

Utveckling av robotprocess för restaurering av defekta telefonskärmar

Sebastian Eriksson

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för el- och automationsteknik

Vasa 2022

EXAMENSARBETE

Författare: Sebastian Eriksson
Utbildning och ort: EI- och automationsteknik, Vasa
Inriktning: Automationsteknik
Handledare: Joachim Böling, Yrkeshögskolan Novia
Tomas Sjöberg, Mirka Ab

Titel: Utveckling av robotprocess för restaurering av defekta telefonskärmar

Datum: 25.4.2022 Sidantal: 39 Bilagor: 3

Abstrakt

Examensarbetet har utförts på uppdrag av företaget Mirka Ab under hösten 2021 och våren 2022. Arbetet behandlar slipning och polering av telefonskärmar med hjälp av en samarbetsrobot. Teori om robotteknik och robotars uppbyggnad samt funktion presenteras.

Restaurering av elektronikskärmar blir allt vanligare och speciellt efterfrågan på begagnade, restaurerade telefoner ökar ständigt. Genom att restaurera telefonskärmen istället för att byta ut den sparar man tid och pengar och det är dessutom mycket mera hållbart ur miljöperspektiv.

Inom företaget finns redan en manuell restaureringsprocess där skärmarnas defekter slipas och poleras bort för hand. Denna process är svår att utföra och en robotapplikation som skulle ersätta människans arbetsinsats efterfrågades. Syftet med examensarbetet var att kontrollera om den befintliga restaureringsprocessen gick att automatisera med hjälp av en samarbetsrobot och således förenkla, förbättra och försnabba restaureringen av telefonskärmar.

En robotapplikation med en Universal Robots samarbetsrobot och ett doseringssystem konstruerades för att ersätta den manuella restaureringsprocessen. Med hjälp av Universal Robots programmeringskonsol har ett program utvecklats som först slipar bort telefonskärmens defekter och därefter polerar skärmen i två olika poleringssteg till sin ursprungliga glans.

Resultatet av examensarbetet är en fungerande robotapplikation som restaurerar telefonskärmar som har defekter i glaset. Robotapplikationen doserar lämpliga mängder slip- och polermedel samt slipar och polerar bort telefonskärmens defekter. Tack vare ett lyckat resultat kan robotapplikationen användas i liknande projekt eller vid expanderingsprojekt till flera telefonmodeller och andra elektronikskärmar.

Språk: svenska

Nyckelord: robotik, slipning, polering, samarbetsrobot

BACHELOR'S THESIS

Author: Sebastian Eriksson
Degree Programme: Electrical Engineering and Automation, Vaasa
Specialisation: Automation Technology
Supervisor(s): Joachim Böling, Yrkeshögskolan Novia
Tomas Sjöberg, Mirka Ltd

Title: Development of robotic process for restoration of defective phone screens

Date: 25.4.2022 Number of pages: 39 Appendices: 3

Abstract

This thesis has been carried out on the behalf of Mirka Ltd during the autumn of 2021 and spring of 2022. The work addresses sanding and polishing of smartphone screens using a collaborative robot. Theory of robotics, the structure and function of robots are presented.

The restoration of electronic screens is becoming increasingly common and the demand for used, restored phones is constantly growing. Restoring the phone screen instead of replacing it saves time and money and is also much more sustainable from an environmental perspective.

Within the company there is already a manual restoration process where the defects of the screens are sanded away and polished by hand. This process is difficult to perform and a robotic application that would replace the human effort was requested. The aim of the thesis was to verify whether the existing restoration process could be automated using a collaborative robot and thus simplify, improve and speed up the restoration process of phone screens.

A robotic application using a Universal Robots collaborative robot and a dispensing system was designed to replace the manual restoration process. Using the Universal Robots teach pendant, an application was developed that first sands away the defects of the phone screen and then polishes the screen in two different polishing steps back to its original shine.

The result of the thesis is a functional robotic application that restores phone screens that have defects in the glass. The robotic application doses appropriate amounts of abrasives and polishing agents and sands and polishes away the defects of the phone screen. The successful result allows the robotic application to be used in similar projects or for expansion to multiple phone models and other electronics screens.

Language: swedish

Key words: robotics, sanding, polishing, collaborative robot

Innehållsförteckning

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Inledning..... | 1 |
| 1.1 | Bakgrund..... | 1 |
| 1.2 | Syfte..... | 2 |
| 1.3 | Mål..... | 2 |
| 1.4 | Uppdragsgivare..... | 2 |
| 1.5 | Avgränsningar..... | 3 |
| 2 | Teori..... | 4 |
| 2.1 | Robotteknik..... | 4 |
| 2.1.1 | Användning av robotar..... | 4 |
| 2.1.2 | Industriell robotteknik..... | 5 |
| 2.2 | Robotsystemets beståndsdelar..... | 6 |
| 2.2.1 | Drivenhet..... | 6 |
| 2.2.2 | Styrenhet..... | 6 |
| 2.2.3 | Sensorer..... | 6 |
| 2.2.4 | Programmering..... | 7 |
| 2.2.5 | Manipulator..... | 8 |
| 2.2.6 | Verktyg..... | 9 |
| 2.2.7 | Koordinatsystem..... | 9 |
| 2.2.8 | Frihetsgrader och rörelseaxlar..... | 10 |
| 2.3 | Samarbetsrobotar..... | 10 |
| 2.3.1 | Universal Robots..... | 11 |
| 2.3.2 | Universal Robots Academy..... | 12 |
| 2.4 | Robotiq..... | 13 |
| 2.5 | Slipning och polering..... | 13 |
| 2.5.1 | Slipning..... | 14 |
| 2.5.2 | Mirka Airos..... | 15 |
| 2.5.3 | Polering..... | 16 |
| 2.6 | Manuell restaurering av telefonskärmar..... | 17 |
| 2.7 | Robotapplikation för restaurering av telefonskärmar..... | 18 |
| 3 | Utförande..... | 19 |
| 3.1 | Programmering..... | 19 |
| 3.2 | Val av metod..... | 21 |
| 3.3 | Val av doseringssystem..... | 22 |
| 3.4 | Skolning..... | 25 |
| 3.5 | Utrustning..... | 25 |
| 3.6 | Mätinstrument..... | 27 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.6.1 | Testo 476 | 27 |
| 3.6.2 | Airos Modbus Controller | 27 |
| 3.6.3 | ATI trycksensor | 27 |
| 3.6.4 | NanoFocus..... | 28 |
| 3.7 | Styrning av slip- och polermaskin | 29 |
| 4 | Resultat | 32 |
| 4.1 | Processen | 33 |
| 4.2 | Mätresultat..... | 34 |
| 4.3 | Vidareutveckling | 36 |
| 5 | Diskussion..... | 37 |
| 6 | Källförteckning | 38 |

Figurförteckning

| | | |
|-----------|---|----|
| Figur 1. | Typisk sex-axlad robot. (Fairchild, 2022)..... | 8 |
| Figur 2. | Exempel på verktyg. (Robotiq, 2022). | 9 |
| Figur 3. | Universal Robots e-seriefamilj. (Universal Robots, 2021a). | 12 |
| Figur 4. | Remintprodukterna. (Mirka Remint, 2022)..... | 14 |
| Figur 5. | Slipmedel och tillhörande plattor. | 15 |
| Figur 6. | Mirka Airos monterad i samarbetsrobot. (Universal Robots & Mirka, 2022). | 16 |
| Figur 7. | Polermedel och tillhörande plattor..... | 17 |
| Figur 8. | Universal Robots programmeringskonsol. (Universal Robots, 2022b). | 19 |
| Figur 9. | Programmeringsmiljö..... | 20 |
| Figur 10. | Inställning av TCP, payload och tyngdpunkt i programmeringsmiljön..... | 21 |
| Figur 11. | Doseringssystemets framsida..... | 23 |
| Figur 12. | Doseringssystemets baksida. | 23 |
| Figur 13. | Diagram över linearitetstest..... | 24 |
| Figur 14. | Hela robotsystemet exklusive drivenhet och kontrollbox. | 26 |
| Figur 15. | Testo 476 stroboskop. (Testo, 2022). | 27 |
| Figur 16. | ATI F/T sensor monterad i Universal Robots samarbetsrobot. (ATI, 2022). | 28 |
| Figur 17. | NanoFocus mätinstrument..... | 29 |
| Figur 18. | Slip- och polermaskinernas drivenheter. | 30 |
| Figur 19. | Inkopplingen av digitala utgångar i robotens kontrollbox..... | 32 |
| Figur 20. | Telefonskärmens restaureringsprocess..... | 33 |
| Figur 21. | NanoFocus-bild av ny telefonskärm. | 34 |
| Figur 22. | NanoFocus-bild av repa i telefonskärm. | 35 |
| Figur 23. | NanoFocus-bild av restaurerad telefonskärm. | 35 |

Tabellförteckning

| | |
|---|----|
| Tabell 1. Tabell med använda parametrar. | 23 |
| Tabell 2. Tabell med resultat från doseringstest. | 24 |
| Tabell 3. Tabell med resultat från test med Remintprodukterna. | 25 |

Kodexempelförteckning

| | |
|--|----|
| Kodexempel 1. Generering av mönster. | 22 |
| Kodexempel 2. Konfigurering av rotationshastighet för Mirka Airos..... | 30 |
| Kodexempel 3. Exempel på styrning av rotationshastighet med digitala utgångar..... | 31 |
| Kodexempel 4. Digitala in- och utgångar. | 31 |

Bilageförteckning

| | |
|---|--|
| Bilaga 1. NanoFocus-analys av ny telefonskärm. | |
| Bilaga 2. NanoFocus-analys av repad telefonskärm. | |
| Bilaga 3. NanoFocus-analys av restaurerad telefonskärm. | |

1 Inledning

Återanvändning och restaurering av begagnade telefoner blir allt mer populärt i dagens samhälle. Restaurering av telefonskärmar utförs för tillfället genom att man helt byter ut skärmen mot en ny eller genom att man slipar och polerar upp den gamla skärmen manuellt. Båda dessa processer är väldigt krävande och svåra att utföra för att nå ett bra resultat. Jag har fått chansen att tillämpa och utveckla ett nytt arbetssätt för restaureringsprocessen, något som inte gjorts tidigare vid Mirka Ab. Examensarbetet har utförts under hösten 2021 och våren 2022. Examensarbetet går ut på att ersätta den manuella restaureringsprocessen med en automatisk. Detta genom att analysera och ställa in optimala parametervärden för en robotapplikation med en samarbetsrobot.

1.1 Bakgrund

Begagnade elektronikskärmar med repor eller andra defekter har kunnat repareras genom att man byter ut skärmen. Denna process är svår att utföra, relativt kostsam och dessutom inte hållbar.

År 2020 lanserade Mirka Ab produktgruppen Remint som är en ny produktserie med slip- och polermedel. Dessa används vid restaurering av kemiskt förstärkta glas, även kallade gorillaglas, genom att slipa och polera bort skärmens defekt istället för att byta ut skärmen mot en ny. Remint-produkterna är för tillfället patentsökta.

Remint-produkterna har möjliggjort snabbare, billigare och miljövänligare restaureringar av defekta elektronikskärmar. Processen är fortfarande svår, tidskrävande och påfrestande för människan att utföra. För att optimera arbetsprocessen kommer den bytas ut mot en automatiserad robotapplikation med en samarbetsrobot, på engelska collaborative robot. Robotprocessen kommer att förenkla människans arbetsinsats och därmed spara både tid och resurser.

Mirka Ab har sedan år 2018 arbetat med robotslipning med samarbetsrobotar och tack vare dennas framgång har tanken om robotpolering växt. Examensarbetet kommer att fungera både som grund och som ett av de första testen för polering med robot. Delar av processen kommer att kunna användas i flera robotpoleringsapplikationer.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att kontrollera om en robotapplikation för restaureringsprocessen av telefonskärmar är möjlig och lönsam att utföra, samt bredda kunskaperna inom robotapplikationer, speciellt när det gäller polering med robot. Syftet är även att skapa en grundförståelse för polering med robot, som sedan kan tillämpas i andra robotpoleringsapplikationer.

1.3 Mål

Huvudmålet för examensarbetet är att genom analys av den befintliga manuella restaureringsprocessen, hitta de optimala parametervärdena för robotapplikationen som sedan tillämpas och testas för att uppnå det önskade slutresultatet på telefonens skärm. Examensarbetets delmål är att utvärdera befintlig utrustning och dess komponenter.

1.4 Uppdragsgivare

Mirka Ab är ett av de världsledande företagen inom ytbehandlingsteknik som tillverkar högkvalitativa slipproduktlösningar för ytbehandling och precisionsindustrin. Mirka är grundat av Onni Aulu år 1943 i Helsingfors, där han startade produktionen av slipprodukter. Aulu flyttade sedan företaget år 1962 till en fabriksfastighet i Jeppo. År 1966 växte företaget när Mirka köptes upp av Oy Keppo Ab och 1973 sammanslogs de två företagen. Redan från början exporterades en stor del av produkterna och idag exporteras mer än 97 % av de tillverkade produkterna. År 1984 bildades KWH-koncernen då Oy Keppo Ab och Oy Wiik & Höglund Ab sammanslogs. Mirka blev därefter en av fyra affärsgrupper som tillhör KWH-koncernen och är idag den största underkoncernen i KWH-koncernen.

Genom många års erfarenhet och kontinuerlig satsning på produktutveckling har Mirka lyckats skapa revolutionerande patenterade produkter samt blivit specialist inom slipmedel och kan bland annat erbjuda sina kunder dammfria ytbehandlingslösningar.

För att alltid hålla sig i världsklass och ha möjlighet att konkurrera med andra företag på internationell nivå har Mirka hela tiden satsat på tillväxt och utveckling. Mirkas huvudkontor är beläget i Jeppo, där forsknings- och utvecklingsavdelningen finns. Produktionsutrymmen inom Finland finns i Jeppo, Oravais, Jakobstad samt Karis. Dessutom finns

kontorsutrymmen också i Vasa. Mirka expanderar årligen och för tillfället har Mirka 18 olika dotterbolag runtom i världen.

