



CHALMERS



GÖTEBORGS UNIVERSITET



Integration av avståndsgivare i system för storskalig additiv tillverkning

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet i Mekatronik

Johannes Dixon

INSTITUTIONEN FÖR DATA OCH INFORMATIONSTEKNIK

11 juni 2024

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA & GÖTEBORGS UNIVERSITET

Göteborg, Sverige 2024

www.chalmers.se

www.gu.se

Förord

Tack till mina RISE handledare Jan Johansson och Woodrow Wiest. Tack till min akademiska handledare Pr. Pedro Petersen Moura Trancoso. Tack till Thomas Bruse, Samuel Johansson och Johan Åkerman på RISE för omfattande stöd. Tack till Anders Spaak på ABB och Richard Edvardsson på Micro-Epsilon för viktig hjälp och information. Tack också till RISE AM-Center och VGR som gjort detta arbete möjligt. Tack till min familj. Tack till min examinator Pr. Lars Svensson.

Sammanfattning

Hos Research Institutes of Sweden (RISE) finns en av Europas största 3D-skrivare som kan skriva ut en kajak i ett stycke. Den använder mycket hårdvara och mjukvara från ABB.

Den fungerar så att en sträng av plast kommer ut ur en extruder och appliceras på en arbetsyta lager för lager tills en 3D-modell växer fram. Extrudern sitter på en robotarm från ABB som flyttar den i en förprogrammerad bana.

När så stora 3D-modeller printas kan nya sorters problem uppstå. Stora volymer av plast expanderar mycket mer av värme än små volymer. Även bottenplattan expanderas av värme och krymper ihop igen när plasten stelnar, men på ett oregelbundet sätt. Hur arbetsytans ojämnheter ser ut förändras lite efter varje print.

Extrudern flyttar sig som om arbetsytan var helt jämn men det är den alltså inte. Därför kan första lagret av plast bli olika tjockt på olika punkter på arbetsytan och därför fästa sämre på vissa punkter än andra. Om 3D-modellen inte fäster ordentligt kan den vika upp sig på kanterna och misslyckas. Därför behövs ofta flera försök per print. Då måste stora mängder av plast kasseras eller återvinnas vilket inte är hållbart.

För att lösa detta problem har en sensor kopplats till 3D-skrivarens kontrollenhet. Denna sensor mäter hur mycket högre eller lägre bottenytan är jämfört med dess ursprungliga höjd. Sedan används dessa värden för att skapa en 3D-bild av hur bottenytan verkligen ser ut. Denna bild används av ett program från ABB för att flytta extrudern upp och ner så att den följer ojämnheter i bottenytan. Då blir första lagret av plast jämntjockt och det behövs färre försök per print vilket är mer hållbart i miljöhänseende.

I praktiken följer inte extrudern bottenytans ojämnheter exakt utan det finns en avvikelse på någon millimeter, men det är ändå en tydlig förbättring av 3D-skrivarens konstruktion.

Innehållsförteckning

Förord	i
Sammanfattning	ii
Innehållsförteckning	iii
Ordlista	iv
1 Introduktion	1
2 Bakgrund.....	2
3 Syfte och mål.....	4
3.1. Frågeställning.....	4
3.2. Avgränsningar	5
4 Metod	6
4.1. Fysisk anslutning av sensorn till IF2030.....	7
4.2. Mjukvaruinställningar för etablering av kommunikation.....	8
4.3. Inställning av hur robotarmen flyttar sensorn	9
4.4. Konfiguration av mjukvara och verifiering av resultat.....	9
5 Genomförande.....	10
5.1. Fysisk anslutning av sensorn till ABB:s kontrollenhet	10
5.2. Anslutning av sensor till laptop via USB konverterare	11
5.3. Praktiska utmaningar.....	12
5.4. Konfiguration av sensorn och IF2030 i Robotstudio.....	13
5.5. Praktiska steg i inställning av TCP	13
5.6. Inställningar för praktisk användning av sensorn	14
6 Resultat	15
6.1. Resultaterande anslutning av sensorn till kontrollenheten.....	15
6.2. Resultaterande inställning av TCP	16
6.3. Utvärdering av sensors förmåga att mäta ytans höjd.....	16
6.4. Resultaterande 3D modeller vid användning av sensors mätning.....	18
6.5. Analys av småfel i RISE-utskriftens kvalitet	19
7 Diskussion om möjliga framtida förbättringar	22
8 Slutsats.....	24
9 Referenser	25

