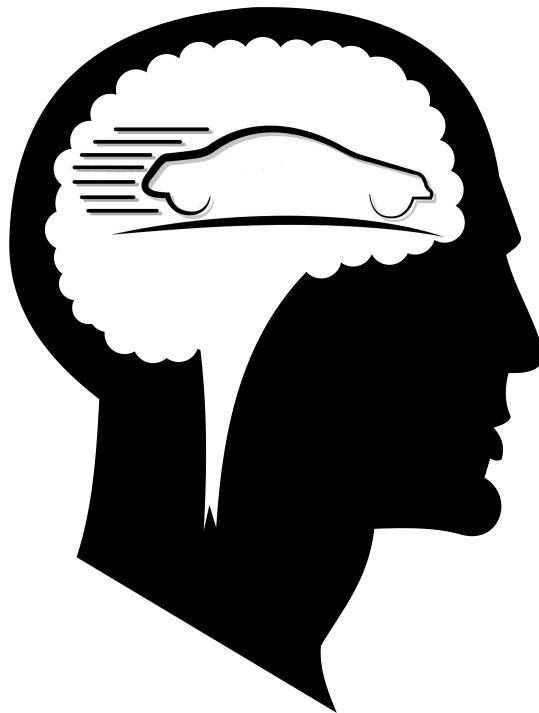


CHALMERS



Tankestyrt Mekaniskt System

Undersökning av hur en modellbil kan styras med hjälp av hjärnaktivitet

Kandidatarbete inom Data- och informationsteknik

VIKTOR BERNTSSON
MARTIN HERMANSSON
EMMA HÅKANSSON
CHRISTIAN LARSSON
VICTOR NILSSON
ZREAN TOFIQ

Institutionen för Data- och Informationsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Gothenburg, Sweden 2015

The Authors grants to Chalmers University of Technology and University of Gothenburg the non-exclusive right to publish the Work electronically and in a non-commercial purpose make it accessible on the Internet. The Author warrants that he/she is the author to the Work, and warrants that the Work does not contain text, pictures or other material that violates copyright law.

The Author shall, when transferring the rights of the Work to a third party (for example a publisher or a company), acknowledge the third party about this agreement. If the Author has signed a copyright agreement with a third party regarding the Work, the Author warrants hereby that he/she has obtained any necessary permission from this third party to let Chalmers University of Technology and University of Gothenburg store the Work electronically and make it accessible on the Internet.

Tankestyrt Mekatroniskt System

Undersökning av hur en modellbil kan styras med hjälp av hjärnaktivitet

VIKTOR BERNTSSON
MARTIN HERMANSSON
EMMA HÅKANSSON
CHRISTIAN LARSSON
VICTOR NILSSON
ZREAN TOFIQ

© VIKTOR BERNTSSON, 2015.
© MARTIN HERMANSSON, 2015.
© EMMA HÅKANSSON, 2015.
© CHRISTIAN LARSSON, 2015.
© VICTOR NILSSON, 2015.
© ZREAN TOFIQ, 2015.

Supervisor: Roger Johansson, Institutionen för Data- och Informationsteknik

Examiner: Arne Linde, Institutionen för Data- och Informationsteknik

Chalmers University of Technology
University of Gothenburg
Department of Computer Science and Engineering
SE-412 96 Göteborg
Sweden
Telephone + 46 (0)31-772 1000

Cover: Project Logotype

Department of Computer Science and Engineering Göteborg, Sweden June 2015

Sammanfattning

Denna rapport beskriver utvecklingen av en radiostyrd bil vars kontrolls signaler motas genom att läsa av användarens hjärnaktivitet. Tekniken som används, brain computer interface (BCI), gjordes nyligen kommersiellt tillgänglig. Detta är anledningen till att majoriteten av implementationerna än så länge är enkla program för underhållnings- och utbildningssyfte. I arbetet undersöks möjligheten att konvertera digitala signaler från ett BCI till styrsignaler för en radiostyrd bil med hjälp av en mikrokontroller. Målet är att undersöka ytterligare användningsområden för denna teknologi.

Eftersom den nyttjade BCI-hårdvaran (MindWave Mobile) använder sig av ett fördefinierat kommunikationsprotokoll är prototypen byggd kring dessa begränsningar. Mikrokontrollern tar emot data från ett BCI genom Bluetooth och konverterar datan till styrsignaler som skickas till kretskortet i bilens handkontroll. För att tillåta kalibrering kan samma data även skickas till en extern dator. Datan tas emot, tolkas och visas av ett program som är framtaget för detta syfte.

Rapporten diskuterar och evaluerar den slutliga prototypen med fokus på användbarhet och kontrollerbarhet. Den beskriver även andra användningsområden av BCI med paralleller till resultatet. Slutligen beskrivs möjliga förbättringar av prototypen, vilket kan leda till fortsatt utveckling.

Resultat från utförda användartester tyder på att den utvecklade bilen har vissa brister, framförallt vad gäller kontrollförmågan. Trots detta finns det ett tydligt intresse för den nyttjade tekniken och därmed bör vidare studier på området utföras. Efterföljande arbeten bör dock utgå från någon annan typ av BCI.

Abstract

This thesis describes the development of a radio controlled car whose control signals are derived exclusively by reading the brain activity of the controlling individual. The utilised technology, brain computer interface (BCI), was recently made commercially available which is why the majority of implementations so far are relatively simple programs intended for recreational and educational purposes. The study explores the possibility of converting the digital signals gained from a BCI to control signals for the remote controlled car through the use of a microcontroller. The goal is to discover further uses of this technology.

Since the utilised BCI hardware (MindWave Mobile) uses a predefined communications protocol, the prototype was built around these limitations. The prototype receives data from the BCI through Bluetooth and converts them to signals for the radio controlled car to receive. In order to allow visualization and testing, the same data may be sent to an external computer. This data is received, interpreted and displayed by a program developed specifically for this purpose.

The thesis also discusses and evaluates the resulting prototype, focusing on the usability and difficulty of control. It further describes other usage areas of BCI, relating them to the result. Lastly, potential improvements of the prototype are described, enabling further development.

Test results shows that the resulting car is experiencing problems, mainly to do with controllability. Nevertheless, there is clearly an interest in the technology which merits further research. Any subsequent studies should however use different BCI hardware.

Förord

Av alla teknologier som är på frammarsch hör de som är kopplade till hjärnan till de mer fascinerande. Några personer och företag har anammat denna tankegång och givit stöd i examensarbetet, som upptagit 15 av de 300 högskolepoäng som utgör vår utbildning. Därför vill vi, studenter vid Chalmers Tekniska Högskola på institutionerna E, D, IT och Z, framföra ett tack till Er som bidragit till projektets utveckling och framgång.

Tack till vår handledare Roger Johansson (Chalmers Tekniska Högskola) för gott handledarstöd och goda råd. Det har bidragit till ett än mer lyckat resultat.

Tack till vår examiner Arne Linde (Chalmers Tekniska Högskola) för praktisk hjälp med arbete och material. Utan det hade inget resultat funnits att presentera.

Tack till Magnus R Johanson (Manager Power Solution - Digital, Ericsson) för uppmärksammandet av arbetet och förtroendet att få presentera det för Er på Ericsson.

Slutligen, tack till Chalmers Teknologkonsulter AB för möjligheten att presentera arbetet i finalen av Bachelor's Challenge 2015.

Författarna, Göteborg, Juni 2015

Ordlista och förkortningar

ABS-plast En plast som består av sammansättningen Akrylnitrilbutadienstyren.

avslappning En typ av data från MindWave Mobile.

BCI brain computer interface.

COM-port Communication port.

EEG Elektroencefalografi.

hårdvaruprototyp Chassit och komponenterna det omsluter.

kontrollförmåga Att avsiktligt ge bilen en styrsignal.

kontrollvärde Ett värde som avgör när en styrsignal ska skickas till handkontrollen.

MindGUI Det framtagna visualiseringprogrammet.

MindWave Mobile En produkt som kan avläsa EEG-vågor utvecklad av företaget NeuroSky.

neutraltillstånd Tillståndet hos en person utan avsikt att på något sätt manövrera den radiostyrda bilen. En tänkt baslinje för personens hjärnaktivitet.

prototyp Två MindWave Mobile, hårdvaruprototypen och den radiostyrda bilen.

uppmärksamhet En typ av data från MindWave Mobile.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Bakgrund	2
1.2.1	Historik över BCI-teknologin	2
1.2.2	Teknisk bakgrund	3
1.3	Mål	4
1.4	Metod	4
1.4.1	Metod för att konstruera hårdvaruprototyp	4
1.4.2	Metod för att uppnå kontrollförmåga	5
1.5	Avgränsningar	5
2	Verktyg och Material	7
2.1	Mjukvara	7
2.2	Hårdvara och material	7
2.2.1	Arduino Mega 2560	8
2.2.2	Arduino Leonardo	8
2.2.3	Bluetooth-modulen RN-42	8
2.2.4	Radiostyrd bil och handkontroll	8
2.2.5	ABS-plast	9
3	Utförande	11
3.1	Förstudie	11
3.2	Hårdvaruprototyp	11
3.3	Signalbehandling	13
3.4	Visualiseringsprogram	13
3.5	Analys av data för att kalibrera styrning	14
3.6	Testning	14
3.6.1	Interna tester	15
3.6.2	Användartest	15
4	Resultat	17
4.1	Prototyp	17
4.2	Visualiseringsprogram	18
4.3	Manövrering	19
4.3.1	Gränsvärden	19
4.3.2	Processering av avläst data	19

4.4	Användarstudie	20
5	Diskussion	23
5.1	Analys av resultat från användarstudie	23
5.2	Analys av prototyp och mjukvara	24
5.2.1	Manövreringsmetod	24
5.2.2	Processering av data	25
5.2.3	Begränsning av bilens fart	25
5.2.4	Begränsningar hos använd EEG-läsare	26
5.2.5	Hårdvaruprototypens portabilitet	26
5.2.6	Visualiseringsprogram	27
5.3	Förkastade tillvägagångssätt	27
5.3.1	Testade Bluetooth-moduler	27
5.3.2	Byte av mikrokontroller	27
5.3.3	Bromsningsmetoder för radiostyrd bil	28
5.4	Tillämpningar	28
5.4.1	Rekreationella syften	28
5.4.2	Privat användning	29
5.4.3	Industriell och kommersiell användning	29
5.5	Samarbete mellan flera BCI	30
6	Slutsats	31
	Referenser	33
	Bilagor	I
A	Handkontrollernas uppbyggnad	III
B	Kommunikationsprotokoll för flaggbitar	V
C	Resultat av interna användartester	VII
D	Krav på manövrering	IX
E	Användarstudie	XI

1

Inledning

Att kunna kontrollera föremål med enbart hjärnan har länge betraktats som science-fiction, men det finns idag teknik som gör det möjligt att avläsa hjärnaktivitet och konvertera den till digitala signaler. Dessa signaler kan sedan användas för att kontrollera olika typer av system. Avläsningen görs vanligen med hjälp av en EEG-läsare och har traditionellt sett främst använts i medicinskt syfte. Den typ av EEG-läsare som ger sin utdata i form av digitala signaler är en typ av brain computer interface (BCI), det vill säga ett gränssnitt mellan hjärna och dator [1, s.1265].

Ett kommersiellt tillgängligt BCI är NeuroSkys MindWave Mobile som tillåter avläsning av en användares hjärnaktivitet i realtid och har möjligheten att skicka den till en mottagare via Bluetooth. Att läsa av hjärnaktivitet kan vara användbart i många sammanhang; teknologin är dock inte lika särskilt välutforskad för alla typer av applikationer. Hittills används den främst i enklare mobilapplikationer och program som främst fungerar som hjälpmedel för att visualisera den avlästa hjärnaktiviteten [2][3]. Således finns det värde i att utforska ytterligare användningsområden för denna teknik.

Projektet som beskrivs i denna rapport har som mål att med hjälp av två stycken MindWave Mobile kontrollera en radiostyrd bil. Genom detta läggs en grund för att diskutera och utvärdera tekniken och dess användningsområden för mekatroniska system.

I detta inledande kapitel tydliggörs arbetets innebörd. Här definieras projektets syfte varpå en kort bakgrund ges för att beskriva arbetets relevans. Därefter redogörs för arbetets omfattning och även en övergripande metodbeskrivning.

Vidare är rapporten upplagd på följande vis: efter detta inledande kapitel presenteras de verktyg och material som möjliggjort arbetet i kapitel 2. Därefter beskrivs utförandet i kapitel 3. I kapitel 4 redovisas arbetets resultat följt av en diskussion kring dessa i kapitel 5. Slutligen, i kapitel 6, presenteras arbetets slutsats.

1.1 Syfte

Projektets syfte är att utforska möjligheterna att nyttja kommersiella brain computer interface (BCI) för att kontrollera mekatroniska system. Detta ska utföras genom att kontrollera en radiostyrd bil med hjälp av två stycken EEG-läsare av modell MindWave Mobile. Det skulle på så sätt bli möjligt att föreslå och diskutera tänkbara användningsområden för sådan teknologi. I och med att två MindWave Mobile ska användas för kontroll av tidigare nämnda bil kommer arbetet också att utvärdera i vilken utsträckning det är möjligt för två personer att gemensamt kon-

trollera ett system med hjälp av individuella EEG-läsare.

