang, men en cobot kan inte läsa en situations specifika sammanhang. För att roboten ska förstå människans intention måste nytta dras av de kommunikationstecken och kroppsspråk som människan uttrycker. Människan förstår däremot sammanhang bättre men måste ändå få kommunikationstecken från roboten för att veta när roboten är redo för överlämning, samt förstå hur roboten reagerar vid överlämning.

2.2 Ergonomi

För att undvika skador vid arbete med hand och arm måste ergonomi tas i åtanke. Risk för belastnings- och utslitningsskador i hand, arm, nacke eller skuldra kan undersökas med hjälp av verktyget HARM [9]. Enligt detta verktyg är rörelser som är viktiga att undvika till exempel att ha armen långt framför eller långt utsträckt åt sidan från bälten, att ha axlarna högt uppdagna, att ha armen maximalt utsträckt eller böjd, att vrida underarmen för mycket eller att böja handen för långt i någon av möjliga riktningar. Rörelser med armen bör även begränsas till en vinkel mellan överarm och kropp på max 45 grader [10]. Snabba handrörelser och vibrationer ger också ökad risk för besvär i armar och händer. För att minska risk för skador kan man, förutom att ändra på hur rörelserna utförs, till exempel ta korta pauser, skapa mer variation i rörelserna eller utvidga arbetet till att omfatta andra uppgifter också.

2.3 Orientering av stel kropp i tre dimensioner

Det finns två populära sätt att beskriva orienteringen hos en stel kropp i tre dimensioner och det är kvaternioner och eulervinklar. Kvaternioner är en utvidgning av det komplexa talplanet till fyra dimensioner med en reell och tre imaginära axlar [11]. På samma sätt som att ett komplext tal kan skrivas som $x = a + bi$, skrivs en kvaternion som

$$q = w + \mathbf{i}x + \mathbf{j}y + \mathbf{k}z, \quad (1)$$

där w , x , y och z är reella tal och komponenterna $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ och $\mathbf{k}$ är enhetsvektorer [12]. Kvaternioner är även användbara för att beskriva rotationer. Givet två objekt, o_1 och o_2 , som är olika orienterade, kan alltså en kvaternion beskriva hur o_1 måste rotera för att få samma orientering som o_2 . Detta leder till att en orientering med kvaternion q_0 kan beskrivas relativt en annan orientering med kvaternion q_1 enligt

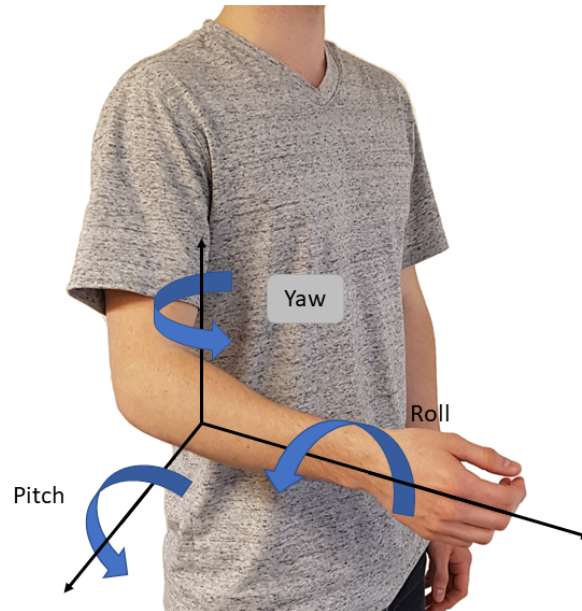
$$q_0 = q_1 \cdot q_{relativ}, \quad (2)$$

där $q_{relativ}$ är en kvaternion som representerar skillnaden mellan q_0 och q_1 enligt

$$q_{relativ} = q_1^{-1} \cdot q_0, \quad (3)$$

där q_1^{-1} är inversen av q_1 . Detta kan ses på som en linjär transformation och är användbart i situationer där ett objekt ska orientera sig efter ett annat objekt. I den här studien ska en robotarm orientera sig efter en människoarm.

Eulervinklar är en mer intuitiv beskrivning som består av tre vinklar, α, β, γ , där varje vinkel representerar en vridning kring en axel i ett koordinatsystem [13]. Vinklarna brukar också benämnas roll, pitch och yaw på engelska. Dessa finns utritade på armen i figur 1. Både eulervinklar och kvaternioner är vanliga att använda vid styrning av robotar, men då först och främst för orientering av verktyg.



Figur 1: Eulervinklarna utritade på armen.

3 Hård- och mjukvara

I detta kapitel presenteras den hård- och mjukvara som använts för att undersöka samarbetet mellan människa och robot.

3.1 Robot Operating System

Robot Operating System (ROS) är ett så kallat meta-operativsystem som är skapat för att samla kod och ramverk för olika robotar med målet att göra det enklare att utveckla avancerade robotapplikationer. ROS innehåller en mängd olika verktyg och bibliotek för implementation av många olika funktioner till olika robotar.

ROS är ett ramverk av processer som kallas noder, där dessa noder är individuella byggstenar. De utbyter information med varandra som skickas över namngivna informationsledningar som kallas topics. En nod kan publicera eller prenumerera på ett topic för att skicka eller ta emot information. För att noderna ska hitta varandra behövs en master-nod, som organiserar alla noder och vilka topics de publicerar och prenumererar på. Noder samlade i grupper kallas paket eller stacks. Till ROS finns det tusentals färdiga paket som är fria att använda för alla, en del paket är specifika för funktioner i ROS och en del är skapade för till exempel styrning av en specifik robot.

Funktionerna i ROS går att använda och implementera i flera programmeringsspråk som till exempel C++, Python och Lisp. Både C++ och Python används i studien. För mer information om ROS och dess funktioner, se ROS Wiki [14].

3.2 Sensorarmband

Bärbara sensorer finns i olika former, bland annat som armband för att kunna detektera arm- och handrörelser. För att göra detta kan sensorer för att avläsa musklernas aktivitet, samt armbandets positionering och orientering användas. Tekniken för att avläsa musklernas aktivitet kallas elektromyografi (EMG) och innebär att sensorerna som ligger mot huden mäter elektrisk aktivitet [15]. Den data som erhålls från sensorerna benämns här som EMG-data.

Sensorer för linjär acceleration, vinkelhastighet, och orientering kallas sammantaget för inertial measurement unit (IMU). Datan benämns här som IMU-data. Den mäts med hjälp av en treaxlig accelerometer, ett treaxligt gyroskop och en treaxlig magnetometer [16]. Orienteringen av armbandet benämns i termer av roll, pitch och yaw som finns utritade på en arm i figur 1.

Det sensorarmband som används är Myo Gesture Control Armband, i rapporten kallat Myoarmband. Armbandet är skapat av företaget Thalmic Labs och har sensorer för EMG- och IMU-data. Datan kan användas för att identifiera olika gester, och Myoarmbandet har några fördefinierade sådana som kan användas direkt. Dessa är att knyta näven, att spretna med fingrarna och att vinkla handen inåt eller utåt. För att kunna registrera gester

behöver armbandet sitta på användaren i cirka 5 minuter innan användning, en så kallad uppvärmningsperiod [17]. EMG-datan samplas med 200 Hz, motsvarande siffra för IMU-datan är 50 Hz.



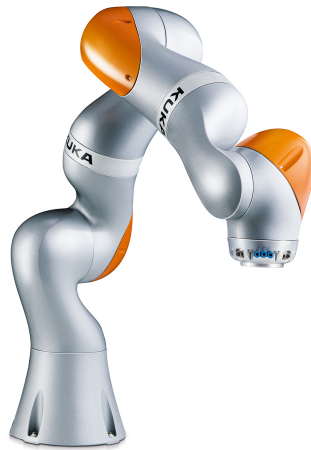
Figur 2: Myoarmband. Från [18], återgiven med tillstånd.

3.3 Kollaborativ robot

För att undersöka samarbete mellan robot och människa används en kollaborativ robot. Speciellt för cobots, till skillnad från vanliga industrirobotar, är att dessa inte behöver avskiljas från människor på grund av säkerhetsskäl [19].

Roboten är av modell LBR iiwa 7, tillverkad av företaget KUKA. Robotarmen har en längd på 1266 mm och en arbetsradie på 800 mm [20]. Den har 7 leder och kan hantera vikter på upp till 7 kg. Roboten ses i figur 3, där kan det ses hur lederna är placerade. På roboten kan olika verktyg, som en gripklo, monteras. På robotens slutled finns flera olika sorters uttag som gör att robotens interna kablage kan användas för kommunikation med verktyg. Roboten är utrustad med inbyggda vridmomentsensorer i alla leder, vilket kan användas för att beräkna kraften som verkar på robotarmens slutled. Dessa sensorer gör det möjligt att styra momentet i lederna med en noggrannhet på $\pm 2\%$ av det maximala moment som motorn i leden kan utveckla. Det finns även inbyggda positionssensorer i alla leder som mäter ledens vinkel. Dessa sensorer har en noggrannhet som gör att robotarmen kan nå en given position med en tolerans på ± 0.1 mm.

Momentsensorerna i roboten är placerade efter utväxlingen vilket gör att momentet som påverkar roboten externt kan mätas utan att momentet från motorerna påverkar. Detta gör kollisionsdetektering och gravitationskompensering med hjälp av momentsensorerna möjligt [21].



Figur 3: Roboten, KUKA iiwa 7. Från [22], återgiven med tillstånd.

3.4 Gripklo

Gripklor kan användas som verktyg på robotars slutled för att möjliggöra greppning av föremål. En Robotiq 2-Finger Adaptive Robot Gripper monterades på roboten. Gripklon har två fingrar, för vilka position, kraft och hastighet kan styras. Varje finger har två leder vilket gör att gripklon kan lyfta föremål med olika form och storlek [23]. Modellen som används har ett maximalt öppningsspänn på 85 mm, rekommenderad högsta nyttolast är 5 kg och gripkraften går att variera mellan 20 och 235 N.



Figur 4: Gripklon, Robotiq 2-Finger Adaptive Robot Gripper monterad på en robotarm. Från [24], återgiven med tillstånd.

3.5 Rörelsedetektering

För att kunna följa en människas handrörelser och sedan göra en liknande rörelse med roboten behöver handens position fångas tredimensionellt i realtid. En enhet som kan användas för att utföra detta är en rörelsekamera. Rörelsekameror använder djupsensorer

som belyser de objekt som ska mätas med infraröd laser i ett speciellt mönster. Mönstret som projiceras på objektet kan sedan analyseras och utifrån detta så kan avstånd till olika punkter beräknas [25].

Den rörelsekamera som används är tillverkad av företaget Asus och är av modell Xtion Pro Live som ses i figur 5. Rörelsekameran använder infraröda sensorer, adaptiv djupdetektering och färgidentifiering för att följa en persons rörelser. Den har även ljudsensorer, vilket ger möjlighet att integrera röst- och ljudkommandon. Kameran har en räckvidd på 0.8-3.5 m [25]. Rörelsekamerans precision avtar med avståndet. På en meters avstånd är den 5-15 mm och på två meters avstånd är den 5-25 mm. Behandlingen av den information som bildsensorerna tar upp sker i kameran, vilket har fördelen att datorns processor inte måste göra detta, dock innebär det att endast processad data och inte rådata kan erhållas [26].



Figur 5: Rörelsekameran, ASUS Xtion Pro Live.

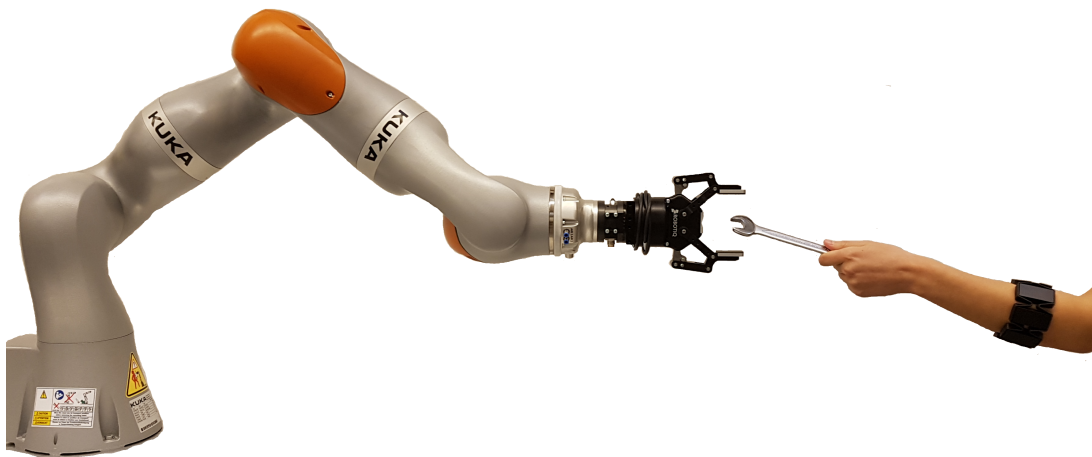
4 Utformning av överlämning

En naturlig och enkel överlämning sker utan knapptryckningar eller skrivna kommandon. Roboten ska förstå människans intention endast genom hens rörelser. Genom att utveckla flera olika överlämningsmetoder som använder armen eller handens gester kan det undersökas vilka som upplevs som mest naturliga och lättanvända. För att bli så naturliga som möjligt utformas de kommandon som används så likt människans naturliga kroppsspråk som möjligt. Som beskrivits i delkapitel 2.1 är fördelen med att utforma en överlämning som använder människans naturliga kommunikation att alla, även de utan speciell träning eller tekniskt kunnande, kan styra och kommunicera med roboten.

I delkapitel 2.1 konstaterades även vikten av att roboten kan kommunicera till människan när den är redo att ta emot eller ge ifrån sig ett föremål. Det finns två möjligheter för systemet att signalera när det är redo, haptisk återkoppling kan fås från Myoarmbandet i form av vibration, och roboten kan visa visuellt att den är redo genom att ställa sig i en förutbestämd överlämningsposition. Genom att ha två kommunikationsvägar säkerställs det att informationen når fram till användaren, och systemet blir mer robust.

Överlämningspositionen, se figur 6, är utformad så att den efterliknar hur människor sträcker sig efter ett föremål när de är redo att ta emot det, eller sträcker fram armen då de signalerar att de är redo att lämna över föremålet. Hänsyn har även tagits till de ergonomiska principer som beskrivs i delkapitel 2.2. Roboten sträcker sig mot användaren på ett sådant sätt att personen inte behöver lyfta underarmen i mer än en 45 graders vinkel från kroppen eller ha armen i en rakt utsträckt position.

Det är viktigt att systemet bara reagerar när användaren har för avsikt att överlämna eller ta emot ett föremål. De rörelser som används som kommandon kan förekomma i andra situationer när användaren har på sig armband. Om roboten då reagerar kan detta leda till att föremål tappas. För att undvika detta lyssnar systemet på Myoarmbandets pitchvärde, och reagerar bara då det är över ett visst tröskelvärde. Detta är en extra säkerhet som gör så att systemet endast lyssnar på input från Myoarmbandet eller robotens sensorer då användaren har armen lyft i överlämningsposition. Detta säkerställer att roboten inte registrerar falsk-positiva kommandon.

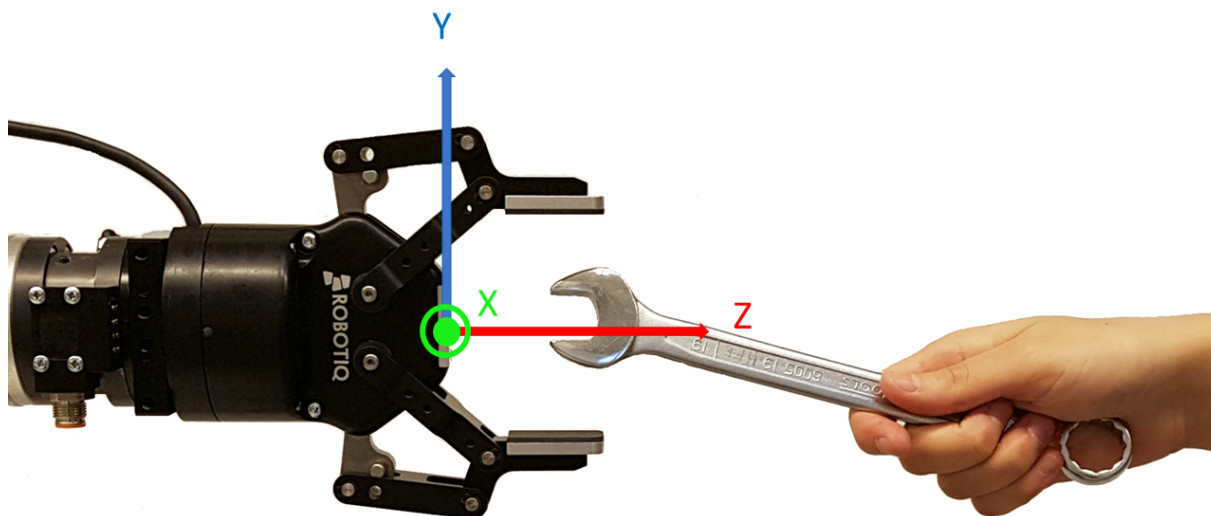


Figur 6: Roboten i överlämningsposition.

4.1 Överlämning människa till robot

Följande överlämningsmetoder föreslås för överlämning människa till robot:

- **Trycka ned** - Gripklon stängs då användaren trycker ned överlämningsföremålet i negativ y-riktning, se figur 7, mot gripklons undre platta. Kraften på gripklon registreras av robotens vridmomentssensorer. Momentet används för att beräkna storleken på kraften y-led. Att lägga vikt på gripklons undre platta liknas vid att lägga ett föremål i en annan persons hand.
- **Greppa** - Användaren klämmer tag kring överlämningsföremålet extra hårt i en rörelse som liknar en knuten näve. Myoarmbandet känner igen rörelsen och således stängs gripklon. Överlämningen är utformad så att människan gör samma rörelse som gripklon ska göra, det vill säga att greppa.
- **Roll** - Vid en mottagning av ett föremål lyfter människan upp armen och vrider handflatan uppåt. Denna rörelse kvantifieras av Myoarmbandets gyroskop. Då vridningen överstiger ett förbestämt tröskelvärde stängs gripklon. Eftersom alla människor vrider armen olika mycket måste funktionen kalibreras individuellt efter varje användare.



Figur 7: Gripklon med koordinataxlar.

4.2 Överlämning robot till människa.

Följande överlämningsmetoder föreslås för överlämning robot till människa:

- **Bända** - Gripklon öppnas då användaren bänder överlämningsföremålet. Robotens vridmomentsensorer registrerar ett vridmoment kring gripklons x-axel, se figur 7. Överlämningen utformades på detta sätt för att efterlikna det vridmoment som uppstår vid överlämning då användaren griper tag om föremålet som skall tas emot.
- **Dra** - Genom att dra i överlämningsföremålet rakt ut i z-led, se figur 7, så öppnas gripklon. Vridmomentet på robotens slutled registreras av robotens vridmomentsensorer och används till att beräkna den kraft i x-led som verkar på slutleden. Överlämningen är utformad på detta vis eftersom att dra i ett föremål som en person håller i är en indikation på att man vill ha det.
- **Dra eller bända** - Den här metoden är en kombination av metoderna *dra* och *bända*. Gripklon öppnas då vridmoment kring x-axeln eller kraft i y-led registreras av robotens sensorer. Detta gör att användaren kan välja mellan att dra föremålet rakt ut, bända eller både och.
- **Greppa** - Användaren greppar tag kring överlämningsföremålet i en rörelse som liknar en knuten näve. Myoarmbandet känner igen rörelsen och således öppnas gripklon. Överlämningen är utformad på det här sättet för att det liknar en överlämning mellan människor. Det är naturligt att ta ett fast grepp om föremålet som överlämnas, och genom att användaren har ett fast grepp så vet roboten om att det är säkert att släppa taget om föremålet.
- **Öppna handen** - Användaren placerar handen under gripklon och öppnar upp handflatan i en gest med spretande fingrar. När Myoarmbandet registrerar gesten öppnas gripklon och överlämningsföremålet släpps i användarens hand. Genom att sträcka fram en öppen handflata signalerar användaren med sitt kroppsspråk att hen är redo att ta emot ett föremål, på liknande sätt som människorna i studien från delkapitel 2.1, gjorde greppande rörelser med händerna i luften för att visa att de var redo. Gripklon kan stå i två olika positioner vid överlämningen, position 1 eller position 2, se figur 8.

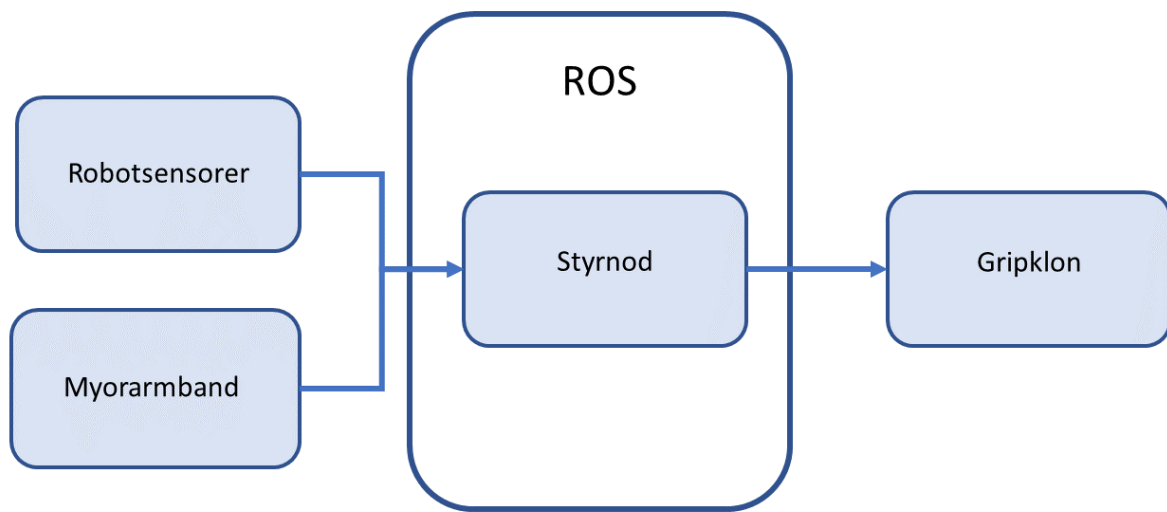


Figur 8: Gripklon positionerad i position 1 och position 2

- **Roll** - Vid en överlämning av ett föremål lyfter människan upp armen och vrider handflatan uppåt. Denna rörelse kvantifieras av Myoarmbandets gyroskop. Då vridningen överstiger ett förbestämt tröskelvärde öppnas gripklon. Eftersom alla människor vrider armen olika mycket måste funktionen kalibreras individuellt efter varje användare.

4.3 Systemarkitektur vid överlämningar

För att roboten ska kunna förstå människans kommandon kommunicerar de olika delarna i systemet med varandra. Systemarkitekturen är uppbyggd enligt figur 9, i centrum ligger styrnoden i ROS som knyter ihop systemets olika komponenter. Styrnoden tar emot indata från robotens vridmomentsensorer och Myoarmbandets IMU och EMG-sensorer. Noden översätter datan från roboten och Myoarmbandet till kommandon som publiceras på ett topic till gripklon.



Figur 9: Systemarkitektur vid överlämning.