Ordlista

Ord	Definition
3D	Tredimensionell
3DP	3D-Printing Power-Pack, tillägg till Robotstudio.
ABB IRC5	ABB Industrial Robot Controller 5
Additiv Tillverkning	Tillverkning med 3D-skrivare.
ASCII	8-bit koder för amerikanska alfabetet, många siffror och vissa specialtecken.
CAD	Computer Aided Design, Program i dator för att göra ritningar, ofta 3D ritningar.
Extruderer	Rör som pressar ut en sträng av smält plast eller betong på en yta och applicerar strängen lager för lager tills en 3D-modell har växt fram.
GDSML-fil	En fil med standardinställningar för Profinet-moduler som skickas från kontrollenhet till modul.
G-kod	Instruktioner för 3D-skrivare om hur den ska printa 3D-modeller lager för lager.
IF2030	Enhet för konvertering från RS422 till Profinet, kort för Micro-Epsilon IF2030.
IRBAM	Industrial Robot-Based Additive Manufacturing
Kontrollenheten	Syftar i denna rapport på ABB IRC5.
PLC	Programmable logical Controller, alltså programmerbar logisk kontrollenhet.
Profinet	Ett protokoll för att skicka digitala signaler via nätverkskablar. Alltså ettor och nollor i en ordning mottagaren förstår.
RAPID	Programmeringsspråk från ABB för styrning av deras robotar.
RJ45	Standard-kontakt på nätverkskablar.
Robotstudio	Program för styrning av ABB IRC5 och liknande kontrollenheter.
RS422	Ett seriellt protokoll för att skicka digitala signaler, alltså ettor och nollor, i en ordning som mottagaren förstår.
Sensorn	Syftar på sensorn Micro-Epsilon OptoNCDT ILD 1420 – 500.
TCP	Tool Centre Point eller Mittpunkt på verktyg. Information för robotarmar om var ett verktyg det ska kunna flytta på befinner sig.
Ytan	Syftar på ytan som 3D-modeller printas på.

1 Introduktion

Vid Research Institutes of Sweden (RISE) finns en av Europas största 3D skrivare för plastmaterial, kallad IRBAM. Den har till exempel använts för att skriva ut en hel kajak i ett stycke i samarbete med företag [1]. Det stora automationsföretaget Asea Brown Boveri (ABB) har försett RISE med många av delarna till deras 3D skrivare. Mjukvaran har utvecklats i samarbete mellan ABB och RISE.

Plast smälts vid additiv tillverkning och kommer ut som en sträng ur en extruder [2]. Sedan appliceras denna sträng av plast på en arbetsyta, i detta fall flera kvadratmeter stor. Ovanpå detta första lager av plast appliceras fler och fler lager av plast tills en tredimensionell modell har tagit form [3, s. 2]. Hos RISE sitter extrudern på en ABB robotarm och beroende på hur den rör sig uppstår olika 3D-modeller [4]. Detta möjliggör att plast kan appliceras från olika håll på en väldigt stor arbetsyta vilket är tämligen unikt.

När så stora 3D modeller printas medför det nya sorters problem som inte finns på samma sätt vid print av små modeller. Plast utvidgas när den är varm och drar ihop sig när den stelnar efteråt. Vid stora volymer är skillnaden så pass stor att modellen kan få sprickor eller vika sig om RISE inte tar hänsyn till detta fenomen [4].