1.2 Bakgrund

Under de senaste åren har enklare och billigare EEG-läsare lanserats på marknaden. Dessa kommersiella EEG-läsare är uteslutande olika typer av BCI, vilket är benämningen på de typer av läsare som återger utdata digitalt. Tidigare har BCI främst använts för medicinska ändamål [4, s.172], men som tidigare nämnt har tekniken numera ett bredare användningsområde. BCI-teknologins historia, hur tekniken använts hittills och vilka tillämpningsområden som är framträdande beskrivs vidare i avsnitt *1.2.1 Historik över BCI-teknologin*. Idag är det exempelvis möjligt att utveckla applikationer för underhållningssyfte som använder sig av BCI-teknik. Många av dessa nya EEG-läsare har en prislapp som gjort det möjligt för en bredare publik att tillämpa tekniken. Det finns redan idag ett antal spel för mobiltelefoner och datorer som använder sig av BCI i olika syften [2][3]. Hur EEG-läsaren som används för detta arbete fungerar beskrivs i avsnitt *1.2.2 Teknisk bakgrund*.

Som nämnt är det intressant hur EEG-läsaren, i detta fall en MindWave Mobile, kan användas för att styra mindre, mekatroniska system. Detta skulle ge en uppfattning om dugligheten hos EEG-läsaren och kan sedan leda till vidare studier inom kontroll av större system, elektriska rullstolar och liknande.

Att låta flera personer manövrera samma system med hjälp av EEG-läsare kan tillåta kontroll av fler funktioner. Antalet kombinationer av styrsignaler från en EEG-läsare växer exponentiellt med antalet läsare som används. Därmed kan samarbete vara av värde för applikationer och system där antalet funktioner är många.

1.2.1 Historik över BCI-teknologin

BCI är ingen ny teknik och har tidigare endast använts i medicinska sammanhang [4]. Termen brain computer interface dök upp för första gången på 70-talet [5], men redan 1929 beskrev Hans Berger hjärnans elektriska aktivitet och hur denna kan registreras med hjälp av elektroder. Metoden kallas Elektroencefalografi (EEG) [4], och har varit en grundförutsättning för utvecklingen av BCI. Ett BCI låter en användare kontrollera ett system enbart med hjälp av sin hjärnaktivitet. Exempel på ett användningsområde där BCI redan tillämpats och är under utveckling är styrning av proteser. Med hjälp av BCI kan en användare påverka omvärlden utan behov av hjärnans vanliga utportar, så som nerver och muskler [6]. Detta sker genom att användarens hjärnaktivitet omvandlas till data som sedan tolkas av en dator för att utföra olika kommandon.

Det finns många olika slags BCI och de flesta skiljer sig från varandra på något sätt [4, s.166]. Den gemensamma nämnaren är att de alla tar någon typ av insignal från hjärnan, nyttjar en algoritm som omvandlar och tolkar signalen, och sedan sänder någon form av digital utsignal. Olika BCI kan däremot använda sig av olika metoder och algoritmer för att tolka och översätta signalerna från hjärnan. Dessutom kan de sensorer som avläser aktivitet antingen vara inopererade i hjärnan eller fästa mot skalpens utsida. Dessa skillnader kan påverka gränssnittets uppdateringsfrekvens och precision. Slutligen menas det att olika BCI kan även kräva olika nivåer

av träning. Användare kan behöva öva sig på att kontrollera sin hjärnaktivitet för att gränssnittet ska vara användbart.

Icke-kirurgiska BCI är i regel långsammare och mindre precisa än kirurgiska [6]. Däremot är icke-kirurgiska BCI lättare att tillgå, både som studieområde och för allmänheten.

Wolpaw m.fl. [4, s. 172] menade år 2000 att utvecklingen av BCI till en början skulle finansieras av myndigheter och privata stiftelser innan kommersiellt intresse skulle uppstå. Detta beror på att det historiskt största användningsområdet för BCI-teknologi har varit att underlätta för människor med funktionsnedsättningar av olika slag. Med tanke på den begränsade målgruppen har intresset för forskning inom området varit lågt från kommersiella företag, men det är idag tydligt att intresset för BCI har ökat till den grad att det finns ett ekonomiskt värde i dess produktion och distribution.

1.2.2 Teknisk bakgrund

MindWave Mobile är en EEG-läsare från NeuroSky och är som nämnt den EEG-läsare som används för att kontrollera den radiostyrda bilen. Som kan ses i figur 1.1 liknar EEG-läsaren ett headset men den har även en sensor som placeras mot pannan för att läsa av hjärnaktivitet. Produkten är tänkt att utgöra en helhetslösning för mjukvaruutvecklare som vill nyttja BCI-teknologi [7].



Figur 1.1: Figuren visar EEG-läsaren MindWave Mobile.

Huvudfunktionaliteten hos EEG-läsaren innefattar möjligheten att utläsa vad företaget själva refererar till som *Attention* och *Meditation* [8], uppmärksamhet och avslappning, utifrån hjärnvågornas olika frekvenser. Utöver det kan enheten avgöra när användaren blinkar. MindWave Mobile har en uppdateringsfrekvens på 1 Hz [9]. Därmed skickas all data en gång i sekunden.

De olika aspekterna graderas (genom algoritmer som NeuroSky tagit fram för ändamålet) på en skala från 1 till 100 [8], där exempelvis ett uppmätt värde nära 100 för avslappning indikerar att användaren är mycket avslappnad. En viktig distinktion är att uppmärksamhet och avslappning är orelaterade. Det är möjligt

att ha hög uppmärksamhetsnivå och hög avslappningsnivå samtidigt; likväl är det möjligt att ha motsvarande låga nivåer samtidigt.

Vid beställning av *MindWave Mobile: Brainwave Starter Kit* tillkommer ett program vid namn *Brainwave Visualizer*, där användarens registrerade hjärnaktivitet visas. Hjärnaktiviteten delas upp efter frekvens i olika så kallade band [3]. Dessa band kallas för Delta (0-4 Hz), Theta (4-8 Hz), Alpha (8-12 Hz), Beta (12-30 Hz) och Gamma (>30 Hz). De låga frekvenserna kan förknippas med avslappning och de höga frekvenserna kan förknippas med uppmärksamhet [10].

MindWave Mobile är en gynnsam produkt för flera aspekter av arbetet. Den är en av de få kommersiella EEG-läsare och BCI som finns tillgängliga på marknaden; av dessa är MindWave Mobile bland de billigaste och mest användarvänliga. Mätningar kan utläsas utan att behöva varken kalibrera MindWave Mobile eller träna upp användaren. En studie från 2009 visar att NeuroSkys teknik i de flesta fall ger korrekta avläsningar av en persons hjärnaktivitet så länge sensorn är korrekt placerad mot pannan [11].

1.3 Mål

Målet med arbetet är att två personer, genom samarbete, ska kunna kontrollera en radiostyrd bil enbart med hjärnaktivitet och således skapa ett underlag för utvärdering av den teknik som beskrivs i avsnitt 1.2.2 *Teknisk bakgrund*. Detta görs genom att de båda aktörerna använder sig av varsin MindWave Mobile för avläsning av sagda hjärnaktivitet. Samarbetet innebär att en person kontrollerar farten samtidigt som en annan kontrollerar styrningen. Användarna ska då kunna köra bilen med god kontroll; innebörden av detta är att dessa personer avsiktligt och konsekvent ska kunna ge bilen specifika styrsignaler. Detta är vad som hädanefter refereras till som kontrollförmåga.

1.4 Metod

I detta avsnitt beskrivs den metod som används och som utformats utifrån målen. Beskrivningen av metoden är uppdelad i konstruktion av hårdvaruprototypen och metoden som användes för att åstadkomma bästa manövrering. I den sistnämnda delen beskrivs datorprogrammet vars syfte är att visualisera insamlad data från EEG-läsarna. Programmet används som ett verktyg för att uppnå god kontrollförmåga. Detta program och den mjukvara som kommer finnas i mikrokontrollern utvecklas parallellt med hårdvaruprototypen för att ha god uppsyn över båda delars utveckling samt för att möjliggöra parallella tester. Både mjukvaran och hårdvaruprototypen utvecklas i iterationer för att gradvis utöka funktionaliteten.

1.4.1 Metod för att konstruera hårdvaruprototyp

Att kunna kontrollera bilen med två EEG-läsare medför vissa tekniska utmaningar. Dessa utgörs i denna del av arbetet främst av praktiska problem; till att börja med måste en kommunikationsväg öppnas mellan två EEG-läsare och en mikrokon-

troller. För att skapa en kommunikationsförbindelse mellan en EEG-läsare och mikrokontrollern används Bluetooth då MindWave Mobile endast stödjer denna typ av kommunikation [12]. Mikrokontrollern måste ha funktionaliteten och prestandan för att hålla två Bluetooth-kopplingar öppna samtidigt, en för vardera EEG-läsare. För att det ska vara möjligt att styra den radiostyrda bilen måste mikrokontrollern och handkontrollens kretskort kopplas samman.

1.4.2 Metod för att uppnå kontrollförmåga

Den andra stora uppgiften att utröna olika intervall av uppmärksamhet och avslappning som ger den bästa kontrollförmågan. Någon form av hjälpmedel som kan bistå med kalibrering av bilen krävs för att underlätta detta.

Att direkt observera bilen och därefter göra en bedömning huruvida de bestämda värdena är korrekta och användbara är både tidskrävande och oprecist. Till följd av detta kommer ett datorprogram utvecklas för att kunna visualisera och koordinera utdata från två EEG-läsare samtidigt. Gränssnittet bör vara tydligt samt kunna påvisa en enkel historik över senast avlästa värden för båda EEG-läsarna. För att undvika oönskade extremvärden kommer det i programmet även att vara möjligt att testa olika modelleringsmetoder som kan processera datan som kommer från EEG-läsarna. Syftet med detta program är att underlätta utvecklingen av den mjukvara som ska kontrollera den slutliga prototypen.

1.5 Avgränsningar

För att förtydliga arbetets omfattning och fokusområde krävs att vissa avgränsningar införs. Fart och svängradie är inte linjärt bundna till de från EEG-läsarna avlästa värdena. Istället motsvaras vissa gränsvärden av en förbestämd respons hos bilen. Således kör den endast framåt respektive bakåt med en förbestämd fart, samt svänger höger respektive vänster med en förbestämd svängradie.

De enda komponenterna som används för att avläsa hjärnaktivitet är två stycken MindWave Mobile. Någon annan form av BCI behandlas inte. Som kommunikationsmedel mellan EEG-läsare och mikrokontrollern används endast Bluetooth.

För att styra den radiostyrda bilen används enbart signaler från handkontrollens kretskort. Detta styrs i sin tur via signaler från mikrokontrollern som tar emot data från EEG-läsarna. Inga andra medel används för att styra bilen.

2

Verktyg och Material

I detta avsnitt redogörs för den mjukvara, hårdvara och det material som använts för att genomföra arbetet. I första avsnittet nedan beskrivs mjukvaran som dels används för mjukvarautveckling men även vissa andra aspekter av arbetet. Därefter beskrivs den hårdvara och övrigt material som använts för att konstruera hårdvaruprototypen och den färdiga prototypen.

2.1 Mjukvara

För att utveckla hårdvaruprototypen och visualiseringsprogrammet användes flera olika datorbaserade verktyg. Under förstudien till arbetet användes programmet *Brainwave Visualizer* för att möjliggöra iakttagelse av mätdata från MindWave Mobile.

Mjukvaran på mikrokontrollern, som är av märket Arduino, skrevs och kompilerades i en utvecklingsmiljö, även den med namnet Arduino, som är speciellt anpassad för denna typ av kretsar. Koden skrevs i ett C-baserat språk anpassat för denna mikrokontroller och byggde på exempelkod från NeuroSkys utvecklingsmiljö Developer Tools 2.5 [13].

För visualiseringsprogrammet valdes programmeringsspråket C# av kompatibilitetsskäl gentemot mikrokontrollern, samt för den generösa tillgången på grafiska komponenter i kodbiblioteket Windows Forms. För utvecklingen av mjukvaran användes utvecklingsmiljön Microsoft Visual Studio 2013. Vidare användes det öppna kodbiblioteket LibUsbDotNet 2.2.8 vid konstruktion av den datorbaserade mjukvaran [14].

Utöver nämnda program användes även CAD-programmet Inventor. Detta program användes för att designa det chassi som kom att omsluta alla komponenter i hårdvaruprototypen. Ritningarna som tagits fram i programmet användes sedan för att tillverka chassit med hjälp av en 3D-skrivare.

2.2 Hårdvara och material

Nedan följer en beskrivning av den hårdvara samt de material som användes för att genomföra arbetet. Avsnittet redogör kort för varje komponents funktionalitet, hur den användes samt varför den valdes för arbetet. Utöver hårdvaran som nämns i de följande delavsnitten användes även två stycken MindWave Mobile då det var med dessa som den radiostyrda bilen styrdes. MindWave Mobile är en EEG-läsare som liknar ett vanligt headset, men har en sensor som sätts mot pannan. För mer

ingående beskrivning av denna se avsnitt *1.2.2 Teknisk bakgrund*.