5 Utformning av armkontrollerad robotstyrning

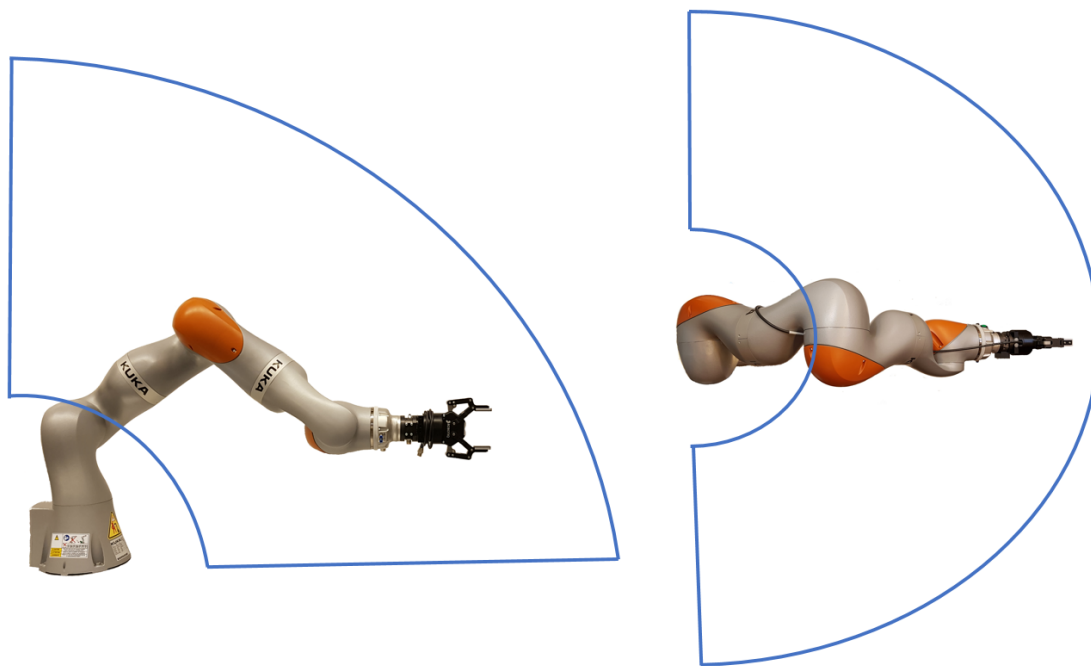
En fördel med kollaborativa robotar är möjligheten att kombinera robotens uthållighet med människans flexibilitet och kognitiva färdigheter. Armkontrollerad robotstyrning är en funktion som utnyttjar detta genom att låta roboten styras av användarens armrörelser. Detta innebär att robotens rörelser blir en imitation av användarens armrörelser och fungerar därmed som en förlängning av användarens arm. Denna funktion ger en naturligt och effektiv metod att manuellt styra roboten.

För att styrningen ska kännas naturlig är det viktigt att roboten enkelt kan styras till önskat läge och att roboten reagerar snabbt på nya kommandon. Detta innebär att det ska vara möjligt att förutse både hur och när roboten kommer röra sig när användaren rör på sin egen arm. Utöver att styrningen ska kännas naturlig är det även viktigt att användaren ska kunna styra roboten från en bekväm ställning. För att åstadkomma det beaktades användarens ergonomi enligt delkapitel 2.2. Genom att användaren själv väljer utgångsläge för styrningen går det att undvika ställningar där axlarna är högt uppdragna eller armen maximalt utsträckt eller böjd.

Styrning av roboten i realtid, genom armrörelser, kan utformas på olika sätt beroende på vad arbetet som ska utföras kräver, samt vad som upplevs mest naturligt och ergonomiskt för användaren. I följande avsnitt presenteras tre möjliga strategier för robotstyrning i realtid. De metoderna som föreslås benämns *Armimitation*, *Armimitation med gripklo* och *Armjustering*.

Armen har sex frihetsgrader, tre positionskoordinater och tre orienteringsvinklar. För att roboten ska kunna styras och utföra rörelser enligt ovanstående metoder behöver dessa bestämmas. Positionskoordinaterna fås från en rörelsekamera. Vidare används ett Myo-armband för att bestämma orienteringen och för att detektera gester som till exempel knuten näve.

För att kunna styra roboten måste den få giltiga koordinater skickade till sig. När roboten får en koordinat försöker den positionera sin slutled där. För att detta ska lyckas måste koordinaten vara inom robotens räckvidd. Därför begränsas alla koordinater som skickas till roboten så de hamnar inom ett tillåtet område enligt figur 10. Detta gäller för alla tre metoderna som utvecklats.



Figur 10: Område för giltiga koordinater.

5.1 Armimitation

Metoden *Armimitation* är utformad för situationer där användaren önskar styra roboten genom att den efterliknar användarens armrörelser. Möjliga scenarion kan vara att positionera roboten innan en överlämning eller att styra roboten då den hämtat ett föremål efter en överlämning.

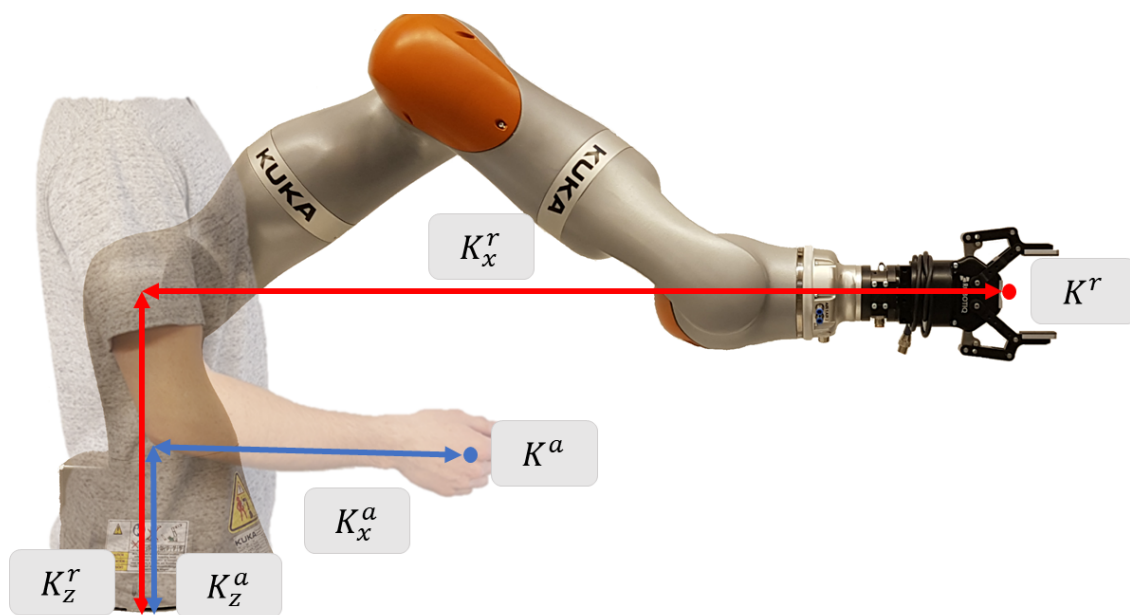
Armimitation fungerar genom att användaren knyter näven för att aktivera styrningen. Roboten följer då användarens handrörelser genom att högerhandens position och orientering kontinuerligt läses av, varpå robotens position justeras enligt den senast erhållna datan. Då användaren öppnar näven avbryts kommunikationen till roboten som hamnar i ett standbyläge. Användaren är sedan fri att röra handen utan att robotens läge förändras. Om användaren på nytt knyter näven positionerar sig roboten till det nuvarande läget som användarens hand befinner sig i.

Användarens rörelser med handen måste relateras till roboten, eftersom roboten och användarens hand inte rör sig i samma koordinatsystem. Roboten rör sig i sitt eget koordinatsystem med origo i dess bas. Ett koordinatsystem för användarens hand definieras genom att använda rörelsekameran för att ange positionen till användarens högerhand relativt en av användarens högra höft. Höften väljs till origo och representerar robotens bas medan handen representerar robotens slutled, se figur 11.



Figur 11: Robot och människa med respektive koordinatsystem.

Eftersom användarens arm är väsentligt kortare än roboten så kan inte robotens fulla arbetsområde utnyttjas, om inte koordinaterna för handens position skalas om. Styrningen bör utgå från en ergonomisk ställning hos användaren. Därför införs kalibreringspositioner för användaren och roboten, K^a och K^r , vilka visas i figur 12. Det är utifrån den positionen som koordinaterna som skickas till roboten skalas om.



Figur 12: Människa och robotarm i kalibreringsposition, med avstånd till respektive origo.

Positionerna K^a och K^r definieras av fyra konstanter som representerar avståndet från origo till respektive position i x- och z-led. Dessa benämns K_x^a och K_x^r respektive K_z^a och K_z^r . I y-led kommer koordinaterna för respektive position att sammanfalla och behöver

därför inte skalas. De övriga konstanterna definieras enligt:

K_x^r := Kalibreringsavstånd för roboten i x-led

K_x^a := Kalibreringsavstånd för användaren i x-led

K_z^r := Kalibreringsavstånd för roboten i z-led

K_z^a := Kalibreringsavstånd för användaren i z-led

Avstånden K_x^a och K_z^a beror på hur lång användaren är och behöver därmed kalibreras för varje person. När användaren styr roboten till övriga positioner skalas avståndet från origo till användarens hand i x- och z-led med K_x^a och K_z^a . Koordinaterna som roboten ska positionera sig i fås enligt:

$$P_x^r = K_x^r \cdot \sqrt{\frac{x}{K_x^a}} \quad (4)$$

$$P_y^r = y \quad (5)$$

$$P_z^r = K_z^r \cdot \sqrt{\frac{z}{K_z^a}} \quad (6)$$

där P_x^r , P_y^r och P_z^r är avståndet roboten ska ha till origo i x-, y- och z-led, och x , y och z är avståndet mellan användarens höft och hand i respektive led. Innan koordinaterna skickas till roboten kontrolleras att de hamnar inom det tillåta området enligt figur 10.

Av ekvation (4) och (6) framgår att x- och z-koordinaterna som skickas till roboten skalas proportionellt mot roten ur koordinatvariablerna. Detta görs för att minska känsligheten jämfört med linjär skalning. Därmed ökar precisionen för positioneringen samtidigt som användarens räckvidd utnyttjas bättre. I y-led skalas inte positionen då koordinaterna redan sammanfaller i kalibreringspositionen och användararmens räckvidd anses vara tillräcklig i y-led för att testa funktionen.

Människans och robotens orientering definieras relativt två olika koordinatsystem. Detta leder till att kvaternionerna som beskriver deras orientering inte sammanfaller i kalibreringspositionen. För att lösa detta används en kvaternion för hur roboten ska orientera sig fram enligt delkapitel 2.3.

5.2 Armimitation med gripklo

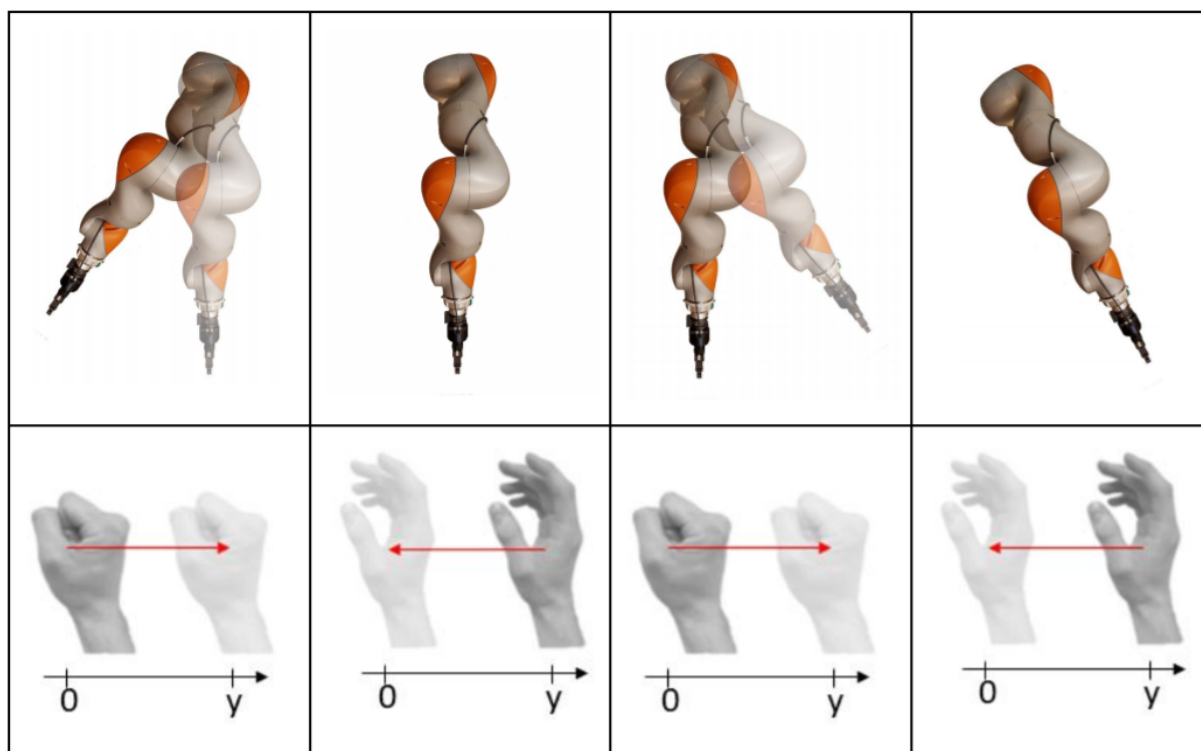
Metoden *Armimitation med gripklo* fungerar i grunden på samma sätt som *Armimitation*, skillnaden är att användaren även har kontroll över gripklon. Detta gör det möjligt för användaren att styra roboten för att plocka upp eller lämna över föremål.

Att öppna och knyta näven liknar gripklons funktion, därför används detta kommando till att kontrollera gripklon i den här metoden. Styrningen av roboten aktiveras istället genom att användaren lyfter sin vänsterhand till axelhöjd. Roboten följer då rörelserna till användarens högerhand som i *Armimitation* och genom att knyta och öppna näven kan gripklon stängas och öppnas. När användaren på nytt lyfter vänsterhanden över axelhöjd deaktiveras styrningen.

5.3 Armjustering

Armjustering är en metod som låter användaren styra roboten genom att röra sin egen arm inom ett mycket mindre område än de tidigare metoderna. Detta gör att *Armjustering* bör vara mer ergonomisk än övriga metoder, enligt delkapitel 21. Metoden gör det även möjligt att styra roboten till lägen som inte kan åstadkommas när roboten imiterar armrörelser, på grund av begränsningar i människans anatomi.

Metoden fungerar genom att användaren knyter näven för att aktivera styrningen av positionen och flyttar sedan handen. Roboten ändrar då sin position motsvarande ändringen av handens position. Styrningen utförs genom att användaren upprepningsvis knyter näven, flyttar armen och sedan öppnar näven igen. Roboten kommer vid varje upprepning att fortsätta sin rörelse från den punkt som den senaste rörelsen avslutade i. Användaren kan däremot flytta handen från samma punkt varje gång, vilket illustreras i figur 13. Orienteringen styrs på samma sätt, men aktiveras först om användaren lyfter sin vänsterhand över axeln igen. Vid styrning av orientering kommer robotens slutled vara i samma position hela tiden, ändring av orientering sker alltså kring denna punkt. När styrning av orientering är aktiverad kan inte positionen styras och tvärt om. Genom att på nytt lyfta vänsterhanden över axeln kan användaren återgå till styrning av position med den nya orienteringen. Anledningen till att bara en faktor styrs i taget är för att erhålla en så ergonomisk och naturlig styrning som möjligt. När en människa flyttar handen antingen åt sidan eller uppåt är det naturligt att armens orientering ändras under rörelsen.



Figur 13: Styrning med armjusteringsmetoden.

Figur 13 visar hur armjusteringsmetoden fungerar för ändring av position i y-led med

roboten sett ovanifrån. Positionen för till exempel y-led kan beskrivas generellt enligt

$$P_{y,ny}^r = P_{y,nu}^r + \Delta P_{y,nu}^a, \quad (7)$$

där $P_{y,ny}^r$ är den nya positionen roboten ska positionera sig i, $P_{y,nu}^r$ är robotens nuvarande position och $\Delta P_{y,nu}^a$ är ändringen i användarens handposition från det att knuten näve registrerats. Utöver detta kontrolleras att koordinaterna som skickas till roboten hamnar inom det tillåtna området enligt figur 10. Orienteringen kan i sin tur beskrivas generellt på motsvarande sätt enligt

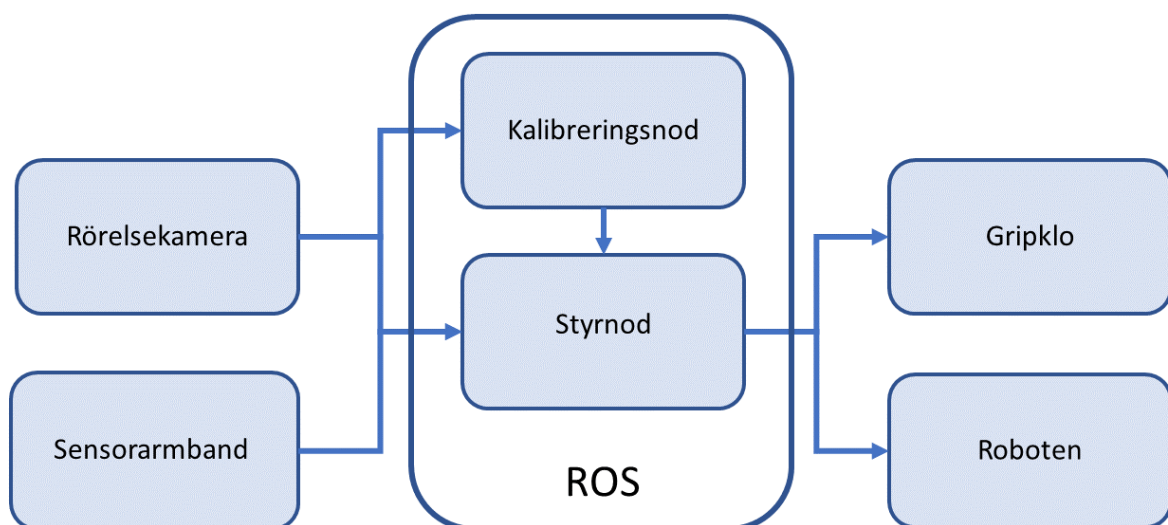
$$ori = rOri + \Delta a Ori, \quad (8)$$

där *ori* är den nya orienteringen till roboten, *rOri* är robotens nuvarande orientering och $\Delta aOri$ är ändringen i användarens handorientering från det att knuten näve registrerats.

5.4 Systemarkitektur vid armkontrollerad robotstyrning

I figur 14 ses systemarkitekturen för armkontrollerad robotstyrning. Systemet består av hårdvara i form av en rörelsekamera, sensorarmband, gripklo och robot som alla binds samman genom ROS. Styrningen initieras av att kalibreringsnoden läser av kalibreringsavstånden och orienteringen av användarens arm i kalibreringspositionen och skickar det till styrnoden. Positions- och orienteringsdata från rörelsekameran och sensorarmbandet skickas kontinuerligt till styrnoden, där kalibreringsdatan används för att skala positionsdatan och beräkna önskad orientering till roboten.

Styrnoden skickar sedan den bearbetade datan till roboten. Datan från sensorarmbandets EMG-sensorer översätts i styrnoden till gester, vilka innebär olika kommandon som antingen skickas till roboten eller gripklon. Kommandon som roboten tar emot kommer från gester som innebär aktivering eller avslutning av styrningen och kommandon som gripklon tar emot är kommer från gester som innebär öppning och stängning.



Figur 14: Flödesschema vid armkontrollerad robotstyrning.

6 Användartester av överlämning

Ett övergripande mål för studien var att interaktionen med roboten skulle upplevas naturlig. För att undersöka hur väl detta uppnås genomfördes två användartester, mellan vilka överlämningsvarianterna skiljde sig åt något. Resultatet från den första omgången användes för att bestämma utformningen av den andra omgången användartest. Eftersom interaktionen skulle kunna genomföras utan några förkunskaper bestod testgrupperna av personer som inte kände till projektet sen tidigare. Alla testanvändare var studenter.

I testen genomfördes ett antal varianter av överlämning, både till och från roboten. Efter varje överlämning fick testanvändarna betygsätta överlämningsvarianten. Skalan som användes var från 1 - 5 där 1 var "Det känns väldigt onaturligt och/eller dåligt" och 5 var "Det känns helt naturligt och bra". Under tiden testanvändarna genomförde testet skrevs deras spontana kommentarer ned.

Testanvändarna fick genomföra de olika överlämningarna i blandad ordning för att minska risken för partiskhet. Dock gick det inte att slumpa fram ordningsföljden helt, då Myoarmbandet behöver lite tid för att börja läsa av användarens muskelsignaler. Därmed kunde inte test med Myoarmbandet genomföras som första test. De sensorer som användes för att detektera signaler var EMG- och IMU-sensorerna i Myoarmbandet som testanvändarna hade på sig, samt robotens sensorer för kraft och vridmoment.

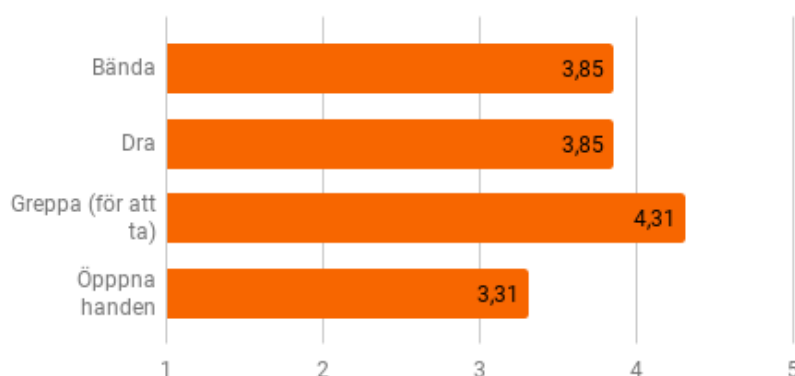
6.1 Användartest 1

Det första användartestet syftar till att ge en grundläggande bild av användarnas uppfattning av de framtagna överlämningsmetoderna. De varianter som testades för överlämning till robot var *Greppa* och *Trycka ned*. De varianter som användes för att ta emot från roboten var *Dra*, *Bända*, *Greppa* och *Öppna handen* med gripklon i position 1. I testet användes en skruvmejsel, ca 13 cm lång, som föremål för överlämning. Testet genomfördes av 13 personer. För fullständigt resultat av användartestet se bilaga A.1 *Sammanställning av användartest 1*.

Medelvärden av betygen för de olika överlämningsmetoderna för robot till människa finns sammanställda i figur 15. Där framgår att den överlämningsmetod som fick högst betyg var *Greppa* (för att ta) med ett medelvärde på 4,3. Därefter kom *Dra* och *Bända* med samma medelvärde, 3,9, och sist *Öppna handen* som fick medelvärdet 3,3. Medelvärdesbetygen för överlämningarna människa till robot visas i figur 16. Testerna för överlämning, människa till robot, *Trycka ned* och *Greppa* (för att ge) fick medelvärdena 3,2 och 3,4 respektive.

Överlämning - robot till människa

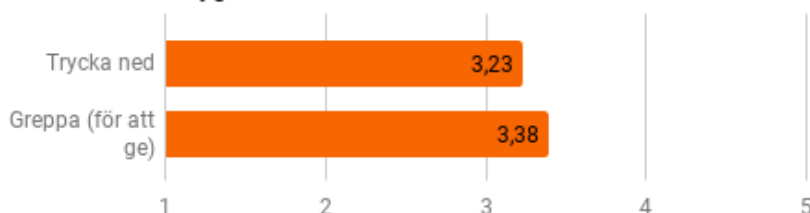
Medelvärde av betyg



Figur 15: Medelvärdet av betyg för överlämning robot till människa.

Överlämning - människa till robot

Medelvärde av betyg



Figur 16: Medelvärdet av betyg för överlämning människa till robot.

Bända och *Dra* fick samma medelbetyg och användarna var oense om vad som var mest naturligt vid överlämning. En del kommenterade att det kändes ryckigt att dra föremålet rakt ut och föredrog vridmomentet. Andra föredrog att dra föremålet rakt ut och tyckte att det kändes onaturligt att bända ett föremål ur robotens grepp då det inte liknade hur ett föremål skulle tas ur en annans människas hand.