”Dedicated to the finish”, som är Mirkas motto, innebär att Mirka alltid är fullt engagerad i hela processen från början av tillverkningen tills produkten når ut till kunden. Mirka strävar till att uppnå en världsledande roll inom ytbehandlingsbranschen och detta ska uppnås via ständig utveckling. (Mirka, 2021).

1.5 Avgränsningar

Examensarbetet kommer att bilda en grund och vara startskottet för restaurering av elektronikskärmar med samarbetsrobot. På grund av att projektet är väldigt brett och stort togs en del avgränsningar i bruk så att inte projektet skulle bli allt för tidkrävande och omfattande. De telefonskärmar som valdes ut till restaureringsprocessen var iPhonemodellerna 6 och 7. Dessa modeller är identiska till storleken och passar i samma fasthållningsform.

En annan avgränsning gällde slip- och polermönstret. Kunskap om ett externt program som tar fram optimala slip- och polermönster finns tillgängligt men det skulle ha behövts en större omprogrammering. Med hjälp av det externa mönsterprogrammet kunde processen ha optimerats och parametrar som tid och tryck kunde ha minimerats. På grund av detta har vi endast fokuserat på att få ett bra slutresultat, och utvecklingen samt ibruktagningen av de optimala mönstren kommer troligtvis göras utöver examensarbetet.

Telefonerna ska egentligen tätas i öppningar såsom mikrofon- och laddningsuttag för att förhindra att slip- och polermedlet kommer in i telefonen. Detta har inte gjorts eftersom telefonerna som använts redan tagits ur bruk. Efter slip- och polerprocessen ska slutligen en oleofobisk beläggning appliceras på telefonskärmen för att skapa en glansig och vattenavstötande yta. Detta har inte utförts eftersom telefonerna användes endast i testmiljö.

Analys av resultatet för restaureringsprocessen har utförts med NanoFocus mätinstrument. Mättekniken är mycket avancerad och omfattande, och kunde ha tillämpats i högre grad för att uppnå ännu utförligare analysresultat. Eftersom mättekniken är så omfattande gjordes en avgränsning så att endast de mest relevanta mätningarna gjordes.

2 Teori

I detta kapitel presenteras teorin som använts i examensarbetet angående robotteknik samt slipning och polering. Robottekniken är främst fokuserad på industriella och samarbetsrobotar, eftersom de är de mest relevanta för examensarbetet.

2.1 Robotteknik

Robottekniken i moderniseringen av produktions- och automationssystem har fått en stor betydelse. Robotteknikens breda användningsområden och flexibilitet har gjort tekniken mycket eftertraktad av många företag.

Ordet *robot* härstammar från det tjeckiska ordet *robota* som betyder ”slit eller slavliknande arbete”. Benämningen robot användes för första gången av Karel Capek i hans pjäs *R.U.R* (Rossum’s Univeral Robots) år 1921 (Dinwiddie, 2019).

Enligt ISO 8373:20213-standarden definieras en robot som: ”*Programmerad manövererad mekanism med en viss grad av autonomi för att utföra förflyttning, manipulation eller positionering*” och robotik som: ”*Robotik är vetenskap och praktik för att designa, tillverka och använda robotar*” (Technical Committee ISO/TC 299, 2021).

2.1.1 Användning av robotar

Det finns en mängd olika orsaker till varför robotar används i industrin. Alla arbetstyper som är beskrivna nedan kan utföras och utförs av människor, men en robot skulle klara av uppgifterna lättare, säkrare och även bättre gällande precision och resultat. Exempel på arbeten som ersätts av robotar är arbeten som är klassificerade som tråkiga, smutsiga, svåra eller farliga. Dessa arbeten förekommer ofta i kombination med varandra.

De tråkiga arbetena innebär repetitiva arbetsuppgifter som ofta kräver lite eller ingen eftertanke. Människan utför samma monotona arbetsuppgifter varje dag i flera år. Denna typ av arbetsuppgift resulterar ofta i skada för kroppen, speciellt i rygg och leder.

Smutsiga arbeten involverar processer där damm, fett, smuts, slam eller andra föroreningar förekommer som ofta resulterar i allergiska reaktioner och irritationer.

Såra arbeten innebär uppgifter som är en utmaning för människan att utföra i industriell miljö, till exempel vid förflyttning eller ihopplockning av tunga föremål. Dessa arbeten är ofta tunga och påfrestande för människokroppen.

Den sista typen är farliga arbeten. Dessa arbeten kan vara uppgifter där människan kommer i kontakt med exempelvis hetta, giftiga ångor, strålning eller något annat arbete som ger en hög risk för skador och sjukdomar.

Utöver dessa aspekter utför robotar även arbetet med precision och detta innebär att arbetsuppgifterna genomförs exakt inom givna kvalitetsriktlinjer. Eftersom alla människor är olika gällande kroppsbyggnad, syn, tankesätt och erfarenheter är det väldigt svårt för oss människor att uppnå samma resultat och med lika hög precision som en robot.

En robot är även kostnadseffektiv eftersom när roboten är färdigt konstruerad och programmerad, utför den sin arbetsuppgift om och om igen, med samma perfekta resultat (Dinwiddie, 2019).

2.1.2 Industriell robotteknik

En industrirobot är en robot anpassad för industriella miljöer och utformad för att göra saker som människor antingen inte kan, vill eller borde göra.

Dagens tillverkare behöver pålitliga, hållbara och intelligenta automationslösningar för att motverka ökad konkurrens och produktomsättning samt för att uppfylla allt hårdare konsumentkrav. Industrirobotar tillåter företagen att leverera kvalitativa produkter och tjänster tack vare industrirobotens höga precision och flexibilitet.

Enligt ISO 8373:20213-standarden definieras en industrirobot så här: ”*Industrirobot, eller robot är en automatiskt styrd, omprogrammerbar universell manipulator, som är programmerbar i minst tre axlar och som kan vara antingen fast monterad eller mobil för användning i industriell automatisering*” (Bolmsjö, 2007, s. 39).

2.2 Robotsystemets beståndsdelar

Robotar har ett brett utbud av användningsområden, design och kapacitet, men i grunden är robotar uppbyggda av en samling delsystem som utgör helheten.

I den här teoridelen kommer de mest relevanta och grundläggande delsystemen förklaras och vad deras roll för robotens funktionalitet är. Utöver dessa grundläggande delsystem används många andra delsystem vid konstruktion av mer komplexa industrirobotar.

2.2.1 Drivenhet

Oavsett robotens användningsmål, komplexitet eller funktion kräver den en energikälla för att generera rörelser i robotsystemet. Hurdan energikälla som används beror ofta på vad roboten är ämnad att göra och hurdan miljö den utsätts för. De mest använda energikällorna inom den industriella robottekniken kan indelas i tre grupper: elektriska, hydrauliska och pneumatiska drivenheter.

För varje delgrupp finns i sin tur flera varianter med olika uppbyggnader och egenskaper. Den mest använda drivenheten inom robotsystemen är den elektriska. Den elektriska drivenheten är billig att använda, har enkel och exakt styrning samt lågt underhåll (Dinwiddie, 2019).

2.2.2 Styrenhet

För att kontrollera robotens handlingar och funktioner används en styrenhet som är hjärnan för roboten och den ansvarar för att utföra specifika åtgärder i en specifik ordning under särskilda förhållanden.

Styrenheten läser in data med hjälp av sensorer och fattar beslut baserat på ett system av logiska filter och kommandon som kallas för ett program. Därefter aktiveras olika utgångar enligt programmets instruktioner (Dinwiddie, 2019).

2.2.3 Sensorer

Precis som för de allra flesta maskiner och processer som används inom industrin, har sensorer en betydande roll även för robotar för att dessa ska fungera korrekt. En sensor inom robotiken används för att mäta och känna av förändringar i omgivningen och förmedlar informationen vidare till styrenheten. De viktigaste variablerna gällande sensorer som används är positions-, hastighets-, samt kraft- och vridmomentssensorer.

Användningen av sensorer har en avgörande betydelse för en effektiv och exakt robotprocess. Sensorer används främst för att upptäcka störningar under processen och med hjälp av denna information har roboten möjlighet att styra, förändra eller stoppa processen.

Sensorer som används inom robotik delas generellt in i två grupper: interna och externa sensorer. Interna sensorer används för att få information om själva roboten och dess inre tillstånd. Typiska interna sensorer är positions-, hastighets- samt accelerationssensorer och dessa är belägna i robotens leder. Externa sensorer används istället för att läsa in information om robotens omgivning. Typiska externa sensorer är avståndsmätare och kameror (Asplund, 2011; Mihelj, o.a., 2019).

2.2.4 Programmering

Det som skiljer robotar och specialmaskiner åt är robotens programmerbarhet. Programmering görs för att kontrollera vad, när och hur en robot utför rörelser. Robotprogrammering delas in i offline- och online-programmering. Klassificeringen anger inga direkta egenskaper hos programmeringsspråket eller uppbyggnaden. Offline-programmering utförs med en extern dator medan online-programmering utförs med robotens egna inbyggda system.

De flesta olika robottillverkare använder sig av egna programmeringsspråk, detta gör det svårt för användaren att förstå sig på alla olika språk. Grunderna i robotprogrammeringen är den samma för alla men de olika syntaxerna som används kan skilja sig åt. I examensarbetet har en robot med online-programmering använts och programmeringen av robotsystemet har utförts med en programmeringskonsol.

Programmeringskonsolen fungerar som ett intuitivt användargränssnitt och används för att styra och samverka med roboten. De flesta industrirobotar använder sig av programmeringskonsoler och all programmering kan göras via den. Detta gör att programmeringen är lättare och ingen extern mjukvara behöver användas.

Programmeringskonsolen används för att utföra specifika uppgifter och även för att styra signalerna från kringutrustning som gripdon och sensorer. Programmeringskonsolen används även av säkerhetsskäl, eftersom alla konsoler utrustas med nödstopp (Dinwiddie, 2019).

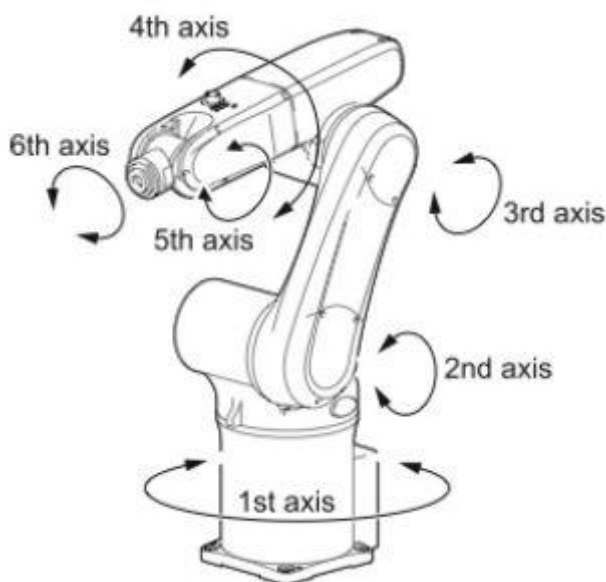
2.2.5 Manipulator

Robotens manipulator är en omprogrammerbar multifunktionell mekanisk enhet som ansvarar för att flytta material, delar, föremål eller verktyg genom programmerade rörelser för att utföra olika arbetsuppgifter. Dessa mekanismer består av en serie sammankopplade delar som bildar en armliknande manipulator.

Den allmänna strukturen för en robotmanipulator består av fasta länkar förbundna med leder. Ena änden av manipulatern är fixerad på basen och den andra änden är fri att utföra olika robotprocesser. Manipulatern är vanligtvis uppdelad i två delar: arm/kropp och handled.

Manipulatorns armar och kropp styr inte bara själva rörelsen utan även positioneringen av robotens arbetsutrustning inom robotens arbetsområde. Handleden styr däremot rörelsen av ett verktyg som är monterat på handleden.

Lederna för en industrirobot delas in i lineära och roterande. De olika lederna skiljer sig från varandra genom deras rörelsemönster. En rotationsledsrörelse sker som rotation kring koordinataxlarna medan en linjärledsrörelse sker längs koordinataxlarna (Robotics Done Right, 2022), (Bolmsjö, 2007).



Figur 1. Typisk sex-axlad robot. (Fairchild, 2022).

2.2.6 Verktyg

Verktyget är den enhet som är fäst på robotens yttre arm. Verktyget kan vara uppbyggt av leder och länkarmar och är ofta specialbyggda för vissa på förhand bestämda arbetsfunktioner.

Beroende på robotens användningsändamål och uppgift, monteras olika verktyg i änden av robotens handled för att den ska kunna utföra specifika arbetsuppgifter. De vanligaste verktygen som används av industrirobotar är gripdon, sugkoppar och svetsmunstycken. I det här examensarbetet har slip- och polermaskiner använts som verktyg (Dinwiddie, 2019).



Figur 2. Exempel på verktyg. (Robotiq, 2022).

2.2.7 Koordinatsystem

Koordinatsystemet definierar ett plan eller utrymme med axlar från en fast punkt som kallas origo. Robotens position lokaliseras genom mätningar längs koordinatsystemets axlar. För att styra och flytta robotens position anges robotens förflyttning till olika punkter i ett tredimensionellt koordinatsystem (Bolmsjö, 2007).

Robotar använder sig av flera koordinatsystem beroende på hurudan rörelse eller programmering som utförs. Nedan kommer exempel på olika koordinatsystem:

- Baskoordinatsystemet används enbart vid förflyttning av roboten från en position till en annan eftersom nollpunkten är belägen i robotens bas.
- Arbetsobjektets koordinatsystem har sin nollpunkt relaterat till arbetsobjektet. Koordinatsystemet används ofta när roboten utför arbetsuppgifter där saker plockas upp eller förflyttas.
- Verktygskoordinatsystemet definierar positionen för verktyget som roboten använder när den når de utpekade positionerna.
- Världskoordinatsystemet definierar robotcellen. Alla andra koordinatsystem är relaterade till världskoordinatsystemet. Detta koordinatsystem används ofta vid hantering av stationer och celler med flera robotar (ABB, 2022).