2.2.1 Arduino Mega 2560

Den mikrokontroller som användes för hårdvaruprototypen var en Arduino Mega 2560. Denna mikrokontroller försörjs med ström via en USB-port (5 V), genom vilken programvara också laddas in. Minneskapaciteten hos Arduino Mega 2560 utgörs av ett flashminne på 256 kB [15]. Valet av mikrokontroller begränsades främst av antalet tillgängliga seriella portar, då prototypen krävde minst två. Detta eftersom de Bluetooth-moduler som används kräver en port vardera; mer information om dessa finns i avsnitt *2.2.3 Bluetooth-modulen RN-42*.

2.2.2 Arduino Leonardo

För att generera simulerad data för testning av visualiseringsprogrammet användes en mikrokontroller av modell Arduino Leonardo. Anledningen till detta var att arbetet med hårdvaruprototypen skedde parallellt och båda parterna var beroende av en mikrokontroller. Arduino Leonardo var ursprungligen avsedd att användas till hårdvaruprototypen, men då den inte uppfyllde de krav som ställdes användes den endast genom att generera testvärden åt mjukvaran.

Arduino Leonardo försörjs med ström via en USB-port (5 V) genom vilken också programvara laddas in. Minnet på mikrokontrollern är ett flashminne av kapacitet 32 kB [16].

2.2.3 Bluetooth-modulen RN-42

För kommunikation mellan EEG-läsare och mikrokontroller användes två stycken RN-42 Bluetooth-moduler. Dessa har en räckvidd på 15-20 m och en bandbredd på 3 Mbps [17]. Anledningen till att två stycken moduler användes var för att varje EEG-läsare behövde ha en egen modul som tog emot mätvärden via Bluetooth. Modulerna, som matades med en spänning på 3,3 V, strömförsörjdes av Arduino Mega 2560, vilken har en specifik utgång på 3,3 V.

2.2.4 Radiostyrd bil och handkontroll

Till arbetet användes en radiostyrd bil med en enkelt utformad handkontroll. Bilen som användes kan ses i figur 2.1. Bilen är av modellen Angry Python, en radiostyrd bil i skala 1:20 av märket Carrera. Bilen är 26 cm lång och kunde ursprungligen köra i upp till 20 km/h enligt produktbeskrivningen [18].

Valet av radiostyrd bil gjordes främst utifrån typen av medföljande handkontroll. Handkontrollen till bilen som valdes hade två spakar, en för fart och en för styrning. Med en så pass enkel design förmodades risken för komplikationer minska då kontrollen skulle demonteras.

Handkontrollen till den radiostyrda bilen var försedd med en 3 V likspänning, i detta fall 2 st AA-batterier. Varje spak var försedd med fyra stycken kablar. Kablarna var till färgen: vit, grön, blå och grå, där den gråfärgade var jord. Med

hjälp av de tre övriga kablarna skapades kombinationer som representerade styrsignaler för bilen. Det fanns sju kombinationer för kontroll av fart (tre lägen för framåt, tre lägen för bakåt och ett läge för att stå stilla) samt sju kombinationer för styrning (tre lägen för vänster, tre för höger och ett för rakt fram). I startläget var alla tre kablar för båda spakarna strömförsörjda. Genom att kortsluta de olika ingångarna kunde bilen accelereras eller ges styrutslag; se bilaga *A Handkontrollernas uppbyggnad* för en tabell över kombinationer av styrsignaler.



Figur 2.1: Figuren visar den radiostyrda bilen Carrera Angry Python. Denna bil användes för prototypen.

2.2.5 ABS-plast

För att hålla alla komponenter samlade och skyddade designades ett komponentchassi som framställdes med hjälp av en 3D-skrivare. Komponentchassit friformframställdes i ABS-plast då denna typ av plast ansågs vara mer robust än andra alternativ.

3

Utförande

Följande avsnitt redogör för hur arbetet utförts. Till att börja med beskrivs hur en kort förstudie genomförts, därefter hur en hårdvaruprototyp och ett visualiseringsprogram vid namn MindGUI har tagits fram samt hur data från hjärnaktivitet hanterats och bearbetats. Slutligen beskrivs arbetet med att förbättra kontrollförmågan genom kalibrering och testning.

3.1 Förstudie

Som utgångspunkt för arbetet undersöktes hur en MindWave Mobile fungerar och vilka signaler den skickar. Som tidigare nämnts skickas värden för uppmärksamhet, avslappning och blinkningar. Utöver detta kan EEG-läsaren också skicka så kallad rådata innehållande mätvärden av oprocesserade hjärnvågor [9]. Dessa hjärnvågor kunde iakttas i programmet *Brainwave Visualizer* [3] som följer med i *MindWave Mobile: Brainwave Starter Kit*. Programmet användes för att ta reda på om de olika hjärnvågorna gick att kontrollera på ett pålitligt sätt. Detta gjordes genom att t.ex. utföra olika muskelrörelser, slappna av samt lyssna på musik och sedan undersöka utslagen av de olika aktiviteterna. Detta gav dock inga tydliga resultat och förstudien resulterade således i ett beslut om att begränsa manövrering av prototypen till de redan processerade värdena för uppmärksamhet, avslappning och blinkningar.

3.2 Hårdvaruprototyp

Hårdvaruprototypen är benämningen på de komponenter som kopplats samman för att till slut åstadkomma kommunikation mellan EEG-läsarna och den radiostyrda bilen. Se figur 3.1 för en enkel visualisering av de system som kontrollerar bilen.

Målet med hårdvaruprototypens första iteration var att mikrokontrollern skulle ta emot data från en EEG-läsare. Nästkommande iteration innefattade att implementera systemets kommunikation med bilen. Detta gjordes genom att kretskortet från den radiostyrda bilens handkontroll kopplades in i mikrokontrollerns 3.3 V utgång. Kretskortet är avsett för 3 V men då differensen var relativt liten ansågs risken för komplikationer försumbar. För att skicka kommandon från handkontrollen till bilen behövde varje sladd från handkontrollen strömförsörjas via mikrokontrollern; detta för att kunna skapa de olika kombinationerna som ger upphov till styrsignaler som skickas till bilen. Dessa kombinationer beskrivs i bilaga A *Handkontrollerns uppbyggnad*. Eftersom mikrokontrollern skickade ut en signal på 5 V och kretskortet var avsett för 3 V var en spänningsdelning nödvändig för att inte skada kretskortet.



Figur 3.1: Figuren visar en översikt över prototypen. Värden skickas från EEG-läsarna till mikrokontrollern via Bluetooth. Mikrokontrollern behandlar dessa värden och skickar dem till handkontrollens kretskort, som sedan ger signaler till bilen. Mikrokontroller och kretskort ligger här inneslutna i ett chassi.

Spänningsdelningen, som utfördes med hjälp av två resistorer, gjordes för att komma åt en önskad del av en större spänning.

Parallellt med de iterationer som gjordes när hårdvaran sammanfogades utvecklades ett program till mikrokontrollern. Syftet med detta program var dels att ta emot data från EEG-läsarna via de anslutna Bluetooth-modulerna, dels att behandla denna data för att åstadkomma bästa möjliga styrsignaler samt att kontrollera spänningen för mikrokontrollerns utgångar som kopplats till den radiostyrda bilens handkontroll och på så sätt manövrera bilen.

Slutligen åstadkoms manövrering av bilen med hjälp av två EEG-läsare. Denna iteration var förutom vissa otillräckligheter hos hårdvaran enkel att utföra, då funktionaliteten för styrning hade programmerats parallellt med iterationerna. När all funktionalitet hade implementerats fästes alla komponenter på ett tomt kretskort för att underlätta hantering. Ett problem som uppstod med hårdvaruprototypen var att Bluetooth-modulerna inte kunde hitta EEG-läsarna om inte mikrokontrollern startades efter EEG-läsarna. Det observerades även att då handkontrollen varit fränkopplad från bilen en längre stund sattes de båda i viloläge. Då handkontrollern inte var särskilt stor och hårdvaruprototypen växte med fler komponenter behövdes något slags chassi för att skydda komponenterna samt göra hårdvaruprototypen mer portabel. Chassi tillverkades i ABS-plast genom att skapa en ritning i Inventor och sedan skriva ut denna i en 3D-skrivare. I chassit monterades en LED-lampa som indikerar en öppen kommunikationsväg mellan bil och handkontrollens kretskort samt en strömbrytare som möjliggör omstart av kretskortet. Det gjordes även möjligt att koppla in en extern strömkälla till mikrokontrollern genom chassit.

För att förenkla manövreringen av den radiostyrda bilen behövde maxfarten sänkas. Detta gjordes genom att införa mekaniska motstånd mellan bilens båda hjul och deras hjulfästen. Materialet som användes för motstånd var en typ av paketeringsplast.

3.3 Signalbehandling

För att förenkla signalbehandlingen mellan mikrokontroller och dator till förmån för visualiseringsprogrammet skrevs kodbiblioteket Minduino. Kodbiblioteket skrevs i programspråket C# och innehöll en klass med metoder vars syfte var att extrahera signaler från mikrokontrollern. Detta gjorde Minduino genom att tolka ett protokoll (se bilaga B *Kommunikationsprotokoll för flaggbitar*) över hur signalerna skickades. Mikrokontrollern tode emot värden från EEG-läsarna och vidarebefordrade denna data via en USB-kabel till en dator där datan behandlades av Minduino.

Utöver att sammanställa informationen ansvarade Minduino även för att skapa en anslutning mellan dator och mikrokontroller genom att öppna en COM-port på datorn som mikrokontrollern var ansluten till. COM-port är en förkortning för engelskans “communication port” som betyder “kommunikationsport” och kan referera antingen till en fysisk seriell port på datorn eller en virtuell port skapad av antingen en Bluetooth- eller USB-enhet.

Minduino användes för att överföra hjärnaktivitetsdata till en dator. När en mikrokontroller hade anslutits till datorn och Minduino anslutits till denna försågs biblioteket med värden motsvarande de som skickats till den radiostyrda bilens handkontroll. Dessa värden, som potentiellt hade behandlats, låg i intervallet 0-100, vilket i sin tur motsvarade de värden som skickats från EEG-läsarna (1-100) med tillägget att Minduino skickar 0 vid dålig signal. Att Minduino fick del av samma värden var en konsekvens av att dess syfte var att övervaka vilka värden som hade skickats till bilen.

3.4 Visualiseringsprogram

Visualiseringsmjukvaran, som kom att kallas MindGUI, utvecklades i iterationer och efter behov och blev till sist mycket användbar för testning och kalibrering. Första iterationen av visualiseringsprogrammet gick ut på att via Minduino rita ut värden från två EEG-läsare i ett koordinatsystem. Med värden från en EEG-läsare på varje axel ritades en markör ut i den punkt som representerade uppmärksamhetsvärdena. Trots ett fungerande resultat blev det snabbt tydligt att programmet behövde förfinas för att underlätta avläsning.

Arbetet fortsatte med fokus på att göra gränssnittet tydligare för att sedan använda detta för att finna lämpliga gränsvärden för styrning. Koordinatsystemet förfinades och kompletterades med grafer som visualiserade data från respektive EEG-läsare. På så sätt åstadkoms ett lättavläst gränssnitt som också visade en historik över erhållen data. Det gjordes även möjligt att läsa av medelvärde, största och minsta värde, senaste värdet, signalstyrka med mera. Därutöver utvecklades funktionen att byta mellan att visa uppmärksamhet, avslappning och blinkningar, detta för att kunna utforska användbarheten av de olika typerna av värden.

För att underlätta testning och därmed underlätta valet av kontrollvärden, de värden som bestämmer när bilen t.ex. ska köra framåt eller svänga höger, utökades funktionaliteten ytterligare. Programmet utökades med en funktion som gjorde det möjligt att ta tid på hur länge en användare kunde bibehålla sin uppmärksamhet

och avslappning över respektive under ett visst värde eller inom ett visst intervall.

Slutligen, då testning och kalibrering av kontrollförmågan hade påbörjats, gjordes det dessutom möjligt att visa data efter att den bearbetats genom olika matematiska modeller, som beskrivs mer ingående i tabell C.1 i bilaga *C Resultat av interna användartester*. Det blev på så sätt lättare att undersöka och jämföra olika metoder för manövrering av bilen.

Testning av visualiseringsprogrammets korrekthet utfördes genom att använda en Arduino Leonardo för att automatiskt generera simulerade värden för avläsning i programmet. Genom att låta dessa värden genereras i bestämda mönster framgick det huruvida skickad data visades korrekt eller inte.

3.5 Analys av data för att kalibrera styrning

Visualiseringsprogrammet användes som det huvudsakliga verktyget för att kalibrera kontrollvärden för fart och styrning av bilen. Med hjälp av programmet kunde lämpliga styrvärden och algoritmer, som behandlade datan, bestämmas som ger manövreringen lämpliga egenskaper. Detta var för att göra manövreringen av bilen så enkel och intuitiv som möjligt.