Greppa (för att ta) fick högst betyg då användarna upplevde den som enkel och naturlig att utföra samt att den liknade hur ett föremål skulle mottas från en människa. En negativ aspekt som användarna kommenterade var att det inte var intuitivt hur hårt föremålet skulle greppas. Myoarmbandet registrerade dessutom grepp olika för olika olika personer, en del behövde knappt gripa tag i föremålet medan andra behövde klämma hårt för att armbandet skulle kunna registrera ett grepp.

Den metod för överlämning robot till människa som fick lägst medelvärde var *Öppna handen*. En vanlig kommentar hos användarna var att storleken och tyngden av föremålet som överlämnades hade stor betydelse för hur detta överlämningsätt upplevdes. En användare kommenterade att ett litet föremål så som ett suddgummi hade fungerat bra att överlämna med denna metod men ett större och tyngre föremål hade inte varit lämpligt. Vid överlämning av större föremål behöver användaren ett stadigt grepp om föremålet

innan roboten släpper taget. En annan nackdel med denna typ av överlämning var att användaren måste vara uppmärksam hela tiden och vara redo att fånga föremålet som roboten släpper.

Båda metoderna för överlämning människa till robot fick relativt låga medelvärden jämfört med de andra metoderna. Vilken metod som användaren upplevde mest naturlig och enkel skiljdes från person till person. *Trycka ned* upplevde många användare som enkel att använda men den upplevdes även som onaturlig. Detta beror på att det inte är vanligt att tryckt ned ett föremål i handen på en annan människa. *Greppa* (för att ge) upplevdes också av många som enkel att använda men även denna metod ansågs vara onaturlig då en person inte hade klämt tag i ett föremål som ska lämnas över.

6.2 Användartest 2

Informationen från användartest 1 gav en grund till vilka typer av överlämning som skulle undersökas i användartest 2. Alla överlämningsmetoder undersöktes vidare men justerades eller kombinerades med andra metoder. Utöver detta testades även *Roll*. Överlämningsmetoderna kombinerades med en kontroll av pitch som extra säkerhet. Detta ger en extra säkerhet så att systemet endast lyssnar på signaler från robotens sensorer eller Myoarmbandet då användaren har armen lyft i en viss vinkel.

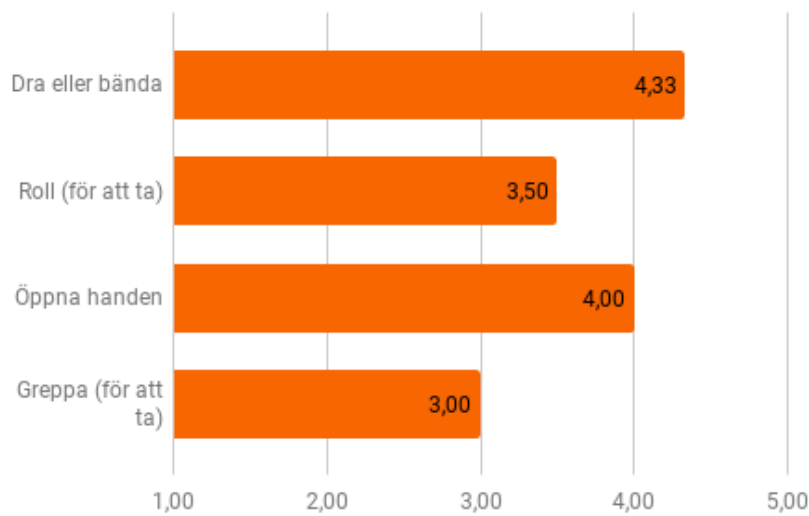
I användartest 2 överlämnas en blocknyckel, ca 21 cm lång, istället för en skruvmejsel. Detta beror på att testpersonerna från det första användartestet upplevde att skruvmejseln hade för låg vikt (se bilaga A). I metoden *Öppna handen* används dock en mutter som överlämningsföremål. Ett mindre föremål används eftersom en vanlig kommentar från användartest 1 var att den här metoden hade passat bättre för små föremål. För *Öppna handen* är gripklon ställd i position 2, se figur 8.

Då användare inte var eniga om huruvida metoden *Dra* eller *Bända* var mest naturlig så utförs ett test där vridmoment och kraft kombineras så att roboten släpper föremålet vid både vridmoment och kraft rakt ut. Detta för att användaren själv ska kunna välja vad som känns naturligt beroende på situation, föremål och personlig preferens. Den här kombinationen kallas *Dra eller bända*.

De olika varianterna som testades för överlämning till roboten var *Roll*, *Greppa* och *Trycka ned*. Varianterna som testades för att ta emot från roboten var *Dra och bända*, *Roll*, *Greppa* och *Öppna handen*. Medelvärden av betygen för de olika överlämningsmetoderna från robot till människa finns sammanställda i figur 17. Den överlämningsmetod robot till människa som fick högst betyg var *Dra och bända* med ett medelvärde på 4,3. Näst högst medelvärde fick *Öppna handen* med 4,0. Därefter *Roll* (för att ta) och *Greppa* (för att ta) med medelvärden 3,6 och 3,0 respektive. Värden för överlämningsmetoderna från människa till robot finns sammanställda i figur 18. Där framkommer att den metod som fick högst medelvärdigt betyg var *Roll* (för att ge) med ett medelvärde på 4,0. Därefter kom *Trycka ned* och *Greppa* (för att ge) med medelvärdena 3,3 och 2,7 respektive.

Överlämning - robot till människa

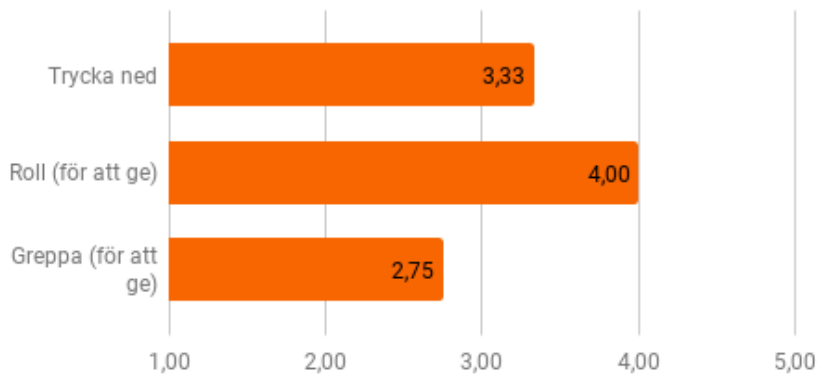
Medelvärde av betyg



Figur 17: Medelvärdet av betyg för överlämning robot till människa.

Överlämning - människa till robot

Medelvärde av betyg



Figur 18: Medelvärdet av betyg för överlämning människa till robot.

Dra eller bända var den metod som fick högst betyg av de olika överlämningsmetoderna från robot till människa. Betyget var betydligt högre än vad det var i användartest 1 för de två metoderna *Dra* och *Bända* var för sig. Flera användare kommenterade att de inte behövde tänka på vilken rörelse de gjorde, utan bara ta emot skiftnyckeln som de hade gjort naturligt.

Den nya metoden *Roll* (för att ta) upplevdes som naturlig då roboten släppte föremålet direkt utan att användaren behövde rycka i föremålet. Dock upplevde många användare att det var lätt att ge felkommando och tappa föremålet då rörelsen för *Roll* enkelt kan utföras av misstag.

Öppna handen fick bättre betyg i det andra användartestet än i det första. Många användare tyckte att överlämningen kändes bra, men att de behövde spreta obekvämt mycket med fingrarna för att gesten skulle registreras. I två fall registrerade inte Myoarmbandet användarens gest och testet gick inte att utföra för denna metod av överlämning.

Greppa (för att ta) fick sämre betyg den här testomgången, och sämst av alla metoder. En vanlig kommentar var att de behövde klämma väldigt hårt för att greppet skulle registreras. Detta gjorde att det för många kändes som ett extra moment att klämma, och inte så naturligt som det hade varit att bara ta tag i föremålet.

För överlämning människa till robot fick den nya metoden *Roll* (för att ge) bäst betyg. Många tyckte att det kändes naturligt att vrida upp armen, och kommenterade att det var likt en överlämning mellan två människor. Däremot upplevde flera av användarna att det var lätt att göra denna rörelsen av misstag, de behövde vara alerta och beredda på att fånga föremålet då roboten släppte det snabbt.

Trycka ned fick ungefär samma betyg som i första användartestet. Användarna upplevde återigen metoden som onaturlig då de inte hade lämnat över ett föremål till en annan människa genom att trycka ned det i deras hand. Vissa användare tyckte dock att det var bra att trycka ned för att de då visste precis vad roboten skulle göra, att ge en fysisk signal gav en känsla av kontroll. Användarna upplevde en viss fördröjning i responstid för systemet.

Greppa (för att ge) fick sämst betyg av de olika metoderna, och sämre än i det första användartestet. Många användare kommenterade att det kändes onaturligt att hålla hårt i någonting som de skulle lämna ifrån sig.

7 Tester av armkontrollerad robotstyrning

Vid utformningen av metoderna för armkontrollerad robotstyrning var ett viktigt mål att styrningen skulle upplevas naturlig. Det innebär att det ska vara intuitivt och enkelt att lära sig att styra roboten, samt att den i sin tur rör sig på ett förutsägbart sätt. Fokus låg även på att möjliggöra styrning med olika metoder till olika situationer. Därför utvecklades tre metoder för armkontrollerad robotstyrning, vilka benämns: *Armimitation*, *Armimitation med gripklo* och *Armjustering*. För att undersöka hur väl metoderna uppfyller målen genomfördes användartester.

Tester gjordes även för att undersöka hur väl roboten utför kommandon, samt hur utrustningens prestanda påverkade möjligheterna till samarbete mellan robot och användare. Aspekter som troligtvis har stor påverkan studerades. En aspekt är hur väl roboten följer användarens rörelser, vilket handlar om med vilken precision roboten positionerar sig relativt användaren och hur lång fördröjningen är från det att användarens hand nått sin slutposition till att roboten nått sin slutposition. En annan aspekt är uppkomsten av inkorrekt eller instabil data som skickas till roboten och därför bidrar till rörelser som inte stämmer överens med användarens intention.

7.1 Användartest av armkontrollerad robotstyrning

Innan användartesterna utfördes gjordes ett förtest av alla tre metoder. Där upptäcktes att orienteringen inte alltid fungerade som avsett. Detta ledde till att testet av *Armimitation* delades upp i två delar. Ett test där användaren styr både position och orientering, samt ett test där användaren styr position med fixerad orientering. Dessa tester kommer härnäst efter benämnas *Armimitation* respektive *Armimitation med fix orientering*. Att dela upp styrningen gjorde det därmed möjligt att se hur orienteringen påverkade den generella upplevelsen av metoden. Detta ledde även till att testet för *Armimitation med gripklo* endast utfördes med fix orientering.

De områden som testerna fokuserade på var prestanda, säkerhet och ergonomi. Prestanda innefattar hur naturlig och lätthanterlig styrningen kändes, samt hur väl roboten utförde användarens kommandon. Säkerhet handlar om hur pass bekväm och säker användaren kände sig med att styra roboten. Mer specifikt med avseende på om det känns som att roboten kan göra oberäkneliga rörelser eller skada omgivningen eller de föremål som den interagerar med. Ergonomi berör ifall styrningen innehåller påfrestande rörelsemoment eller positioner för användaren. För alla områden noterades testpersonernas åsikter samt ett generellt betyg på en skala från 1 till 5. Betyg 1 innebar "Det känns väldigt onaturligt och/eller dåligt" och 5 innebar "Det känns helt naturligt och bra". För fullständigt resultat av användartesterna se bilaga C *Sammanställning av användartest för armkontrollerad robotstyrning*.

Användartesten genomfördes av fem medlemmar i gruppen som utfört studien - en deltagare i taget. Det första testet var *Armimitation med fix orientering*, där testpersonen fick pröva att manövrera roboten utan någon särskild uppgift. Därefter testades *Armimitation*. Användaren fick även här testa att manövrera roboten utan en specificerad uppgift. Det

tredje testet var av *Armimitation med gripklo*. Uppgiften som skulle utföras under detta test var att positionera roboten intill en kloss för att sedan greppa den, styra den till en ny position där en låda var placerad, släppa klossen i lådan och slutligen föra roboten tillbaka till dess ursprungsläge. Det fjärde och sista testet var av *Armjustering*. Testpersonen skulle i detta fall styra roboten till en valfri position för att sedan orientera gripklon till vertikalt läge, riktad nedåt, och sänka roboten likt en rörelse för att plocka upp ett föremål placerat på ett bord under roboten. Under detta test var inte gripklon ansluten till styrningssystemet då den ansågs ha testats i föregående test.

7.1.1 Prestanda för armkontrollerad robotstyrning

Betygen för prestanda av de olika styrningsfunktionerna kan ses i figur 19, angivna som medelvärden utifrån de fem testerna. Den metod som fick högst medelbetyg var *Armimitation med gripklo*, följt av *Armimitation med fix orientering*, vilka fick värdena 3,6 respektive 3,4. Därefter kom *Armjustering* med ett medelbetyg på 3,0 och sist *Armimitation* med medelvärdet 2,8.

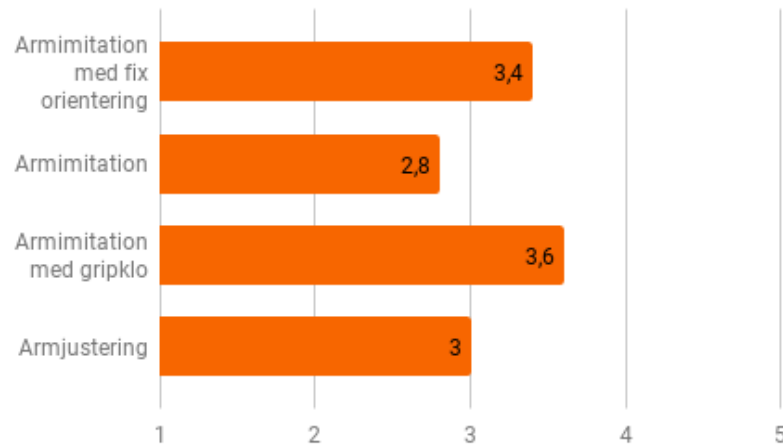
Vissa testpersoner kommenterade att positioneringen för *Armimitation med gripklo* fungerade bra och att det kändes naturligt att stänga handen för att stänga gripklon. Det var även uppskattat att Myoarmbandet vibrerade när roboten efter kalibrering var redo att styras. Några negativa aspekter som nämndes var att robotens rörelser ofta upplevdes fördröjda, samt att små rörelser ibland gav stora utslag på styrningen av roboten. Vid delmoment där ett föremål skulle plockas upplevdes detta inte som önskvärt, då testpersonerna menade att det hade varit bättre med en mer stabil styrning och precision. Positioneringen för *Armimitation med fix orientering* fungerade på samma sätt som för *Armimitation med gripklo*, vilket innebar att kommentarerna var väldigt lika bortsett från att gripklon inte användes.

För *Armjustering* sa många testanvändare att det var bra att positionering och orientering kunde styras separat, men att orienteringen oftast inte kändes intuitiv och inte betedde sig som förväntat. En observation som gjordes var att samtliga testpersoner, vid styrning av orienteringen, försökte orientera underarmen kring armbågen. Dessutom sades det att Myoarmbandet ibland inte reagerade på gesterna för att starta och avsluta styrningen.

Åsikterna angående *Armimitation* handlade ofta om att vissa rörelser kändes bra, till exempel hur roboten orienterade sig vid en yaw-rörelse. Dock påpekade flera att andra rörelser, till exempel roll, inte fungerade lika bra och att orienteringen ofta efter en längre tid inte kändes intuitiv.

Armkontrollerad robotstyrning - Prestanda

Medelvärde av betyg



Figur 19: Medelvärde av betyg för prestanda av armkontrollerad robotstyrning.

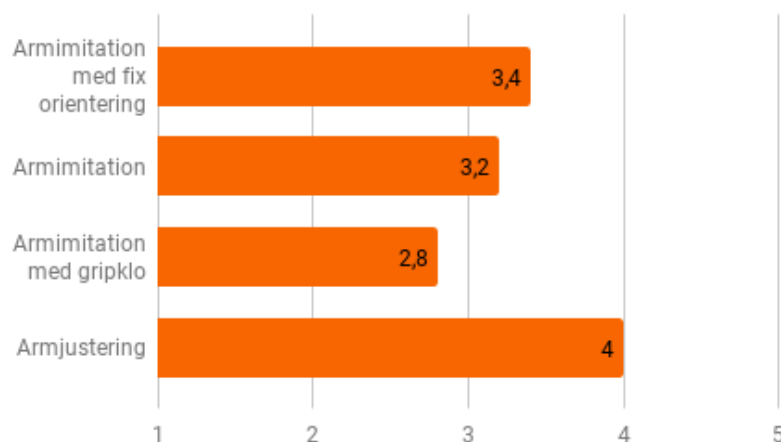
7.1.2 Säkerhet för armkontrollerad robotstyrning

Medelvärdena av betygen för säkerhet ses i figur 20. Den funktion som fick högst betyg var *Armjustering* som fick 4. Därefter fick *Armimitation med fix orientering* betyget 3,4, *Armimitation* fick 3,2 och *Armimitation med gripklo* det lägsta betyget 2,8.

En återkommande kommentar för alla metoderna var att testpersonerna aldrig kände sig obekväma med att arbeta med roboten eller att den upplevdes hotfull. För samtliga metoder uttryckte användarna att det hade känts säkrare ifall roboten hade stannat direkt då en gest för stopp utförts. Det ansågs därför vara önskvärt med en stoppfunktion som reagerar mycket snabbare. *Armjustering*, som var den högst rankade metoden sett till säkerhet, upplevde många som bättre än övriga metoder på grund av att robotens rörelser kändes mer förutsägbara. För *Armimitation* upplevdes styrningen ibland mindre säker då testpersonerna kände att de inte alltid förstod hur de skulle kontrollera orienteringen och därmed tyckte att robotens rörelser var mindre förutsägbara. Gällande *Armimitation med gripklo* var det många som uttryckte oro för omgivningen och föremål som roboten interagerade med.

Armkontrollerad robotstyrning - Säkerhet

Medelvärde av betyg



Figur 20: Medelvärde av betyg för säkerhet av armkontrollerad robotstyrning.

7.1.3 Ergonomi för armkontrollerad robotstyrning

Medelbetygen för det sista området som testerna fokuserade på, ergonomi, ses i figur 21. *Armimitation med gripklo* ansågs som den mest ergonomiska funktionen då den fick det högsta betyget, 4,2. Därefter på samma medelbetyg, 2,8, rankades *Armimitation med fix orientering* och *Armimitation*. *Armjustering* ansågs vara den minst ergonomiska funktionen med medelbetyget 2,6.

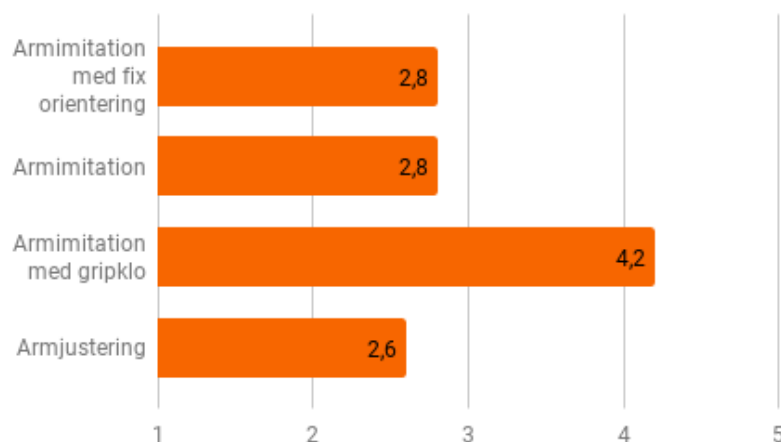
Fördelarna med *Armimitation med gripklo* menade många testpersoner var att handen endast behövdes lyftas upp en kort stund för att aktivera och deaktivera styrningen. Dessutom behövdes handen endast stängas då gripklon skulle stängas. Dock förekom några kommentarer att det hade varit mer ergonomiskt att knyta näven kort en gång för att stänga eller öppna gripklon, vilket hade varit mindre ansträngande. I övrigt menade många att styrningen inte innehöll många ansträngande rörelser eller slitsamma vinklingar av armen.

För *Armimitation med fix orientering* och *Armimitation* påpekade flera personer att det var påfrestande att hålla handen stängd under hela styrningen, samt att det framför allt skulle vara slitsamt under ett långt tidsperspektiv. Det upplevdes dessutom som att vissa rörelser och vridningar av armen förekom som inte var ergonomiska. För *Armimitation* sades även att räckvidden och rörelsemöjligheterna till vänster var mer ansträngande då kroppen ansågs vara i vägen.

Vid några tillfällen kommenterades det att *Armjustering* var relativt ergonomisk vid positionering, men desto mindre vid orientering. En fördel som nämndes var att det var möjligt att utföra rörelser i flera etapper, vilket gjorde att vissa påfrestande ställningar för armen kunde undvikas. Att dela upp en manöver i flera delmoment upplevde många också gjorde det möjligt att utföra större förändringar i position och orientering av roboten.

Armkontrollerad robotstyrning - Ergonomi

Medelvärde av betyg



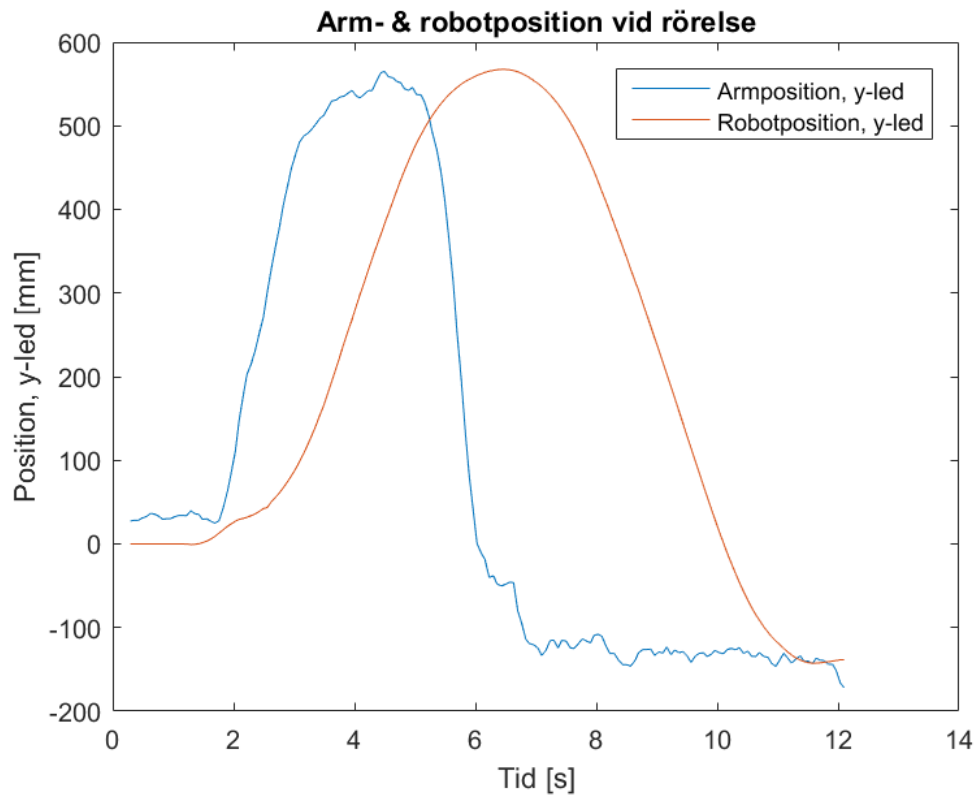
Figur 21: Medelvärde av betyg för ergonomi av armkontrollerad robotstyrning.