Även den största delen av bottenplattan består av plast för att plasten från extrudern ska kunna fästa ordentligt [4]. När stora mängder av smält plast appliceras på ytan kan ytan utvidga sig mellan skruvarna som fäster ytan i golvet. Det krymper så klart igen när ytan svalnar, men på ett oregelbundet sätt. Därför blir ytan snart ojämn och ojämnheter varierar också mellan varje print [4]. Även den delen av arbetsytan som är av metall kan bli något ojämn av samma anledning, men metall är mindre känslig för värme än plast.

Att ytan är ojämn är ett problem för att det första lagret av plast inte fäster ordentligt när extrudern alltid applicerar plast vid samma höjd trots att ytans höjd varierar [4]. Då trycks en del plast nästan ner i plattan medan det ibland blir för tunt för att första lagret ska bli plant. Det leder i sin tur till vikningar, att modellen viks upp där plasten inte riktigt fäster eller är för tunn [4].

Detta leder fram till syftet med detta examensarbete: en avståndssensor som sitter på robotarmen ska anslutas till robotarmens kontrollenhet [4]. Denna sensor ska mäta hur höjden på bottenplattan avviker från den ideala höjden. Dessa värden ska skickas till en mjukvara från ABB som ska se till att extrudern rör sig upp och ner när den applicerar första lagret av plast så att det blir plant och inga vikningar uppstår [4]. Då minskar risken att utskriften misslyckas så att stora mängder plast måste återvinnas eller kasseras [4]. Det är inte hållbart att slänga stora mängder av plast.

2 Bakgrund

På RISE avdelning för additiv tillverkning finns en av Sveriges största 3D-skrivare för plastmaterial som exempelvis har använts till att skriva ut en kajak i ett stycke [1]. Ytan som modeller printas på är två meter bred och sex meter lång.

Denna 3D skrivare använder sig av en robotarm från ABB som det sitter en extruder på. En extruder är ett smalt rör som pressar ut en sträng med delvis smält plast [2]. Robotarmen och extrudern styrs av en kontrollenhet från ABB som heter ABB Industrial Robot Controller 5 (IRC5) [5].

Extrudern på robotarmen applicerar plast lager för lager så att ett tredimensionellt objekt växer fram [3, s.2]. Varje lager av plast tillåts delvis stelna innan nästa lager appliceras så att det undre lagret blir bärande. Lagren behöver inte vara exakt ovanför varandra utan kan sticka ut lite från föregående lager, och ingen bärande struktur behövs [4].

Robotarmen behövs för att plasten ska appliceras på rätt plats utifrån en CAD ritning. CAD står för Computer Aided Design på engelska. CAD-program används för att göra ritningar för industrin, i detta fall tredimensionella ritningar.

CAD ritningen omvandlas till G-kod vilket är samma tredimensionella bild fast uppdelad i tunna lager som representerar plast som en 3D skrivare kan applicera på bottenplattan [6]. ABB och RISE har tagit fram en kod i språket RAPID som gör att robotarmen automatiskt flyttar extrudern på ett sådant sätt att plast appliceras på rätt plats [4]. RAPID är ett programmeringsspråk som ABB lanserade för att kontrollera sina robotar [7].

En stor del av den bottenplatta som den tredimensionella modellen printas på är också av plast för att många modeller bara kan fästa på plast utan att glida omkring under processen [4]. Om den gled omkring vore risken stor att plast appliceras på fel punkter eller rentav i luften. När smält plast appliceras på denna yta leder det till att ytan fläckvis buktar utåt på grund av värmen [4].

Efter ett tag svalnar den applicerade plasten, vilket får bottenplattan att dra ihop sig igen. Problemet är att ytan utvidgas och drar ihop sig olika mycket vid olika punkter på grund av temperaturskillnader och ojämnheter i molekylstrukturen i bottenplattans material [4]. Detta leder till ojämnheter i ytan som gör att modellerna inte alltid fäster ordentligt så att det kan bli vikning, revor och veck längst ned i det första lagret [4]. Bland annat på grund av detta är det vanligt att tre eller fyra försök måste göras innan en modell av god kvalitet har printats med 3D-skrivaren [4].