För att definiera vad som menades med enkel och intuitiv manövrering sammanställdes en lista med krav, se bilaga *D Krav på manövrering*. Kraven kan sammanfattas till att det ska gå att styra kontrollerat; bilen ska svänga höger, vänster eller inte svänga åt något håll när användaren har för avsikt att detta ska hända och på motsvarande sätt ska bilen köra framåt, bakåt eller stå stilla endast då användaren avser att göra något av detta.

Ett antal matematiska modeller togs fram för att styrningsförmågan skulle uppfylla kontrollkraven bättre. För att uppfylla kraven räckte det inte med att bestämma de mest lämpliga styrvärdena, t.ex. vid vilket värde av uppmärksamhet bilen skulle köra framåt. Datan från EEG-läsarna behövde även bearbetas, i synnerhet för att undvika oönskade toppar och dalar. Flera modeller togs fram och testades internt. Den modell som ansågs mest framgångsrik testades därefter av användare utan förkunskap om MindWave Mobile.

3.6 Testning

I följande stycke beskrivs den process av tester som utfördes för att utvärdera olika aspekter av arbetet. Till att börja med gjordes interna tester med olika scenarion utan att applicera någon av de matematiska modellerna; därefter applicerades de olika modellerna i tur och ordning. Slutligen testades den modell som ansågs mest användbar med externa användare i en mer omfattande användarstudie. Med hjälp av de interna testerna kunde lämpliga kontrollvärden samt värden för de matematiska modellerna bestämmas. Det var även möjligt att undersöka om kontrollförmågan hade förbättrats och hur väl kraven uppfylldes.

3.6.1 Interna tester

Interna tester gjordes för att få en initial uppfattning av kontrollförmågan. Testerna genomfördes både med och utan de olika typer av bearbetning av datan som kan utföras av visualiseringsprogrammet. Till att börja med undersöktes vad som karaktäriserar grafen för uppmärksamhet respektive avslappning i olika scenarion utan någon bearbetning av datan. I det här skedet uteslöts användandet av blinkningar, eftersom dessa värden visade sig vara opålitliga och oregelbundna.

För att undersöka grafernas utseende i ett normalfall lästes hjärnaktiviteten från två personer från arbetsgruppen i neutraltillstånd, ett tillstånd helt utan avsikt att manövrera bilen på något sätt. Dessutom undersöktes grafernas utseende då personerna medvetet försökte styra sin aktivitet på olika sätt.

Det konstaterades att avslappning, åtminstone för dessa personer, var betydligt svårare att kontrollera än uppmärksamhet. Ett normaltillstånd var svårt att fastställa, då grafens utseende vid neutraltillstånd varierade avsevärt från gång till gång. Gemensamt för övervägande delen av normaltillståndstesterna var många toppar och dalar. Ansatser att kontrollera uppmärksamhetsnivå var mer lyckade; en låg-, hög- eller medelnivå gick bitvis att hålla, men många gånger var extremvärden ett problem även här. Grafer och relaterade analyser från de interna testerna finns att tillgå i bilaga *C Resultat av interna användartester*.

Utifrån observationer av testerna följde nya tester där bearbetad data analyserades och jämfördes med icke bearbetad data. Visualiseringsprogrammet tillät att bearbetade värden visades som grafer i realtid i samma koordinatsystem som grafen över de icke bearbetade värdena. Detta gjorde det behändigt att jämföra effekten av flera olika matematiska modeller samtidigt. I visualiseringsprogrammet kunde även variablerna i modellerna justeras under exekvering. Med denna funktionalitet blev det enklare att göra finjusteringar vilket ledde till att de modellerade grafernas nya utseende direkt kunde analyseras. Därmed kunde en passande matematisk modell för att uppfylla kontrollkraven tas fram och implementeras i mikrokontrollerns mjukvara, för att sedan vara ett stöd i manövreringen av bilen. Därefter kunde bilen användas för att utföra ett antal användartester för vidare utvärdering av kontrollförmågan.

3.6.2 Användartest

Öppna användartester organiserades för att bättre kunna utvärdera kontrollförmågan av bilen. Detta ansågs nödvändigt då dessa skulle kunna ge en bättre bild av kontrollförmågan hos personer med minimal erfarenhet av att använda BCI-teknologi. Testets utformning togs fram med hjälp av ett pilottest för att utvärdera de olika testerna och hur de skulle kunna förbättras innan de slutliga testerna utfördes. För att utvärdera kontrollförmågan undersökte testerna bland annat hur lång tid det tog för en användare att börja köra, stanna, backa, svänga höger och svänga vänster. Tiden för att utföra uppgiften mättes från att instruktionen gavs; på så vis mättes hur lång tid det tog innan bilen svarade på ett avsiktligt kommando.

Användartesterna utfördes med grupper av två användare åt gången. Den ena användaren fick först utföra några uppgifter som testade kontrollförmågan för fart. Den andra användaren fick sedan utföra liknande uppgifter som testade kontrollför-

mågan för styrning.

Testsessionerna utfördes i par då varje session avslutades med att testa samarbetet mellan fart och styrning. Användarparet tilläts experimentera med manövreringen tillsammans. De ombads därefter att köra bilen runt en kon som placerats en bit bort.

Innan testerna påbörjades gavs en kort presentation av teknologin, hur prototypen skulle kontrolleras och vad testet gick ut på, se manuskript i bilaga *E Användarstudie*.

Testerna utfördes i en motionshall för att ha gott om utrymme att obehindrat köra omkring bilen. Varje testsession tog cirka 30 minuter. Alla användare var teknikintresserade studenter mellan 16-25 år. Totalt genomfördes testerna av 5 grupper.

När testet hade avslutats fick varje användare fylla i en kort enkät om testet. Enkäten utformades delvis för att ge en bild av hur användarna uppfattade prototypens kontrollförmåga och delvis för att ta reda på om prototypen var behaglig och underhållande att använda. Se bilaga *E Användarstudie* för frågorna och en sammanställning av svaren från enkäten.

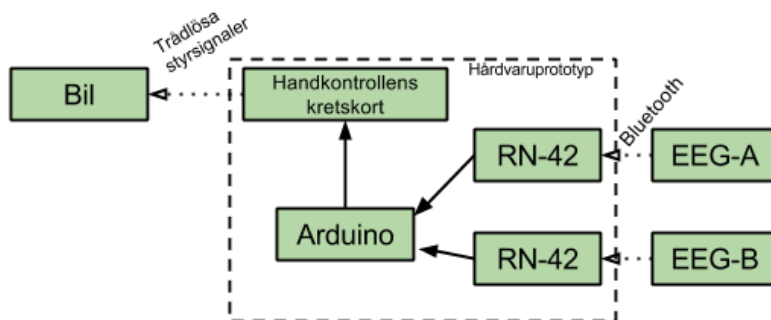
4

Resultat

I följande avsnitt presenteras resultatet av arbetet som beskrevs i kapitel 3. Först beskrivs hårdvaruprototypen och de värden som mikrokontrollerns mjukvara använder för att manövrera bilen samt hur dessa värden processades för att undvika extrema avvikelser. Därefter följer resultatet av visualiseringsprogrammet MindGUI. Slutligen uppvisas resultatet av den användarstudie som gjordes.

4.1 Prototyp

Efter utfört arbete och tillhörande tester är det mest relevanta resultatet en fungerande tankestyrd bil. Bilen styrs enbart genom inläsning och tolkning av värden som erhålles av två stycken EEG-läsare som används i tandem. Den EEG-läsare som kontrollerar fart kommer härnäst benämnas *EEG-A* och den som kontrollerar styrning *EEG-B*. De värden som skickas tolkas av en Arduino Mega 2560 för att sedan ges som styrsignaler till det kretskort som tidigare utgjorde elektroniken i bilens handkontroll. Från handkontrollens kretskort skickas till sist styrsignaler till bilen; hela proceduren illustreras i figur 4.1.



Figur 4.1: Figuren visar en översikt över hur de olika komponenterna i prototypen kommunicerar med varandra.

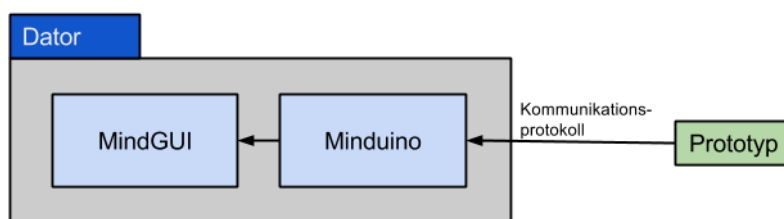
Samtliga hårdvarumässiga komponenter är placerade i ett chassi i form av en plastlåda tillverkad i ABS-plast. Detta chassi har måtten 132x122x70 mm och har möjlighet att, med hjälp av en LED-lampa, indikera hurvida kommunikation mellan kretskort och bil pågår. Det är också möjligt att starta om kretskortet via en strömbrytare ovanpå chassit om kommunikationen skulle avbrytas. Tillgängligt från utsidan finns även en USB-port för att möjliggöra strömförsörjning samt kommunikation med en dator.

4.2 Visualiseringsprogram

Projektet resulterade förutom prototypen i visualiseringsprogrammet MindGUI. Denna mjukvara består vid kalibrering och testning av den tankestyrda bilen. Som namnet antyder är det ett program som grafiskt ritar upp den data som erhålls från prototypen genom Minduino, vilket illustreras i figur 4.2. Som kan ses i figur 4.3 kan programmet visa en mängd olika värden som är användbara vid testning, t.ex. signalstyrka, de gröna staplarna, och det största värdet som avlästs under körningen. Dessutom visas all indata i grafer. All data kan avläsas för uppmärksamhet så väl som avslappning och blinkningar. Programmet visar data från båda EEG-läsarna samtidigt, men endast en typ av hjärnaktivitet per EEG-läsare vid ett givet tillfälle.

Vidare har programmet möjlighet att bistå i testningen genom tidtagning. Denna funktionalitet kan ses i spalten längst till höger. Det är med denna funktionalitet möjligt att låta programmet visa under hur lång tid användaren lyckas ge en signal över ett godtyckligt värde för antingen uppmärksamhet eller avslappning.

MindGUI är endast kompatibelt med operativsystemet Microsoft Windows och har bara testats på Windows 7 och Windows 8.



Figur 4.2: Figuren visar hur data skickas från prototypen till en dator via USB. Datan skickas till Minduino enligt specificerat protokoll och visualiseras därefter av MindGUI.



Figur 4.3: Figuren visar gränssnittet för mjukvaran MindGUI.

4.3 Manövrering

I följande avsnitt beskrivs resultatet av de metoder som användes för att öka kontrollförmågan vid manövrering av den radiostyrda bilen. Först redovisas de kontrollvärden för uppmärksamhet och avslappning som bestämts för att manövrera bilen. Därefter beskrivs den metod som eliminerar extremvärden och ger en jämnare och mer kontrollerad manövrering.

För att ytterligare förenkla manövreringen är den radiostyrda bilen begränsad till att köra med lägsta farten. Dessutom är mekaniska motstånd monterade på bakhjulen för att sänka farten ytterligare, vilket har lett till att bilens maxfart sänkts till cirka 6 km/h.

4.3.1 Gränsvärden

De två EEG-läsarna som används har förbestämd funktionalitet för manövrering av den radiostyrda bilen. För att accelerera framåt krävs att *EEG-A* avläser ett uppmärksamhetsvärde som överskrider 65. Den radiostyrda bilen slutar drivas framåt om samma typ av hjärnaktivitet därefter avläses som 60 eller mindre. För att backa bilen krävs att *EEG-A* avläser ett värde för avslappning som är 70 eller mer, dessutom måste ett lågt värde på uppmärksamheten avläsas. På så sätt är det omöjligt att köra framåt och bakåt, samtidigt blir det något svårare att backa.

För att svänga åt vänster krävs att *EEG-B* avläser ett uppmärksamhetsvärde mindre än 40. För att svänga åt höger krävs att värdet på samma typ av hjärnaktivitet avläses till att vara över 65. För avlästa värden på uppmärksamhet från *EEG-B* som faller mellan 40 och 65 är hjulen alltså framåttänkta. Undantaget är då bilen redan svänger åt något håll. I detta fall har det gjorts mer krävande att sluta svänga än det är att börja. Detta i ett försök att uppnå stabilare manövrering. Gränserna för att sluta svänga höger respektive vänster är alltså satta något lägre respektive högre än värdena för att börja svänga. Värden för avslappning från *EEG-B* används ej. Alla kontrollvärden sammanfattas i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Värden som krävs från EEG-läsarna för respektive styrsignal till bilen.