2.2.8 Frihetsgrader och rörelseaxlar

Robotmanipulatorer kan automatiskt flytta eller hantera föremål enligt ett givet antal frihetsgrader. Dessa frihetsgrader kallas även för axlar. Antalet axlar i robotmanipulatorn är associerade med antalet motorer i roboten. Antalet axlar varierar beroende på robot och kan vara allt från två till tio axlar. De flesta robotar som används i industriella miljöer är sex-axliga manipulatorer eftersom deras rörelseomfång liknar en mänsklig arm. Denna egenskap ger roboten flexibiliteten som behövs för att automatisera många industriella processer (Bolmsjö, 2007).

2.3 Samarbetsrobotar

Historiskt sett har robotens användning inom industrin varit att utföra specifika uppgifter som har blivit designade särskilt för roboten. Robotens arbetsprocess har inte haft någon korrelation med människans arbetsuppgifter. Roboten har utfört sina uppgifter bakom fasta och förseglade skydd som burar med känslig skyddsutrustning för att kunna förhindra människans intrång i robotens arbetsområde samt öka människans säkerhet.

Lanseringen av collaborative robots (cobot), eller kollaborativa robotar/samarbetsrobotar som används på svenska, har kommit att bryta trenden för hur industriella robotar används och samspelar med människan. Vilken robot som helst kan kallas kollaborativ med de rätta säkerhetsanordningarna i användning. En samarbetsrobot är en robot som utvecklats specifikt för att utföra arbetsuppgifter i samordning med människor inom en definierad arbetsyta.

Samarbetsrobotar är utrustade med sensorer som detekterar och undviker kollisioner och på så sätt tryggar säkerheten. För att försäkra sig om säkerheten ska särskilda arbetsområden definieras för samarbetsroboten och operatören. Inom samarbetsrobotens arbetsområde ska speciellt farten och vridmomenten begränsas. Utanför samarbetsrobotens och operatörens gemensamma arbetsområde kan samarbetsroboten manövrera utan begränsningar och således fungera som en vanlig industrirobot (Mihelj, o.a., 2019).

En av de största orsakerna till att samarbetsrobotar används är deras unika förmåga att vara programmerbara med hjälp av handstyrning. Programmeringen har alltid varit det mest tidskrävande och svåraste arbetskedet inom robotiken. Med hjälp av handstyrning går det lätt att ”lära in” programpositioner genom att förflytta robotarmen manuellt till önskat läge. Efter inläringen av önskad position klarar roboten av att replikera den exakta vägen eller positionen som blivit inlärd. Samarbetsrobotens användarvänliga programmeringsmiljö tillåter företag att lättare uppnå sina mål och förväntningar på en robot.

Integrationen av samarbetsrobotar har hjälpt tillverkare att öka produktiviteten och förbättra kvaliteten. Tack vare att samarbetsrobotarna är förmånliga och att säkerhetsfunktionerna ständigt utvecklas är dessa väldigt eftertraktade inom industrin (Universal Robots, 2022a).

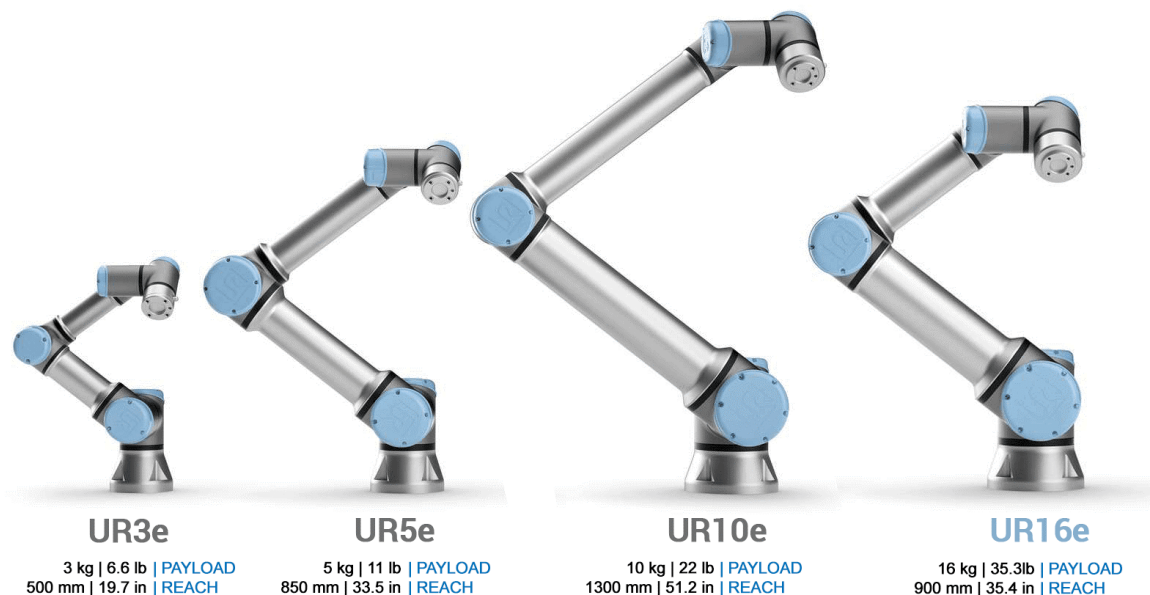
2.3.1 Universal Robots

Universal Robots (UR) är ett danskt företag som grundades år 2005 av Esben Østergaard, Kasper Støy och Kristian Kassow. Universal robots utvecklar sex-axliga industriella robotar som är säkra, flexibla och lättanvända. Företaget fokuserar på samarbetsrobotar som automatiserar och effektiviserar repetitiva industriella processer.

Universal Robots skapade sina samarbetsrobotar för att avhjälpa den traditionella industriella robotens brister, som är stora investeringar, komplicerad drift och underhåll i form av komplicerad programmering. År 2008 introducerade Universal Robots världens första kommersiellt livskraftiga samarbetsrobotarm, som skiljer sig från industriella robotar tack vare deras lilla fotavtryck, lätta vikt och användarvänlighet.

Universal Robots samarbetsrobotars förmåga att arbeta tillsammans med människan och direkt hjälpa kan betyda att produktiviteten för företaget ökar rejält. Samarbetsrobotar är främst designade för robotmontering, automatiserad dispensering, efterbehandling, maskinvård och materialhantering. Användning finns även för andra applikationer.

Universal Robots samarbetsrobotar består av deras ursprungliga UR-serie och deras nya e-serie. E-serien lanserades år 2018 och *e* står för *evolution, easy to use and empowering people*. Varje robotmodell namnges enligt den givna nyttolasten för den specifika modellen, till exempel UR10 har en lastkapacitet på 10 kg. Universal robots e-serie består av fyra olika modeller, UR3e, UR5e, UR10e, samt UR16e.



Figur 3. Universal Robots e-seriefamilj. (Universal Robots, 2021a).

UR16e, som är en av de fyra samarbetsrobotmodeller som Universal Robots erbjuder för tillfället används i detta examensarbete och är den nyaste roboten som företaget har utvecklat. UR16e har en lastkapacitet på 16 kg och en räckvidd på 900 mm. Roboten väger endast 33 kg och är ideal för applikationer som innefattar hantering av tunga material (Universal Robots, 2021a).

2.3.2 Universal Robots Academy

Universal Robots Academy (URA)-modulerna påbörjades 2016 och lanserades för att skapa interna UR-expert och utbilda arbetskraften för att behärska samarbetsrobotar. Numera erbjuder Universal Robots träningsmodulerna även till sina kunder.

Med hjälp av träningskurser, online-inläring, webinarier och videoinformationsexempel utbildar och hjälper Universal Robots sina användare att kontrollera och använda robotarna helt enligt kundernas önskemål.

Universal Robots Academys interaktiva inlärningsmodul ”e-series core track” lär ut alla viktiga begrepp, terminologi och programmeringskommandon som behövs för att driva en Universal Robots-robot. E-series core track bygger på interaktivt lärande så att användaren får tillämpa olika funktioner och programmera dessa själv (Universal Robots, 2021b).

2.4 Robotiq

Tillverkare har svårt att programmera och tillämpa robotar rätt för sina specifika ändamål, eftersom processen anses kostsam och komplicerad. Företaget Robotiq hjälper till att förenkla processen via expertishjälp och med förenklade robotapplikationer.

Robotiq erbjuder många olika manipulatorer och applikationssatser för samarbetsrobotar. Robotiqs mål är att förbättra och förenkla människans arbetsuppgifter genom att minska på repetitiva samt farliga uppgifter som människan idag utsätts för.

Robotiqs mjukvaruprogram förenklar programmeringen för en Universal Robots-robot och innehåller avancerande programmeringsfunktioner som breddar robotens arbetsmöjligheter och flexibilitet.

Informationen om Robotiq kommer från personlig kommunikation med Y. Methot (Robotiq After-Sales Support Technician) via e-post (12.9.2021).

2.5 Slipning och polering

Restaureringen av telefonskärmar utförs med en trestegsprocess där den defekta skärmen först slipas ner till en matt yta och därefter poleras med två olika poleringsplattor för att återställa ytan till sin ursprungliga glans.

Slipning- och poleringsprocessen utförs med Remint-produkter samt med slip- och polermaskin. I den här teoridelen beskrivs Remint-produktgruppen, slip- och polermaskinerna som används samt den manuella restaureringsprocessen av defekta telefonskärmar och hur den kommer att automatiseras (Mirka Remint, 2022).

Mirka Remint är slip- och polerprodukter som är specifikt utvecklade för ytbehandling av kemiskt förstärkta glas. Glaset som används i iPhonemodellerna 6 och 7 som använts inom projektet kallas också ”Gorilla Glass”. Gorillaglasets är gjort genom att man byter ut befintliga natriumjoner i glaset mot större kaliumjoner som skapar en hög tryckspänning djupt in i glaset. Denna process skapar en yta som är mer motståndskraftig mot skador från

daglig användning. Företaget som har skapat gorillaglaslet är amerikanska Corning (Corning, 2022).

Till slipningen används Abrasive Compound 10 som innehåller kiselkarbid och är det grövsta slipmedlet som Mirka erbjuder. Till poleringen används Polishing Compound H som är en högkoncentrerad poleringsmassa med ceriumoxid (Mirka Remint, 2022).



Figur 4. Remintprodukterna. (Mirka Remint, 2022).

2.5.1 Slipning

Slipningen utförs för att matta ner telefonskärmen och således jämna ut skärmens yta genom att slipa bort ojämnheter.

Slipningsdelen utförs med en slipmaskin, Mirka Airos 350C/Nv 77 mm, ett slipmedel, Abrasive Compound 10 och en slipplatta gjord av koppar. Kopparplattan används eftersom det inte finns något annat slipmaterial som i kombination med slipmedlet kan användas för att slipa kemiskt förstärkt glas. För att fästa kopparplattan i slipmaskinen används en 77 mm underlagsplatta.



Figur 5. Slipmedel och tillhörande plattor.

2.5.2 Mirka Airos

Mirka Airos är ett lätt sliphuvud (vikt från 1,1 kg och uppåt) som är kompatibelt med de flesta robotsystem och slipapplikationer inom industriella miljöer. Airos är den första smarta elektriska slipmaskinen som är utvecklad specifikt för industrirobotar. Maskinen är konstruerad för att vara lätt att integrera och för att passa olika användningsbehov. Airos är IP66-klassad och byggd för kontinuerlig automatisk användning i både torr- och våtslipning eftersom den är både damm- och vattentät.

Airos kan användas med slipskivor, nåtslippapper och flerhålsapper för att producera en konsekvent och slät yta i en automatiserad process som stöder dammfria sliplösningar.

Maskinens inbyggda intelligens möjliggör tvåvägskommunikation mellan sliphuvudet och styrsystemet. Styrsystemet kan således få detaljerad information om slipmaskinens status och möjlighet att justera parametrar och kontrollera processen.

Den borstlösa motorn och den separat monterade styrenheten möjliggör exakt konfigurerbar varvtalshantering för reproducerbar slipkvalitet, vilket håller varvtalet konstant även under hög belastning (Mirka Airos, 2022).



Figur 6. Mirka Airos monterad i samarbetsrobot. (Universal Robots & Mirka, 2022).

2.5.3 Polering

Poleringen görs för att få den nermattade slipade ytan till en glansig och ny yta. Till poleringen används Remint Polishing Compound H och två olika poleringsplattor. Poleringen delas upp i två steg. Första poleringssteget består av en mjukare steg 1-poleringsplatta och polermedel och det andra poleringssteget består av en styvare steg 2-poleringsplatta och samma polermedel. Poleringsplattorna fästs i en underlagsplatta som monteras fast i polermaskinen.



Figur 7. Polermedel och tillhörande plattor.

Som poleringsmaskin har en prototyp använts som företaget håller på att utveckla. Prototypen är en roterande polermaskin med ett avancerat elektriskt polerhuvud som är utvecklat för robotanvändning. Maskinen är utrustad med en 77 mm underlagsplatta.

2.6 Manuell restaurering av telefonskärmar

För att få en inblick i hur telefonskärmar restaureras för tillfället, det vill säga utan robotapplikation, ordnade Tomas Sjöberg, *Application Development Manager* och Ville Paussu, *Sanding Test Developer* en demonstration av processen.

Hela processen börjar med att repan eller defekten utvärderas så man vet hur mycket telefonen ska behandlas. Processen är indelad i två delar, varav den första är slippprocessen och den andra poleringsprocessen. Poleringen delas även in i två steg, för att uppnå bästa möjliga resultat. Telefonen placeras i en fast form för att hållas på plats.