7.2 Test av utrustning

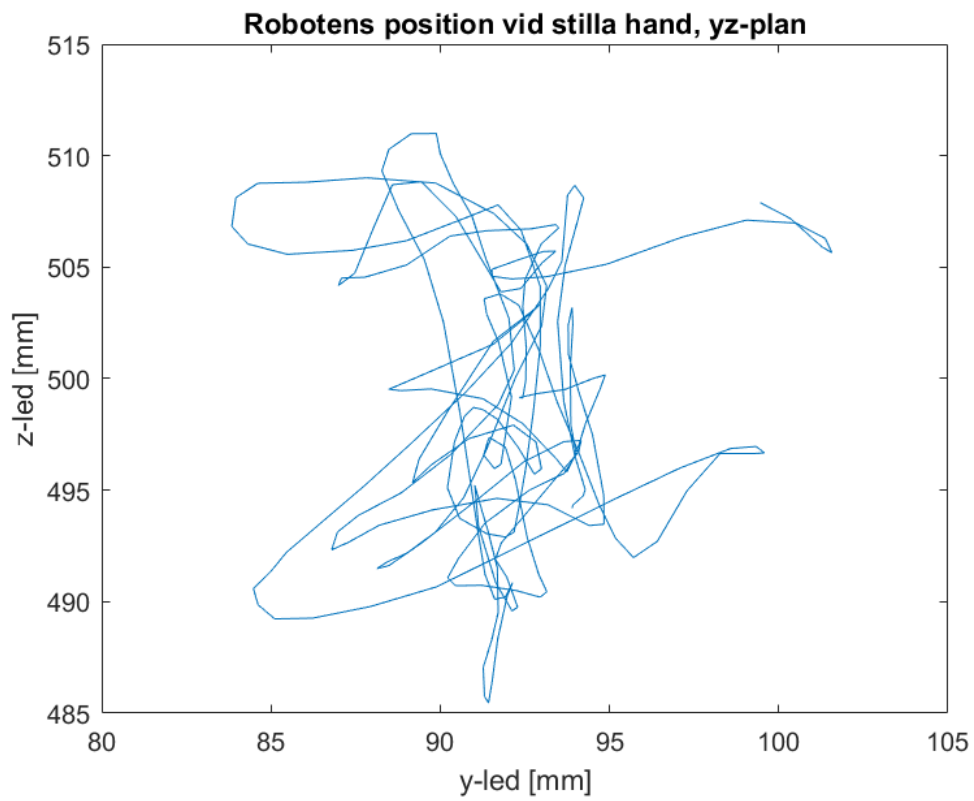
Hur väl roboten klarar av att följa armens rörelser undersöktes genom olika tester av hård- och mjukvara. Skillnaden mellan kamerans positionering av handen och robotens position undersöktes. Hur väl kameran positionerade handen när den inte rörde sig undersöktes också, samt hur väl Myoarmbandet läste av armens orientering när den inte rörde sig.

För att testa hur stor fördröjningen var mellan roboten och användarens hand utfördes en rörelsesekvens, där armpositionen och robotens position i horisontellt led (y-led) studerades. I testet var roboten inställd på samma hastighet som under användartesterna, vilket var det långsammare av två möjliga standardlägen. Sekvensen representeras i grafen i figur 22. Först förde testpersonen handen åt höger för att sedan förflytta den förbi ursprungspositionen, till vänster. Ur grafen går det att urskilja att handen och roboten nådde sina slutpositioner till höger om ursprungspositionen efter ungefär 4,5, respektive 6,4 sekunder. Detta innebär därmed en approximerad fördröjning på 1,9 sekunder. Handen befann sig sedan i slutpositionen till vänster om ursprungspositionen efter cirka 6,9 sekunder. Roboten däremot nådde motsvarande slutposition efter ungefär 11,2 sekunder, vilket innebär en ökad fördröjning på 4,3 sekunder. Dock hade roboten även färdats en längre sträcka vid den andra mätpunkten jämfört med den första.

Under användartesterna rörde sig roboten påtagligt trots att användarna upplevde att de höll handen still. I figur 23 ses rörelsen för hur robotens slutled rörde sig i en sekvens där en testpersons hand hölls still i samma position under 17 sekunder. Rörelsen är illustrerad i det plan då användaren står rakt mitt emot roboten, yz-planet, där y är det horisontella ledet och z det vertikala, studien försummade därmed robotens rörelse i djupled, x-led. Grovt avrundat förflyttade sig roboten inom ett intervall på 15 mm i y-led och 25 mm i z-led.

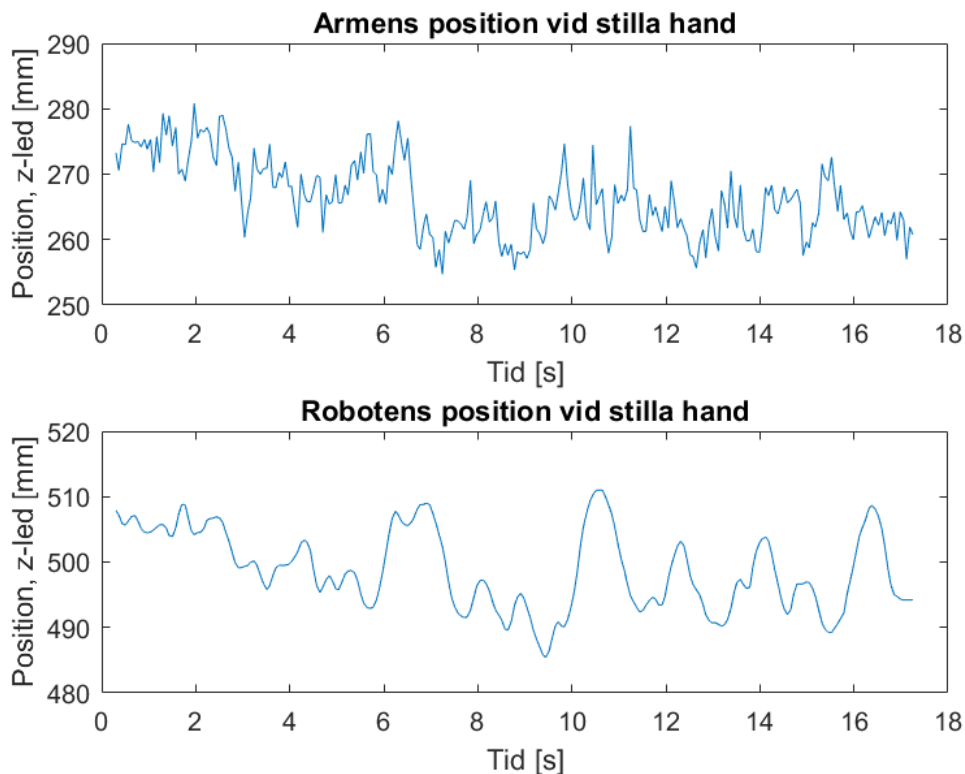


Figur 22: Armens och robotens positioner i y-led under rörelsesekvens.



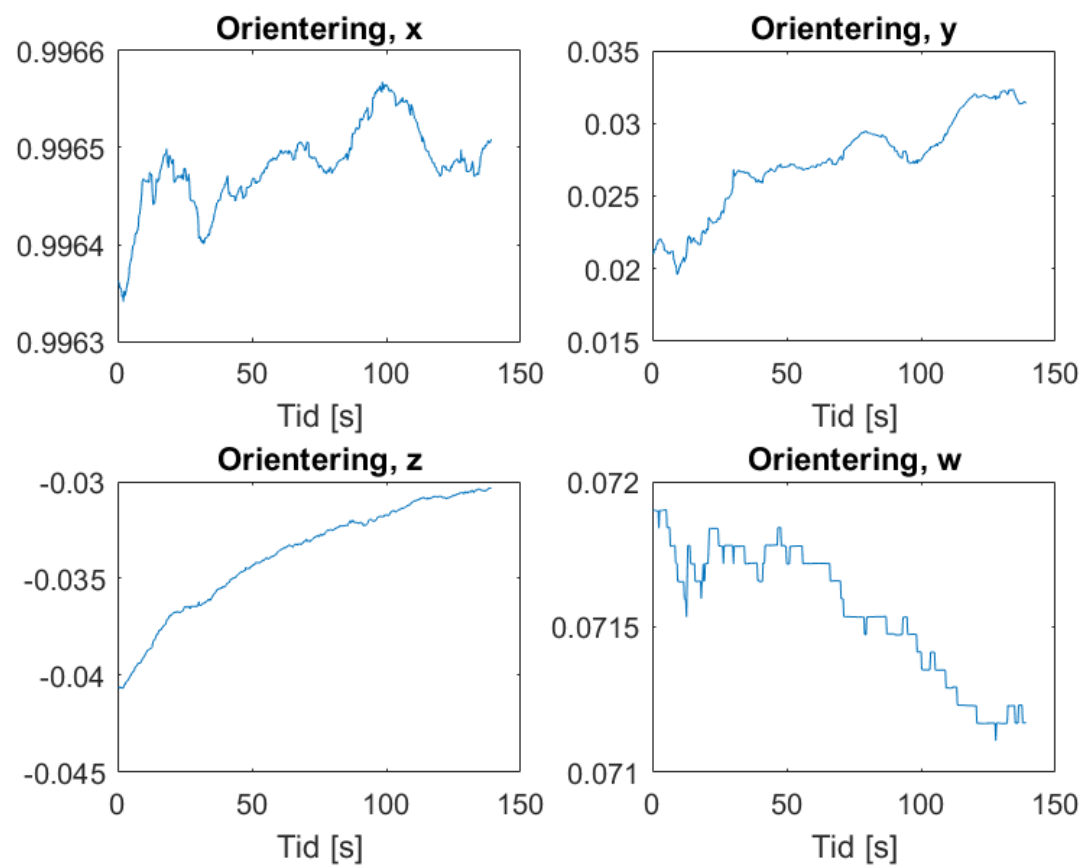
Figur 23: Robotens position i yz-planet vid hand i stilla läge.

Graferna i figur 24 representerar samma sekvens som figur 23 då handen hölls still, men endast positionen i z-led relativt användarens höft över tid. Den undre grafen beskriver robotens rörelse och den övre representerar positionsdatan för handen som erhålls från rörelsekameran. Det går tydligt att se att kurvan för handens positionsdata innehåller rippel som innebär att positionen i z-led varierade inom ett intervall på ungefär 20 mm. Detta medför att roboten ständigt får nya positioner skickade till sig, vilket ger ett svängande rörelsemönster. Rörelsekurvan för roboten visar att dess position i z-led varierade inom ett intervall på drygt 20 mm. Liknande rippel gick även att se för handens positionsdata i både x-led och y-led.



Figur 24: Armens och robotens position i z-led vid hand i stilla läge.

Under användartesterna nämndes det att styrningen av orientering ofta inte kändes intuitiv eller att styrningen var oberäknelig. För att testa orienteringsdatan från Myoarmbandet, låg armbandet still i 140 sekunder. Grafer för hur orienteringsdatans kvaternionskomponenter x, y, z och w beter sig under denna sekvens ses i figur 25. Komponenterna x, y och z ökar något med tiden och samtidigt som w minskar. Värdena för x- och y-komponenten svänger, vilket kommer från utomstående störningar då Myoarmbandet inte kunde hållas helt stilla. För z-komponenten kan dock en tydlig ökning urskiljas.



Figur 25: Orienteringsdata från Myoarmbandet.

8 Cobots ur ett etiskt perspektiv

Frågan om huruvida automatisering och införande av robotar i produktion är bra eller dåligt är kontroversiell och laddad. Det finns en oro bland allmänheten som framförallt bottnar i en rädsla för massarbetslöshet då robotar potentiellt kan ersätta yrken tidigare utförda av människor [27]. Det finns även funderingar kring hur en framtid med robotar ser ut, ifall en människa kan ersättas av en robot i full utsträckning, samt hur människor och robotar kan leva sida vid sida. Det är därmed av högsta relevans att reflektera över hur denna studie kan påverka samhället och den tekniska utvecklingen inom produktion.

8.1 Etisk bakgrund

I och med att robotarna blir allt smartare kan de på sikt ta över fler arbetsuppgifter från människan. En stor expansion av industriella robotar skulle potentiellt kunna leda till en negativ samhällspåverkan som massarbetslöshet då montörer ersätts av robotar. Denna studie har fokuserat på cobots som inte utesluter människan ur produktionsprocessen som traditionell industriautomation gjort, utan istället bygger på ett samarbete där roboten hjälper människan att utföra arbetet. Därav kommer roboten i många fall inte ta över människans jobb och påverkan av denna typ av robot förmodligen inte vara lika stor som ett helt automatiserat system hade varit.

Införande av en mer automatiserad produktion betyder också att nya jobbtillfällen skapas. Amerikanska tillverkningsföretag tror att robotar kommer ersätta 28 procent av arbetskraften de närmsta 3-5 åren [2]. Företagen förutspår också att 35 procent nya arbetstillfällen kommer skapas. Troligen kommer fler högutbildade jobbtillfällen skapas inom teknik- och systemutveckling medan positioner av lägre utbildningsnivå försvinner. Att lågutbildade yrken försvinner skulle kunna resultera i större samhällsklyftor. Det kan dock möjligtvis undvikas om samhället anpassar sig efter behovet av nya tekniska jobb på ett bra sätt.

Ett möjligt sätt att möta denna förändring, som debatterats för av bland annat Bill Gates, är att beskatta robotars arbete [28]. Skatt på robotisering skulle kunna ersätta den inkomstskatt som går bort då den mänskliga arbetaren ersätts. Det finns dock kritiker till detta förslag som menar att robotskatt skulle driva företag till att flytta sin produktion utomlands. En annan möjlighet till att anpassa samhället inför denna förändring skulle kunna vara att införa programmering som ett grundämne i skolan för att förbereda den kommande generationen. Exakt hur automation påverkar samhället i längden och hur det bör bemötas kan dock inte sägas med säkerhet.

När utveckling av autonoma robotar sker är det viktigt att också diskutera vem som har kontroll. Om det är roboten eller människan som bestämmer. Eftersom det finns en risk att roboten inskränker på människans autonomi eller säkerhet så är det viktigt att dessa saker diskuteras. Det är även viktigt att ansvarsfördelningen vid en olycka är tydlig.

Olyckor med kollaborativa robotar kan grovt delas upp i två kategorier: olyckor orsakade av operatören och olyckor orsakade av systemet. Eftersom operatören till viss del styr

roboten så kan ett felkommando orsaka en olycka. Är det så att operatören trots bättre vetande givit ett felaktigt kommando så bör denne vara ansvarig för olyckan. Om däremot systemet är utformat på ett sätt som gör det svårt att avgöra vad som är ett korrekt respektive felaktigt kommando så är det inte lika tydligt vem som bör hållas ansvarig. Enligt regler för utveckling av autonom teknik, skapade som riktlinjer för ingenjörer, ska den som designat, utvecklat eller distribuerat produkten hållas ansvarig för produkten samt dess förutsebara effekter [29]. Att avgöra om det är produkten eller användandet av produkten som är felaktig är en stor gråzon. Det är svårt att verifiera vad som är ett robust system som gör att operatören inte kan ge felaktiga kommandon.

Det är också viktigt att nämna att en ökad automationsgrad inte bara medför problem utan också mycket positivt. Automation brukar användas av företag bland annat för att öka genomströmning och produktivitet, öka säkerheten och ergonomin för arbetaren och för att uppnå bättre kvalitet samt eliminera variation [30]. Potentiellt kan även robotar utvecklas för att hjälpa människor med funktionshinder och på så sätt förenkla vardagen för en stor andel människor.

8.2 Etisk analys av resultat

Det har tagits fram ett antal förslag på hur olika delar av samarbetet mellan människa och robot kan utformas. Huruvida de olika förslagen är etiska är svårt att tolka individuellt. Däremot kan det diskuteras hur studien och dess resultat som helhet kan påverka samhället och teknisk utveckling.

När robotar och människor ska arbeta sida vid sida är det viktigt att människan känner kontroll över situationen och inte känner sig trängd. Montören ska känna sig trygg och säker för att en bra arbetsmiljö ska uppnås. Resultatet av studien ger information om vad som känns naturligt vid denna typ av samarbete. Det har därför ett positivt värde ur etisk synpunkt då det kan användas som underlag för att säkerställa en god arbetsmiljö.

Dessa typer av studier kan på sikt bidra till ett större införande av cobots i produktion. Säkerheten är en viktig aspekt att analysera då införandet av cobots kan ha både positiva och negativa effekter gällande säkerhet på arbetsplatsen. En positiv effekt är att människan får hjälp av roboten att göra annars slitsamma arbetsuppgifter, vilket minskar risken för förslitningsskador. Funktioner som *armimitation* kan till exempel användas till att styra en robot som ska utföra ett arbete i en farlig miljö. Människan behöver då inte vistas i den farliga miljön utan kan styra robotens arm som sin egen arm på ett tryggt avstånd. Denna typ av teknisk utveckling bidrar till ett säkrare och mer ergonomiskt arbete för människan.

En negativ effekt är att arbetet blir mer komplext vilket gör att det blir svårare att utvärdera säkerhetsrisker. Även om roboten inte är programmerad att skada människan finns risken för olyckor. Som tidigare nämnt är det inte helt självklart att avgöra hur dessa olyckor ska hanteras juridiskt samt vem som ska hållas ansvarig.

Slutligen kan det konstateras att utvecklingen av autonoma robotar både har negativ och positiv samhällspåverkan. Den största negativa aspekten som framställs är risken för arbetslöshet men en studie som undersöker samarbetet mellan människa och robot

främjar snarare människans roll inom industrin i framtiden. Studien bidrar positivt till utvecklingen av ett hållbart samarbete då det är essentiellt att utforma tekniken med människan i centrum. Det är dock viktigt att poängtera att vidare undersökningar behövs gällande frågorna kring ansvarsuppdelning och säkerhet.

9 Diskussion

Här diskuteras först allmänna förbättringsmöjligheter för studien i sin helhet samt möjligheter till framtida studier som bygger vidare på denna. Vidare diskuteras de aspekter som behandlar överlämning och armkontrollerad robotstyrning. Bland annat resultatet från användartesterna, hur utrustningen påverkade testerna och hur metoderna kan förbättras.

Det har funnits begränsad möjlighet att påverka vilken hårdvara som användes inom studien, det vill säga robotarm, gripklo, Myoarmband och rörelsekamera. Dock bedöms det att även om det finns utvecklingspotential för vissa delar av hårdvaran så har den i stort givit möjlighet att testa det som skulle undersökas. Roboten och gripklon hade tillfredsställande precision. Rörelsekameran hade däremot ett visst brus i datan men tros ändå kunna användas i vidareutveckling, detta diskuteras under delkapitel 9.2.1. Förbättringsmöjligheter gällande Myoarmbandet diskuteras i sin tur under delkapitel 9.1.

En del förbättringar gällande säkerhet måste göras innan implementering utanför testmiljö är möjlig. Alla tester har utförts i labbmiljö, vilket ställer avsevärt lägre krav på säkerheten jämfört med en faktisk arbetsplats. Här finns möjligheten att undersöka hur Myoarmbandet kan användas för att öka säkerheten i samarbetet med roboten. Till exempel kan det undersökas om det finns spontana rörelser som människan gör när den upptäcker ett problem och vill att roboten ska stanna. En annan möjlighet är att undersöka om musklerna i armarna spänns på ett speciellt sätt när ett fel uppstår och människan vill att roboten ska stanna. Här finns en potential till att utveckla en snabb nödstoppsfunktion, vilket skulle kunna förbättra säkerheten inte bara i samarbete med roboten utan också i andra arbetssituationer.

9.1 Överlämning

Användartester genomfördes för att undersöka hur naturligt människor uppfattade olika överlämningsmetoder. Genom att utföra användartester gavs ett resultat på vilka metoder som upplevdes bäst. Användarnas kommentarer gav ytterligare information om vad det var med de olika metoderna som upplevdes naturligt eller onaturligt.

Den metod som fick bäst betyg för överlämning från robot till människa i det andra användartestet var *Dra eller bända*. Det användes även en kontroll av pitch för att vara säker på att användaren hade höjt armen för att göra en överlämning. Denna extra säkerhetsfunktion tillämpades i kombination med alla olika överlämningsmetoder i andra användartestet.

Dra eller bända fick ett högt resultat vilket visar på styrkan med att använda sensorfusion - att väga samman flera olika sensoriska värden för att skapa en bild av vad användaren vill åstadkomma. Det kan användas dels som i fallet med *Dra eller bända* för att möjliggöra olika kommandon för samma sak. Detta kan göra att fler användare upplever interaktionen som naturlig, och att betydelsen av personlig preferens minskar. Det kan även användas som kontrollen av pitch, som en extra säkerhetskontroll för att minska falsk-positiva kom-

mandon. Detta ger ett mer robust system. En vidareutveckling av detta hade kunnat vara att kombinera flera överlämningsmetoder, samt andra sensorer, för ytterligare frihet och säkerhet för användaren.

Metoden *Roll* var den populäraste metoden för överlämning människa till robot. När det gällde överlämning robot till människa fick dock metoden en längre rankning. Men många användare var ändå positivt inställda till metoden eftersom den upplevdes som väldigt naturlig. Det som hämmade denna metod var att användarna upplevde att det var lätt att ge falskpositiva kommandon, vilket kan leda till att överlämningen misslyckas. Det är möjligt att detta problem kan lösas genom att införa ytterligare en säkerhetsfunktion som försäkrar systemet om att människan är redo för att ta emot eller ge föremålet. Som diskuterat tidigare gällande *Dra eller bända* kan sensorfusion vara en möjlighet för att förbättra metoderna och därmed ge ett mer robust system. En extra sensor som till exempel en rörelsekamera eller en IR-sensor skulle kunna användas för att säkerställa att användaren har handen positionerad framför gripklon.

Vid en överlämning som ska vara naturlig och därav efterlikna överlämningen mellan två människor bör extra delmoment eller rörelser som inte ingår i en vanlig överlämning undvikas. Metoderna *Roll* och *Bända eller dra* kräver inga extra delmoment utan metoderna använder de rörelser som redan förekommer vid en överlämning. Att höja och vrida på armen samt att ta tag i föremålet och dra det mot sig är naturliga rörelser. Detta kan vara en faktor som gjorde dessa metoder populära bland användarna. *Trycka ned*, då användaren trycker föremålet som ska överlämnas till roboten på gripklons undre platta, är däremot mindre tillfredsställande ur denna aspekt. Om en människa ska överlämna ett föremål till en annan trycker hen inte ned föremålet i handen på den andre. Detta var något som ett flertal av deltagarna i användartesterna påpekade. Det är högst troligt att det var just därför som denna metod inte utmärkte sig. Att trycka ned föremålet i gripklons undre platta kan liknas vid att trycka på en knapp för att gripklon ska stängas, vilket i sin tur är ett extra moment som ska utföras utöver den vanliga överlämningen.

Ytterligare en faktor som påverkade användarens upplevelse av *Trycka ned* var fördröjningen i systemets responstid och känslighet. Användaren upplevde att responsen var långsam, vilket bero på att det tar tid för gripklon att stänga sig när den utgår från ett helt öppet läge. Pausen som uppstår då användaren väntar på att gripklon ska ta tag i föremålet blir en fördröjning som känns onaturlig.

En metod vars resultat blev avsevärt högre i det andra användartestet jämfört med det första var *Öppna handen*. Metoden hade förbättras med hjälp av resultatet från första användartestet. Föremålet byttes ut från en skruvmejsel till en liten mutter, och gripklon positionerades i en mer lämplig position för att släppa ned föremål i användarens hand. Detta tyder på att olika överlämningsmetoder lämpar sig bäst för olika föremål, något som även påvisas i användarnas kommentarer. *Öppna handen* passade bäst för små föremål som var svåra att få ett bra grepp om, därför var det bekvämare för användaren att låta föremålet släppas ned i handen. För övriga metoder användes en liten skruvmejsel i det första användartestet, och en mellanstor blocknyckel i det andra användartestet. Alla slutsatser som kan dras från användartesten gäller främst föremål av samma storlek och form som dessa verktyg.