Signal till bilen \ Värde (0-100)	Avläst värde <i>EEG-A</i> <i>Uppmärksamhet</i>	Avläst värde <i>EEG-B</i> <i>Uppmärksamhet</i>	Avläst värde <i>EEG-A</i> <i>Avslappning</i>
Driv framåt	> 65		
Driv bakåt	≤ 30		≥ 70
Utslag höger		> 65	
Utslag vänster		< 40	
Avsluta utslag höger		≤ 60	
Avsluta utslag vänster		≥ 45	
Avsluta driv framåt	≤ 60		

4.3.2 Processering av avläst data

Systemet nyttjar en matematisk modell avsedd att modifiera de avlästa värdena och därmed göra dem mindre flukturerande. Denna modell bygger på metoden

att ta hänsyn till det direkt föregående värdet av en viss procent för att beräkna det nästkommande. Idén bakom modellen byggde på en liknande princip som nätverksprotokollet TCP använder för att beräkna den uppskattade tiden det tar för en signal att nå sin destination och komma tillbaka [19]. När ett nytt, modifierat värde V ska beräknas görs detta med hjälp av följande formel:

$$V = \alpha * v_1 + (1 - \alpha) * S$$

där α är ett procentuellt värde mellan 0-100 %, v_1 anger föregående värde för V medan S motsvarar det senast avlästa värdet innan processering. Ett lågt α -värde innebär större hänsyn till värdet på den senast inlästa datan och mindre hänsyn till det föregående värdet. För ett högt α -värde gäller motsatsen.

Beroende på vilken typ av data som avlästes sattes α till olika värden, vilket kan utläsas i tabell 4.2. Värdena valdes utifrån resultatet av de interna tester som utfördes med hjälp av MindGUI. Målet var att eliminera värden som kraftigt avviker från genomsnittet och på så sätt minska risken för oönskad manövrering men samtidigt bevara den radiostyrda bilens responsivitet. Att värdet för *EEG-A Avslappning* var lägre än de för *EEG-A Uppmärksamhet* och *EEG-B Uppmärksamhet* berodde på att fluktuationerna inte var lika stora; därmed var behovet av ett högt α inte lika stort. Vidare inkluderades inte något värde för *EEG-B Avslappning*, eftersom det inte behövdes för att manövrera den radiostyrda bilen; detta kan utläsas ur tabell 4.1.

Tabell 4.2: Värden som beskriver till hur stor del ett nytt värde tar hänsyn till det föregående.

Typ av α	Procentsats (%)
<i>EEG-A Uppmärksamhet</i>	50
<i>EEG-B Uppmärksamhet</i>	50
<i>EEG-A Avslappning</i>	20

4.4 Användarstudie

Användartesterna genomfördes med hjälp av fem grupper med två medlemmar i varje, där en person kontrollerade farten och den andra kontrollerade styrningen. Ett flertal tester genomfördes och tiden för genomförandet mättes. Innan ett snittvärde räknats ut för respektive test exkluderades kraftigt avvikande data. I tabellerna 4.3 och 4.4 återfinns testresultaten för alla användare som kontrollerade fart respektive styrning samt snittresultatet för varje test med och utan avvikande extremfall.

Resultatet från användarstudien visar att många av singelkommandotesterna (att svänga höger eller vänster alternativt köra framåt eller bakåt) i snitt tar upp emot 30 s. Ett singelkommando som visade sig vara i snitt mer responsivt var att stanna bilen. Då användarna ombads stanna bilen direkt efter att de börjat köra tog det dem i snitt 8 s.

Även två mer avancerade styrningsuppgifter tilldelades där användaren skulle

göra två vänstersvängar efter varandra samt växla från att svänga höger till vänster. Det första testet klockades aldrig då det endast var av intresse att undersöka ifall användaren kunde utföra uppgiften eller inte. Som kan observeras i tabell 4.4 slutförde fyra av de fem personerna uppgiften direkt eller efter några försök medan en av de fem personerna inte lyckades med uppgiften.

Det andra testet klockades då det var av intresse att veta hur fort en användare kan gå upp till hög nivå av uppmärksamhet för att direkt därefter sänka uppmärksamheten till ett lågt värde. Denna uppgift tog i snitt 33 s att utföra vilket är i likhet med snitttiderna för de enklare uppgifterna i ovanstående stycke.

Även ett statistiskt test utfördes av respektive användare där uppgiften var att stå stilla med bilen respektive att varken svänga höger eller vänster. Användarna kunde i snitt hålla bilen stilla i 29,6 s innan den började köra framåt eller bakåt. Resultatet för det statistiska styrningstestet blev i snitt 7 s vilket är i betydligt kortare tid än det första statistiska testet.

Tabell 4.3: Resultattider för användarna som kontrollerade bilens fart.

Tester (s) Användare	Börja köra	Stod still	Börja backa	Till stillastående
Anv. 1	10	12	22	3
Anv. 2	16	8	21	3
Anv. 3	31	18	40	28
Anv. 4	126	60	157	4
Anv. 5	53	50	28	2
Medelvärde	47,2	29,6	53,6	8
Medel utan extremfall	27,5	-	27,75	3

Tabell 4.4: Resultat för användarna som kontrollerade styrningen.

Tester (s) Användare	Höger	Vänster	Rakt	H+V ^a	2*V ^b
Anv. 1	43	6	3	23	Lyckades inte
Anv. 2	28	46	10	14	Lyckades ^c
Anv. 3	11	14	9	39	Lyckades direkt
Anv. 4	259	4	3	22	Lyckades direkt
Anv. 5	1	63	10	69	Lyckades
Medelvärde	68,4	26,6	7	33,4	-
Medel utan extremfall	20,75	-	-	-	-

^aSväng höger och sedan vänster. H = höger, V = vänster.

^bSväng vänster två gånger (utan högersväng mellan). Ej i sekunder. V = vänster.

^cAnvändaren slutförde testet efter flera försök.

Resultat kan även extrapoleras från den enkät som alla testpersoner fyllde i efter att testerna gjorts. Resultaten från enkäterna har sammanställts i tabell 4.5. Observera att användarna som kontrollerade styrningen ansåg att bilen var svårare att köra än de som kontrollerade farten. Detta var dock inte fallet för responsiviteten.

Även underhållningsaspekten är av intresse. Användarna ombads gradera hur underhållande det var att köra bilen. Som kan ses i tabell 4.5 uppnådde denna fråga ett snittbetyg på 4,8 på en femgradig skala för båda grupperna.

Tabell 4.5: De tio testarna fick svara på frågorna i den vänstra kolumnen genom att ge ett värde mellan 1-5. I den högra kolumnen visas medelvärdet över svaren.

Enkätfrågor	Snittsvar		
	Fart	Styrning	Båda
Hur lätt/svårt var det att kontrollera bilen? (1 = mycket svårt, 5 = mycket lätt)	2,4	1,8	2,2
Hur responsiv var bilen utifrån dina intentioner? (1 = ej responsiv, 5 = mycket responsiv)	2,6	3,2	2,8
Hur underhållande var aktiviteten? (1 = ej underhållande, 5 = mycket underhållande)	4,8	4,8	4,8

Av de fem användare som kontrollerade farten angav även tre att det i synnerhet var svårt att köra framåt. Tre av fem användare som kontrollerade styrningen svarade att det var särskilt svårt att snabbt byta riktning. Tre av fem angav även att det i synnerhet var svårt att koordinera styrningen med den andra användaren. Innebörden av detta så väl som alla andra resultat diskuteras i nästföljande kapitel.

5

Diskussion

I följande kapitel diskuteras de givna resultaten och de vidare frågor som uppstått utifrån dessa. Det kompletterar föregående kapitel genom att i närmare detalj granska resultatet samt olika aspekter av arbetet som inte bidrar till den slutliga prototypen; dessutom analyseras och utvärderas alternativa verktyg och metoder. Kapitlet inleds med en analys av resultaten från användarstudien som redovisades i föregående kapitel. Övriga resultat knyts sedan samman med en diskussion kring förändringar som skulle kunna förbättra prototypen. Därefter diskuteras tillvägagångssätt som av olika anledningar förkastats; i detta avsnitt läggs störst vikt vid möjliga sätt att styra bilen som inte har implementerats. Vidare analyseras i detta kapitel tänkbara användningsområden för BCI samt vad det kan innebära ur ett samhällsperspektiv. Slutligen diskuteras möjligheten för två personer att samarbeta med hjälp av varsin EEG-läsare utifrån observationer från användarstudien.

5.1 Analys av resultat från användarstudie

I avsnitt 4.4 *Användarstudie* nämns att många singelkommandon tog i snitt omkring 30 s att utföra. Detta är ohållbart för att kontrollera en radiostyrd bil med en fart på 6 km/h. Om användaren exempelvis vill svänga höger medan bilen drivs framåt kommer bilen i snitt hinna 48 m innan användaren lyckas svänga.

Däremot uppmättes små skillnader i de tider som det tog att utföra singelkommandotesterna och de mer avancerade testerna, vilket tyder på inläring och förbättring i styrningsförmåga på mycket kort tid. Tyvärr mättes singelkommandona bara en gång per test. Det är dock rimligt att tro att snitttiden för att utföra dessa minskade redan under den halvtimmeslånga testsessionen då de avancerade användartesterna tog ungefär lika lång tid som singelkommandotesterna.

Ett annat gott tecken är att det tar i snitt 8 s för en användare att stanna bilen. Detta är okaraktäristiskt responsivt och tyder på att det är relativt lätt att sänka sin uppmärksamhetsnivå snabbt, direkt efter att den har höjts.

Snitttiden för de statiska testerna är låga men detta är ett, till viss del, förklarligt resultat. Kontrollförmågan är utvecklad för att vara funktionell men även underhållande. Prototypen ansågs vid de interna testerna bli mer underhållande om det inte är för svårt att förmå den att röra på sig; styrgränserna är satta med detta i åtanke, men utifrån användartesterna finns motiveringen att det är alltför svårt att hålla bilen stillastående och undvika att svänga varken höger eller vänster.

Under användartesterna iaktogs vidare att olika personer har mycket olika värden för uppmärksamhet och avslappning i ett neutraltillstånd, det vill säga då de

inte aktivt försöker kontrollera bilen. Vissa användare svängde t.ex. höger (hög uppmärksamhet) utan avsikt medan andra försökte öka sin uppmärksamhet en längre stund innan de lyckades. Detta hade inte observerats i lika stor utsträckning vid de interna testerna och innebar ett problem när kontrollvärdena skulle justeras. Att t.ex. avgöra ett uppmärksamhetsvärde över vilket bilen kör framåt som ger god kontrollförmåga blir mycket svårt eftersom värdet kommer vara olika lätt eller svårt för olika personer att nå.

Resultaten visar att det finns stora brister i kontrollförmågan och därmed finns anledning att justera kontrollvärdena ytterligare. Den stora variationen för uppmärksamhet och avslappning i neutraltillstånd tyder dock på att justering av kontrollvärden inte är tillräckligt för att uppfylla kontrollkraven.

Av resultaten från enkäten framträder bristerna i kontrollförmågan tydligare. Det framgår att både farten och styrningen är mycket svåra att kontrollera. Inte helt oväntat uppfattas den sistnämnda vara den mest utmanande av de två, då styrningen är mer komplext än fart. Det framgår även att alla deltagare tyckte att aktiviteten var underhållande, oavsett om de kontrollerade fart eller styrning. Kanske kan detta till stor del bero på nyhetsvärdet av att manövrera mekaniska system endast genom att använda hjärnan, men det tyder även på ett underhållningsvärde hos prototypen.

Slutligen kan det konstateras att det möjligen hade varit av intresse att utvärdera prototypen genom en mer omfattande studie, specifikt en som sträcker sig över en längre tid. På så vis skulle möjligheterna att utvärdera prototypen efter en längre inlärningsperiod öka.

5.2 Analys av prototyp och mjukvara

Till följd av de utvecklingsmöjligheter som nämndes tidigare analyserar följande avsnitt möjliga förändringar inom olika områden av arbetet. Avsnittet innehåller diskussion kring brister i tekniken som använts samt hur resultatet i övrigt kan förbättras.

5.2.1 Manövreringsmetod

Konstruktionen av hur bilen kontrolleras har vissa brister, därmed finns möjlighet till vidareutveckling. I nuläget är manövreringen av bilen begränsad till att främst kontrolleras med hjälp av uppmärksamhet; avslappning används enbart vid backning av bilen. Att prototypen använder sig av denna manövreringsmetod var ett resultat av de interna testerna där detta bedömdes vara det bästa alternativet i majoriteten av fallen. Förbättringar kan vara möjliga genom att utföra en undersökning av alternativa metoder för manövrering.

Ett alternativt sätt att bestämma svängriktning hade varit genom att utnyttja att MindWave Mobile kan registrera användarens blinkningar. Tanken var att låta bilen ha endast en svängriktning vid ett givet tillfälle och att en blinkning skulle växla denna riktning. På så sätt hade styrning fungerat på samma sätt som fart; vid hög uppmärksamhet svänger bilen och i annat fall ges inget utslag. En blinkning hade ändrat en pågående sväng från vänster till höger och vice versa. Tanken med denna lösning var att undvika det nuvarande systemet där styrning sker genom tre

olika uppmärksamhetsintervall. Problemet är dock att blinkningar inte registreras korrekt tillräckligt ofta; bilen hade kunnat byta riktning utan avsikt, alternativt inte byta riktning när det var tänkt. Dessutom skulle det behöva ges en indikation på att det aktiva värdet på riktning hade ändrats om bilen inte redan svängde.

Det skulle vara möjligt att låta användaren själv bedöma vilken typ av hjärnaktivitet som ska styra bilen och tillåta detta genom att införa knappar kopplade till mikrokontrollern. Arduino Mega 2560 har tillräckligt med minne för att utöka funktionaliteten, dessutom skickas all data redan genom systemet. En sådan förändring hade medfört att den funktionalitet som inkluderas i MindWave Mobile nyttjas i större omfattning än med den nuvarande konfigurationen.