Robotarmen och enheten för extrudering är ansluten till kontrollenheten via nätverkssladdar med fältbussprotokollet Profinet [4]. Profinet är ett fältbussprotokoll framtaget av Siemens för att överföra data via nätverkskablar i fabriker [8]. Profinet använder sig av industriella nätverkskablar med vanliga RJ45 kontakter eller industriella nätverkskontakter. Fördelen med att använda nätverkskablar (för vanliga RJ45 uttag) är att de sänder digitala signaler. RJ45 är den vanligaste kontakten för anslutning av

nätverkskablar. Digitala signaler överför mycket mindre brus än analoga signaler [9]. Problemet med brus är att det ger en avvikelse mellan mätvärdena som sensorn faktiskt mäter upp och mätvärdena som kommer fram till kontrollenheten. Hos RISE är avståndet mellan robotarmen och kontrollenheten för långt för att använda sig av analoga signaler [4].

För att förstå syftet med detta examensarbete är det viktigt att känna till vad en triangulationssensor är. Det är en typ av sensor som skickar ut en laserstråle som reflekteras mot en yta [10]. En del av reflektionen träffar en lins i sensorn. Med hjälp av trigonometri går det då att beräkna avståndet till objektet som reflekterar laserstrålen. Avståndet mellan linsen och laserpekaren används i beräkningen. Vissa triangulationssensorer skickar data via RS422. Det är ett seriellt nätverksprotokoll som skickar digitala data, alltså logisk etta eller logisk nolla, enligt ett definierat mönster som mottagaren vet hur den ska tolka [11]. Detta nätverksprotokoll kan konverteras till Profinet med hjälp av särskild hårdvara.

För att styra robotarmen och extrudern används programmet ABB Robotstudio med ett särskilt tillägg framtaget av ABB och RISE. Detta tillägg heter 3D Printing Power Pack (3DP) och behövs för att använda ABB robotarmar för additiv tillverkning [12].

3 Syfte och mål

För att lösa problemet med ojämnheter i ytan har RISE föreslagit en lösning. Att verkställa den lösningen är målet för detta examensarbete. En rörelsesensor ska sättas på 3D-skrivaren som mäter höjdskillnader i ytan, skickar denna data till 3D-skrivarens kontrollenhet som använder den för att justera utskriften av första plastlagret på varje 3D-modell. Första lagret av modellen kan då följa ojämnheterna i ytan så att det inte uppstår sprickor eller revor i modellen. Om det första lagret av plast är av hög kvalitet blir hela modellen av högre kvalitet och färre försök behövs per utskrift. Detta blir mer hållbart i miljöhänseende.

Det finns några kriterier från RISE om hur ovanstående mål ska uppnås:

1. Sensorn som ska användas är Micro Epsilon optoNCDT ILD 1420 – 500 [13]. Den ska monteras så att det går att byta mellan fräs och extruder utan att montera av sensorn. Det ska räcka med en sensor som flyttas av robotarmen.
2. Sensorns mätvärden ska skickas via Profinet till kontrollenheten för att analoga signaler ger för mycket brus över långa avstånd. Sensorns RS422 signaler ska konverteras till Profinet med hjälp av en modul som heter Micro-Epsilon IF2030 [14].

3.1. Frågeställning

Det finns en fråga som behöver besvaras för att det ska gå att bedöma om syftet med examensarbetet är uppfyllt. Är det möjligt att slösa mindre plast vid print av tredimensionella modeller med IRBAM printern genom att integrera en avståndssensor i printerns konstruktion? För att besvara den frågan kan följande två frågor med fördel besvaras:

- Kan IRBAM roboten använda mätvärdena på ett sådant sätt att första lagret av plast blir jämntjockt?
- Får första lagret av plast bättre vidhäftning när sensorn används?