Slipningen påbörjas med att Remint Abrasive Compound 10 doseras och bredds ut över telefonskärmens yta. Slipningen pågår vanligtvis i en minut och ett varvtal på 5000 används. Tiden som slipningen pågår varierar beroende på hur djup repan är, men efter en minut måste vatten och nytt slipmedel doseras eftersom medlet torkar efter en minuts användning.

Då telefonskärmen har fått en matt och slät yta är slippningsprocessen egentligen färdig. För att förenkla och försnabba poleringsprocessen kan ytterligare en slippprocess med Remint Abrasive Compound 30, som innehåller finare slipkorn användas. Denna process utförs i en

minut på samma sätt som den tidigare slipprocessen. Efter slipningen tvättas telefonen noggrant och poleringsprocessen kan påbörjas.

Poleringsprocessen kräver mera arbete och tar längre tid än slipprocessen. För poleringen används Remint Polishing Compound H och två olika poleringsplattor, en mjukare och en styvare. Polermedlet doseras på telefonskärmen varefter poleringsprocessen utförs med den mjukare poleringsplattan i ungefär fyra minuter. Polermedel doseras med en minuts mellanrum och även vattnet bör tillföras med jämna mellanrum för att kyla ner processen och för att polermedlet inte ska torka. Det är speciellt viktigt att hålla telefonen kyld eftersom polermedlet inte får överstiga 45 grader Celcius, men bör hållas runt 40 för bästa resultat.

När fyra minuter har gått byts den mjukare poleringsplattan ut mot den styvare och samma process repeteras. Efter att telefonskärmen slipats ytterligare en till två minuter och polerats i åtta minuter är skärmen restaurerad och lika felfri som en ny från fabriken (Paussu & Sjöberg, 2021).

2.7 Robotapplikation för restaurering av telefonskärmar

Mirka Ab strävar till en robotapplikation som ska utföra allt som krävs för att reparera repor på telefonskärmar. Den ska både dosera vatten och slip- och polermedel och slipa samt polera telefonskärmen.

För att avgränsa examensarbetet och förenkla processen var det några moment i robotapplikationen som utfördes för hand. Mellan slip- och poleringsprocessen tvättas telefonen noggrant och plattorna byts ut. Kopparplattorna används en per telefon och poleringsplattorna byts även ut efter några telefoner.

Automatiseringen av processen skulle leda till en snabbare process, bättre resultat och en kostnadseffektivare lösning. Eftersom roboten kan hålla högre och samma konstanta tryck och utföra exakt samma slip- och polermönster varje gång är tanken att helt kunna lämna bort det finare slipmedlet Remint Abrasive Compound 30, som används i den manuella processen för att förenkla poleringsprocessen. Detta skulle minimera sliptiden som krävs och underlätta hela processen (Paussu & Sjöberg, 2021).

3 Utförande

Det praktiska arbetet påbörjades med en diskussion med handledaren om hur målet ska uppnås och med vilka medel. En stor del av utförandet gick ut på testning för att hitta de optimala parametervärdena. Kapitlet behandlar utförandet av projektet och består av val av metod och doseringssystem, skolning, utrustning, styrning av maskinerna samt programmering. Delar av programmeringen kommer att förekomma som kodexempel i detta kapitel.

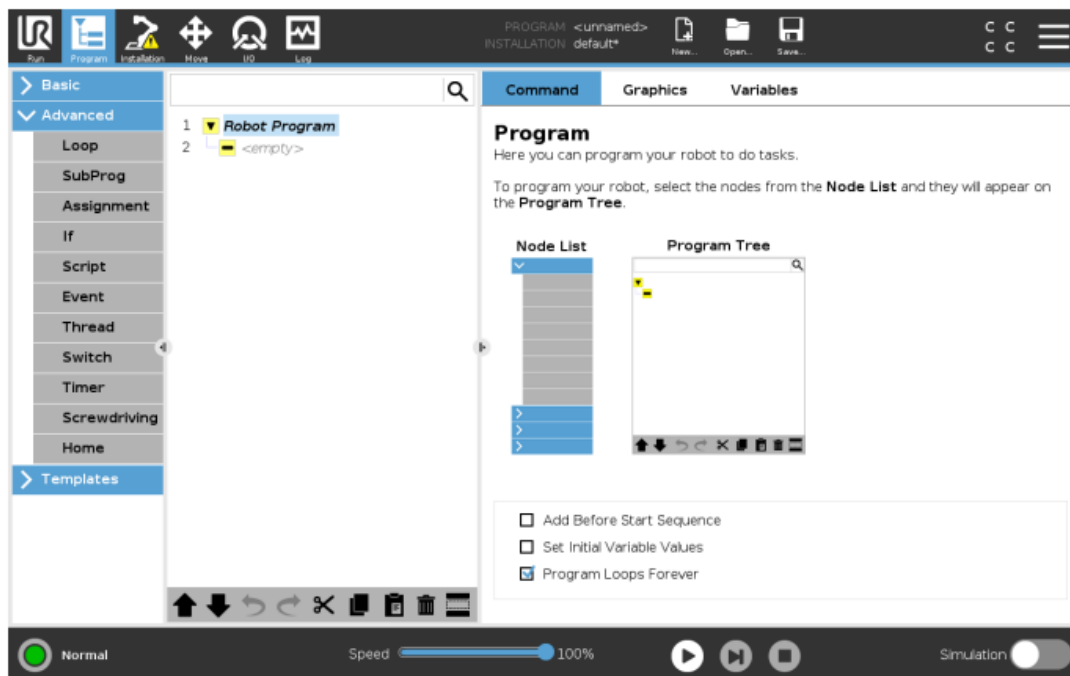
3.1 Programmering

Programmeringen av applikationen har utförts med Universal Robots interaktiva 12” programmeringskonsol. Universal Robots programmeringsmiljö heter PolyScope och baserar sig på ett grafiskt användargränssnitt som styr robotarmen och kontrollboxen, samt skapar och utför robotprogram. Normala funktioner som rörelsekommandon, variabler, logiska funktioner samt skapande av nya koordinatsystem finns att tillgå och ifall mer avancerade lösningar önskas finns även skriptspråket URscript tillgängligt (Universal Robots, 2022c).



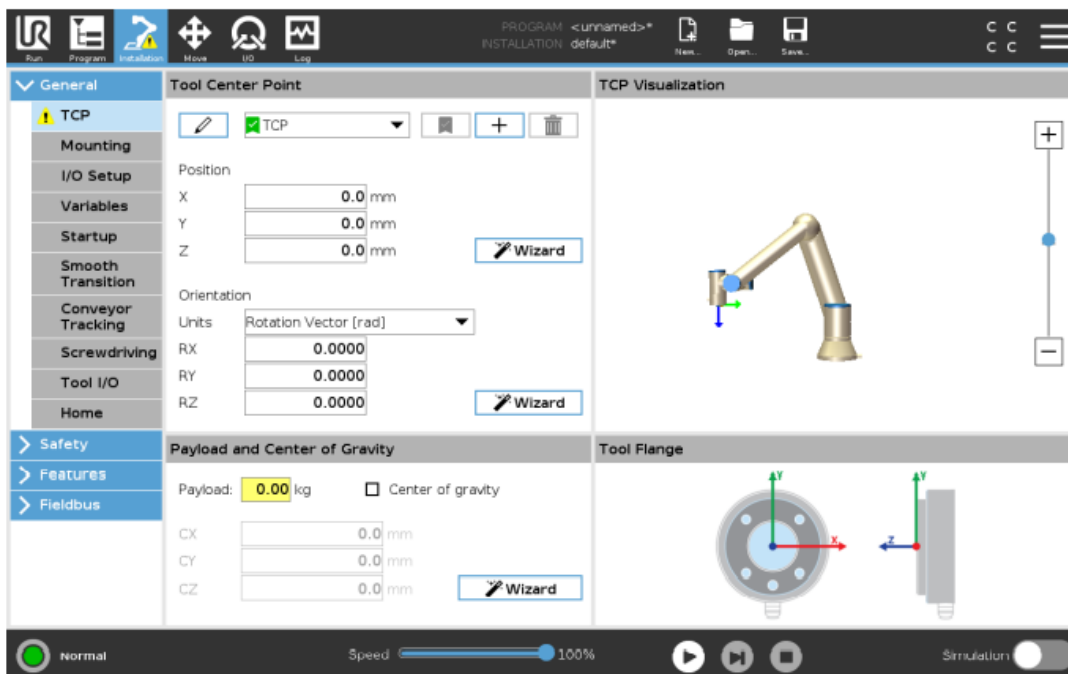
Figur 8. Universal Robots programmeringskonsol. (Universal Robots, 2022b).

Universal Robots programmeringsmiljö läser och kör programmet i stegvis ordning och körs uppifrån och ner. Programmet byggs upp i sektionen ”Program” och programmeringskoden placeras i ”Program Tree”. Funktionerna som används hittas i ”Node List” där man kan välja vanliga grundläggande funktioner som att förflytta roboten, och mera avancerade funktioner som användning av skriptspråket Urscript och loopfunktioner (Universal Robots, 2022c).



Figur 9. Programmeringsmiljö.

Innan programmeringen kan påbörjas krävs en del inställningar. En Tool Center Point (TCP) är en punkt på robotens verktyg. Robotapplikationen använder sig av två olika verktyg och kräver därför separata TCP. För att roboten ska fungera korrekt måste även vikten på nyttolasten anges och tyngdpunkten definieras. Alla dessa inställningar görs enkelt med hjälp av färdiggjorda inställningsverktyg och mäts med hjälp av ”Wizard”-funktionerna som visas i bilden.



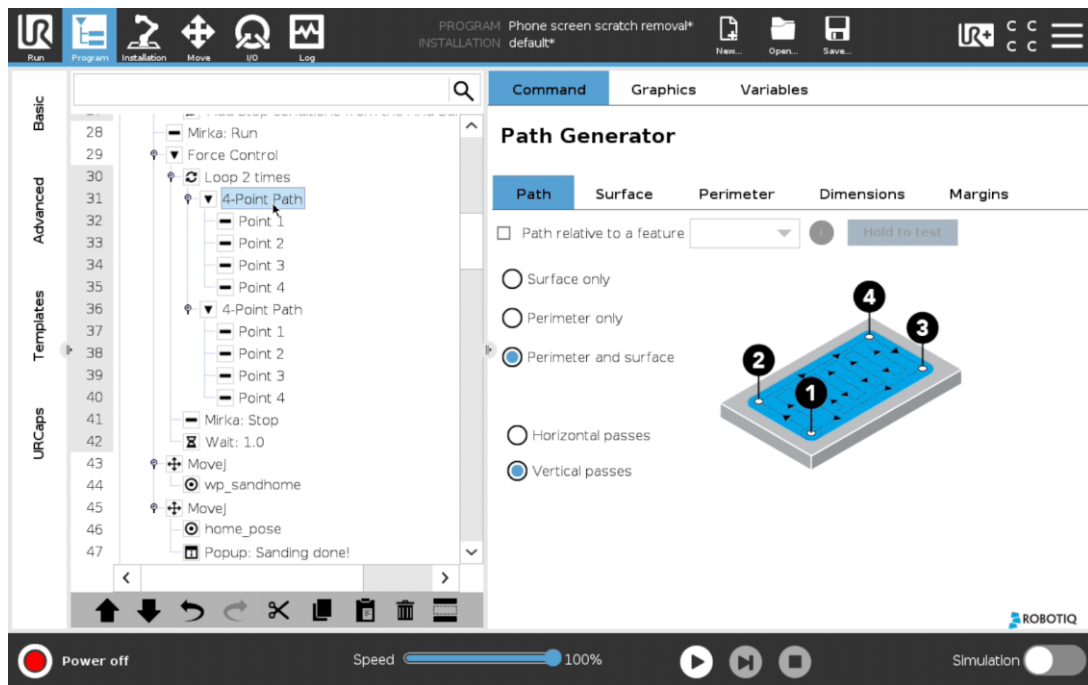
Figur 10. Inställning av TCP, payload och tyngdpunkt i programmeringsmiljön.

3.2 Val av metod

En telefonskärm är väldigt känslig för ojämnheter, därför är det viktigt med ett så exakt slip- och polermönster som möjligt. När skärmen slipas och poleras bör ytan få en jämn distribution av arbetstid. Detta var svårt att möjliggöra och det fanns idéer om externa program som ritade ut det optimala mönstret för slip- och poleringsprocessen. För att examensarbetet skulle hållas inom rimliga gränser valdes detta bort och mönstren testades fram under testperiodens lopp.

Slipprocessen innefattar dosering av slipmedel och slipning av telefonskärmen. Slipprocessen är klar på en minut. Poleringsprocessen innefattar dosering av polermedel och vatten, samt polering av den slipade telefonskärmen i två steg. Dosering av polermedel sker med en minuts mellanrum och dosering av vatten med 20 sekunders mellanrum. Vattnet används i poleringsprocessen för att kyla ner arbetsobjektet och för att poleringsmedlet inte ska torka. Poleringen omfattar fem minuter polering med en mjuk poleringsplatta påföljt av polering med styvare poleringsplatta i ytterligare fem minuter.

De största faktorerna som spelar en stor roll för ett bra resultat är mönster, tid, hastighet, samt tryck. Dessa ska även samspela med doseringen av slip- och polermedlen. Mönstren som använts baserar sig på funktionen path generator som har fördelaktiga egenskaper för ändamålet. Genom att använda sig av kombinationer av vertikala och horisontella passeringar uppnås det ideala slip- och polermönstret.



Kodexempel 1. Generering av mönster.

3.3 Val av doseringssystem

Företaget hade redan utvecklat ett doseringssystem och jag testade funktionaliteten av systemet. Doseringssystemet baserar sig på ett tryckluftssystem som använder sig av magnetreglerventiler som doserar ut slip- och polermedel i lämplig mängd och styrs med digitala utgångar i robotens drivenhet.