Det finns alternativ till att bara använda konstanta värden för kontroll av bilen. I nuläget kräver prototypen att användaren som kontrollerar farten konstant uppnår ett värde som överstiger det utsatta tröskelvärdet för att köra framåt. En annan möjlighet hade varit och använda sig av ett pulssystem; i korta ordalag skulle det innebära att bilen börjar accelerera när ett tillräckligt högt värde avlästs en enstaka gång och inte slutar göra det förrän ett lika högt värde avlästs igen. En sådan lösning hade antagligen gjort det lättare att hålla bilen i rörelse på bekostnad av responstid och underhållningsvärde.

5.2.2 Processering av data

Den processering av data som i nuläget är implementerad kan bidra till försämrad responsivitet. Ytterligare externa användartester utan den använda algoritmen skulle dock vara användbara för att undersöka denna hypotes. Kanske skulle någon annan algoritm eller lägre α -värde i algoritmen som används, se avsnitt 4.3.2 *Processering av avläst data*, ge bättre resultat. Att noga bestämma värdena på de olika α var av stor vikt då ett högt värde skulle kunna eliminera extremvärden medan ett lågt värde skulle innebära bättre responsivitet för nästkommande värden. Då båda dessa egenskaper var eftersträfvansvärda för god kontroll av bilen testades flera olika α -värden innan ett slutgiltigt värde bestämdes.

Som nämnt i avsnitt 5.1 *Analys av resultat från användarstudie* är det ett uppenbart problem för kontrollförmågan att olika personers hjärnaktivitet är mycket olika i ett neutralt läge. Det skulle vara möjligt att lösa detta genom ytterligare mjukvara som kalibrerar kontrollvärden efter en persons neutrala läge. Denna princip kan kombineras med MindWave Mobile och troligen ge ett bättre resultat.

5.2.3 Begränsning av bilens fart

Ett annat alternativ för att öka kontrollförmågan är att sänka farten på bilen. Detta utfördes genom att fästa mekaniska motstånd på insidan av bilens båda bakre fälgar. Fördelen med denna lösning är att det är enkelt att justera hur hårt motståndet ska sitta åt samt att endast hjulen behöver skruvas loss för att byta ut motstånden vid slitage eller justering. Dessa motstånd är tillverkade av paketeringsplast. Även kartong testades, men förkastades då materialet är för stelt och bromsade bilen för mycket. Att tillföra för mycket motstånd hade medfört en större risk för överhettning i motorn, vilket bidrog till valet av det slutgiltiga materialet. Även

paketeringsplasten medför onödigt slitage på motorn, men i och med att det som tas fram är en prototyp anses detta vara en acceptabel lösning på problemet.

Ett förslag på hur bilens fart hade kunnat sänkas på ett sätt med färre brister var genom att bygga en radiostyrd bil från grunden och från början bestämma farten. Denna idé förkastades dock då det främst prioriterades att kunna använda de båda EEG-läsarna och dess data.

5.2.4 Begränsningar hos använd EEG-läsare

Då resultatet påvisar en låg kontrollförmåga kan vissa brister, så som låg uppdateringsfrekvens och svårigheter att kontrollera värden för uppmärksamhet och avslappning, ses hos NeuroSkys MindWave Mobile.

En svårighet med MindWave Mobile är att den endast ger hanterliga värden i form av uppmärksamhet, avslappning och blinkningar. Det är dessutom önskvärt med ett intuitivt system, exempelvis skulle det intuitiva sättet att backa bilen vara att tänka 'åk bakåt'. I och med de begränsningar som finns i hårdvaran motsvaras nu detta av att slappna av. Med en större omfattning av möjliga värden att avläsa ökar också möjligheterna att utveckla bättre fungerande produkter som använder sig av BCI. En annan brist hos EEG-läsaren som använts är relativt låg uppdateringsfrekvens vilket inte lämpar sig då en radiostyrd bil ska manövreras.

Med anledning av dessa brister eftersöktes andra BCI på marknaden. Dessa finns i varierande pris och kvalitet; att istället använda någon av dessa hade troligtvis kunnat förbättra kontrollförmågan och tillåtit ytterligare funktionalitet. Ett exempel på annan hårdvara är Emotiv EPOC, en EEG-läsare med stöd för inlärning [20]. Detta innebär att användaren kan associera en viss hjärnaktivitet med vissa förbestämda mentala kommandon. Detta hade resulterat i att användare av bilen inte hade kunnat använda den ordentligt utan att först kalibrera hårdvaran. Däremot hade kontrollförmågan antagligen ökat. Förutom priset finns ännu en nackdel; sensorerna som används av EPOC måste våtläggas i saltlösning innan användning. Detta, i kombination med tidigare nämnda kalibrering, hade infört ett behov av förarbete innan bilen är redo att köras. I nuläget är detta inte en faktor, men att ersätta MindWave Mobile med en EPOC, eller annan mer avancerad BCI, hade troligtvis gett ett bättre helhetsresultat på bekostnad av det i nuläget korta förberedelsearbetet.

5.2.5 Hårdvaruprototypens portabilitet

Hårdvaruprototypen skulle kunna göras portabel och helt trådlös. För tillfället strömförsörjs hårdvaruprototypen kontinuerligt via en USB-kabel. Detta skulle kunna utvecklas genom användning av en intern kraftkälla. Det hade gjort det möjligt att frikoppla hårdvaruprototypen och på så sätt göra den portabel.

Utan behov av att ständigt vara inkopplad via USB för strömförsörjningens hade kommunikationen mellan dator och hårdvaruprototyp kunnat göras helt trådlös. Eftersom Bluetooth, liksom USB, ansluter till datorn via en COM-port skulle en sådan lösning inte innebära några förändringar i visualiseringsprogrammet.

5.2.6 Visualiseringsprogram

Visualiseringsprogrammet kan göras mer generellt men detta krävdes inte för arbetets omfattning. Som hjälpmedel för kalibrering fungerar visualiseringsprogrammet MindGUI enligt förväntan. Om programmet hade haft större relevans för målsättningen hade det kunnat göras mer generiskt, även om det redan kan visa en stor bredd av data. I nuläget visar programmet data från två stycken EEG-läsare och kräver att båda är anslutna. En önskvärd förändring är således att tillåta godtyckligt antal läsare för avläsning samt att tillåta visualisering oavsett hur många läsare som kopplas samtidigt.

Som beskrivet i avsnitt 5.2.5 *Hårdvaruprototypens portabilitet* hade funktionen att kunna ta emot data direkt via Bluetooth varit en användbar funktion, då anslutningen via USB-kabel inte hade behövts.

5.3 Förkastade tillvägagångssätt

I detta avsnitt diskuteras dellösningar som undersöktes, men som aldrig implementerades i slutresultatet på grund utav brister som uppstod med dem.

5.3.1 Testade Bluetooth-moduler

Valet av Bluetooth-modul som används är kritiskt. Modulen måste ha rätt funktionalitet för att kommunicera på önskat sätt med korrekt antal EEG-läsare. Både varianterna HC-06 och HC-05 testades men var otillräckliga av olika anledningar. HC-05 hade bristen att den inte hade något statiskt minne medan HC-06 inte var kompatibel med EEG-läsarna.

5.3.2 Byte av mikrokontroller

Hårdvaruprototypen var tänkt att drivas av en Arduino Leonardo, men då två EEG-läsare via varsin Bluetooth-modul skulle kopplas ihop med denna räckte inte antalet seriella portar. Arduino Leonardos övriga inportar har en begränsad överföringshastighet på 9 800 Bd medan Bluetooth-modulerna sänder med 57 600 Bd. En möjlig lösning som undersöktes var att endast skicka den data som användes för att kunna minska överföringshastigheten för Bluetooth-modulerna och på så vis kunna utnyttja övriga inportar. Dock lyckades inte försöken att göra detta, då det inte fanns möjlighet att kontrollera hur mycket av datan som MindWave Mobile skulle skicka.

En annan lösning som undersöktes var att använda en multiplexer och en demultiplexer. En multiplexer mottar två eller fler signaler, men skickar endast vidare en signal i taget. Demultiplexern mottar en signal, men har flera utgångar som den kan byta mellan beroende på önskemål. Denna lösning förkastades då multiplexern inte fungerade konsekvent. Det uppstod fördröjningar eftersom den endast mottog värden varannan sekund från EEG-läsarna. För att lösa problemet införskaffades slutligen en ny mikrokontroller, Arduino Mega 2560, med fyra seriella portar. Genom detta öppnades möjligheten att låta båda Bluetooth-modulerna vara anslutna till

mikrokontrollern samtidigt. I och med detta frångicks multiplexern och demultiplexern fullständigt medan Arduino Leonardo nyttjades i samband med testning av MindGUI istället.

5.3.3 Bromsningsmetoder för radiostyrd bil

Bilens fart är begränsad för att öka kontrollförmågan. I ett första försök att sänka farten testades ett antal resistorer med varierande motstånd att placeras i serie med motorn för att minska spänningen över den. När detta inte gav något resultat testades istället att införa en resistor parallellt med motorn för att sänka strömstyrkan. Detta gav likt föregående test inga resultat eftersom det visade sig att motorn styrs av PWM (pulsbreddsmodulering). Det innebär i korta ordalag att motorns varvtal beror på en pulssignal istället för spännings- eller strömstyrka. Att sänka pulskvoten och på så sätt sänka varvtalet visade sig dock inte vara möjligt utan att programmera om bilens kretskort eller att montera ytterliga elektronik på bilen. På grund av detta uteslöts denna lösning. Istället monterades mekaniska motstånd mot hjulen trots att även denna lösning har vissa brister.

När mekaniska motstånd skulle bestämmas testades utöver den valda lösningen (se avsnitt 5.2.3 *Begränsning av bilens fart*) en typ av struktur där motstånden placerades på drivaxeln för att sänka farten. Detta ledde till onödiga komplikationer där flera delar av bilen var tvungna att skruvas loss för att justera motstånden.

5.4 Tillämpningar

I följande avsnitt diskuteras hur prototypen skulle kunna användas för framtida bruk, men också hur BCI-teknologi i sin nuvarande form kan komma att nyttjas. Därutöver diskuteras i korthet hur ökad kommersialisering av området kan ha inverkan på miljön.

5.4.1 Rekreationella syften

Det går i dagsläget att manövrera en tankestyrd bil med hjälp av två stycken Mind-Wave Mobile; prototypen är däremot inte speciellt kontrollerbar. Att bilen uppfattas som svårkontrollerad i början kan ses som en möjlighet att utveckla användarnas förmåga att kontrollera den egna hjärnaktiviteten. För att uppnå god kontrollförmåga krävs en tydlig och synkroniserad kommunikation mellan den individ som kontrollerar farten och den individ som kontrollerar styrningen. Prototypen framstår fortfarande, trots dess bristande kontrollförmåga, som underhållande och innovativ produkt. Resultaten från användartesterna tyder på att urvalet av testpersoner (teknikintresserade studenter) ser ett värde i denna prototyp, om än bara i underhållningssyfte. Intresset hade dock rimligtvis varit ännu större om ett mer precist BCI använts för manövrering.

5.4.2 Privat användning

Resultaten från testerna tyder på att det skulle vara svårt att använda MindWave Mobile för praktiska sysslor i hemmet. Även om tekniken läser av hjärnaktiviteten korrekt är svårigheterna i att kontrollera koncept som uppmärksamhet och avslappning för stora för att tillåta praktisk användning. Det finns dock andra typer av BCI som antagligen hade kunnat användas i sådana syften, se avsnitt 5.2.4 *Begränsningar hos använd EEG-läsare*.

I dagens läge hade det varit möjligt att nyttja BCI för att kontrollera vissa system i hemmet. Det är möjligt att människor med funktionsnedsättning hade haft nytta av ett BCI i hemmet. Exempelvis kan det underlätta för personer med nedsatt rörlighet att kunna öppna dörrar till rum och skåp samt släcka och tända lampor utan att behöva använda sig av strömbrytare.

Givetvis är inte BCI den enda lösningen på detta problem. I ett system tänkt att öka tillgängligheten i hemmet fungerar en EEG-läsare enbart som en fjärrkontroll. Således kan alla lösningar där en EEG-läsare används också lösas genom användning av just en fjärrkontroll eller i vissa fall ljudstyrning. Den främsta fördelen med BCI är i detta fall att man eliminerar behovet av att fysiskt trycka på en knapp, vilket också resulterar i att man kan ha händerna fria. Dessutom ska det nämnas att en MindWave Mobile inte är bekväm att bära under längre perioder. Detta säger visserligen ingenting om komforten hos andra BCI-lösningar, men risken finns att inte heller dessa är väl anpassade för en längre tids användning.

Sammanfattningsvis är det i dagsläget svårt att hitta några användningsområden för BCI i hemmet som inte kan lösas på annat sätt. Det är dock möjligt att tekniken får fäste och i framtiden utvecklas för användning i vardagen; kanske kommer även kirurgiska BCI finnas tillgängliga för privat bruk. Om så blir fallet är det sannolikt att många användningsområden kommer att utvecklas för dessa, men i nuläget är det svårt att se några unika användningsområden för denna teknik.