3.2. Avgränsningar

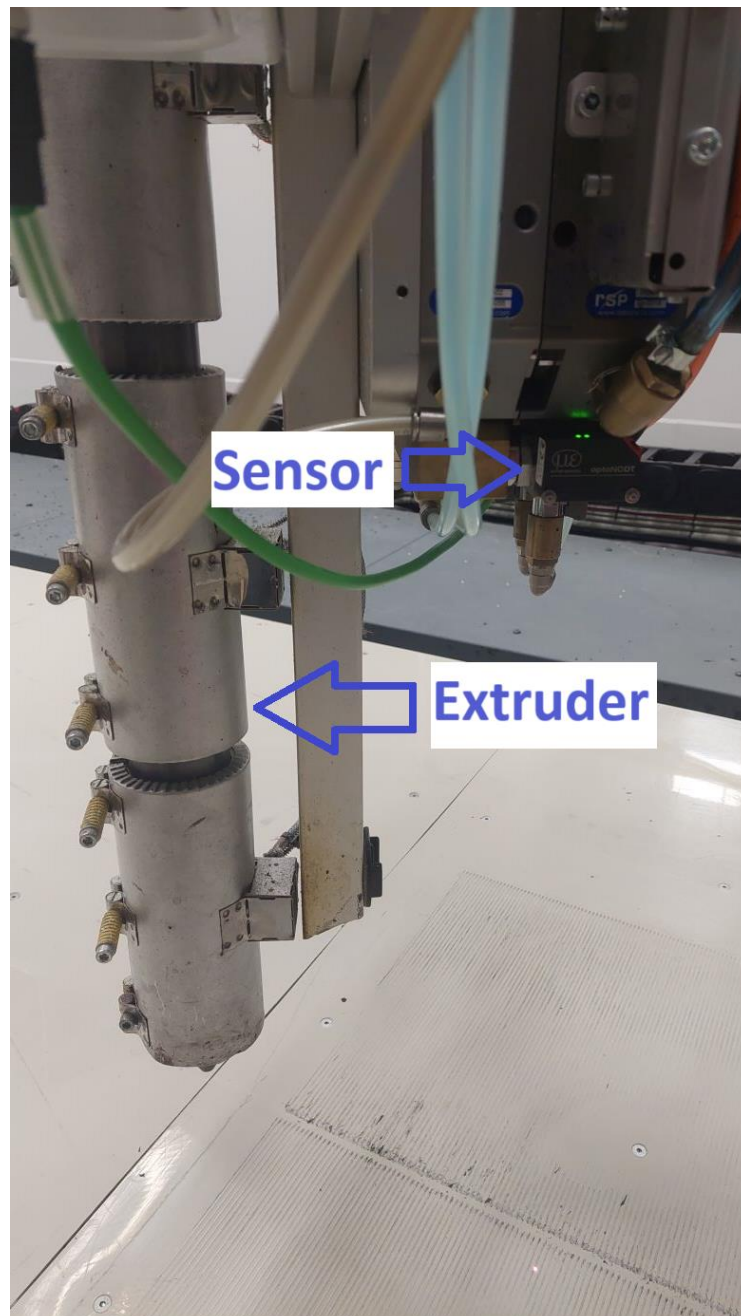
RISE bedömer att det är för komplicerat att mäta ojämnheter i varje lager i modellen, därför ska bara ojämnheter i bottenplattan mätas ut [4]. Fördelen med att mäta ojämnheter i varje lager hade varit att robotarmen hade kunnat programmeras till att följa ojämnheterna i varje lager. Då hade den inte applicerat plast i luften eller pressat in spetsen på extrudern i modellens yta när den printar.

En annan avgränsning är att mycket färdig kod från ABB kan användas. Hur roboten rör sig styrs av färdig programkod som ABB och RISE har tagit fram. ABB har även en liknade sensor och ett program som använder dess mätvärden för att låta robotarmen följa ojämnheter i bottenplattan när den applicerar första lagret av plast. Det finns dock två tydliga skillnader mellan ABB:s lösning och den lösning RISE vill uppnå:

1. ABB har satt sensorn längst ner på extrudern. RISE byter mellan en extruder och en fräs och sensorn måste därför monteras på själva robotarmen så att den sitter kvar oavsett [4]. Därför måste även sensorns konfiguration ändras så att den visar värdet noll vid rätt höjd över arbetsplattan. Se mer information i avsnittet metod.
2. ABB och RISE använder olika enheter för att överföra sensorns mätvärden från RS422 formatet till Profinet. Även detta gör att sensorn måste ha en annan konfiguration.