Öppna handen var en metod som trots sitt höga betyg av användarna hade problema-

tiska element. För att gripklon skulle öppna sig och släppa föremålet i handen behövde Myoarmbandet registrera gesten ”öppen hand”. Gestregistreringen fungerade inte för alla användare vilket gjorde att metoden i vissa fall inte gick att använda.

En annan metod som bygger på Myoarmbandets gestigenkänning var *Greppa*, som registrera när användaren har ett grepp kring föremålet. I det första användartestet fick metoden *Greppa* bäst resultat både för överlämning till och från robot. I det andra testet däremot fick *Greppa* sämst resultat både till och från robot. Detta kan bero på att metoden *Greppa* var samma i båda testen medans nya eller förbättrade versioner av de andra metoderna testades i användartest 2. Om metoden *Greppa* också förbättras kan den kanske vara mer konkurrenskraftig gentemot de andra metoderna. Något som påverkade testet av *Greppa* var att Myoarmbandets gestigenkänning inte alltid fungerade. För en del av testanvändarna gavs ett utslag så fort de påbörjade gesten. För andra krävdes det flera försök. För vissa gavs det aldrig utslag för vissa gester, eller så tolkades gesterna fel. Detta gjorde att användarnas bedömning inte bara berodde på användningen av tekniken så som den är tänkt att fungera, utan även på hur väl den fungerade för varje enskild individ.

I de fall då Myoarmbandet registrerade rätt gester för metoden *Öppna handen* upplevde användaren att metoden fungerade bra. Detta gällde även för *Greppa* vid överlämning robot till människa. Därför tros metoder som baseras på gestigenkänning ha stor potential, men det behövs mer robust teknik. Möjligtvis kan Myoarmbandet fungera bra i en annan situation. Som tidigare nämnt i delkapitel 3.2 behöver Myoarmbandet bäras en stund innan gestigenkänning fungerar bra. I testen hade varje användare på sig armbandet i ungefär fem minuter innan användning. Om en montör skulle ha på sig samma armband en hel dag kan det tänkas att resultatet skulle bli bättre.

Något annat som skulle kunna göra gestigenkänningen bättre är att använda en annan mjukvara. Ett alternativ är BioPatRec, en programvara främst tänkt för proteskontroll utvecklad av forskare på Chalmers [31]. Den har avancerade algoritmer för mönsterigenkänning anpassade till muskelaktivitet. Genom att använda denna programvara finns potential för att registrera gester med högre precision.

Resultaten för användartesten gäller främst för en viss typ av användare, då alla som deltog i testen är studenter på Chalmers; personer i tjugoårsåldern med viss teknisk förkunskap. Denna grupp skiljer sig från de som är de tänkta slutanvändarna, montörer i olika åldrar med blandade erfarenheter av att använda industrirobotar. Det kan tänkas att det upplevs mer naturligt att interagera med roboten ifall användaren har tidigare erfarenhet från industrirobotar. Det kan också tänkas att saker som skiljer i styrningen, sedan tidigare erfarenheter, skulle kunna skapa irritation. Därför skulle fler tester med den tänkta målgruppen behöva genomföras innan metoderna implementeras i industrin. Dock uppfyller testet syftet att ge en bild av vilka överlämningsmetoder som känns naturliga för användaren.

9.2 Armkontrollerad robotstyrning

Resultaten från användartesterna av armkontrollerad robotstyrning gav subjektiv information om hur styrningen upplevdes med avseende på prestanda, säkerhet och ergonomi.

Vidare gav de mer konkreta testerna av utrustningen ytterligare information om hur utrustningen påverkade resultaten. Alla tester ger underlag för diskussionen kring hur armkontrollerad robotstyrning upplevdes, hur den kan förbättras och vilken potential som finns för funktionen i framtiden.

Användartesterna utfördes av studenter på Chalmers som alla hade arbetat med utrustningen innan. Vidare gjordes testerna endast av fem personer, och slutsatserna från användartesterna drogs från medelbetyget för respektive metod. Det var en stor spridning för hur testpersonerna upplevde vissa metoder. Detta betyder att resultatet kunde varit annorlunda om fler personer hade testat metoderna. För att få en tydligare bild av prestationen och upplevelsen av metoderna är det därför nödvändigt att utföra större tester med den målgrupp som är avsedd att använda funktionen. Dock anses testerna ha producerat tillräckligt med resultat för att kunna användas som underlag vid vidareutveckling.

9.2.1 Prestanda

En aspekt som utvärderades under användartesten av armkontrollerad robotstyrning var prestanda. Med prestanda avses hur naturlig och lätthanterlig styrningen kändes, samt hur väl roboten utförde användarens kommandon. Den metod som fick högst betyg med avseende på detta var *Armimitation med gripklo*. Av testpersonernas kommentarer framgår det att positioneringen var bra. Det var även naturligt att styra gripklon genom att stänga och öppna näven eftersom det liknar hur rörelsen användaren själv hade utfört för att greppa ett föremål. Dock ansågs styrningen vara skakig, även då testpersonen hade handen still. Från testerna av utrustningen konstaterades att rörelsekamerans positionsbestämning var brusig och kunde svänga med 20 mm avvikelse på under en sekund. Det skakiga beteendet hos roboten tros bero på detta, och kan förbättras genom att lägga till ett lågpasfilter på datan som skickas från rörelsekameran. Det kommenterades också att robotens rörelser upplevdes fördröjda. Detta blev kvantifierat i testet av utrustningen, där det konstaterades att det förekommer fördröjningar på ungefär två och fyra sekunder för vissa rörelser. Fördröjningen gjorde att styrningen kändes mindre naturlig och behöver därmed minskas för en bättre prestanda. En lösning är att öka hastigheten på roboten, dock kommer detta bidra till snabbare rörelser vilket kan göra att användaren känner sig hotad. För att ge användaren en känsla av att ha bättre kontroll borde denne själv kunna välja vilken hastighet roboten ska röra sig i. Myoarmbandet skulle kunna användas för detta, där användaren knyter näven olika hårt för att styra roboten i olika hastigheter.

Vidare fick *Armimitation med fix orientering* nästan samma betyg som *Armimitation med gripklo*. Detta är rimligt i och med att styrningen är den samma för båda metoder. Det kommenterades dock att styrningen av *Armimitation med gripklo* kändes bättre, detta kan bero på att testpersonen hade vant sig vid styrningen efter testet av *Armimitation med fix orientering*. Detta implicerar att styrningen har en viss inlärningskurva och är därmed inte så intuitiv som den önskas vara. Det kan även bero på att det var mer naturligt att styra roboten för att utföra en specifik uppgift, vilket gjordes i testet av *Armimitation med fix orientering*.

Metoderna med lägst betyg med avseende på prestanda var *Armimitation* och *Armjustering*. Baserat på kommentarerna beror detta på att styrningen av orientering inte fungera-

de som avsett. I fallen då det fungerade tyckte dock testpersonerna att styrningen kändes bättre än då orienteringen var fixerad. Orienteringen är alltså väsentlig för att få en så naturlig styrning som möjligt. Under testet av *Armimitation* imiterade roboten rörelsen yaw bra för de flesta testpersonerna. För några lyckades den även imitera pitch-rörelser medan det för andra resulterade i en helt annan orientering. Detta kan bero på de olika koordinatsystemen till Myoarmbandet och roboten, och att transformationen av orienteringsdata mellan dessa inte alltid ger rätt kommando till roboten. Andra kommentarer gällande orienteringen var att den upplevdes mindre intuitiv desto längre styrning pågick. Från testet av utrustningen framgick det att Myoarmbandets orienteringsdata driftar över tid. Att styrningen presterade sämre över tid tros bero på detta. För att åstadkomma en bättre styrning av orienteringen måste dessa aspekter undersökas ytterligare.

Armjustering var den andra metoden där orienteringen inte fungerade som avsett. Här tros felen dels vara de samma som för *Armimitation*, men tros även bero på utformningen av metoden. *Armjustering* utgår från att styrningen av orientering ska ske kring en fixerad punkt. För att roboten ska imitera orientering korrekt behöver alltså användaren rotera armbågen kring handen. Detta är tvärt om från det som är naturligt, nämligen att rotera handen kring armbågen, vilket är det testpersonerna gjorde. En vidareutveckling av metoden bör utgå från den naturliga rörelsen, rotation kring armbågen, för att bättre kunna imitera orienteringen.

En stor fördel med *Armjustering* som lyftes fram under användartesten var möjligheten att nå området på robotens vänstra sida (sett från testpersonen), vilket upplevdes som väldigt svårt med de andra metoderna. Anledningen till detta är att en människa inte kan röra sin högerhand lika långt ut på vänster sida av kroppen som på den högra. I och med att högerhandens position bestäms relativt användarens högerhöft för imitationsmetoderna begränsas därför räckvidden på vänstersidan. För att lösa detta kan handens avstånd i y-led skalas vid styrning på vänstersidan. I så fall skulle en liten rörelse hos användaren ge en större rörelse hos roboten, och med rätt skalning kan roboten nå hela dess räckvidd på vänstersidan. Med en sådan lösning kommer dock styrningen bli väldigt känslig och det kan därmed bli svårt att styra roboten med precision. En annan möjlighet är att låta användaren byta vilken hand roboten följer genom att utföra en enklare gest eller rörelse. Då kan användaren styra roboten på vänster sida med sin vänsterhand och sedan signalera ett byte av hand för styrning på högersida.

9.2.2 Säkerhet

Säkerhet handlar om hur bekväm och säker användaren upplever styrningen av roboten. Från användartesterna framgick att den metod med bäst resultat med avseende på säkerhet var *Armjustering*. Flera testpersoner var positiva till att det bara var ändringen i handens position som styrde roboten. Detta skiljer sig från de andra metoderna, där roboten alltid följer handens nuvarande position, och gör det möjligt att aktivera styrningen utan att roboten rör sig. För att åstadkomma detta för de andra metoderna måste testpersonen komma ihåg var handen var placerad då den senaste rörelsen avslutades, och sedan aktivera styrning i den punkten. *Armjustering* gör det därmed lättare för användaren att ta en kort paus i styrningen där denne kan tänka igenom hur roboten fortsättningsvis ska styras till önskad position. Många människor upplever ofta att de är säkrare när de

har tid på sig att tänka, jämfört med när de inte har den möjligheten. Detta kan vara anledningen till att *Armjustering* fick bäst betyg.

Armimitation med fix orientering var den metod som fick näst högst betyg. En vanlig kommentar var att även fast orienteringen var fixerad så ändrades den under styrningen. Detta beror på att när roboten förflyttar sig mellan två punkter är dess mål att nå rätt slutposition med rätt orientering, vilket leder till att roboten kan röra sig på ett oförutsägbart sätt mellan punkterna. Dessa oförutsägbara rörelser ledde till att testanvändarna inte upplevde metoden som säker. Metoden *Armimitation* fick nästan samma betyg som *Armimitation med fix orientering*. Det testanvändarna lyfte fram som påverkade säkerheten negativt var att styrningen av orienteringen var problematisk. Detta tros bero på samma problem gällande orienteringen som lyftes upp under 9.2.1.

Den metod med lägst betyg var *Armimitation med gripklo*. Att metoden fick lågt betyg kan bero på att detta var den enda metoden där användaren skulle interagera med omgivande objekt under testet. Testanvändarnas respons på testet var blandad, vissa upplevde det som mycket svårt att plocka upp klossen medan andra inte gjorde det. I och med att det fanns en risk att skada omgivningen upplevdes styrningen som osäker.

Generellt från samtliga tester var att ingen kände sig hotad fysiskt eller att de var i personlig fara under styrningen. Detta beror till stor del på att den som styrde roboten inte befann sig inom robotens arbetsradie, hade testanvändarna befunnit sig inom arbetsradien är det troligt att användaren skulle kunna känna personlig fara. Testanvändarna upplevde att det förelåg en risk att skada föremål i robotens närhet eftersom de inte på ett enkelt sätt kunde avbryta styrningen av roboten snabbt.

På grund av detta noterades behovet av en effektiv nödstoppsfunktion. Den som fanns var placerad på en manövreringsenhet till roboten och för att nå denna måste användaren röra på sig, detta innebär att roboten och gripklon också kommer röra på sig. I en typisk arbetssituation så är nödstopps-knappen monterad på väggen eller "arbetsbänken" och tänkt att tryckas på med händerna. Eftersom roboten styrs med händer och armar är detta inte ett alternativ. En möjlighet är att undersöka hur gestigenkänning kan användas till att stoppa roboten, kan till exempel en gest där användaren lyfter handen i en "stopp"-gest. Ytterligare en säkerhetsfunktion som har potential är att använda rörelsekameran för att detektera människor i robotens omgivning. Baserat på denna information kan roboten sänka hastigheten när en människa befinner sig inom dess räckvidd, eller meddela användaren att den inte kan använda den planerade rutten på grund av att ett objekt blockerar det.

9.2.3 Ergonomi

Ytterligare en aspekt som undersöktes vid användartesten var ergonomin. Genom att låta användarna betygsätta de olika metoderna utefter hur ergonomiska de upplevdes kan en diskussion föras kring hur armkontrollerad robotstyrning kan utformas på ett sätt som är skonsamt för användaren.

Från användartesterna framgick det att den metod med bäst resultat med avseende på ergonomi var *Armimitation med gripklo*. Detta tros bero på att metoden hade ett mer

bekvämt sätt att starta styrningen på än de andra metoderna. Vid *Armimitation med gripklo* aktiverades styrningen genom att användaren höjer vänster arm ovanför axelhöjd. Detta är avsevärt mindre ansträngande än att hålla en knuten näve under hela styrningen, vilket användaren behövde göra för att styra funktionerna *Armimitation* och *Armimitation med fix orientering*. Dessa två funktioner fick ett lägre betyg i ergonomi från användarna. Det är viktigt att styrningen är enkel och inte ansträngande för musklerna. Att hålla en knuten näve under en längre tid är uttröttande samt skulle kunna ge användaren kramp i handen. Därav kan det konstateras att en funktion som ska vara ergonomisk inte bör kräva att användaren behöver hålla ansträngande poser under en längre tid.

Funktionen *Armjustering* upplevdes som ergonomisk gällande positionering eftersom det gick att utföra stora förflyttningar i robotens position utan att behöva flytta armen motsvarande sträcka. Genom att använda denna funktion behövde användaren till exempel inte göra icke ergonomiska rörelser så som att sträcka armen fullt ut. Denna metod skulle därav kunna tänkas vara lämplig vid större förflyttningar. Däremot var funktionen bristande angående styrningen av orientering, för att justera orienteringen behövde användaren röra armen i onaturliga och slitsamma vinklar. För att denna typ av styrning ska vara hållbar ur ett ergonomiskt perspektiv måste styrningen av orientering ses över.

Armimitation upplevdes däremot ha en sämre räckvidd, samt att rörelsemöjligheten till vänster ansågs begränsad eftersom användarens kropp var i vägen. Detta gör att denna typ av styrning skulle kunna passa bättre för mindre typer utav rörelser, till exempel montering av små komponenter inom ett litet område.

10 Slutsats

Studien visar att det finns potential för samarbete mellan människa och robot baserat på rörelser med arm och hand. Sensorarmband utrustade med EMG- och IMU-sensorer, rörelsekameror och vridmomentsensorer kan tillsammans skapa en digital bild av armen och handens rörelser som kan användas till styrning av en kollaborativ robot.

Med användartesterna som grund kan det konstateras att den överlämningsmetod från robot till människa som upplevdes mest naturlig var *Bända eller dra*. Denna metod fungerar genom att användaren tar tag i föremålet och drar det mot sig eller bänder det nedåt. När krafter eller vridmoment som verkar på robotens slutled registreras öppnas gripklon. Eftersom metoderna *Bända* och *Dra* var för sig fick avsevärt sämre betyg kan slutsatsen dras att den kombinerade metoden passar in på fler användares preferenser. Alla de som annars hade föredragit en av de två metoderna blir nöjda.

Vidare kan det konstateras att det finns en stor fördel att använda sensorfusion. Genom att kombinera flera olika sensorer kan en tydligare och säkrare digital bild av människans intention skapas. Flera klassificerare kan användas för att skapa ett mer robust system som minskar risken för falskpositiva kommandon. Det kan även användas som i metoden *Bända eller dra*, genom att lyssna på flera olika kommandon får användaren en större frihet att välja själv hur överlämningen ska utföras.

En metod som fick väldigt varierande resultat var *Greppa* (för att ta). Där registrerar Myoarmbandets EMG-sensorer när användaren knyter näven runt föremålet vilket då ska släppas. När gestigenkänningen fungerade som det var tänkt fick metoden bra betyg, men ofta var användarna tvungna att klämma hårt för att rörelsen skulle registreras, och då sjönk betyget. Detta tyder på att det finns potential för gestbaserad interaktion, men att mer robust teknik för gestigenkänning behövs för att användandet ska kännas naturligt.

När det kommer till överlämning från människa till robot var det metoden *Roll* som fick högst betyg av användarna. *Roll* fungerade genom att IMU-sensorerna på Myoarmbandet registrerade den vridning av armen som utförs då armen lyfts för att överlämna ett föremål. Då ett tröskelvärde av vridning registreras av Myoarmbandet stängs gripklon. Den här metoden upplevdes naturlig av användarna eftersom armen ofta vrids upp naturligt när ett föremål överlämnas.

Metoder som *Roll* kräver ingen extra rörelse som inte redan ingår i en överlämning, och användarna upplevde metoden som naturlig och enkel att utföra. Däremot fick metoden *Trycka ned* avsevärt lägre betyg av användarna. *Trycka ned* fungerar genom att användaren trycker ned föremålet de vill överlämna på gripklons undre platta. Det är inte en rörelse som ingår i en naturlig överlämning mellan två människor och kan liknas vid ett extra moment som att till exempel trycka på en knapp.

Ett annat problem med *Trycka ned* var att den upplevdes för långsam. Det är tydligt att systemets responstid och känslighet har stor betydelse för användarupplevelsen. För att systemet ska upplevas som väl fungerande ska det vara responsivt och utan onödiga pauser. Det finns även andra faktorer som påverkar överlämningen, exempelvis personlig preferens, föremålets vikt och storlek. Olika typer av överlämningsmetoder kan vara olika

lämpliga att använda beroende på vilken typ av föremål som överlämnas.

Sammanfattningsvis är det de metoder som mest liknar en överlämning mellan två människor och inte kräver några extra moment de som upplevs som mest naturliga. Genom att ta vara på den kunskap och det muskelminne människan redan besitter utformas en överlämning som är intuitiv och naturlig.

För att ge en naturlig och bekväm helhetsupplevelse för styrning av en robot genom armrörelser och gester måste ett antal aspekter angående prestanda, säkerhet och ergonomi bemötas. Vad gäller prestanda krävs en fungerande manövreringsmetod av både positionering och orientering av robotens slutled. Om däremot orienteringen inte fungerar upplevs dock prestandan som sämre än om bara positionen styrdes. Fördröjningar i robotens rörelser var också något som försämrade styrningens prestanda. Testanvändare upplevde sämre kontroll över styrningen då roboten följde rörelserna med en fördröjning. Vid precisionsmoment så som att gripa tag om ett föremål med gripklon var robotens rörelser ofta svängiga och oberäkneliga. Detta tros bero på rippel hos positionsdatan som erhålls från rörelsekameran. För en optimal prestanda vid små, exakta rörelser måste roboten därför vara stabilare, detta hade kunnat förbättras genom att använda ett lågpasfilter. Vid interaktion med föremål där gripklon används var det tydligt att en gest där användaren stänger sin hand känns naturlig att använda för att stänga gripklon.

Gällande ergonomi kan det konstateras att styrning måste utgå från det som känns naturligt för människan. Detta innebär att undvika obekväma kroppsställningar för att åstadkomma den önskade styrningen, så som att hålla armen maximalt utsträckt eller böjd. Därför upplevs styrning mer ergonomisk när användaren kan upprepa mindre rörelser framför att styrningen sker i en kontinuerlig rörelse. Vidare bör styrningen undvika att ställningar och gester måste utföras under en längre tid, en ergonomisk styrning baseras på korta kommandon från användaren.

Ur ett säkerhetsperspektiv upplevs det generellt sett säkrare med en styrning där robotens rörelser är förutsägbara och intuitiva i förhållande till de kommandon användaren ger. Det är viktigt att användaren kan arbeta i en takt som för denne känns bekväm, med utrymme för att stanna upp och planera hur det fortsatta styrningsmomentet bör se ut. Vidare är det också eftersträvaransvärt med en styrning där roboten aldrig antar en oförutsägbar position eller orientering när styrningen aktiveras. Genom att undvika oförutsägbara rörelser hos roboten upplever användaren att styrningen är mer säker för omgivningen och de föremål som roboten interagerar med. Robotens fördröjning var något som medförde att styrningen inte avslutades direkt när användaren gav ett kommando för detta. Således är det önskvärt att implementera ett nödstopp för att kunna avsluta styrningen direkt.

Den mänskliga rörelsemotoriken och naturliga interaktionen med sin omgivning är mycket komplex. Människor kan utföra precisa rörelser och reagerar snabbt, därför förväntar sig en människa detta vid interaktion. Om en människa ska kunna interagera med en robot på samma sätt som hen interagerar med en annan människa krävs det att systemet har snabb respons och hög precision. Eftersom människor använder en stor variation av tal- och kroppsspråk för att kommunicera sina intentioner är det en utmaning att tolka detta med hjälp av sensorer och algoritmer. Trots detta kommer användandet av bättre sensorer, databehandling, samt en fortsatt utveckling av överlämnings- och styrmetoder, ge ett mer naturligt samarbete mellan människa och robot.

Referenser

- [1] Chalmers. *Människan slår roboten vid slutmontering*. 2012. URL: <https://www.chalmers.se/sv/nyheter/Sidor/Manniskan-slar-roboten-vid-slutmontering.aspx> (hämtad 2018-04-26).
- [2] Pricewaterhousecoopers. *The new hire: How a new generation of robots is transforming manufacturing*. 2014. URL: <https://www.pwc.com/us/en/industries/industrial-products/library/robotic-trends-changing-manufacturing.html> (hämtad 2018-01-30).
- [3] P.L Götvall (Volvo Trucks) privat kommunikation. Febr. 2018.
- [4] V. V. Unhelkar och J. A. Shah. "Challenges in Developing a Collaborative Robotic Assistant for Automotive Assembly Lines". I: HRI Pioneers workshop. Portland, Oregon, USA, 2015, ss 1. URL: http://interactive.mit.edu/sites/default/files/documents/unhelkar_HRI_Pioneers_2015.pdf (hämtad 2018-01-30).
- [5] P. Webb och S. Fletcher. "Industrial robot ethics: facing the challenges of human-robot collaboration in future manufacturing systems". I: A World with Robots International Conference on Robot Ethics. Lisbon, Portugal, 2017, ss 1. URL: https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/11422/Industrial_robot_ethics-2017.pdf?sequence=3&isAllowed=y (hämtad 2018-04-27).
- [6] G. Hoffman och C. Breazeal. "Effects of Anticipatory Action on Human-Robot Teamwork". I: ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction. Arlington, Virginia, USA, 2007, ss 6. URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1228718> (hämtad 2018-02-01).
- [7] N. Mavridis. "A review of verbal and non-verbal human-robot interactive communication". I: *Robotics and Autonomous Systems* 63.1 (2015), s. 23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.09.031>.
- [8] K.Strabala m. fl. "Toward Seamless Human-Robot Handovers". I: *Journal of Human-Robot Interaction* 2.1 (2013), s. 113–117. URL: <http://humanrobotinteraction.org/journal/index.php/HRI/article/view/114/91> (hämtad 2018-03-30).
- [9] Arbetsmiljöverket. *Repetitivt och handintensivt arbete*. 2018. URL: <https://www.av.se/halsa-och-sakerhet/arbetsstallning-och-belastning---ergonomi/repetitivt-och-handintensivt-arbete/?hl=harm> (hämtad 2018-04-20).
- [10] Håltagning. *HEMLIGHETEN BAKOM EFFEKTIV HANTERING AV HANDVERK-TYG*. 2014. URL: <http://www.xn--hltagning-52a.nu/hemligheten-bakom-effektiv-hantering-av-handverktyg/> (hämtad 2018-04-26).
- [11] Joe Ward. "From Complex Numbers to Quaternions". I: *TEACHING MATHEMATICS AND ITS APPLICATIONS*. Vol. 16. 2. 1997, s. 80. URL: <https://academic.oup.com/teamat/article-pdf/16/2/79/5613711/16-2-79.pdf>.
- [12] Yan-Bin Jia. "Quaternion and Rotation *". I: (2017). URL: <http://web.cs.iastate.edu/%7B~%7Dcs577/handouts/quaternion.pdf>.
- [13] *Understanding Euler Angles | CH Robotics*. URL: <http://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles> (hämtad 2018-05-11).