5.4.3 Industriell och kommersiell användning

Vilken typ av system är då kapabelt till att kontrolleras med en användares hjärnaktivitet? I studien har ett system med två funktioner undersökts. Detta visade sig vara relativt komplicerat då det krävs att båda användarna är synkroniserade med varandra. Det skulle vara möjligt för en person att kontrollerar både fart och styrning, med exempelvis uppmärksamhet respektive avslappning. Det skulle dock vara svårt att göra ett sådant system kontrollerbart eftersom båda parametrarna måste kontrolleras simultant. För att kunna bibehålla god kontrollförmåga bör systemet maximalt ha en funktion, givet att Mindwave Mobile används.

Kommersiella tillämpningsområden innefattar bland annat dörrar och lampor (se avsnitt 5.4.2 *Privat användning*). Ett annan möjlighet skulle för BCI är att använda tekniken tillsammans med verktyg så som motorsågar eller bormaskiner. BCI skulle kunna användas som en säkerhetsspärr för sådana verktyg genom att de blir obrukbara då användarens uppmärksamhetsnivå är för låg. För detta användningsområde är det önskvärt med en mer avancerad och pålitlig hårdvara än MindWave Mobile, men med hjälp av BCI-teknik hade troligtvis säkerheten hos denna typ av verktyg kunnat öka.

Då frågan om kommersialisering lyfts är det viktigt att ta hänsyn till att ökad konsumtion också kan leda till ökad miljöpåverkan. Tillväxt på tekniska områden kräver ansvarsfullhet; detta gäller i synnerhet områden som BCI. I och med att området ännu inte är etablerat kommer val av material för exempelvis prototyper att sätta standarden för vidare utveckling. Framförallt vid massproduktion är val av material viktigt ur ett miljöperspektiv. I samband med utveckling av nya BCI och dess tillämpningsområden bör därför miljöaspekten beaktas noggrant.

5.5 Samarbete mellan flera BCI

Eftersom MindWave Mobile endast kan registrera tre olika typer av hjärnaktivitet (uppmärksamhet, avslappning och blinkningar) är en viktig aspekt att diskutera huruvida det är möjligt att arbeta kooperativt med denna typ av EEG-läsare. Detta för att möjliggöra en större mängd styrsignaler, då antalet möjliga kombinationer av dessa ökar exponentiellt med antalet MindWave Mobile. Att låta flera personer utföra en uppgift tillsammans genom tankeverksamhet kan även skapa lagkänsla och bidra till underhållningsvärdet. Ur resultatet av användarstudien framgår det dock att precisionen hos MindWave Mobile medför en stor begränsning för att möjliggöra detta. En utförlig bedömning av samarbetsaspekten är därför svår att göra, då testerna påvisat svårigheter även vid individuell kontroll av fart eller riktning.

Trots bristerna hos MindWave Mobile var det dock möjligt att observera tydliga förändringar i mätdata från testpersonerna när de började kommunicera verbalt. Detta försvårar potentiellt samarbetsmöjligheterna ytterligare, men inga välgrundade slutsatser kan dras då detta var en sekundär observation som gjordes under testernas gång. Det är inte heller möjligt att dra några slutsatser om inverkan av kommunikation på mer precisa BCI.

6

Slutsats

I följande avsnitt presenteras en sammanfattning av de slutsatser som motiverats tidigare i rapporten. Här kommer även de frågeställningar som formulerats samt syftet att behandlas, det vill säga “att utforska möjligheterna att nyttja kommersiella brain computer interface (BCI) för att kontrollera mekatroniska system”.

Vid framförandet av bilen finns det ett antal svårigheter. Den radiostyrda bilen visar sig vara mycket svår att manövrera korrekt, då de EEG-läsare som används har sina begränsningar i form av låg uppdateringsfrekvens samt att värdena för uppmärksamhet och avslappning är svåra att kontrollera. Samarbetsaspekten gör det även svårt att få bilen att köra i önskad riktning då muntlig kommunikation mellan förarna påverkar de från EEG-läsarna givna värdena.

Mycket tyder på att användningsområdet för MindWave Mobile inte sträcker sig längre än i syfte av underhållning. Eftersom de värden som avläses från denna EEG-läsare är få och abstrakta och ett system med två funktioner inte kan kontrolleras tillförlitligt av MindWave Mobile behövs en ökad precision. Responstiden är också ett led i denna slutsats; en uppdateringsfrekvens på 1 Hz är inte tillräckligt snabbt för att kunna kontrollera ett känsligt mekatroniskt system.

BCI har potential att nyttjas i produkter avsedda för mer än rekreation, men det krävs betydligt högre precision än vad MindWave Mobile kan leverera. Med fortsatt utveckling kan enkla BCI liknande MindWave Mobile användas för att kontrollera praktiska system, dock till en början med mindre avancerade funktioner. Ett exempel på sådana system är maskiner som kräver ständig uppmärksamhet för att undvika skador. Genom att använda ett BCI som ett extra nödstopp, som slår till vid ouppmärksamhet, skulle risken för olyckor troligtvis minska.

Projektet har visat att det går att manövrera ett mekatroniskt system, i detta fall en radiostyrd bil, med kommersiellt tillgängliga EEG-läsare. Den använda läsaren MindWave Mobile visar sig dock ha begränsningar i precision, vilket gör den otillräcklig för praktisk användning. Dessa begränsningar har varit återkommande och av stor vikt för arbetets utgång. Till följd av den bristfälliga kontrollförmågan är det svårt att dra några slutsatser angående samarbetsaspekten, som beskrivet i avsnitt 5.5 *Samarbete mellan flera BCI*. Tydligt enligt användarstudien är dock att teknikintresserade studenter har ett intresse för BCI, vilket gör det relevant att genomföra ytterligare studier på området. I och med den bristande precisionen hos MindWave Mobile bör dock sådana undersökningar baseras på andra typer av BCI.

Referenser

- [1] E. Niedermeyer, F. H. Lopes da Silva, *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*, 5th ed. Lippincott Williams & Wilkins, 11 2005.
- [2] Stillalive Studios, “Son of Nor,” 2015, Accessed: 2015-05-18. [Online]. Available: <http://www.sonofnor.com>
- [3] NeuroSky, “Brainwave Visualizer,” 2013.
- [4] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, W. J. Heetderks, D. J. McFarland, P. H. Peckham, G. Schalk, E. Donchin, L. A. Quatrano, C. J. Robinson, and T. M. Vaughan, “Brain-computer interface technology: A review of the first international meeting,” *Ieee Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 164–173, 2000, Accessed: 2015-05-18.
- [5] J. J. Vidal, “Toward direct brain-computer communication,” *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, vol. 2, pp. 157–180, 1973, Annual reviews Inc. Accessed: 2015-05-18.
- [6] S. Leif and L. Pablo, *Bioelectrical signal processing in cardiac and neurological applications*, 1st ed. Academic Press, 2005.
- [7] NeuroSky, “EEG Biosensors,” 2015, Accessed: 2015-02-06. [Online]. Available: <http://neurosky.com/biosensors/eeg-sensor/>
- [8] NeuroSky, “eSense Meters,” 2014, Accessed: 2015-06-02. [Online]. Available: http://developer.neurosky.com/docs/doku.php?id=esenses_tm
- [9] NeuroSky, “ThinkGear Serial Stream Guide,” Accessed: 2015-05-29. [Online]. Available: http://developer.neurosky.com/docs/doku.php?id=thinkgear_communications_protocol
- [10] NeuroSky, *NeuroSky Technology Overview*. NeuroSky, 2012, book section 4.
- [11] G. Rebolledo-Mendez, I. Dunwell, E. A. Martinez-Miron, M. D. Vargas-Cerdan, S. de Freitas, F. Liarokapis, and A. R. Garcia-Gaona, “Assessing neurosky’s usability to detect attention levels in an assessment exercise,” *Human-Computer Interaction, Pt I*, vol. 5610, pp. 149–158, 2009, ISI Document Delivery No.: BKR17 13th International Conference on Human-Computer Interaction Jul 19-24, 2009 San Diego, CA Accessed: 2015-05-18.

- [12] Neurosky, *Setting Up Your MindWave Mobile*. NeuroSky, 2012, book section 2.
- [13] NeuroSky, “Developer tools 2.5,” 2015, Accessed: 2015-05-18. [Online]. Available: <http://store.neurosky.com/products/developer-tools-2-5>
- [14] T. Robinson, “LibUsbDotNet 2.2.8,” 2010, Accessed: 2015-05-18. [Online]. Available: <http://libusbdotnet.sourceforge.net/>
- [15] Arduino, “Arduino Mega 2560,” 2015, Accessed: 2015-05-27. [Online]. Available: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [16] Arduino, “Arduino Leonardo,” 2015, Accessed: 2015-05-27. [Online]. Available: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLeonardo>
- [17] Microchip Technology Inc., “RN42 / RN42N Class 2 Bluetooth Module with EDR support Data Sheet,” 2015, Accessed: 2015-05-27. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002328A.pdf>
- [18] Carrera, “Angry Python; Carrera buggy, blue,” Accessed: 2015-05-29. [Online]. Available: http://www.carrera-rc.com/fileadmin/user_upload/downloads/Carrera-RC_BA_202005_202006_D-GR_03.pdf
- [19] V. Paxson, M. Allman, J. Chu, and M. Sargent, “Computing TCP’s Retransmission Timer,” RFC 6298, June 2011.
- [20] M. Duvinage, T. Castermans, M. Petieau, T. Hoellinger, G. Cheron, and T. Dutoit, “Performance of the Emotiv Epoc headset for P300-based applications,” *Biomedical Engineering Online*, vol. 12, 2013, Accessed: 2015-05-18. [Online]. Available: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/12/1/56>

Bilagor

A

Handkontrollernas uppbyggnad

Tabell A.1 och A.2 är resultaten av experimenterande med bilens handkontroll. Tabellerna förklarar vilken kombination av kablar som ska kortslutas för att nå ett önskvärt resultat. Tabell A.1 avser drivning medan tabell A.2 avser styrning.

Teckenförklaring kablar (färg):

b — Blå kabel

v — Vit kabel

g — Grön kabel

Teckenförklaring drivning (plustecken indikerar högre fart):

F — Drivning framåt

B — Drivning bakåt

S — Stillastående

Teckenförklaring styrning (plustecken indikerar större utslag):

V — Vänster

R — Rakt fram

H — Höger

Tabell A.1: Kortslutningstabell för drivning framåt och bakåt.

Kablar	g, b, v	g, v	g	-	v	b, v	b
Resultat	F++	F+	F	S	B	B+	B++

Tabell A.2: Kortslutningstabell för styrning.

Kablar	b	b, v	v	-	g	g, v	g, b, v
Resultat	V++	V+	V	R	H	H+	H++

B

Kommunikationsprotokoll för flaggbitar

Nedan beskrivs det kommunikationsprotokoll som använts mellan mikrokontroller och Minduino. När mikrokontrollern tar emot data från en EEG-läsare delas denna data upp för att kunna representeras på format enligt det nedan givna kommunikationsprotokollet. För att kunna tolka vilken typ av värden det handlar om tilldelas de en byte innehållande information om datans typ. Om en EEG-läsare skickar data som omvandlas till totalt 3 byte information, kommer mikrokontrollern i sin tur att skicka totalt 6 byte till Minduino. För varje byte bildas alltså ytterligare en byte innehållande flaggbitar.

Tabell B.1 visar hur kommunikationsprotokollet mellan mikrokontroller och Minduino är utformat. Bitarna motsvarar ett binärt värde för någon egenskap hos den skickade datan.

Tabell B.1: Flaggbyten ur det kommunikationsprotokoll mellan mikrokontroller och Minduino som beskriver datan i den efterföljande byten.

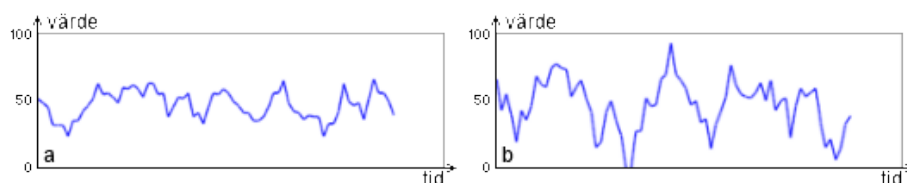
Flaggvärde Bitnummer	0	1
0: Avgör vilken EEG-läsare som skickar datan.	Datan kommer från den EEG-läsare som kontrollerar fart.	Datan kommer från den EEG-läsare som kontrollerar styrning.
1: Avgör om datan är uppmärksamhet eller avslappning.	Datan är uppmärksamhetsnivå.	Datan är avslappningsnivå.
2: Avgör om det är en blinkning som skickas. Denna bit överskuggar bit 1.	Datan kommer inte från en blinkning.	Datan kommer från en blinkning.
3: Avgör om det är signalstyrka som skickas. Denna bit överskuggar bit 2 och 1.	Datan bestämmer inte värdet på svag signal från EEG-läsare.	Datan bestämmer värdet på svag signal från EEG-läsare.
4: Avgör om den EEG-läsare som kontrollerar fart är ansluten till mikrokontrollern eller inte.	Den EEG-läsare som kontrollerar fart är ansluten till mikrokontrollern.	Den EEG-läsare som kontrollerar fart är inte ansluten till mikrokontrollern.
5: Avgör om den EEG-läsare som kontrollerar styrning är ansluten till mikrokontrollern eller inte.	Den EEG-läsare som kontrollerar styrning är ansluten till mikrokontrollern.	Den EEG-läsare som kontrollerar styrning är inte ansluten till mikrokontrollern.
6: Kan ha godtyckligt booleskt värde.	-	-
7: Kan ha godtyckligt booleskt värde.	-	-

C

Resultat av interna användartester

Nedan beskrivs i korthet resultatet av de interna användartester som gjordes för att initialt bestämma gränsvärden och processeringsmetod för värden i hårdvaruprototypen. Samtliga värden är i intervallet $[0, 100]$.