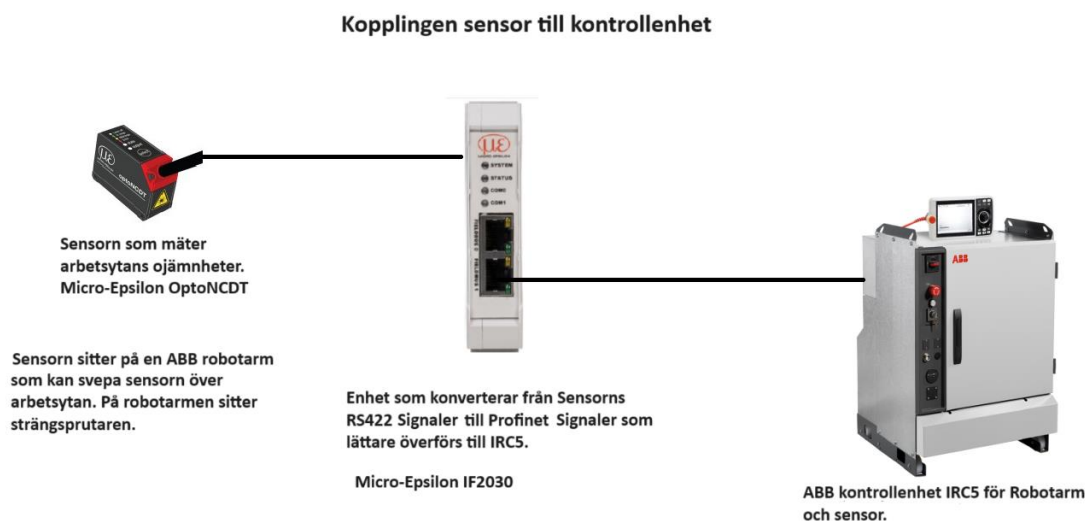
4 Metod

I detta avsnitt kommer metoden för att uppnå syftet med examensarbetet att beskrivas. Metoden består av flera steg. Först måste konvertern anslutas till sensorn och kontrollenheten. Sedan måste sensorn och kontrollenheten konfigureras så att sensorn skickar värdena till kontrollenheten. Slutligen måste kontrollenhetens mjukvara ställas in så att värdena används på korrekt sätt. Sensorn var redan monterad där RISE vill ha den. Se hur den sitter på robotarmen bredvid extrudern i figur 1 nedan.



Figur 1. Sensorns placering bredvid extrudern.

Från sensorn ska det gå seriella kablar som överför digitala data till Micro-Epsilon IF2030. De seriella kablarna ska använda sig av RS422 protokollet. Från IF2030 ska det gå nätverkskablar till kontrollenheten ABB IRC5 som styr både extrudern och förflyttningen av sensorn. Det kommer bara behövas en sensor för att robotarmen kan flytta den över ytan. Se detta system i följande figur:

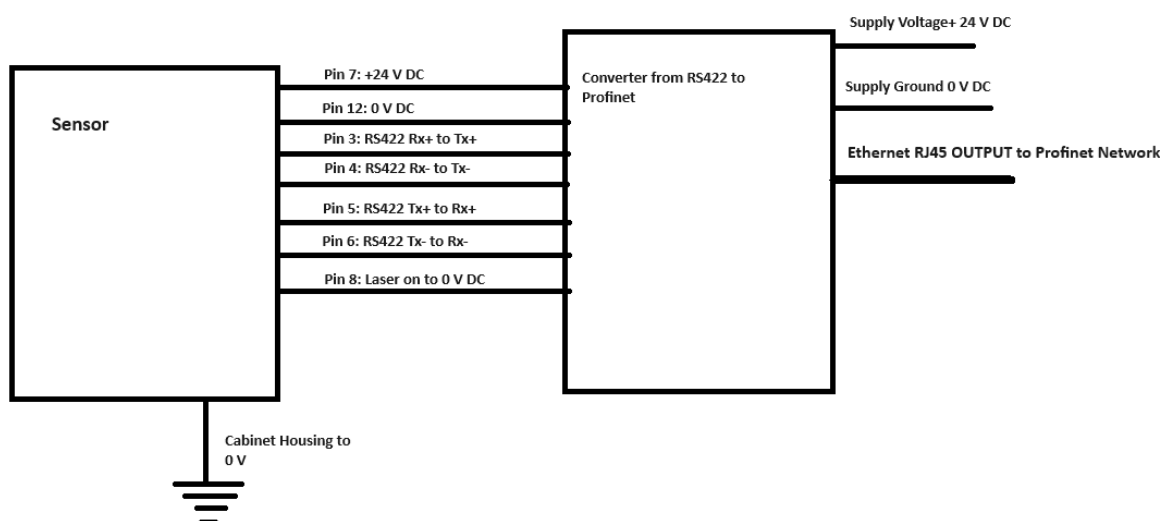


Figur 2. Kopplingen sensorn till kontrollenheten

4.1. Fysisk anslutning av sensorn till IF2030

För att ansluta sensorn till konverterern IF2030 så måste manualerna för enheterna jämföras. Sensorn har flera kontakter, så kallade pins, och 10 meter långa analoga kablar går från varje pin till mottagaren IF2030. I manualen för sensorn står det vilka kablar som överför data och vilka som används för strömförsörjning [13, s. 32]. I manualen för IF2030 står det hur dessa kablar ska anslutas [14, s.11]. Sensorn kan överföra data bland annat på följande sätt: 2 ”Transmitter” pins (Tx+ och Tx-) ansluts till två ”Receiver” pins (Rx+ och Rx-) för att överföra data via det seriella protokollet RS422. Samtidigt måste en 24 V spänningskälla anslutas genom IF2030 till sensorn. Detta gäller även jordningen.

Dessutom måste sensorhöljet jordas. Ytterligare en pin måste jordas för att lasern i sensorn ska vara på. Se hur det ska kopplas i figur 3:



Figur 3. Koppling sensorn till konvertern. Endast sensorn har pin-nummer, IF2030 har bara bokstavs-beteckningarna ovan [14, s. 11].

När ovanstående koppling är klar ska sensorns "Output" LED vara grön för att visa att sensorn skickar data via RS422 [13, s.29]. På IF2030 finns två RJ42 uttag som enkelt kan anslutas med industriella nätverkskablar till 3D skrivarens Profinet nätverk som är anslutet till kontrollenheten.

Därefter ska det vara möjligt att verifiera att IF2030 är ansluten till kontrollenheten genom att skanna nätverket i kontrollenhetens mjukvara RobotStudio och se om den kommer upp i listan av I/O enheter.

4.2. Mjukvaruinställningar för etablering av kommunikation

För att värdena ska kunna överföras till kontrollenheten så måste både sensorn, IF2030 och kontrollenheten konfigureras med rätt inställningar. Det finns verktyg i RobotStudio för att överföra filer till Profinet enheter som IF2030. Dessa inställningar ska möjliggöra kommunikation mellan alla tre enheterna eftersom IF2030 är en konverter från RS422 protokollet till Profinet.

Micro-Epsilon måste tillgängliggöra en GDSML fil som innehåller baskonfigurationen av IF2030. Där kan inställningar väljas som är unika för varje sensor. Det går att hitta dessa inställningar i dokumentet "IF203x Hardware Configuration – Settings." [15]. Därefter måste inställningarna skickas till IF2030 och lagras där.