Doseringssystemet använder sig av olika tryckbehållare för att lagra slip- och polermedlen som sedan transporteras via 10 mm grova plastslangar till reglerventilen. Trycket som används beror på medlet som ska användas och önskad mängd medel. Doseringssystemet har även ett vattensystem som dels krävs för poleringsprocessen och dels för att rensa och tvätta ur slangarna.



Figur 11. Doseringsystemets framsida.



Figur 12. Doseringsystemets baksida.

Examensarbetet inleddes med att testa företagets prototyp för doseringssystem för att kontrollera om doseringssystemet lämpade sig för ändamålet. I detta skede av projektet var användningsmålet inte inriktat på telefonskärmar och det var inte bestämt vad som skulle slipas och poleras med roboten. Därför testades doseringssystemet först med andra medel än de medel som sedan användes i projektet. Medlen som först testades var Polarshineprodukterna och Remintprodukterna som slutligen användes testades sedan i jämförelse med Polarshineprodukterna.

Alla slip- och polermedel har olika viskositet och jag började med att testa olika parametrar för olika medel. Ju lägre viskositet medlet har, desto tunnare är medlet. Om medlet har låg viskositet behövs mindre tryck än för ett medel med högre viskositet. Andra faktorer som är av betydelse är tiden samt längden på själva slangen.

Ett första test gjordes med Polarshine poleringsmedel för att se om medlens viskositet har en korrelation med mängden som doseras. Parametrarna som användes hölls konstanta oberoende av vilka polermedel som testades. Dessa parametrar var:

Tabell 1. Tabell med använda parametrar.

| Munstycke (mm) | Slang (m) | Tryck (bar) | tid (s) |
|----------------|-----------|-------------|---------|
| 3 | 2,4 | 2,5 | 1 |

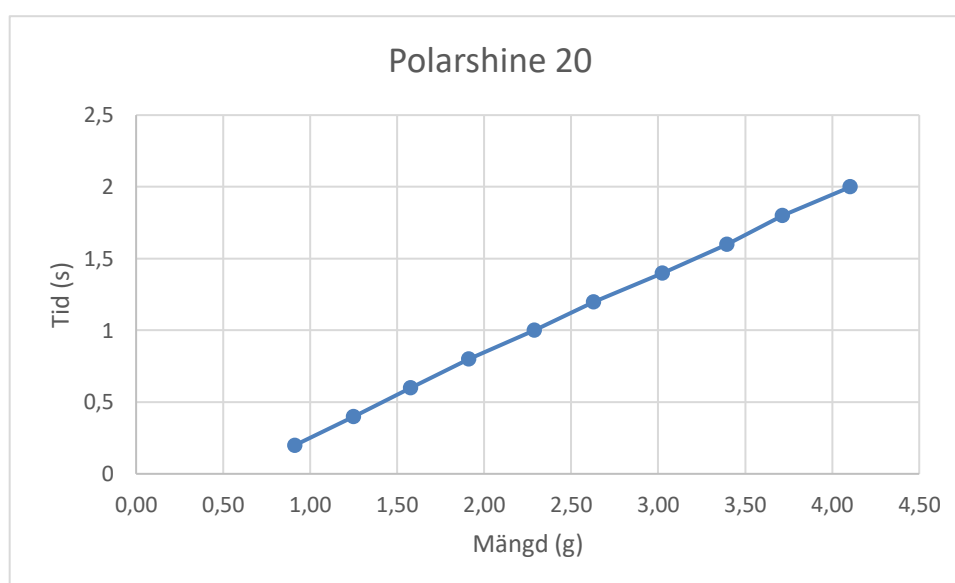
Med dessa parametrar gjordes samma test för de olika Polarshinemedlen och testet gick ut på att dosera polermedlet vid 9 olika punkter och detta gjordes i två omgångar, för att kontrollera repeterbarheten. Resultatet visas i tabellen nedan

Tabell 2. Tabell med resultat från doseringstest.

| Polarshine | Viskositet (Börvärde) | Medeltal (g) |
|------------|-----------------------|--------------|
| 5 | 950 | 0,55 |
| 8 | 1150 | 2,25 |
| 10 | 1250 | 1,83 |
| 12 | 1250 | 1,55 |
| 15 | 1550 | 1,78 |
| 20 | 1200 | 1,83 |
| 35 | 1650 | 3,65 |

Tabellen visar ett visst samband mellan viskositeten och doseringsmängden. De olika polermedlen har olika innehåll och sammansättning som kan ha betydelse för polermedlets massavikt och påverkar slutresultatet.

Efter att korrelationstestet för viskositet/mängd hade gjorts utfördes ett test för att kontrollera om doseringsmängden är linjär mot tiden. Detta gjordes genom att öka doseringstiden från 0.2 till 2 s. med en ökning på 0.2 s. per gång. Vid alla doseringstider doserades medlet ut vid tre olika punkter. Nedan ses resultatet av Polarshine 20s linearitetstest.



Figur 13. Diagram över linearitetstest.

Resultatet var att doseringsmängden i förhållande till tid är linjärt.

Efter att polermedlen konstaterats ha ett samband med viskositet och mängd och samtidigt vara linjära mot tiden, testades Remintprodukterna i liknande test. Remintprodukterna testades endast för att kontrollera att de fungerade på samma sätt som Polarshineprodukterna.

Remintprodukternas låga viskositet gjorde att dessa medel behövde klart mindre tryck och tid. När detta test gjordes ändrades parametrarna för att se om en ungefärligt samma doseringsmängd kunde uppnås med de rätta inställningarna. Trycket valdes till 1 bar och tiden varierade beroende på medel. Doseringsmängden som eftersträvades var 2.5 g.

Tabell 3. Tabell med resultat från test med Remintprodukterna.

| Remintmedel | Tryck(bar) | Tid (s) | Mängd (g) | Viskositet |
|----------------------|------------|---------|-----------|------------|
| Polishing Compound H | 1 | 0,2 | 2,5 | 340 |
| Abrasive Compound 10 | 1 | 0,7 | 2,47 | 670 |
| Abrasive Compound 30 | 1 | 2,5 | 2,45 | 370 |

3.4 Skolning

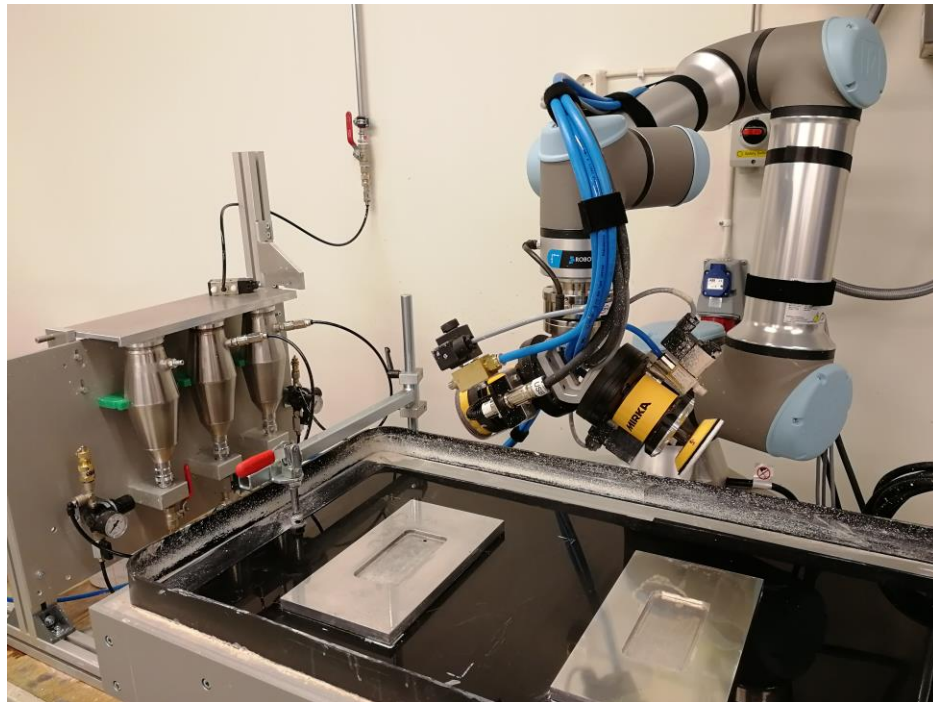
Innan det praktiska utförandet påbörjades deltog jag i och utförde Universal Robots Academys program för online-träning för att få en förståelse för Universal Robots samarbetsrobots grundprinciper och funktioner. Det var särskilt viktigt att förstå säkerhetsprinciperna för roboten, eftersom roboten arbetar i nära anslutning till operatören. Skolning inom den manuella restaureringen av telefonskärmar anordnades av Paussu och Sjöberg (se kap. 2.7). Introduktion till mätinstrumentet NanoFocus gavs av Stefan Lindvall, *Product Validation Manager*.

3.5 Utrustning

Utrustningen som användes för projektet bestod av följande komponenter:

- UR16e (samarbetsrobot)
- Doseringssystemet
- ATI trycksensor

- Underlagsplatta för både slip- och polermaskin
- Fastsättningsformer för telefonen
- Mirka Airos 350CV 77 mm
- Remint Abrasive Compound 10
- Slipplatta av koppar
- Mirkas poleringsmaskinsprototyp
- Remint Polishing Compound H
- Mjuk och styv poleringsplatta



Figur 14. Hela robotsystemet exklusive drivenhet och kontrollbox.

3.6 Mätinstrument

Mätinstrumenten som använts i projektet användes för att kontrollera och bestämma olika parametrar, som tryck och varvtalshastighet. Även temperaturen har övervakats. Resultatet av processen har kontrollerats med NanoFocus mätverktyg.

3.6.1 Testo 476

Testo 476 stroboskop är en varvtalsmätare som används för att mäta rotations- och vibrationsrörelser med hög noggrannhet. Stroboskopet har använts för att kontrollera att varvtalet som använts för maskinerna verkligen stämde (Testo, 2022).



Figur 15. Testo 476 stroboskop. (Testo, 2022).

3.6.2 Airos Modbus Controller

Airos Modbus Controller är en mjukvara som utvecklats för att kontrollera och styra signalerna från en Mirka Airos med modbuskommunikation. Verktöget går även att tillämpa på de andra maskinmodellerna och har använts för att kontrollera maskinernas temperatur så att den inte når för höga temperaturvärden.

3.6.3 ATI trycksensor

ATI Axia80 F/T sensor är en kraft- och vridmomentssensor som använts för att styra och kontrollera trycket som samarbetsroboten använder. Sensorn är tillgänglig i tre olika modeller och beror på det maximala vridmomentet som kan användas: M8, M20 och M50. Modellen M20 har använts i examensarbetet och har en maximal vridmomentkapacitet på 20 Nm. Universal Robots har en intern kraft- och vridmomentssensor i alla robotmodeller

men för att få mera noggranna mätningar och bättre kontrollerbarhet används en extern sensor (ATI, 2022).



Figur 16. ATI F/T sensor monterad i Universal Robots samarbetsrobot. (ATI, 2022).

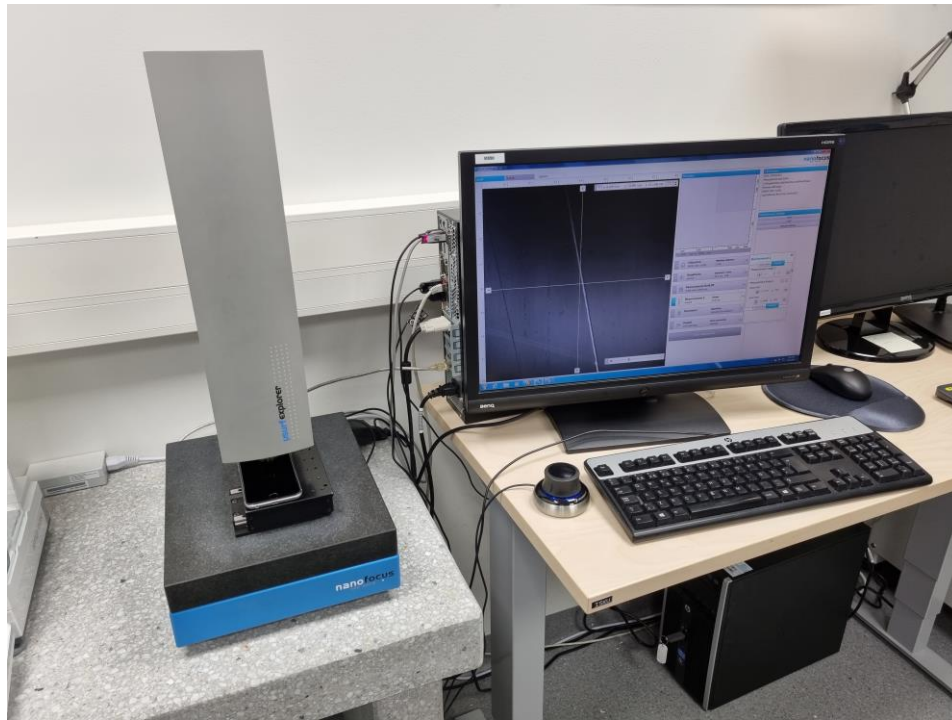
3.6.4 NanoFocus

Resultatet har utvärderats med hjälp av mätningar med konfokalt mikroskop från NanoFocus AG. Företaget utvecklar, tillverkar och distribuerar mätteknik och mjukvarupaket för karakterisering av tekniska ytor. Företaget är tyskt och har funnits på marknaden sedan 1994. Med hjälp av NanoFocus mätteknik möjliggörs snabba, enkla och beröringsfria 3D-mätningar av topografi, mikrogeometri, grovhet eller andra ytegenskaper. NanoFocus mätinstrument μ Surf har använts i examensarbetet för att bestämma repornas storlek på telefonskärmen och för att utvärdera resultatet av restaureringsprocessen. Orsaken till varför detta mätinstrument valdes är för att det baserar sig på kontaktlös mätning av ytan. Mätinstrument som använder sig av mätning med en spets lämpar sig inte för denna typ av mätningar eftersom spetsen inte ryms ner i repan och kan dessutom skada ytan ännu mera.