En första iakttagelse som gjordes var att värden för uppmärksamhet är lättare att hålla stabila än värden för avslappning, vilket kan jämföras i figurerna C.1a och C.1b. Under ca en minuts mättid visar C.1a en jämnare kurva medan C.1b visar en mer fluktuerande. Detta var utgångspunkten för att uppmärksamhet skulle användas som den primära värdetypen för manövrering.



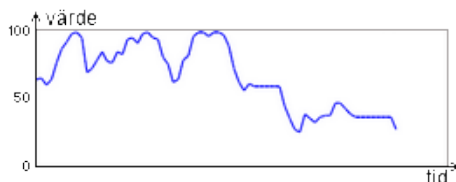
Figur C.1: Värden för (a) uppmärksamhet och (b) avslappning då användaren försökte hålla sig i mitten.

Ett antal processeringsmetoder togs fram för att bidra till minskad fluktuation. En beskrivning av dessa med tillhörande formler finns att tillgå i tabell C.1. Utifrån testerna visade sig den nedersta, som tar procentuell hänsyn av viss grad α till det föregående värdet, lämpa sig bäst; denna implementerades därmed i mikrokontrollerns mjukvara. Då formlerna utgick från tidigare värden applicerades de så långt det var möjligt; t.ex. kunde inte en första iteration utgå från tidigare värden.

Tabell C.1: Olika processeringsmetoder som provades för att minska mängden fluktuerande värden. V avser värdet som är under processering, N är ett index i riktning bakåt utifrån det senaste processerade värdet, v_N avser ett värde N steg bakåt, S avser det senast inkommande värdet och α är ett tal i intervallet $[0, 1]$.

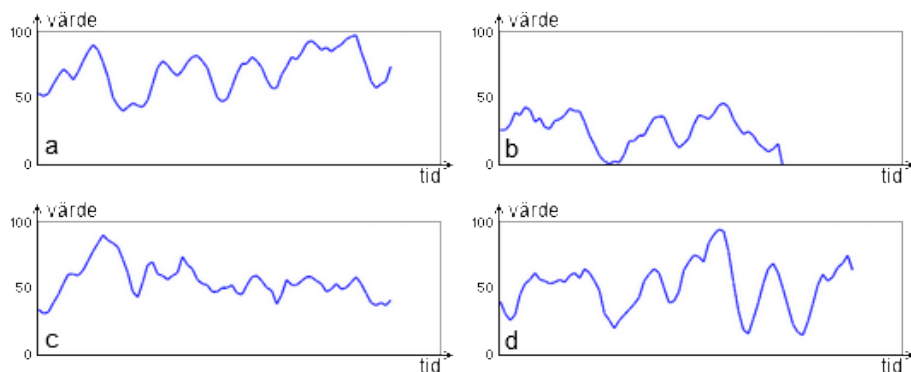
Processeringsmetod	Formel
Medelvärde över de N senaste värdena.	$V = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (v_i) + S}{N}$
Viktat medelvärde över de N senaste värdena. Tar mer hänsyn till de senaste värdena än medelvärde.	$V = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (v_i * (N-i)) + S * N}{\sum_{i=1}^N i}$
Procentuell hänsyn till det föregående värdet.	$V = v_1 * \alpha + (1 - \alpha) * S$

En fördel med avslappning var att det gick relativt lätt att hålla höga värden för avslappning under lång tid, vilket kan ses i figur C.2 där nästkommande värde utgick till 40 % från det senaste värdet. Med tanke på att värdena inte följde särskilt snabbt jämfört med dem i figur C.1b valdes dock ett värde på 20 %. Att det gick att hålla höga värden för avslappning låg till grund för att konceptet kunde användas i samband med backning.



Figur C.2: Värden för avslappning i försök att hålla höga värden. Nästkommande värde utgår till 40 % från det föregående värdet.

För uppmärksamhet valdes efter några iterationer att 50 % av det föregående värdet skulle användas för att bestämma nästkommande värde. Detta visade sig vara lämpligt för samtliga testmoment. Att hålla höga värden gick som kan utläsas ur figur C.3a relativt bra. Samma sak gällde för låga värden som visas i figur C.3b. När användaren hade för avsikt att hålla värdena stadigt i mitten gick även detta relativt bra vilket kan ses i figur C.3c. Slutligen visade det sig inte vara för mycket att ta hänsyn till 50 % av föregående värde, eftersom det relativt enkelt gick att växla mellan att hålla höga och låga värden, vilket visas i figur C.3d.



Figur C.3: Värden för uppmärksamhet för (a) höga värden, (b) låga värden, (c) värden i mitten och (d) snabbt växlande värden. Nästkommande värde utgår till 50 % från det föregående värdet.

Med informationen ovan som underlag implementerades det i mikrokontrollerns mjukvara att det nya värdet för uppmärksamhet skulle ta 50 % hänsyn till det föregående värdet och 50 % till det senast inkommande; för avslappning 20 % hänsyn till det föregående värdet och 80 % till det senaste.

Gränsvärdena sattes utifrån de värden kurvorna i figur C.3 visar. Dock valdes olika gränsvärden för att påbörja rörelse respektive avsluta rörelse. Eftersom det gick att sänka sin uppmärksamhetsnivå relativt lätt och för att undvika att bilen råkade röra sig till följd av korta extremvärden sattes gränsvärdet för att avsluta en rörelse något lägre än det för att påbörja en rörelse.

D

Krav på manövrering

Nedan beskrivs de krav som avser vad som menas med god kontrollförmåga. Kraven har ställts utifrån att förutsättningarna för förarna är så goda som möjligt; de ska känna sig utvilade och förberedda för uppgiften.

Fart

- Det ska vara relativt svårt att komma upp i hastighet.
- Det ska vara lätt att avsiktligt stanna.
- Föraren ska inte råka backa. Detta bör hanteras på annat sätt.
- Det ska vara svårare att backa än att stanna.
- Det ska gå relativt snabbt/vara relativt responsivt.
- Föraren ska inte tappa kontrollen när bilen börjar röra sig.
- När föraren inte anstränger sig ska bilen inte köra; det ska inte hända oavsiktligt.

Styrning

- Det ska vara lätt att inte råka svänga.
- Det ska vara relativt lätt att svänga höger respektive vänster.
- Det ska vara relativt lätt att fortsätta svänga.
- När föraren slutar svänga ska det vara lätt att köra rakt fram. Bilen ska inte börja svänga i andra riktningen.
- Det ska inte ta för lång tid att börja svänga.
- Föraren ska inte bli distraherad av att bilen rör sig.

E

Användarstudie

Nedan återfinns material från den användarstudie som gjordes. Först presenteras dess mål och målgrupp, följt av de tester som gjordes. Därefter beskrivs när och var de gjordes samt det material som behövdes. Vidare återges det manus som användes under testerna och slutligen presenteras de enkätfrågor testpersonerna fick svara på efter testet.

Mål

Målet med studien är att testa användarvänlighet. Med det menas hur väl kraven uppfylls som satts för manövreringsförmågan.

- Lätthanterlighet (Hur lätt är det att kontrollera signalen?)
- Responsivitet (Hur snabbt tar sig användaren någonstans?)
- Underhållning (Vill användaren fortsätta köra? Hur länge vill de fortsätta?)

Målgrupp

Användarstudiens målgrupp är studenter med teknikintresse. I studien kommer tio stycken testpersoner att ingå.

Tester

Nedan visas vilka tester som ingår i studien samt hur lång tid som är avsatt för varje moment.

Farttester

1. Köra framåt (1 min)
2. Stå still (1 min)
3. Backa och sedan stanna (2 min)
4. Köra framåt och sedan stanna (2 min)

Styrningstester

1. Svänga höger (1 min)
2. Svänga vänster (1 min)
3. Låt bli att svänga (1 min)
4. Svänga vänster till rakt fram och direkt tillbaks (1 min)
5. Växla mellan att svänga höger och vänster (3 min)

Tester med båda

Denna del innefattar tio minuter till att köra runt i rummet och låta användarna testa själva. Förslag på vad de kan göra:

1. Kör fram och sväng åt höger/kör runt lite.
2. Kör runt en kon och tillbaka.

Allmänt

Nedan beskrivs sådant som har med tid, plats och material att göra.

Tider

Testerna sker på följande tider:

- Fredag 17/4 09:00 - 12:00
- Tisdag 21/4 14:30 - 17:00

Plats

Testerna utförs i gymnastiksalen i Chalmers kårhus på campus Johanneberg, Göteborg.

Att ta med

- Prototypen
- Dator för att visa MindGUI och fylla i resultat
- Dator för testarna att fylla i utvärderingsformulär på
- Tidtagare

Manus

Följande manus användes under användartesterna.

Introduktion

Vi börjar med att hälsa dem välkomna och tacka för att de vill testa. Därefter ger vi dem varsin MindWave Mobile, undersöker vem som fick EEG-läsaren för fart respektive styrning och hjälper dem sedan att ta på sig EEG-läsarna.

Bakgrund

– Vi har tagit fram en prototypanordning för att styra en bil med enbart tankeverksamhet. Testet kommer ta ca 20 minuter, kommer vara anonymt och endast användas av oss för att ge oss en bättre bild över hur bra det funkar. Vissa kan uppleva att de får lite ont i huvudet efter en stund då headsetet trycker lite över huvudet, så säg till om ni behöver en paus eller vill avbryta.

– Bilen styrs av två personer, en av er kommer svänga höger och vänster medans den andra gasar och backar. Ni kommer få varsina uppgifter som ni får försöka utföra samtidigt. Det gör inget om ni inte skulle klara uppgiften, det här är en utvärdering av vår prototyp, inte av er. Det tar ett tag att lära sig hur det fungerar så ge inte upp efter första försöket.

– Ni styr genom att höja och sänka er nivå av uppmärksamhet och avslappning:

- Tilltala den som kontrollerar fart:
 - För att köra framåt måste du höja din nivå av uppmärksamhet. För att sedan stanna bilen måste du sänka nivån igen. För att backa måste du ha hög nivå av avslappning och samtidigt låg uppmärksamhet.
- Tilltala den som kontrollerar styrning svängning:
 - För att svänga höger måste du höja din nivå av uppmärksamhet och för att svänga vänster måste du sänka den. För att inte svänga åt något håll måste du hålla dig ungefär i mitten.

Stäm av att de förstått instruktionerna för hur de styr, annars upprepa instruktionerna.

– Ni kan ofta höja uppmärksamhet genom att hålla fast vid en och samma tanke, helt enkelt fokusera på något. Tvärtom kan ni sänka uppmärksamhet genom att låta tankarna vandra. Avslappning höjer ni genom att slappna av, ofta hjälper det mycket att blunda.

Presentera testet

Börja med farttester, gör därefter styrningstester och slutligen de gemensamma testerna.

Ge dessa tips efter hand:

- För högre uppmärksamhet:

- Fokusera på/håll fast vid en tanke
- Fokusera blicken på någon punkt
- Räkna baklänges från 100
- Läs en svår text
- För lägre uppmärksamhet:
 - Låt tankarna vandra
 - Titta omkring i rummet, fäst inte blicken/blunda
- För högre avslappning:
 - Blunda, slappna av
 - Ta djupa andetag
- För lägre avslappning:
 - Skaka loss

Avslutning

Tacka för medverkande och förse med dator för att utvärdera testet i ett formulär.

Enkätfrågor

Följande frågor fick användarna svara på efter sina testsessioner:

Vad kontrollerade du? Fart/ Styrning

Om Fart:

Var någon uppgift särskilt svår att utföra? Köra framåt/ Stå still/ Backa/ Stanna från backning/ Stanna från framåt/ Koordinera med den andra föraren/ Inget/ Annat (Flera svar möjliga)

Om Styrning:

Var någon uppgift särskilt svår att utföra? Svänga vänster/ Svänga höger/ Undvika att svänga/ Svänga vänster två gånger utan att svänga höger/ Snabbt byta riktning/ Koordinera med den andra föraren/ Inget/ Annat (Flera svar möjliga)

Hur svårt var det att styra bilen?

1 (Mycket svårt) - 5 (Mycket lätt)

Hur responsiv kändes bilen till dina avsikter?

1 (Inte responsiv) - 5 (Responsiv)

Hur underhållande var aktiviteten?

1 (Ej underhållande) - 5 (Underhållande)