- [14] *ROS/Concepts - ROS Wiki*. 2014. URL: <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts> (hämtad 2018-04-16).
- [15] Nationalencyklopedin. *EMG*. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/emg> (hämtad 2018-04-10).
- [16] Thalmic Labs. *Tech Specs*. URL: <https://www.myo.com/techspecs> (hämtad 2018-04-10).
- [17] Thalmic Labs. *Warm up while wearing your Myo armband*. URL: <https://support.getmyo.com/hc/en-us/articles/203910089-Warm-up-while-wearing-your-Myo-armband> (hämtad 2018-04-27).
- [18] Thalmic lab. *Myoband- Press kit*. 2018. URL: <https://www.thalmic.com/press> (hämtad 2018-05-03).
- [19] M. Peshkin och J. Colgate. "Cobots". I: *Industrial Robot: An International Journal* 26.5 (1999), s. 335–341. DOI: <https://doi.org/10.1108/01439919910283722>.
- [20] KUKA Roboter GmbH. *LBR iiwa specification*. Augsburg, Germany: KUKA AG, 8-01-2015.
- [21] A. Jubien, M. Gautier och A. Janot. "Dynamic identification of the Kuka LWR robot using motor torques and joint torque sensors data". I: *Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control*. Cape Town, South Africa, 2014, ss 8391. URL: https://ac.els-cdn.com/S147466701642937X/1-s2.0-S147466701642937X-main.pdf?_tid=ea63ba92-55ad-4d8d-ac9f-fe353e10ca00&acdnat=1523203529_8651a6d8276c51637106a9720529bf28 (hämtad 2018-03-30).
- [22] P.Touch KUKA AG. . 2018. URL: <https://kuka.sharefile.eu/share/view/s21f07be46ea4786a> (hämtad 2018-04-10).
- [23] Robotiq. *2-Finger Adaptive Robot Gripper*. URL: <https://robotiq.com/products/2-finger-adaptive-robot-gripper> (hämtad 2018-04-10).
- [24] Robotiq. . URL: <https://blog.robotiq.com/robotiq-release-new-force-torque-sensor-ft300> (hämtad 2018-04-08).
- [25] Gonzalez-Jorge m.fl. "Metrological evaluation of Microsoft Kinect and Asus Xtion sensors". I: *Measurement* 46.6 (2013), s. 1803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.01.011>.
- [26] D. Swoboda. "A Comprehensive Characterization of the Asus Xtion Pro Depth Sensor". I: *European Conference on Educational Robotics 2014*. Cape Town, South Africa, 2014, ss 3. URL: <http://www.rob4you.at/wp-content/uploads/2014/11/A-Comprehensive-Characterization-of-the-Asus-Xtion-Pro-depth-sensor.pdf> (hämtad 2018-03-30).
- [27] Olivia Solon. "More than 70% of US fears robots taking over our lives, survey finds". I: *The Guardian* (2017). DOI: <https://www.theguardian.com/technology/2017/oct/04/robots-artificial-intelligence-machines-us-survey>.
- [28] A. Sumi. *En bromskloss för utvecklingen eller en livlina när automatisering och artificiell intelligens konkurrerar ut människor på arbetsmarknaden? Skatt på robotar har blivit en het politisk fråga*. URL: <https://digital.di.se/artikel/nu-borjar-debatten-om-robotskatt> (hämtad 2018-05-04).

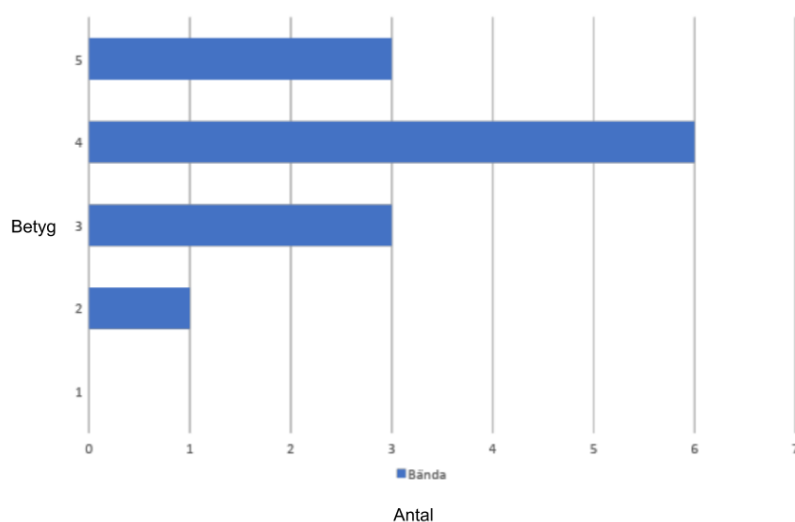
- [29] J. Herkert J. Borenstein och K. Miller. "Self-Driving Cars: Ethical Responsibilities of Design Engineers". I: *IEEE Technology and Society Magazine* 2.36 (2017), s. 71. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MTS.2017.2696600>.
- [30] M. Chui m.fl. *Human + machine: A new era of automation in manufacturing*. 2017. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/human-plus-machine-a-new-era-of-automation-in-manufacturing> (hämtad 2018-01-30).
- [31] Chalmers university of technology. *BioPatRec*. 2017. URL: <https://www.chalmers.se/en/projects/Pages/biopatrec-eng.aspx> (hämtad 2018-04-14).

A Sammanställning av användartest 1

Nedan visas resultatet för de olika överlämningsmetoderna. Stapeldiagrammen visar hur många som gav de olika betygen 1-5. Under diagrammen finns de kommentarer som användarna hade om överlämningsmetoderna.

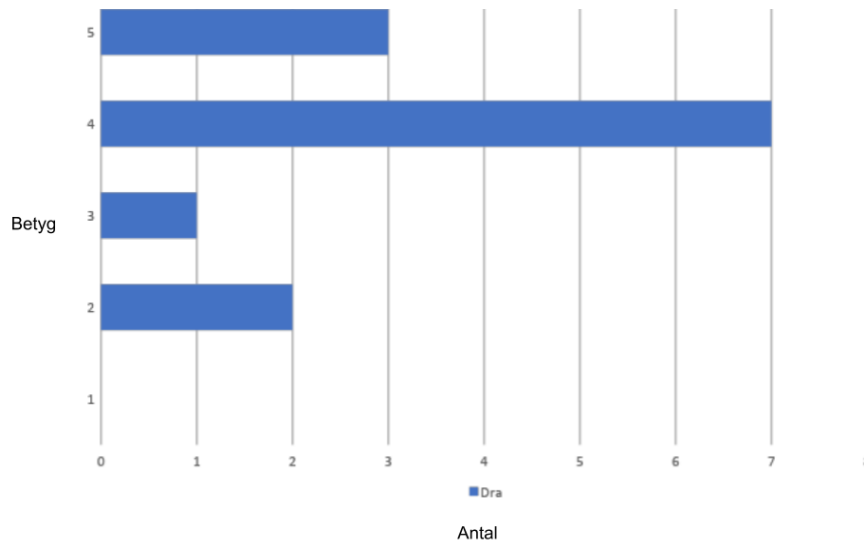
Överlämning robot till människa

Bända



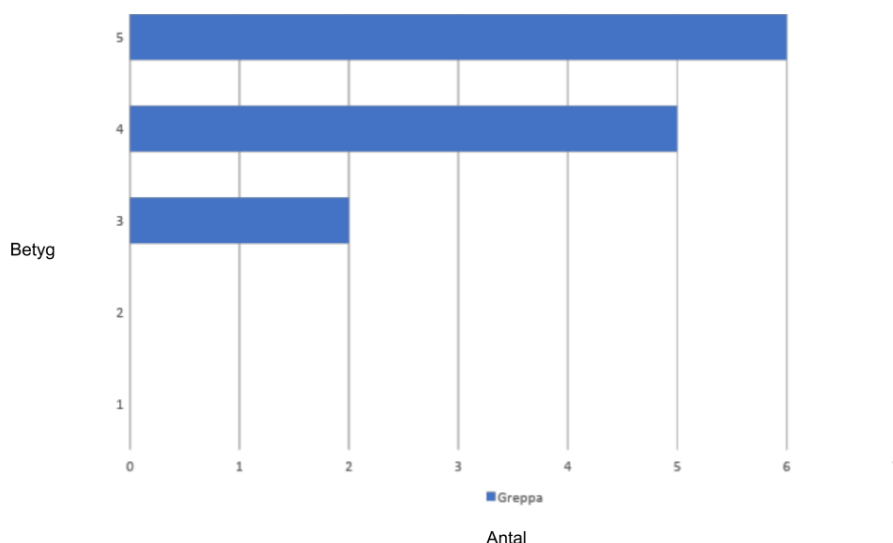
- Funkar till och med med lösnaglar, enkelt och intuitivt.
- Känns naturligt.
- Det känns inte som att en människa räcker en föremålet, men det känns inte konstigt.
- Det går lätt men känns som att föremål kan gå sönder när man bänder.
- Lättare än vad jag trodde först men man får ändå ta i lite. Liten fördröjning som drar ner betyget, det kan störa i monteringsmiljö.
- Lite långsam men det är en robot så man är med på det.
- Naturligt. Kontinuerlig rörelse.
- Den reagerar inte direkt, men när den väl börjar känns det bra.
- Den släpper snabbt, man behöver inte ta i så mycket.
- Man vet inte riktigt om man gjort rätt när det är lite motstånd.
- Smidigt.
- Naturligt, behövdes inte alls mycket kraft.

Dra



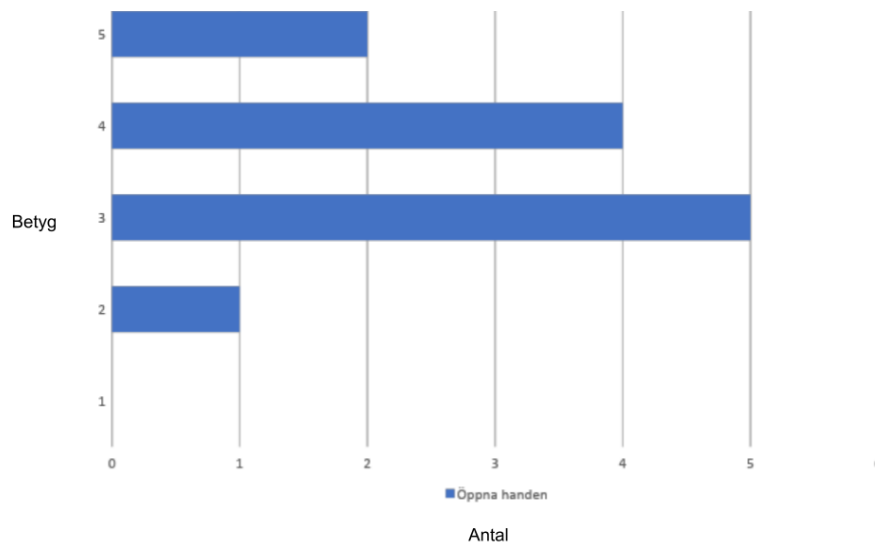
- Väldigt känslig så det är ingenting mot annat i fabriken. Känns lite mer naturligt med torque, men det känns säkrare med force eftersom det är en mer finkänslig rörelse. Så håller den vassa/farliga/känsliga saker är dra bättre, men för ex skruvmejslar är bända bättre.
- Den förra kändes mer naturlig, den känns lite ryckig.
- Mer naturligt än förra. Om någon annan hade räckt mig nåt så hade jag inte bánt det ur handen utan tagit mer rakt (som nu). Mindre jobb för en själv.
- Känns ganska bra. Kanske är svårt med ett föremål med konstig form.
- Den här är skönast, behövs väldigt lite kraft. Känns mer naturligt än att bända.
- Mer intuitiv. Inte lika mycket fördröjning.
- Ungefär lika som förra, nästan direkt. man får ta i lite mer.
- Inte lika bra, känns konstigt att rycka och sen få den.
- Att den inte reagerar direkt känns mer naturligt när man drar.
- Det känns inte lika naturligt att dra rakt ut.
- Känns bättre, när jag ska ta den vill jag dra den mot mig och inte neråt.
- Ännu mer naturligt, som att överlämna till en människa.
- Krävs mycket mer att dra den rakt ut, det blir hoppigt.

Greppa



- Lite seg att öppna sig men den öppnar sig inte mot ens vilja iallafall. Känns osäkert att den öppnar sig när man stänger handen. Litar inte på min arm tillräckligt. Man hade kunnat ha en lampa ready to take". Men gillar de andra sätten mer.
- Känns bra och naturligt, lite fördröjt. Känns som man har mer kontroll för man håller stadigt i föremålet.
- Det känns väldigt naturligt. Den släpper lite för tidigt (den släpper innan testpersonen ens knutit handen).
- Det är nice men tar lite tid. Som att man ska få nåt av nån som är lite trög.
- Man får klämma ganska hårt ibland, ibland går det lätt.
- Det känns lite onaturligt att klämma hårdare än vad man behöver hålla. Men samtidigt behöver man ju se till att man greppar ordentligt. Lite Känns ganska bra, man håller ändå i den så det är bara att man håller lite hårdare. intuitivt att behöva klämma till.
- Naturlig rörelse att klämma när man tar tag.
- Bäst hittills. Närmast att ta emot något från en annan person.
- När det funkade kändes det bra.
- Det kommer mer naturligt när man tar emot något att klämma.
- Ganska naturligt men lite skumt att behöva spänna handen.
- Det var väldigt bra, för när man tar emot det så kniper man ju faktiskt om det, till skillnad från när man lämnar bort.
- Känns ganska bra, man håller ändå i den så det är bara att man håller lite hårdare.

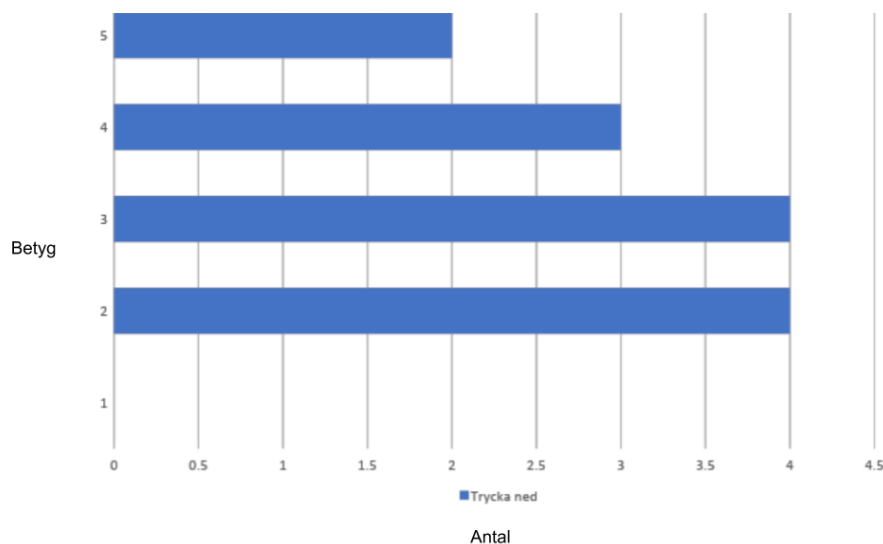
Öppna handen



- Känns lite obehaglig, jag har inget bollsinne. Man vet inte hur mycket verktyget väger.
- Hade mer kontroll på de andra. Beror på vad det är för föremål.
- Det beror på vad jag ska ta emot, en skruvmejsel känns inte naturligt att ta emot såhär. Typ ett suddigummi hade varit bra att ta emot såhär.
- Den är väldigt känslig. Mini-hjärtattack. Blir ganska bra med skruvmejsel. Beror på objektet.
- Den funkar bra man behöver inte sträcka alls mycket. Man kommer eventuellt tappa något när det släpps i handen.
- Funkar inte. (myoarmbandet kände ej igen grepp hos denna person)
- Känns naturligt, beror på pryl. Typ en boll eller nåt hade varit bra att ta emot såhär men verktyg vill man greppa.
- Ganska naturligt.
- Känns bra. Hade varit mer naturligt om den släppt den så den trilla ner i min hand. (blir konstigt pga hur gripklon är riktad)
- Beror på vad man ska överlämna. Ska man få småprylar är detta kanske enklare.
- Jag gillar det inte, känns som risk att tappa den.
- Det är bra och intuitivt för. Beror på vad det är, men för rätt föremål en femma.
- Inte jättenaturligt eftersom man inte håller i den. Om man tar emot skruvar eller nåt så hade det varit bra, men när det är nåt längre så tippas den ner.

Överlämning människa till robot

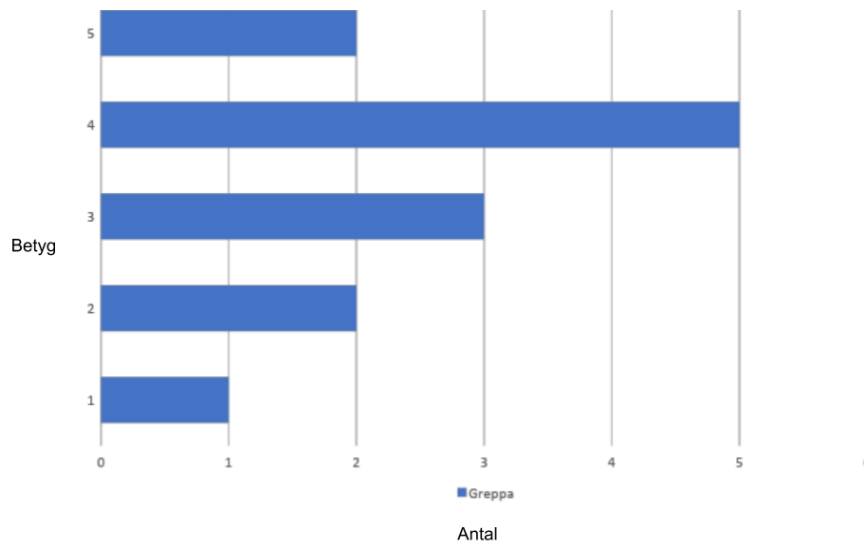
Trycka ned



- Intuitivt och bra.
- Det är lite svårt att veta hur mycket man ska trycka och hur länge man ska hålla kvar. Nu tryckte jag lite men det hände inget.
- Vet inte hur hårt man ska trycka, sen vänta lite. Man brukar inte trycka när man ska lämna över något.
- Detta går snabbare än att till exempel greppa. Mindre jobbigt än att klämma. Lättare att kontrollera.
- Känns bättre än armbandet, man behöver inte använda konstiga rörelser. Behöver lite mycket kraft.
- För ett så litet föremål hade den inte behövt vara så öppen. Det tar tid att den ska stängas.
- Inte jättenaturligt.
- Tar lite för lång tid. Man måste hålla den i position hela tiden, hade velat släppa den tidigare.
- Eftersom den rör sig måste man flytta på handen. Men annars känns det bra. Kan va skönt att den följer med.
- Känns lite konstigt att behöva trycka ner. Hade velat att den tog den bara jag höll den framme.
- Kan man trycka uppåt också? Känns naturligt. Hade känts mer naturligt om det var ett tyngre föremål som man bara kunde lägga utan att trycka så mycket.

- Man skulle vilja göra motsatt mot att dra, att trycka in bara. Känns bakvänt, man hade inte tryckt ner den i handen på en annan människa. Tar lite längre tid också.
- Kommer nog fungera bättre med nåt tyngre, men känns mindre naturligt när man måste trycka.

Greppa



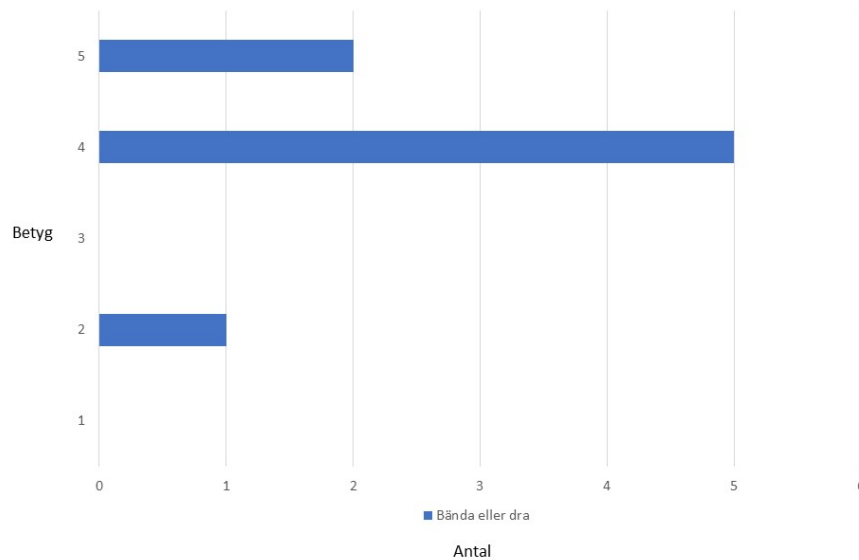
- Känns mer naturligt. Svårt om man tar ett tungt verktyg.
- Man har kontroll över föremålet. Detta känns smidigare än att lägga kraft.
- Detta kändes mycket bättre. Mer naturlig gest.
- Det känns inte naturligt. Helt ok.
- Fräckt! (5 om det funkar smidigt med armbandet)
- Man har ingen kontakt så man måste sikta mer. Med mer övning kan det gå bättre.
- Onaturligt, det är inte jag som ska greppa hårt utan det borde va mottagaren.
- Jag måste knyta näven ganska hårt för att den ska reagera.
- Det känns bra om den funkar. Enklare att klämma än att lägga kraft nedåt.
- Känns väldigt känslig, känns ganska bra. Den märker lillfingret.
- Inte lika bra att man måste klämma till. Lite seg.
- Bättre. Behöver inte lägga på kraft

B Sammanställning av användartest 2

Nedan visas resultatet för de olika överlämningsmetoderna. Stapeldiagrammen visar hur många som gav de olika betygen 1-5. Under diagrammen finns de kommentarer som användarna hade om överlämningsmetoderna.