NanoFocus μ Surf-mätprincipen är baserad på CMP (Confocal-Multi-Pinhole)-tekniken och är speciellt designad för kvalitetskontroll av tekniska ytor och fungerar som ett helt oberoende 3D-videomätningssystem.

Systemet består av ett kompakt konfokalt mät huvud som monteras på ett stabilt stativ och är motordrivet i vertikal riktning (z-axeln). Testobjekten placeras på ett datorstyrt precisionsglas som rör sig i x- och y-axeln. Det konfokala mät huvudet flyttas stegvis neråt i z-axeln och

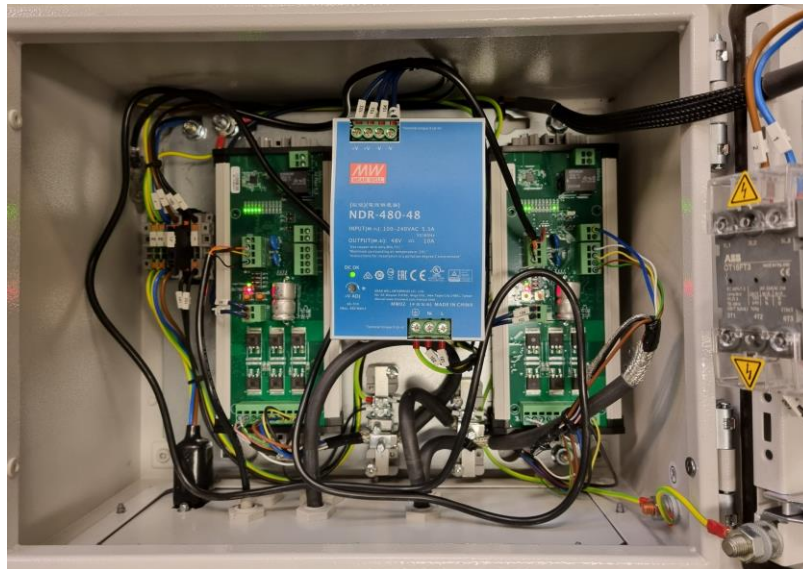
utför den kontaktlösa optiska mätningen av ytstrukturen. Resultatet av topografin kan analyseras och presenteras med hjälp av NanoFocus olika analyseringsverktyg (NanoFocus AG, 2022; Lindvall, 2022).



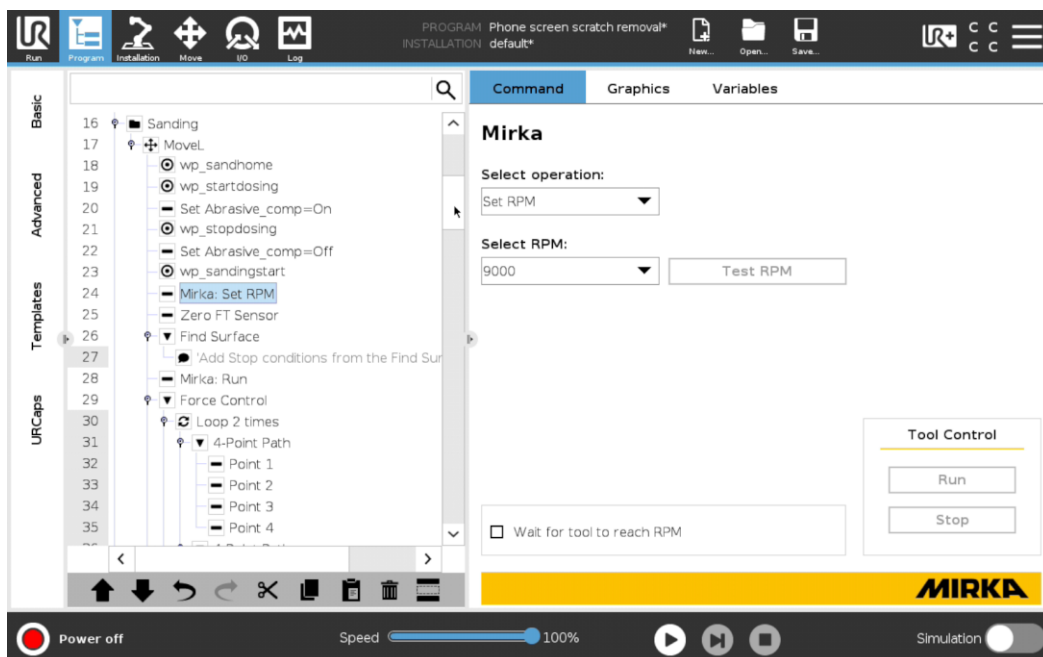
Figur 17. NanoFocus mätinstrument.

3.7 Styrning av slip- och polermaskin

Modbus RTU med RS-485-kommunikation används för att kommunicera mellan Universal Robots kontrollbox och motorns drivenhet. Kommunikationen underlättar styrningen och övervakningen av maskinen som används och användaren kan lätt ändra på viktiga parametrar som exempelvis rotationshastighet. Denna kommunikationstyp är för tillfället endast tillgänglig för en maskin per kontrollbox och eftersom restaureringsprocessen kräver två separata maskiner styrs slipmaskinen med Modbus RTU/ RS-485 och poleringsmaskinen med digitala utgångar.

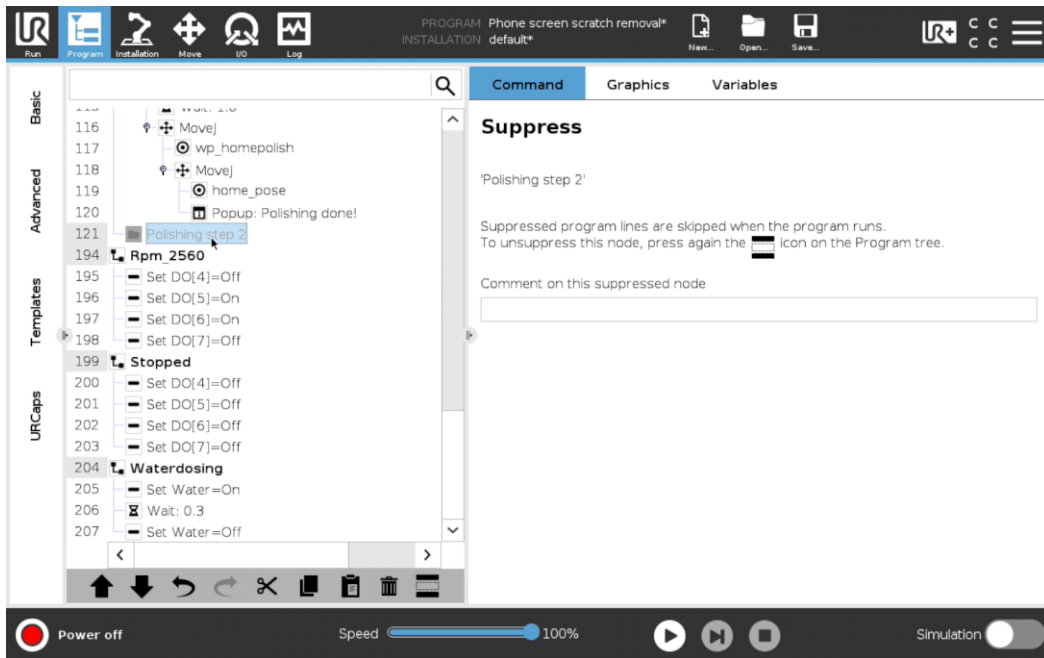


Figur 18. Slip- och polermaskinernas drivenheter.

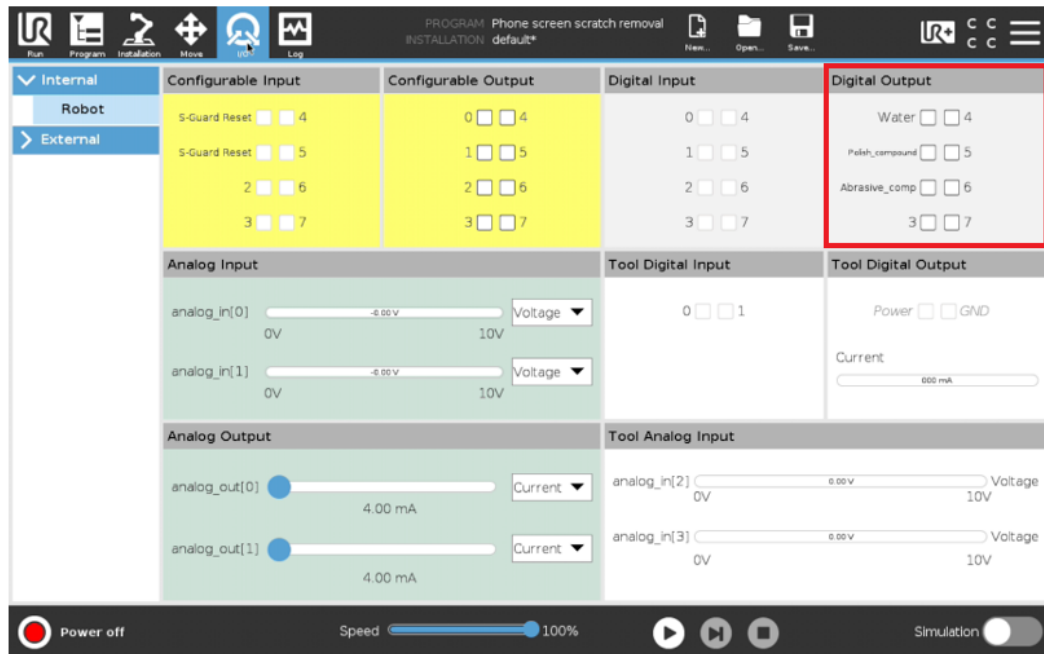


Kodexempel 2. Konfigurering av rotationshastighet för Mirka Airos.

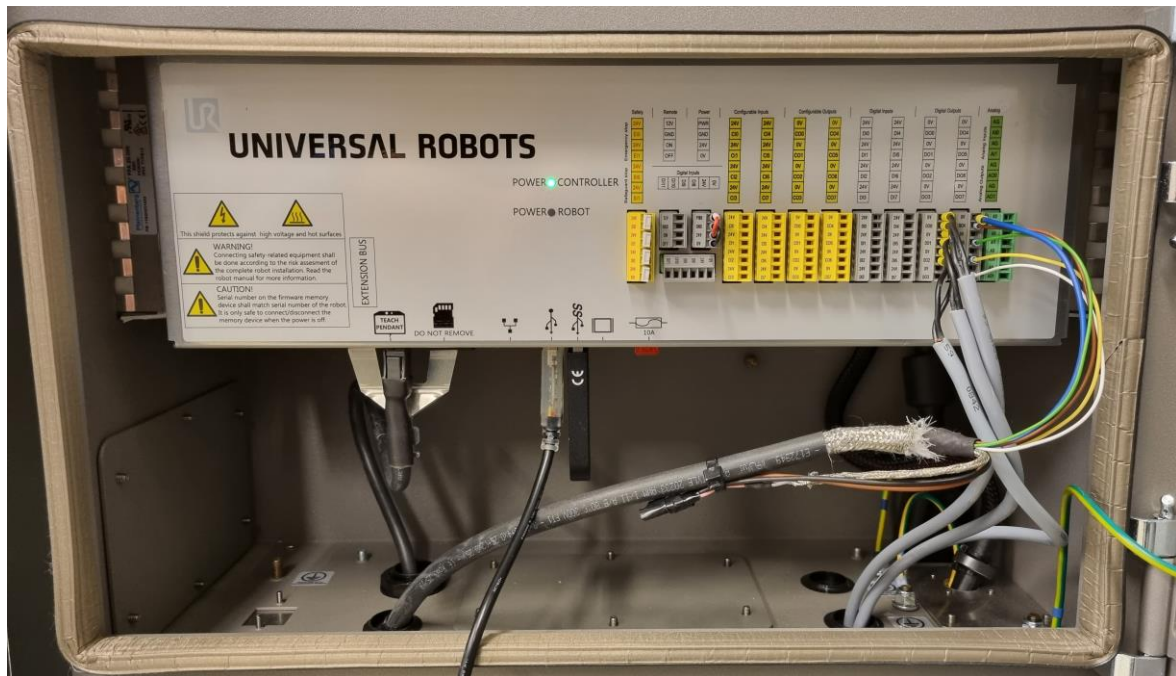
Universal Robots UR16e-modell är utrustad med 16 digitala in- och utgångar samt två analoga in- och utgångar för ihopkoppling av externa enheter. Poleringsmaskinen styrs med hjälp av fyra av robotens digitala utgångar. Styrningen av rotationshastigheten görs genom olika kombinationer av de fyra digitala utgångarna. Utöver styrningen av polermaskinen så styrs även all dosering med digitala utgångar.



Kodexempel 3. Exempel på styrning av rotationshastighet med digitala utgångar.



Kodexempel 4. Digitala in- och utgångar.



Figur 19. Inkopplingen av digitala utgångar i robotens kontrollbox.

4 Resultat

Resultatet av projektet är en fungerande robotapplikation som slipar och polerar bort oönskade defekter från en telefonskärm. Robotapplikationen uppfyller delvis examensarbetets mål. En del av examensarbetets mål: att hitta de optimala parametervärdena för robotapplikationen, kan ännu förbättras genom användningen av ett externt program som ritat ut de optimala slip- och polermönstren och detta diskuteras mera i vidareutvecklingen. Ifall man bortser från möjligheten att optimera slip- och polermönstren har projektet varit mycket givande och gett ett bra resultat. Examensarbetets syfte: att kontrollera om restaureringsprocessen är möjlig och lönsam att göra visade ett lovande resultat. Tack vare ett lyckat resultat kan expanderingsprocessen till flera telefonmodeller och elektroniskärmar överlag göras genom att implementera och modifiera den befintliga robotapplikationen.

Under projektets gång testades om det gick att använda sig av den styvare poleringsplattan för att undgå bytet av plattor. I teorin är det möjligt att endast använda en platta men i praktiken krävs ett allt högre tryck och längre poleringstid. Det höga trycket gör att värmen överskrider temperaturnivån och telefonen kan skadas. Ifall ett optimalt slip- och polermönster skulle användas kunde processen möjligtvis gå att utföra med endast en poleringsplatta.

Projektet har även fungerat som ett utvärderingstest av företagets prototyp för poleringsmaskin. Detaljer och ändringar som behöver ses över innan produkten kan lanseras har konstaterats.

4.1 Processen

Resultatet av restaureringsprocessen är en robotapplikation där en defekt telefonskärm slipas ner tills defekten försvinner och sedan poleras upp med två poleringssteg för att uppnå en ny perfekt yta. Robotprocessen motsvarar resultatet från en telefonskärm som är manuellt behandlad med maskin och kan således ersätta människans arbetsinsats.

I figuren nedan sammanfattas robotprocessen och de fyra olika stegen telefonskärmen går igenom visas. Den första bilden är en defekt telefonskärm som behöver restaureras. Den andra bilden är resultatet efter slipningsprocessen, en matt och jämn yta uppstår. På den tredje bilden är telefonskärmen polerad med steg 1, där den mattade ytan har försvunnit men ett ojämnt ytskikt fortfarande finns kvar. Den sista bilden är resultatet av hela processen och telefonskärmen är motsvarande en ny. Telefonskärmen har genomgått en 11 minuter lång restaureringsprocess och kan nu återanvändas.

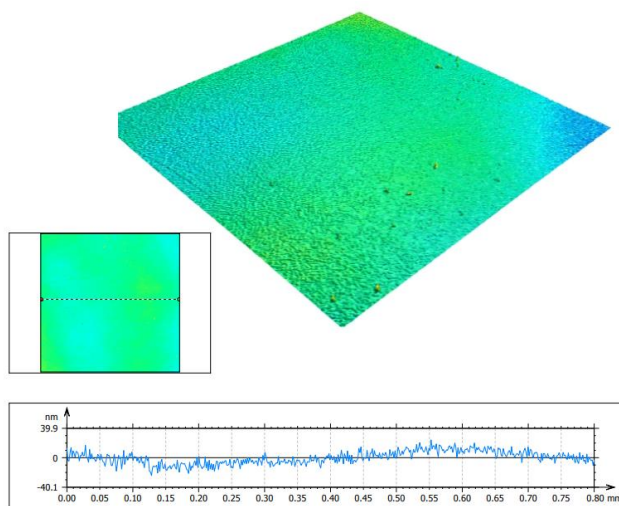


Figur 20. Telefonskärmens restaureringsprocess.

4.2 Mätresultat

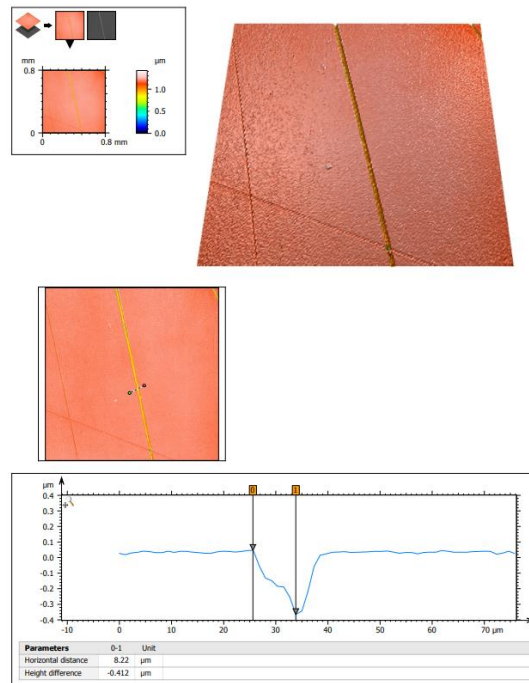
Mätningar med NanoFocus mätinstrument gjordes för att kontrollera resultatet från restaureringsprocessen. Mätytan på telefonskärmen är endast 1,6 mm². Som referens har en ny iPhone-telefon använts där baksidan har blivit analyserad direkt efter leverans från fabriken. Vid kontroll av processen har en telefonskärm med en större repa mätts. Efter restaurering av repa på telefonskärmen har den analyserats igen. Parametrar som kontrollerats är Sa, som är aritmetisk medelhöjd och Sv, som är det maximala uppmätta djupet. Båda parametrarna baserar sig på hela mätytan. I övrigt bör telefonskärmens yta vara jämn, rak, och inga synliga repor vid okulär besiktning ska finnas. Telefonskärmen bör ha ett Sa-värde mindre än 20 nm för att konstateras bra. De små prickarna som kan synas i NanoFocus-bilderna är dammkorn eller andra orenheter.

Den nya telefonen har en jämn yta och ett Sa-värde på 8,33 nm och ett Sv-värde på 146 nm. Bilaga 1 visar analysen av den nya iPhone-telefonskärmens jämna yta. Se bilaga 1.



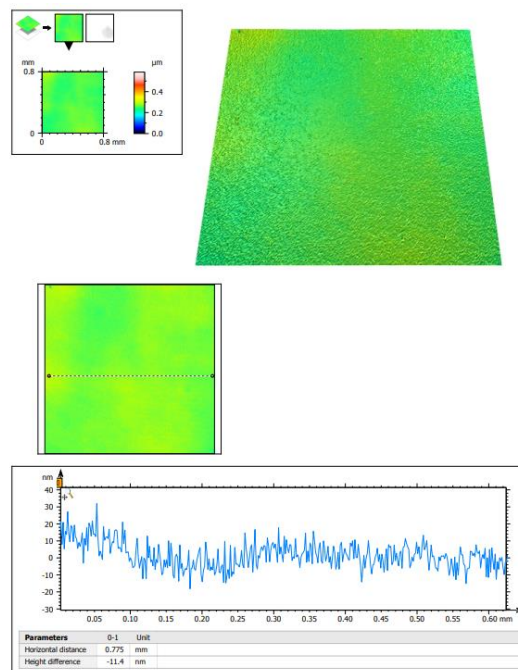
Figur 21. NanoFocus-bild av ny telefonskärm.

Vid analys av repa har även parametern höjddifferens kontrollerats, vilket är djuphöjden av repa. Repa som analyserats har en djuphöjd på 412 nm och telefonskärmen har ett Sa-värde på 15,1 nm och ett Sv-värde på 1190 nm. I bilaga 2 visas en bild med analys av en repa i telefonskärmen. Se bilaga 2.



Figur 22. NanoFocus-bild av repa i telefonskärm.

Efter restaurering av telefonskärmen har repnan försvunnit och skärmen har fått en ny och jämn yta. Den restaurerade ytan har ett Sa-värde på 7,37 nm och ett Sv-värde på 267 nm. Bilden i bilaga 3 visar analysen av den restaurerade telefonskärmen. Se bilaga 3.



Figur 23. NanoFocus-bild av restaurerad telefonskärm.

4.3 Vidareutveckling

Delmålet med examensarbetet var att utvärdera det befintliga systemet och dess komponenter. Det befintliga systemet har fungerat för projektet med en del underhåll och korrigeringar, men för ett komplett system som inte används i testmiljö behöver systemet ännu modifieras.

Doseringsystemet är inte idealt och kan förbättras. Medlen som används inom restaurering av elektronikskärmar är svåra att dosera eftersom de innehåller slitande innehåll som nöter upp de flesta alternativ för doseringsventiler. Magnetreglerventilerna som använts inom projektet klarar av jobbet men är inte helt ideala, detta eftersom medlet stelnar inne i ventilen. Magnetreglerventilen ska öppna upp ventilen och dosera vid hög signal och stänga ventilen och sluta dosera vid låg signal. Eftersom medlet stelnar inne i ventilen reagerar ventilen inte tillräckligt snabbt på signalerna. Detta betyder att ventilen förblir hög även om den ska vara låg och fortsätter dosera medel.

För att få ett perfekt resultat vid restaureringsprocessen behöver mönstret för slip- och polering vara precist. Företaget har tidigare använt liknande program som baserar sig på programkod som ritar ut optimala slipmönster för andra arbetsobjekt. Programmet kan modifieras med hjälp av redan befintlig programkod och således skapa ett optimalt slip- och polermönster för restaureringsprocessen av telefonskärmar eller andra elektronikskärmar.

Mera omfattande analysmätningar med NanoFocus mätinstrumentet kunde ha utförts och kan förbättras i framtida fortsättning av projektet.

5 Diskussion

Före examensarbetets början hade jag aldrig arbetat med robotteknik. Då jag reflekterar över detta examensarbete kan jag konstatera att jag lärt mig mycket om robotteknikens grunder samt om slipning och polering med robot. Några kommentarer gällande Universal Robots är att deras samarbetsrobotar är väldigt användarvänliga och mycket information och hjälp på vägen kan fås från deras hemsida.

I början av processen var slutmålet aningen oklart och idén om restaurering av telefonskärmar uppkom i mitten av projektet när doseringssystemet hade blivit utvärderat. Det var viktigt för företaget att få doseringssystemet testat och utvärderat eftersom oavsett användningsområde för robotpoleringen kommer dosering av poler- samt slipmedel behövas.

En av utmaningarna som uppstod under projektets gång var som omnämnt i vidareutvecklingen: doseringssystemet. Doseringssystemet kommer i framtiden att modifieras för att förbättra doseringen av de olika medlen. En annan utmaning som uppstod var att hitta ett optimalt slip- och polermönster. Eftersom examensarbetet avgränsade externa program för optimering av mönstren så har processen genomförts ett flertal gånger och många timmar har lagts ner på testning och förbättring för att hitta bra mönster.

Jag vill tacka Mirka Ab och speciellt min handledare Tomas Sjöberg för möjligheten att utföra mitt examensarbete i form av detta projekt. Jag vill även tacka Joachim Böling, som fungerat som handledare från Novias sida och medarbetarna på Mirkas produktutveckling som hjälpt till och stöttat mig genom hela projektet.

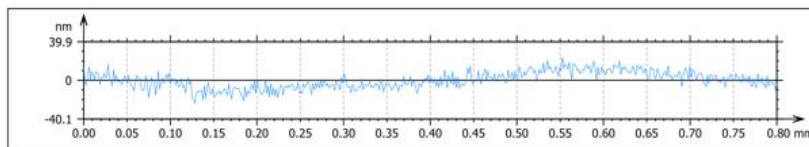
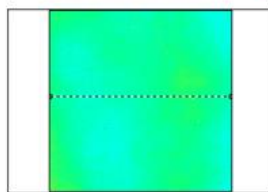
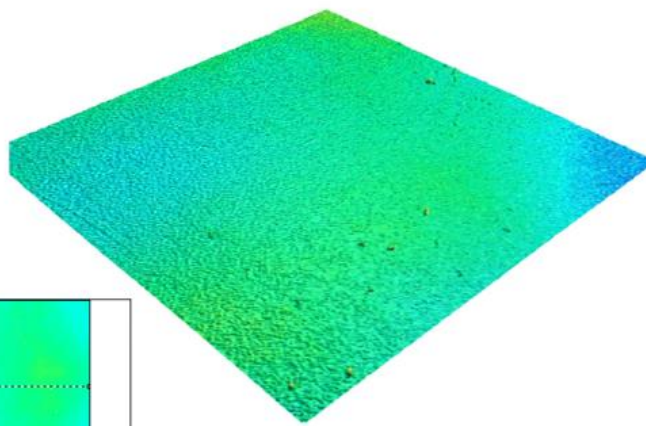
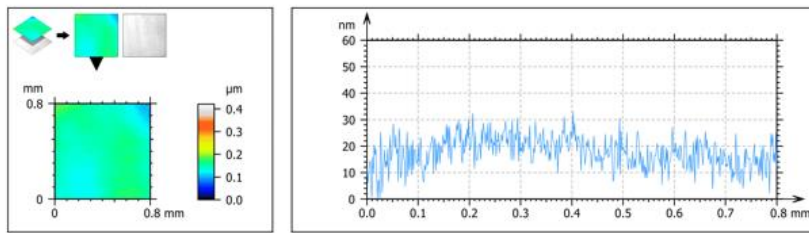
6 Källförteckning

- ABB. (den 3 1 2022). *Robotics Operatörshandbok IRC5 med FlexPendant*. Hämtat från ABB Robotics:
<https://abb.sluzba.cz/Pages/Public/IRC5RoboticsDocumentationRW6/Controllers/IRC5/FlexPendant/sv/3HAC050941-002.pdf>
- Asplund, L. (2011). *Robotik*. Stockholm: Liber.
- ATI. (den 3 1 2022). *ATI Develops New Low-Cost Force/Torque Sensor*. Hämtat från ATI Industrial Automation: <https://www.atia.com/Company/NewsArticle2.aspx?id=1169833375>
- Bolmsjö, G. S. (2007). *Industriell Robotteknik (3:2 uppl.)*. Lund: Studentlitteratur.
- Corning. (den 7 3 2022). *Corning gorilla glass*. Hämtat från <https://www.corning.com/gorillaglass/worldwide/en.html>
- Dinwiddie, K. (2019). *Industrial Robotics first edition*. Boston: Cengage Learning Inc.
- Fairchild, M. (den 4 1 2022). *How do you decide which type of industrial robot is the right fit?* Hämtat från howtorobot: <https://www.howtorobot.com/expert-insight/industrial-robot-types-and-their-different-uses>
- Lindvall, S. (den 14 3 2022). NanoFocus.
- Mihelj, M., Tadej, B., Ales, U., Jadran, L., Ales, S., Marko, M., . . . Sebastian, S. (2019). *Robotics (2nd uppl.)*. Ljubljana: Springer.
- Mirka. (den 13 9 2021). Hämtat från Om företaget: <https://www.mirka.com/sv/fi/top/About-us/>
- Mirka Airos. (den 3 1 2022). *Mirka® AIROS The perfect robotic sanding solution*. Hämtat från Mirka Airos: <https://www.mirka.com/airos/>
- Mirka Remint. (den 3 1 2022). *Remove scratches from phones with Mirka® Remint*. Hämtat från Mirka: <https://www.mirka.com/remint/>
- NanoFocus AG. (den 15 3 2022). Hämtat från <https://m.nanofocus.de/en/>:
https://www.nanofocus.com/fileadmin/user_upload/Download-Dokumente/Broschueren_Flyer_E/NanoFocus_Technologybrochure_E_100412_web.pdf
- Paussu, V., & Sjöberg, T. (den 3 12 2021). Demonstration av telefonskärms restaurering. Jeppo.
- Robotics Done Right. (den 3 1 2022). *What is a Robotic Manipulator?* Hämtat från robotsdoneright: <https://robotsdoneright.com/Articles/what-is-a-robotic-manipulator.html>
- Robotiq. (den 3 1 2022). *Robotiq products*. Hämtat från Robotiq: <https://robotiq.com/products>
- Technical Committee ISO/TC 299, R. (2021). ISO 8373:2021, 3rd edition.