Överlämning robot till människa

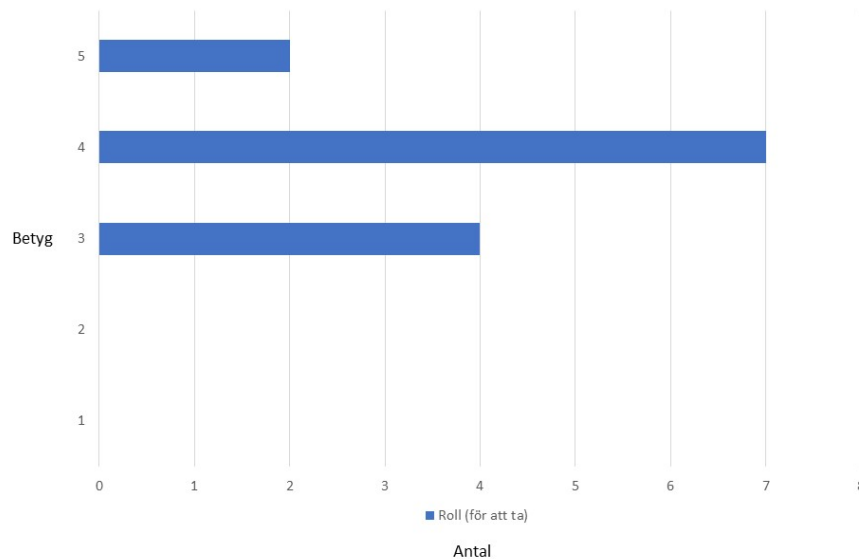
Dra eller bända



- Var inte svårt, nice att kunna ta den hur man vill.
- Det var nice att jag kunde testa på olika sätt, vinkla upp, dra åt sidan. Nästan ingen fördröjning.
- Väldigt intuitivt.
- Bra, snabb, man behövde inte göra något extra för att den skulle fatta att man ville ha den.
- Kändes väldigt bra. Man behövde inte tänka, det var inte svårt. Den släppte lite efter men det kändes tryckt. Man hade ett ordentligt grepp.
- Ganska bra, men blir ett litet ryck.
- Man får ta lite väl mycket, lite krångligt.
- Kändes naturligt, man behövde inte mycket kraft.

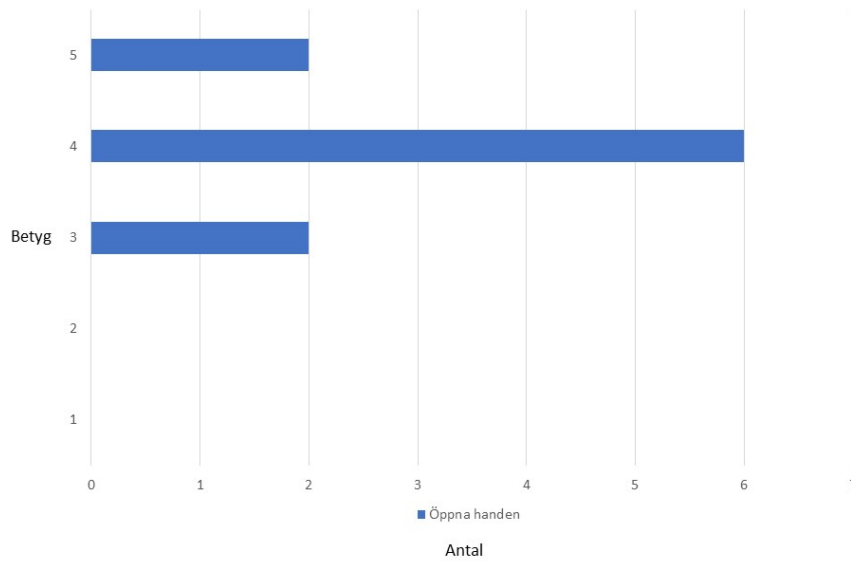
- Funkade bra. Man behövde inte att tänka, ingen jobbig sekvens.
- Känns bra, detta var lätt eftersom det enda roboten behöver veta är att man försöker ta den.

Roll



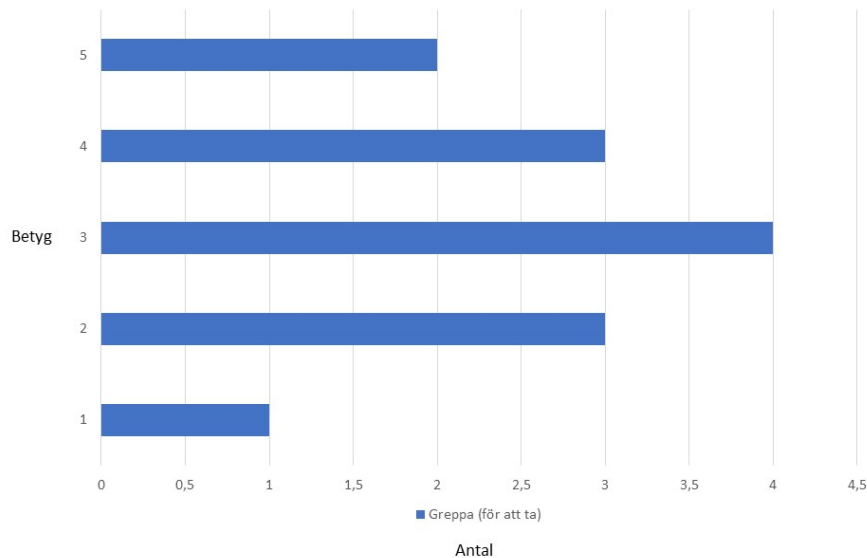
- Beror på föremålet, avlångt föremål fungerar bra då man får ett bra grepp.
- Det känns som att man måste vara beredd på att fånga föremålet.
- Man måste tänka efter lite.
- Passar inte för alla grepp. Reagerar väl.
- Blir lite nervös när det är en sån rörelse, vill inte råka nysa och göra den av misstag. Men kan vara smidigt när man lärt sig.
- Fungerar väldigt naturligt. Lite statiskt att behöva ta föremålet med vridningen.
- Känns bra men den kan vara för snabb. Man kan råka aktivera den av misstag!
- Känns bra att den reagerar snabbt, men man kan lätt göra den rörelsen utan avsikt och tappa verktyget.
- Man måste vara lite snabb. Bra metod men man måste vara beredd.
- Smidigt för att den släppte direkt, man behövde inte rycka.
- Man vet inte om den kommer att släppa när man inte förväntar sig det.

Öppna handen



- Armbandet fungerar inte så bra. Kan vara okej för små föremål.
- Väldigt intuitivt och enkelt. Det var lätt.
- Kändes bra, men man måste öppna handflatan lite mycket och spretigt i just den här gesten.
- Ibland är det lite svårt att få gesten att registreras. Annars känns det väldigt bra.
- Naturlig och lagom snabb.
- Man vet inte exakt när den ska släppa. Annars bra.
- Coolt, lite seg men häftigt.
- Känns bra. Lite onaturligt att spreta med fingrarna.

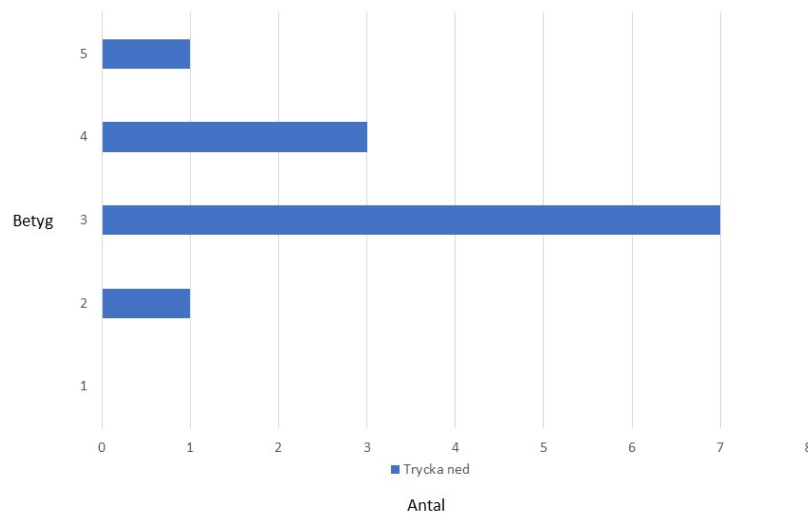
Greppa



- Onaturligt att behöva klämma.
- Man fick greppa ordentligt för att ta emot den.
- Det känns intuitivt när man ska ta den.
- Greppet funkade inte så bra, annars bra att det inte är någon extra rörelse man behöver göra.
- Måste klämma hårt för att armbandet ska lyssna.
- Känns bra, beror på vad föremålet är. Kan vara bra om man vill vara säker på att man har ett bra grepp, typ saker som inte är så stöttåliga så risken minskas att den tappas. På det här viset kan man inte råka stöta till den så att den tappas.
- Gillar inte att hålla fast hårt i saker. Jag skulle inte ta tag i föremålet på det sättet.
- Fungerar bra, det blir naturligt att ta tag i föremålet när man ska ta emot det från robot. Dock fortfarande lite av ett extra moment.
- Bra, inte en jobbig rörelse.
- Lätt att trigga när armbandet fungerade.
- Man har bra kontroll.

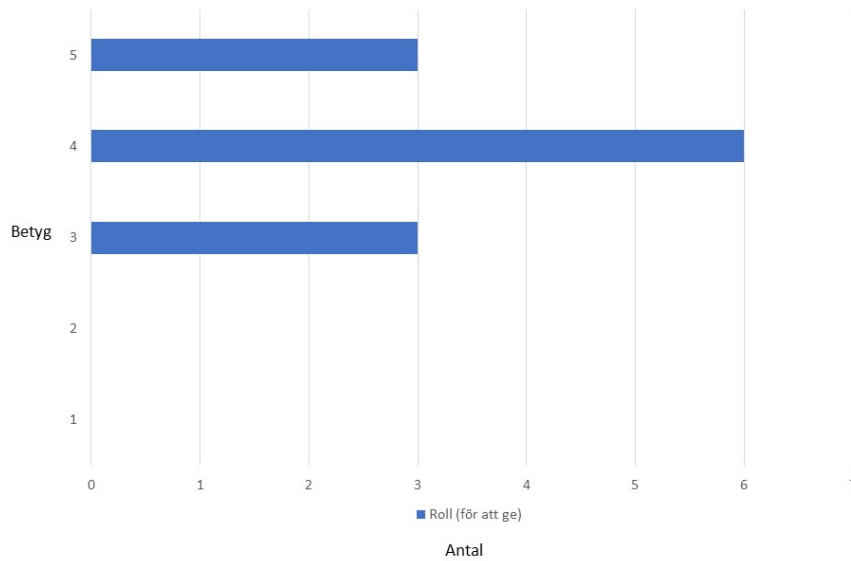
Överlämning människa till robot

Trycka ned



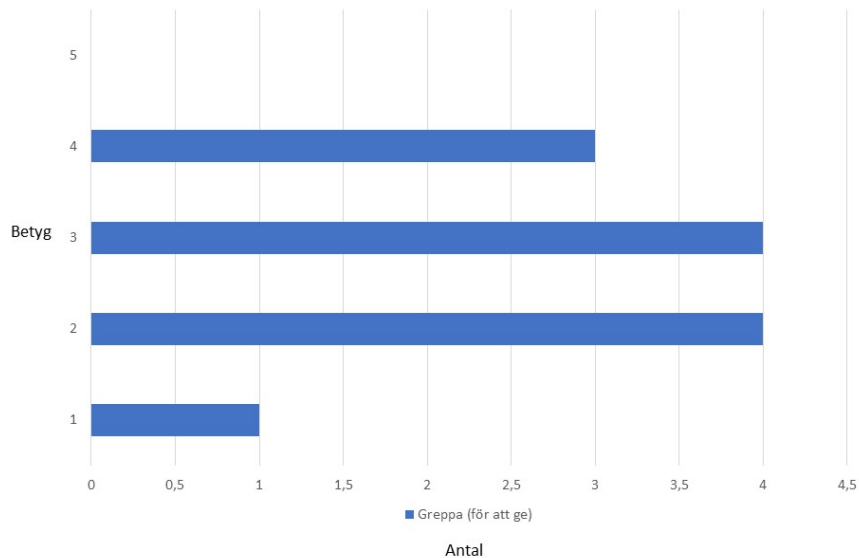
- Inte så naturligt att trycka ned, skulle inte gjort så till en människa. Man har inte så mycket kraft i den vinkeln.
- Det var lite konstigt, feedbacken var lite långsam.
- Bra, det krävs inte mycket kraft.
- Ganska bra, lite ovant att trycka. Men man kan nog komma in i det.
- Snabbare respons hade varit bra.
- Känns inte som att man ska trycka ned när man lämnar över ett föremål, konstigt att trycka ned i någons hand.
- Man får trycka lite väl hårt.
- Man behövde trycka, det är inte helt naturligt. Man vill kunna hålla fram och bara släppa.
- Trycka ned är inte naturligt, man trycker inte ned i handen när man ger något till någon vanligtvis.
- Man var säker på när den skulle röra sig, tydligt kommando.
- Känns bra, man talar aktivt om för roboten att nu ska du ta det här.

Roll



- Känns bättre än att trycka. Man behövde inte vänta lika länge.
- Började stängas lite väl snabbt, man måste vara snabb.
- Det gick snabbt. Naturligt, som att mata en häst.
- Man behövde inte tänka, det var som att ge den som vanligt.
- En mer naturligt överlämning än att trycka ned, lite snabbare respons är önskvärt.
- En naturlig vridning som sker automatiskt när man lämnar över.
- Den var bra, det känns naturligt. Ingen konstlad rörelse, så hade man gjort till en vanlig människa.
- Skönt att bara kunna vrida över armen.
- Känns bra, men man måste anpassa sin fart efter roboten annars hinner man inte med.

Greppa

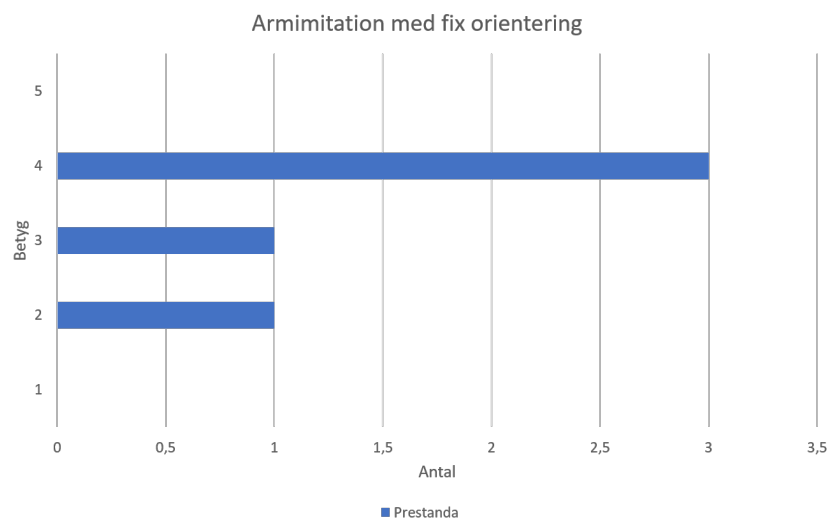


- Det känns lite onaturligt.
- Intuitivt. Greppet registrerades för snabbt. Lätt rörelse, men när man vill lämna känns det konstigt att greppa, inte helt uppenbart.
- Hade vart jobbigt att göra i längden.
- Kändes inte bra, konstigt att greppa tag i något. Man fick ta i mycket för att knytnäven skulle registreras.
- Ganska naturligt, lite svajig respons från armbandet.
- Om du lämnar över något ska man inte hålla fast det så hårt man kan.
- Man måste göra något extra, när man lämnar ifrån sig är det inte naturligt att man kramar mer.
- Funkade inte alltid, konstigt att greppa när man ska lämna
- Gör man det många gånger kan man bli lite trött.
- Registrerade inte greppa så bra.

C Sammanställning av användartest för armkontrollerad robotstyrning

Armimitation med fix orientering

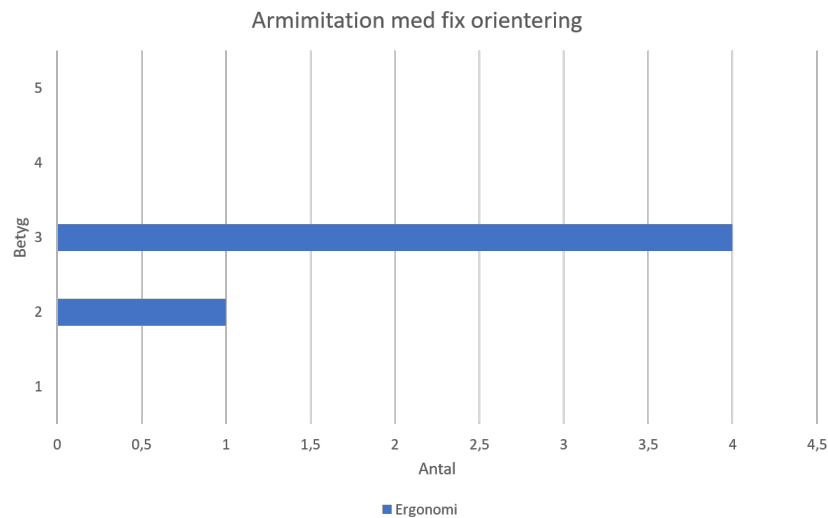
Prestanda



Hur känns styrningen?

- Den gjorde det man ville till viss del, men kändes absolut som den lyssnade.
- Den gör inte vad jag vill göra oftast. Svår att kontrollera.
- Man vill dra bak armbågen för att rätta ut den. Kändes som man tillslut kom dit man ville, men inte helt konsekvent hur den reagerade.
- Känns som att titta i en spegel. Roboten följer rörelserna relativt bra.
- Går oftast dit jag ser för mig att den ska gå, men roboten är efter. Inget nödstopp. Känns naturligt att greppa för att styra, men är obekvämt. Roboten står inte still när jag har armen still.

Ergonomi



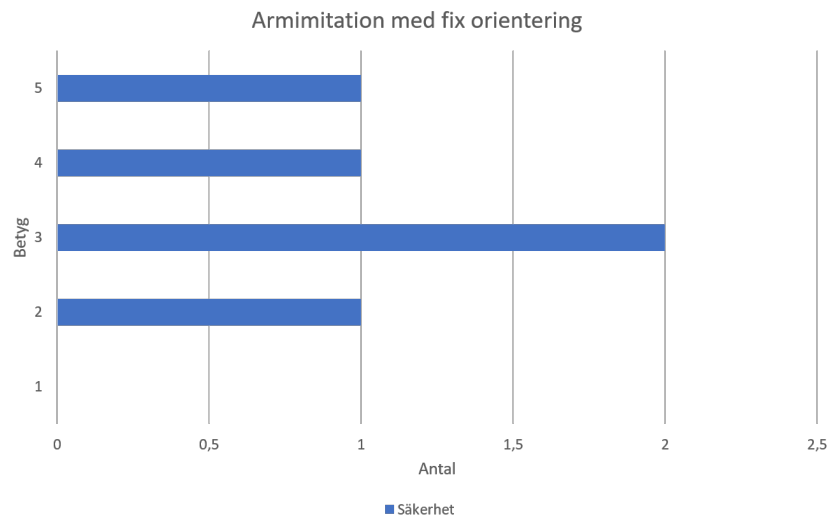
Kändes styrningen ergonomisk/bekväm?

- Beror på hur länge man ska jobba, knyta näven är jobbigt. Beror på hur stora förflyttningar som ska ske, vid små arbetsområden är det nog okej.
- Som den med orientering. Inte så stor skillnad på vinklar och rörelser.
- Jobbigt att behöva klämma, skulle man göra det en hel dag skulle det inte gå. Beror på hur lång tid. Men det är inga tunga lyft. Man behöver inte ha armen över huvudet.
- Inga ansträngande rörelser men jobbigt att behöva knyta handen hela tiden.
- Känns okej. De flesta rörelser kan åstadkommas inom en bekväm räckvidd.

Vad var bekvämt/obekvämt?

- När man ska mot vänster så är det svårt, kroppen är i vägen.
- Bekvämt att bara ha sin egen hand man styr. Man står där man är. Obekvämt att klämma hela tiden.
- Obekvämt att behöva knyta handen.
- För att få till större rörelser hos roboten behöver jag utföra större rörelser med min arm, vilket inte alltid är bekvämt. Det är även obekvämt att knyta näven över längre tid.

Säkerhet

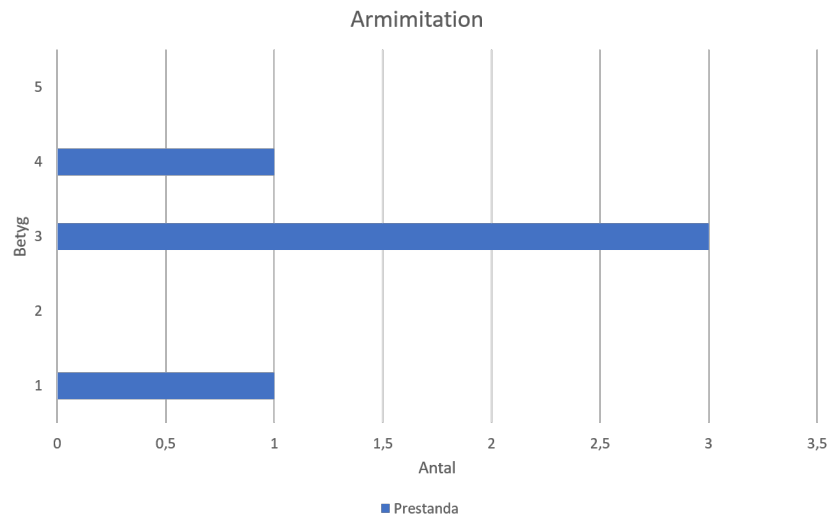


Känner du att du har kontroll?

- Ja, bra kontroll.
- Svårare att kontrollera utan orientering.
- Önskar att den stoppar med en gång när man vill, som ett nödstopp, då hade man känt sig mycket säkrare. Känner sig personligen väldigt säker. Men inte trygg över de föremålen som är nära roboten.
- Ja, roboten ligger lite efter dock så den stannar inte exakt när man vill.
- Ja.

Armimitation

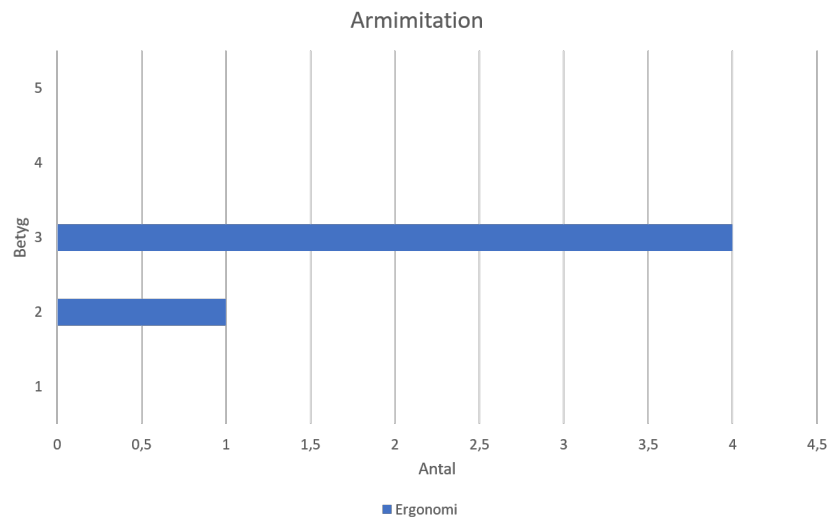
Prestanda



Hur känns styrningen?

- Inte jättebra, gick inte att rikta som man ville, inte så exakt.
- Det är svårt att bara inte orientera den. Men orienteringen funkar riktigt bra.
- När man gör en rörelse följer den bättre än när det inte är orientering. Men vissa grejer som man försökte göra funkade inte som man trodde. Väldigt känslig, om man inte rörde armen rörde sig roboten lite.
- Yaw känns bra och likaså hela rörelsen i början. Efter ett tag känns det som att roboten inte orienterar sig som man tänkt sig.
- Positionen fungerar bra, men orienteringen drar ned betyget. Den lyssnar bra på yaw, men gör inte det jag tycker den borde för andra rörelser. Orienteringen verkar även drifta över tid, vilket gör det ännu svårare.