- Testo. (den 3 1 2022). *Testo*. Hämtat från Testo 476: <https://www.testo.com/en-ID/testo-476/p/0563-4760>
- Universal Robots. (den 13 9 2021a). *About Universal Robots*. Hämtat från Universal Robots: <https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/>
- Universal Robots. (den 13 9 2021b). Hämtat från Universal Robots Academy: <https://www.universal-robots.com/academy/>
- Universal Robots. (den 3 1 2022a). *SÅ VÄLJER DU MELLAN EN KOLLABORATIV ROBOT OCH EN TRADITIONELL INDUSTRIROBOT*. Hämtat från Universal Robots: <https://www.universal-robots.com/se/blog/saa-vaeljer-du-mellan-en-kollaborativ-robot-och-en-traditionell-industrirobot/>
- Universal Robots. (den 3 1 2022b). *Teach pendant*. Hämtat från 3PE TEACH PENDANT FOR E-SERIES: <https://www.universal-robots.com/plus/products/universal-robots/3pe-teach-pendant-for-e-series/>
- Universal Robots. (den 3 1 2022c). *Universal Robots e-Series User Manual*. Hämtat från <https://www.universal-robots.com/download/manuals-e-series/user/ur10e/59/user-manual-ur10e-e-series-sw-59-english-international-en/>
- Universal Robots, & Mirka. (den 3 1 2022). *Mirka® AIROS*. Hämtat från Universal Robots + Products: <https://www.universal-robots.com/plus/products/mirka/mirka-airos/>

Bilaga 1. NanoFocus-analys av ny telefonskärm.

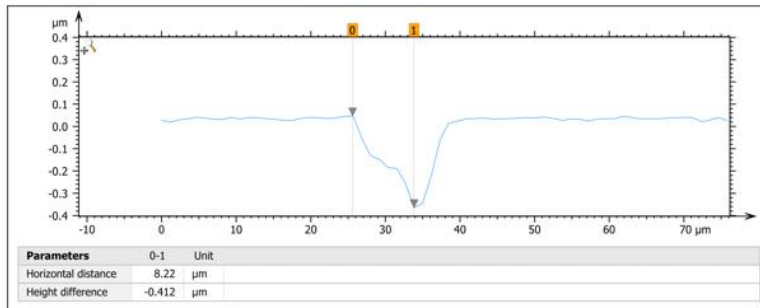
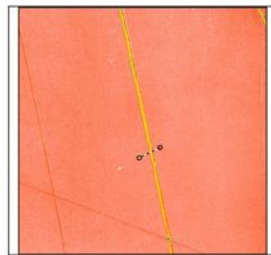
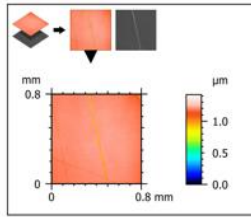
| User information | |
|------------------|----------------------------|
| Document name | Iphone backside as new.mnt |
| Creation date | 2/28/2019 |



| ISO 25178 | | | |
|--|--------|---------------------|--|
| Height Parameters | | | |
| Sq | 10.4 | nm | Root-mean-square height |
| Ssk | 0.137 | | Skewness |
| Sku | 6.02 | | Kurtosis |
| Sp | 254 | nm | Maximum peak height |
| Sv | 146 | nm | Maximum pit height |
| Sz | 400 | nm | Maximum height |
| Sa | 8.33 | nm | Arithmetic mean height |
| Functional Parameters (Stratified surfaces) | | | |
| Sk | 13.2 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Core roughness depth |
| Spk | 5.41 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Reduced summit height |
| Skv | 7.33 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Reduced valley depth |
| Smr1 | 10.0 | % | Gaussian filter, 0.25 mm Upper bearing area |
| Smr2 | 89.3 | % | Gaussian filter, 0.25 mm Lower bearing area |
| Sq | ***** | | Gaussian filter, 0.25 mm Plateau root-mean-square roughness |
| ISO 4287 | | | |
| Amplitude parameters - Roughness profile | | | |
| Ra | 4.03 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Arithmetic Mean Deviation of the roughness profile. |
| Rz | 27.8 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Maximum Height of roughness profile. |
| Rt | 31.2 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Total Height of roughness profile. |
| Material Ratio parameters - Roughness profile | | | |
| Rmr | 100 | % | c = 1000 nm under the highest peak, Gaussian filter, 0.25 mm. Relative Material Ratio of the roughness profile. |
| Rdc | 8.38 | nm | p = 20%, q = 80%, Gaussian filter, 0.25 mm Roughness profile Section Height difference |
| Rmr (Rz/4) | 7.39 | % | Gaussian filter, 0.25 mm Automatic Relative Material Ratio of the roughness profil. |
| ISO 13565 | | | |
| ISO 13565-2 | | | |
| Rk | 11.8 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Kernel Roughness Depth. |
| Rpk | 4.66 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Reduced Peak Height. |
| Rvk | 3.52 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Reduced Valley Depth. |
| Mr1 | 12.7 | % | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Upper Material Ratio. |
| Mr2 | 89.2 | % | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Lower Material Ratio. |
| A1 | 295288 | nm ² /mm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Upper Area. |
| A2 | 190308 | nm ² /mm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Lower Area. |
| Rpk* | 7.47 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Peak Height. |
| Rvk* | 5.59 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Valley Depth. |

Bilaga 2. NanoFocus-analys av repad telefonskärm.

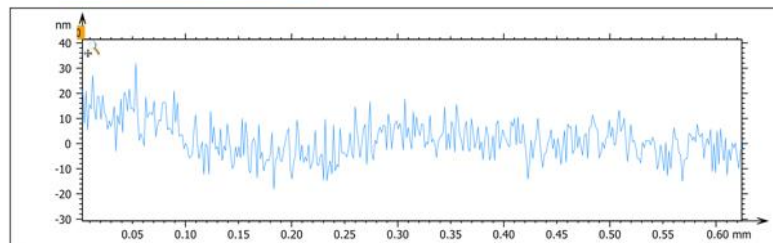
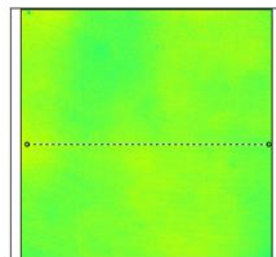
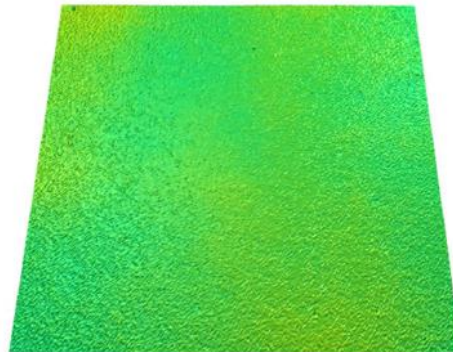
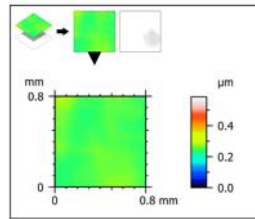
| User information | |
|------------------|---------------------|
| Document name | Slutarbete Repa.mnt |
| Creation date | 3/15/2022 |



| ISO 25178 | | | |
|---|--------|---------------------|--|
| Height Parameters | | | |
| Sq | 0.0382 | µm | Root-mean-square height |
| Ssk | -8.76 | | Skewness |
| Sku | 109 | | Kurtosis |
| Sp | 0.234 | µm | Maximum peak height |
| Sv | 1.19 | µm | Maximum pit height |
| Sz | 1.42 | µm | Maximum height |
| Sa | 0.0151 | µm | Arithmetic mean height |
| Functional Parameters (Stratified surfaces) | | | |
| Sk | 0.0338 | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Core roughness depth |
| Spk | 0.0158 | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Reduced summit height |
| Svk | 0.0967 | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Reduced valley depth |
| Smr1 | 11.0 | % | Gaussian filter, 0.25 mm Upper bearing area |
| Smr2 | 89.3 | % | Gaussian filter, 0.25 mm Lower bearing area |
| Spq | ***** | | Gaussian filter, 0.25 mm Plateau root-mean-square roughness |
| ISO 4287 | | | |
| Amplitude parameters - Roughness profile | | | |
| Ra | ***** | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Arithmetic Mean Deviation of the roughness profile. |
| Rz | ***** | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Maximum Height of roughness profile. |
| Rt | ***** | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Total Height of roughness profile. |
| Material Ratio parameters - Roughness profile | | | |
| Rmr | ***** | % | c = 1 µm under the highest peak, Gaussian filter, 0.25 mm Relative Material Ratio of the roughness profile. |
| Rdc | ***** | µm | p = 20%, q = 80%, Gaussian filter, 0.25 mm Roughness profile Section Height difference |
| Rmr (Rz/4) | ***** | % | Gaussian filter, 0.25 mm Automatic Relative Material Ratio of the roughness profile. |
| ISO 13565 | | | |
| ISO 13565-2 | | | |
| Rk | ***** | µm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Kernel Roughness Depth. |
| Rpk | ***** | µm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Reduced Peak Height. |
| Rvk | ***** | µm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Reduced Valley Depth. |
| Mr1 | ***** | % | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Upper Material Ratio. |
| Mr2 | ***** | % | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Lower Material Ratio. |
| A1 | ***** | µm ² /µm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Upper Area. |
| A2 | ***** | µm ² /µm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Lower Area. |
| Rpk* | ***** | µm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Peak Height. |
| Rvk* | ***** | µm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Valley Depth. |

Bilaga 3. NanoFocus-analys av restaurerad telefonskärm.

| User information | |
|------------------|--------------------|
| Document name | Slutarbete Bra.mnt |
| Creation date | 3/15/2022 |



| Parameters | 0-1 | Unit |
|---------------------|-------|------|
| Horizontal distance | 0.775 | mm |
| Height difference | -11.4 | nm |

| ISO 25178 | | | |
|---|----------|---------------------|---|
| Height Parameters | | | |
| Sq | 0.00941 | µm | Root-mean-square height |
| Ssk | -0.00684 | | Skewness |
| Sku | 16.7 | | Kurtosis |
| Sp | 0.319 | µm | Maximum peak height |
| Sv | 0.267 | µm | Maximum pit height |
| Sz | 0.586 | µm | Maximum height |
| Sa | 0.00737 | µm | Arithmetic mean height |
| Functional Parameters (Stratified surfaces) | | | |
| Sk | 0.0159 | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Core roughness depth |
| Spk | 0.00575 | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Reduced summit height |
| SVk | 0.00705 | µm | Gaussian filter, 0.25 mm Reduced valley depth |
| Smr1 | 9.56 | % | Gaussian filter, 0.25 mm Upper bearing area |
| Smr2 | 90.0 | % | Gaussian filter, 0.25 mm Lower bearing area |
| Spq | ***** | | Gaussian filter, 0.25 mm Plateau root-mean-square roughness |
| ISO 4287 | | | |
| Amplitude parameters - Roughness profile | | | |
| Ra | 4.86 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Arithmetic Mean Deviation of the roughness profile. |
| Rz | 29.9 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Maximum Height of roughness profile. |
| Rt | 31.5 | nm | Gaussian filter, 0.25 mm Total Height of roughness profile. |
| Material Ratio parameters - Roughness profile | | | |
| Rmr | 100 | % | c = 1000 nm under the highest peak, Gaussian filter, 0.25. Relative Material Ratio of the roughness profile. |
| Rdc | 10.7 | nm | p = 20%, q = 80%, Gaussian filter, 0.25 mm Roughness profile Section Height difference |
| Rmr (Rz/4) | 10.2 | % | Gaussian filter, 0.25 mm Automatic Relative Material Ratio of the roughness prof.. |
| ISO 13565 | | | |
| ISO 13565-2 | | | |
| Rk | 15.9 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Kernel Roughness Depth. |
| Rpk | 5.98 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Reduced Peak Height. |
| Rvk | 3.36 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Reduced Valley Depth. |
| Mr1 | 8.66 | % | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Upper Material Ratio. |
| Mr2 | 93.9 | % | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Lower Material Ratio. |
| A1 | 25884 | nm ² /mm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Upper Area. |
| A2 | 103166 | nm ² /mm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Lower Area. |
| Rpk* | 7.42 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Peak Height. |
| Rvk* | 7.82 | nm | Double-Gaussian filter, 0.25 mm Valley Depth. |