Ergonomi



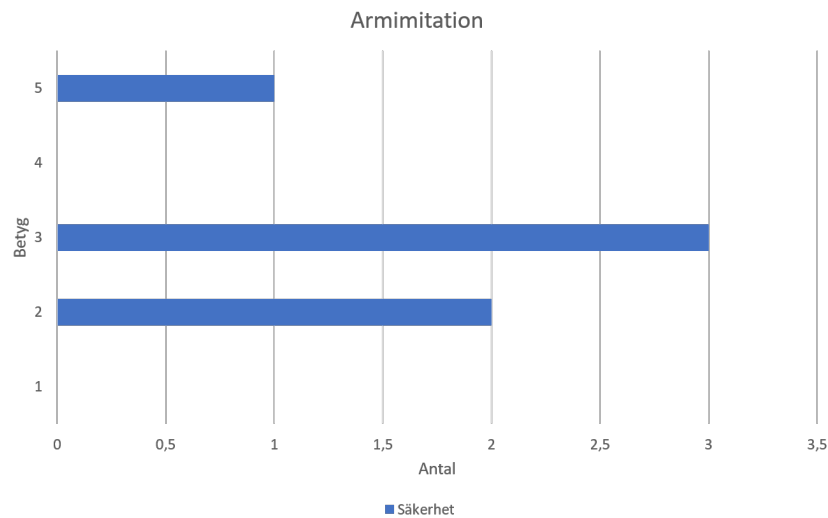
Kändes styrningen ergonomisk/bekväm?

- Okej, inte alltid. Det funkar okej. Svårt att göra vissa rörelser.
- Jobbigt att behöva klämma, skulle man göra det en hel dag skulle det inte gå. Beror på hur lång tid. Men det är inga tunga lyft. Man behöver inte ha armen över huvudet.
- Ungefär som armimitation med fast orientering, fast ibland tillkommer det jobbiga rörelser.
- Känns okej. De flesta rörelser kan åstadkommas inom en bekväm räckvidd.

Vad var bekvämt/obekvämt?

- När man ska mot vänster så är det svårt, kroppen är i vägen.
- Bekvämt att bara ha sin egen hand man styr. Man står där man är. Obekvämt att klämma hela tiden.
- Att behöva knyta handen och påfrestande vridningar av armen.
- För att få till större rörelser hos roboten behöver jag utföra större rörelser med min arm vilket inte alltid är bekvämt. Det är även obekvämt att knyta näven över längre tid.

Säkerhet

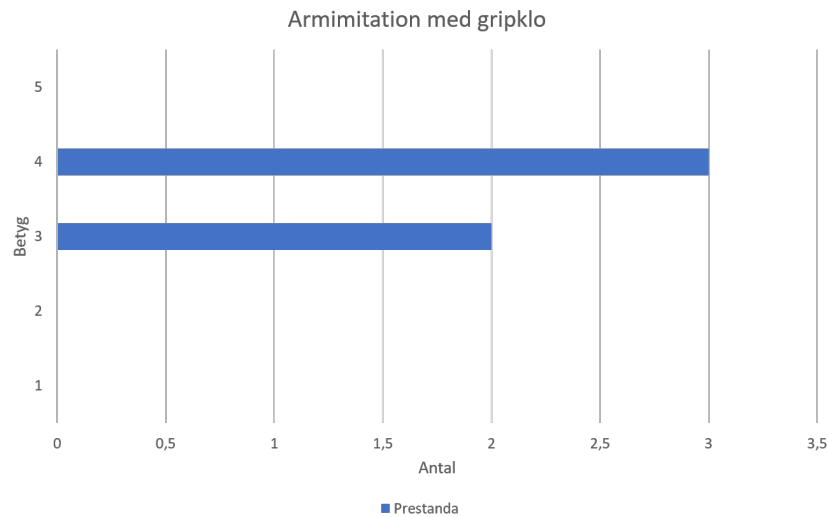


Känner du att du har kontroll?

- Man känner inte att man har full kontroll. När man med armen går tillbaka till kalibreringsläget är inte roboten riktigt var den ska va.
- Önskar att den stoppar med en gång när man vill, som ett nödstopp, då hade man känt sig mycket säkrare. Känner sig personligen väldigt säker. Men inte trygg över de föremålen som är nära roboten.
- Känner stora delar att man inte har någon kontroll eller intuition av hur roboten ska styras.
- Ja, men lite svårt när orienteringen inte gör som jag vill. Känns som jag kommer slå i grejer lättare.

Armimitation med gripklo

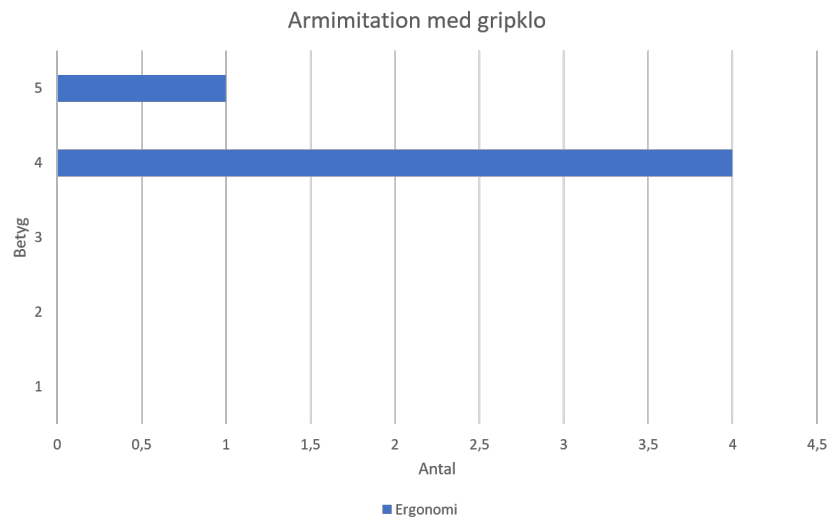
Prestanda



Hur känns styrningen?

- Svårt att styra. Små rörelser blev stora, vilket gjorde det väldigt svårt. Annars funkade det bra.
- Lite ryckig, lite delay, om man vill göra något gör roboten lite andra saker också, till exempel om man vill fram går den lite uppåt också.
- Bra att man känner att den vibrerar när den är redo att styras. Skönt att slippa greppa hela tiden, skönt att trigga. Naturligt sätt att starta och stoppa. Känns naturligt att greppa för att ta ett föremål, men man hade kunnat greppa en gång och sedan släppa för att greppa och samma sak för att släppa.
- Positionen fungerar fortfarande, men den är skakig vilket inte är nice när man ska plocka upp föremål. Det är viktigare att den är noggrann då.

Ergonomi



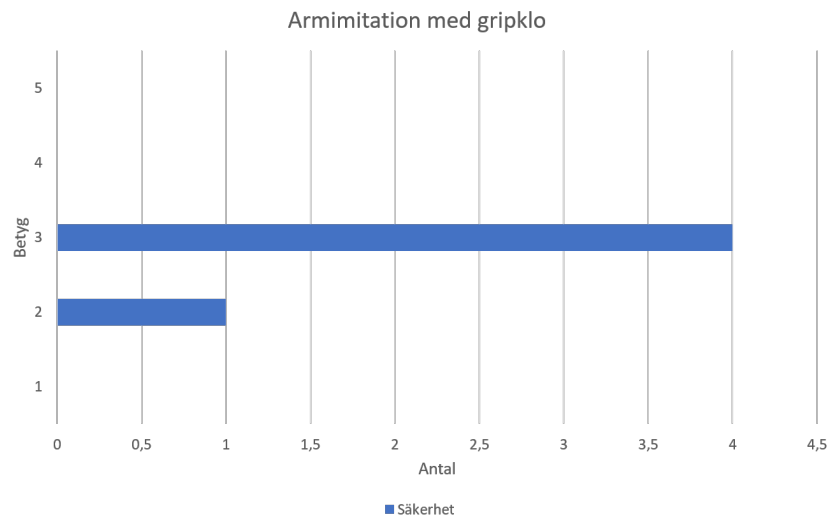
Kändes styrningen ergonomisk/bekväm?

- Mycket bekvämare att trigga, beror på vilken position man använder roboten i.
- Man behöver inte hålla på i en konstig vinkel, men det beror ju på hur man ska plocka grejer.
- Bättre, men man måste fortfarande hålla inne hela tiden när man håller föremålet.
- Som armimitation med fast orientering fast skönt att man inte behöver knyta handen hela tiden.
- Lite bättre än de innan då man inte behöver knyta näven för att aktivera styrningen.

Vad var bekvämt/obekvämt?

- Inget som stack ut.
- Ingen skillnad från förra.
- Skön, men hade varit ännu skönare om man bara behöver greppa kort för att stänga eller öppna gripklon.
- Bekvämt att inte behöva knyta näven hela tiden och i stället lyfta armen. Lite obekvämt att knyta näven så länge man vill greppa.

Säkerhet

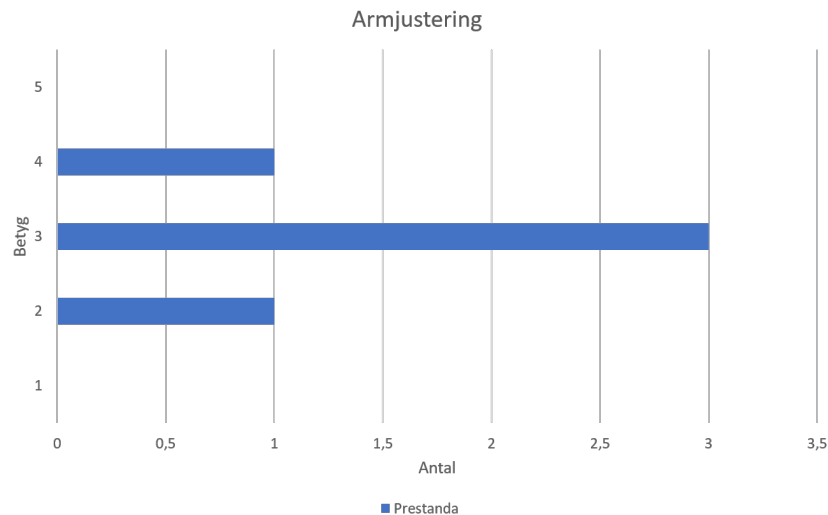


Känner du att du har kontroll?

- Det är väldigt svårt.
- Hyfsad, klarade testet på första försöket.
- Har ganska bra kontroll, man lär sig nog fort. Bara man är van vid fördröjningen lär man sig hur det funkar.
- Samma som armimitation med fast orientering.
- Generellt bra kontroll om jag tar tid på mig så roboten hinner stanna innan jag fortsätter rörelsen in mot föremålet. Dock står inte roboten still när jag försöker ha armen still, och det känns inte nice nära objekt.

Armjustering

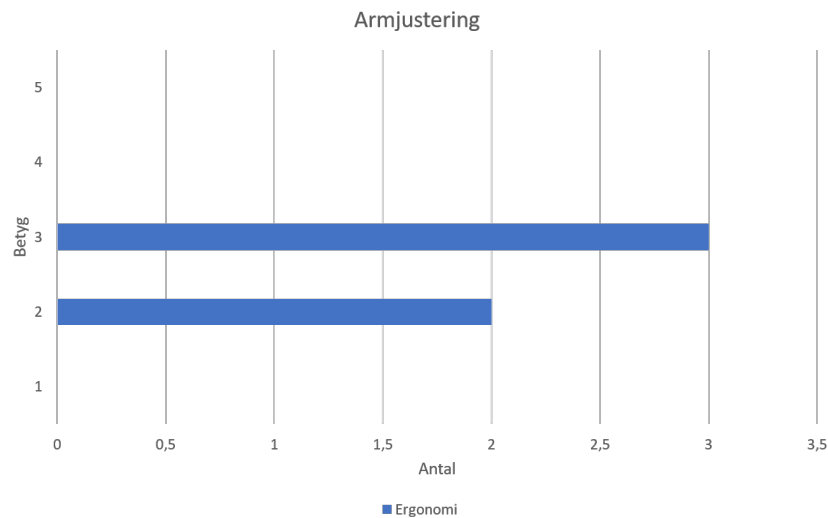
Prestanda



Hur känns styrningen?

- Funkar väldigt bra om armbandet fungerar, bortser man från det var det smidigt. Var praktiskt om man ska göra stora rörelser. Smidigt att man kan styra orientering och position separat.
- Ganska otydligt hur man skulle göra för att orientera den. Men funkar helt okej.
- Känns tvärt om, trodde man skulle kontrollera med yaw och så blev det pitch. Positionen får man inte till bra. Ser att det inte finns någon led som kan ta den till vart man vill. Svårare med en uppgift att göra, förut va det mest att leka runt. Mer rörelse, framförallt om man kan röra roboten hela vägen runt. Bra att man kan dra den istället för att behöva sträcka armen långt. Coolt att man kan byta, ger fler möjligheter.
- Positioneringen känns skön och att man inte behöver sträcka armen så lång utan kan dela upp förflyttningen i etapper. När orienteringen kommer in känns det ointuitivt, dock skönt att man inte behöver tänka på positioneringen då.
- Styrningen av positionen känns bra. Den rör sig som jag tycker att den borde. Orienteringen responderar inte som jag tycker att den borde. Svårt att veta hur man ska röra armen för att få önskat ändring i orienteringen. Bra att dom styrs var för sig.

Ergonomi



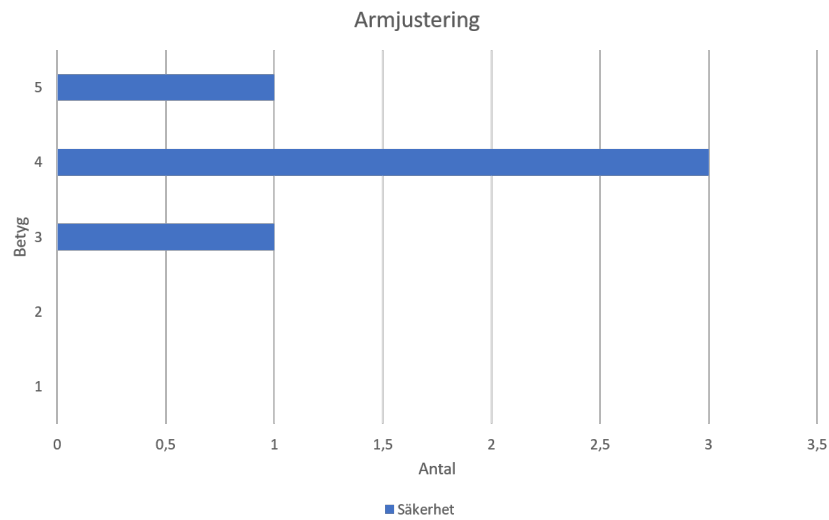
Kändes styrningen ergonomisk/bekväm?

- Styrningen kändes obekväm vid orientering.
- Jobbigt att knyta handen. Inga konstiga rörelser.
- Som armimitation med fast och rörlig orientering.
- Positionen känns bra, orienteringen känns inte bra.

Vad var bekvämt/obekvämt?

- Kändes oergonomiskt att ändra orientering, positionen är okej. 3 för positionering.
- Obekvämt att greppa för att styra.
- Att behöva knyta handen och påfrestande vridningar av armen.
- Mer bekvämt att kunna styra positionen inom ett mindre område. Var tvunget att ställa mig i några obekväma ställningar för att få till önskat orientering då den inte reagerar som jag tycker den borde.

Säkerhet



Känner du att du har kontroll?

- Man hade behövt en robot som rör sig bättre.
- Ja hyfsad, den gör vad man säger åt den fast på sitt sätt.
- Känns säkrare för att när man börjar igen vet man att den börjar på samma position som när man slutade.
- Skönt att roboten börjar på den position den slutat på så man slipper oroa sig för att den åker iväg till en helt oberäknelig position.
- Känns som jag har mer kontroll än dom andra i och med att jag alltid kan starta rörelsen genom att ha handen där jag själv vill.

D Guide till uppstart av systemet

Systemet som har använts i projektet består av roboten, gripklon, Myoarmbandet, rörelsekameran och en dator från vilken programmen körs. Här följer en guide på hur man får igång och kopplar ihop de olika delarna.

Dator

När projektet genomfördes fanns det en stationär dator vid roboten, med Linux som operativsystem och ROS Indigo installerat. Den användes när roboten, gripklon och/eller rörelsekameran skulle användas. När bara Myoarmbandet skulle användas räckte det med en virtuell Linux-maskin på en Windows-dator, vi rekommenderar inte att använda virtual box till styrning av robot, gripklo eller rörelsekameran. En guide till hur man installerar en virtuell Linux-maskin med ROS Indigo finns på länken nedan, under **PC Setup**.

<http://aeswiki.datasys.swri.edu/rositraining/indigo/Exercises/>

När man jobbar i ROS använder man ett **catkin workspace**. Kommandot som används för att bygga workspacet är `catkin_make`. Ibland kan ett felmeddelande dyka upp: "Could not find a package configuration file provided by `x_y`". Kör då: `sudo apt-get install ros-indigo-x-y`, där `x_y` kan vara olika paket.

Robot

För att kunna styra roboten med ROS används "iiwa_stack", vilket är en samling av paket utvecklad för styrning av specifikt KUKA iiwa. Innan det går att skicka kommandon genom ROS till roboten måste allt på robotsidan och ROS-sidan vara rätt konfigurerat för att få kontakt.

1. Ladda ner iiwa_stack till ubuntu genom att köra:
`git clone https://github.com/IFL-CAMP/iiwa_stack`
2. För att ställa in nätverk på cabinet:
https://github.com/IFL-CAMP/iiwa_stack/wiki/cabinet_setup.
3. Ställ in rätt IP-adress i ROS:
https://github.com/IFL-CAMP/iiwa_stack/wiki/roscore_setup
4. Konfigurera Sunrise-projekt i Sunrise Workbench enligt följande:
https://github.com/IFL-CAMP/iiwa_stack/wiki/sunrise_project_setup
 - (a) Om någon mjukvara i StationSetup.cat saknas kan denna installeras genom att klicka: Help>Install new software...>Add...>Archive...>Leta upp .zip-filen för rätt mjukvara och installera denna.

5. Ladda över Sunrise-projektet genom koppla in ethernetkabeln som går till kontakten ovanför on/off-switchen på roboten i Windowsdatorn, öppna sedan StationSetup.cat och installera den. Roboten kommer då att starta om och efter det kan man trycka på synchronize project (en liten knapp “uppe till vänster” i Sunrise Workbench).
6. Koppla in ethernetkabeln som går till kontakten vid USB-uttagen på kabinetten i ubuntudatorn och ställ in IP-adressen 160.69.69.100(IPv4) och Netmask 255.255.255.0. Nu ska man kunna pinga 160.69.69.100 och 160.69.69.69 (kolla så att ethernet är på).
7. Starta en master på ubuntudatorn genom att köra t.ex. roscore eller roslaunch iiwa_moveit moveit_planning_execution.launch
8. Starta ROSSmartServo m.h.a. smartpaden (Hittas under Applications). Kör på T1 läget. För att starta smartservo håll inne dödmansgrepp och håll in play för att köra. När ROSSmartServo är igång ska ett antal topics komma upp i ROS. Kolla detta genom att skriva `rostopic list` i en terminal på ubuntudatorn.
9. Roboten kan också styras via smartpaden genom att hålla in dödmansgrepp och använda + och - knapparna.

Tips och tricks

- Om inget publiceras på topics så koppla ut ethernetkabeln till ubuntudatorn, stäng av roboten och börja från steg 6 igen.
- Kommentera bort IP-inställningarna i .bashrc-filen då ROS ska köras utan att vara uppkopplad mot roboten. (se steg 3)
- Om roboten inte rör sig kan det ofta lösas genom att starta om SmartServo.

Gripklo

För att lossa och fästa gripklon på robotens verktygsväxlare används tryckluft. Gripklon kopplas till datorn och till spänningsaggregatet. För att använda gripklon genom ROS används paketet **robotiq**. Här följer en installationsguide och vad man kan göra vid några olika felmeddelanden.

1. För att ladda ner robotiq-paketet, kör i terminalen:
`git clone https://github.com/ros-industrial/robotiq.git`, sen:
`rosdep install robotiq_modbus_tcp`
2. Om du får felmeddelande:
”The following packages have unmet dependencies...”, kör:
`sudo apt-get install -f`, och börja sedan om från steg 1.

3. Om du får felmeddelande:
"Sub-process /usr/bin/dpkg returned an error code (1)", kör:
`sudo dpkg -i -force-overwrite /path/to/error.deb`
`sudo apt-get autoremove`
`sudo apt-get update`, och börja sedan om från steg 1.
4. För att installera de paket som behövs, kör:
`sudo apt-get install ros-indigo-soem`
`sudo apt-get install ros-indigo-hardware-interface`
`sudo apt-get install ros-indigo-controller-manager`
`sudo apt-get install ros-indigo-moveit`
`sudo apt-get install ros-indigo-socketcan-interface`
5. För att tillåta access till USB-porten, kör:
`sudo -s`
`sudo usermod -a -G dialout <user>`, där <user> är till exempel ros-industrial
om du kör virtuell maskin. Kör sedan `exit` och logga sedan ut och in igen.
6. För att göra noderna du behöver körbara, kör:
`chmod +x CmodelRtuNode.py`
`chmod +x CmodelSimpleController.py`
7. För att koppla gripklon till ROS via USB, kör:
`roslaunch robotiq_c_model_control CModelRtuNode.py /dev/ttyUSB0`
Nu ska lampan på gripklon lysa blå.
8. Öppna ett nytt terminalfönster och kör:
`roslaunch robotiq_c_model_control CModelSimpleController.py`
Detta är en styrnod som du kan kontrollera gripklon med. Kör först **reset** och sedan **activate**.

Myoarmband

När Myoarmbandet ska användas kopplas bluetooth-stickan till datorn. Det paket som används för att använda Myoarmbandet med ROS är **ros_myo**. Kom igång med Myoarmbandet på följande sätt:

1. Om du kör Virtual Box, gå in i menyn **Devices/USB** och klicka i **Bluegiga Low Energy Dongle** för att ge tillgång till USB-porten.
2. Ladda ner paketet du behöver genom att köra i terminalen:
`git clone https://github.com/uts-magic-lab/ros_myo.git`
3. Alltid när Myoarmbandet körs måste dess huvudnod köras:
`roslaunch ros_myo myo-rawNode.py`
4. Ibland kan man få ett felmeddelande:
"...Permission denied: '/dev/ttyACM0'", kör då:
`sudo chmod 666 /dev/ttyACM0` för att få läsrättigheter till USB-porten.

Rörelsekamera

Rörelsekameran kopplas till datorn via en USB-sladd. För att använda kameran via ROS måste paketet **openni_tracker** laddas ner. Sen, för att kunna bestämma positionen till alla kroppens ledar behövs programvaran NiTE. Rekommenderas att använda version 1.5.2.23 då den var den enda som fungerade med **openni_tracker**. Beskrivning av hur programmet fungerar finns på deras wikisida http://wiki.ros.org/openni_tracker.

1. Ladda ner openni_tracker till ubuntu genom att köra:
`git clone https://github.com/ros-drivers/openni_tracker`
2. Ladda ner rätt version NiTE från deras hemsida
<http://openni.ru/openni-sdk/openni-sdk-history-2/index.html>
 - (a) Filen som laddas ner är en tar.zip-fil som måste packas ut till exempelvis datorns skrivbord.
 - (b) När det är gjort har man fått en ny mapp av typen ****** som också måste packas ut enligt ******.
 - (c) Sen kan man installera programmet genom att navigera till den nya mappen och köra kommandot ******.
3. När allt är installerat och byggt kan programmet körs med kommandot
`roslaunch openni_tracker openni_tracker`
4. Ställ dig framför kameran i en såkallad *psi pose*. Se wikisidan till openni_tracker. Detta startar kalibreringen av programmet.
5. När kalibreringen är klar kan positioner mellan kroppens leder läsas av från transformer som skapas av programvaran.
6. För att visualisera i **rviz** kör
`roslaunch rviz rviz`
 - (a) Rviz måste så sättas upp med rätt inställningar. Börja med att ändra **Global Options** till *openni_depth_frame*
 - (b) Lägg in alla transformer mellan kroppens leder. Tyck på **add** och sen på **tf**.
 - (c) Du ska få upp en bild på dig med koordinatsystem i alla kroppens leder.