Värdena kommer fram som binära tal och vissa bits innehåller informationen om avståndet från sensorn till bottenplattan. Enligt ABB [16] så måste avståndsvärdena skickas till en analog Profinet ingång med ett bestämt namn och avstånd som är mer än

100mm från extruderns spets ska räknas. Värdena måste konverteras från binära tal till mm.

4.3. Inställning av hur robotarmen flyttar sensorn

Därefter så måste TCP ställas in. TCP står för "Tool centre point" på engelska, alltså "Mittpunkt på verktyg" [17]. Verktuget är sensorn. För att robotarmen ska kunna flytta sensorn på ett sådant sätt att ojämnheter på rätt punkter på ytan ska mätas ut behöver TCP ställas in. En TCP syns i RobotStudio som en punkt i ett virtuellt koordinatsystem. I detta fall ska TCP vara där sensorns laserstråle träffar ytan när extruderns spets är 100 mm ovanför ytan.

4.4. Konfiguration av mjukvara och verifiering av resultat

När allt detta har uppnåtts måste ABB:s mjukvara för att skanna av byggplattan konfigureras enligt deras manualer som finns tillgängliga för användare av RobotStudio [18]. Detta program ska kunna anpassa hur extrudern rör sig så att den följer ojämnheter i ytan.

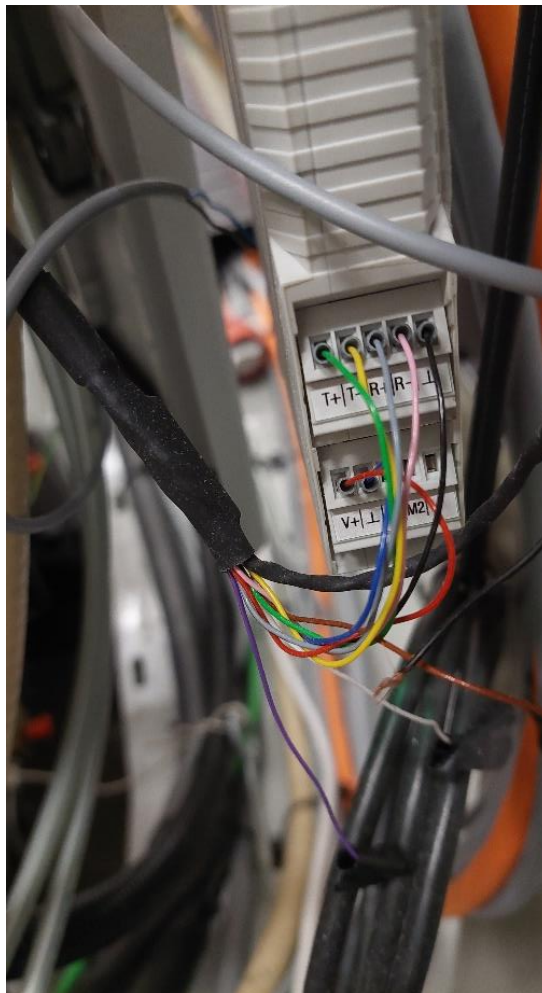
Det sista steget blir att verifiera om första lagret av printade modeller blir av högre kvalitet när detta program körs. För att göra det kan samma modell printas två gånger. En gång med sensorn på och en gång med sensorn avslagen. Då kan det fastställas om resultatet blir bättre. I mån av tid kan fler försök göras och en topografisk karta av bottenplattan ritas för att ytterligare stärka bevisningen.

5 Genomförande

I detta avsnitt kommer det att beskrivas om det gick att hålla sig till metoden och vilka svårigheter som uppstod på vägen. Vissa saker visade sig vara lite mer komplicerade och innehålla fler steg än förutsett medan andra saker gick smidigt.

5.1. Fysisk anslutning av sensorn till ABB:s kontrollenhet

Det blev relativt oproblematiskt att ansluta sensorn med konverterern enligt ritningen i figur 3 i metoden. Här följer en bild på hur det ser ut på den sida av IF2030 där RS422 anslutningarna kommer från sensorn.



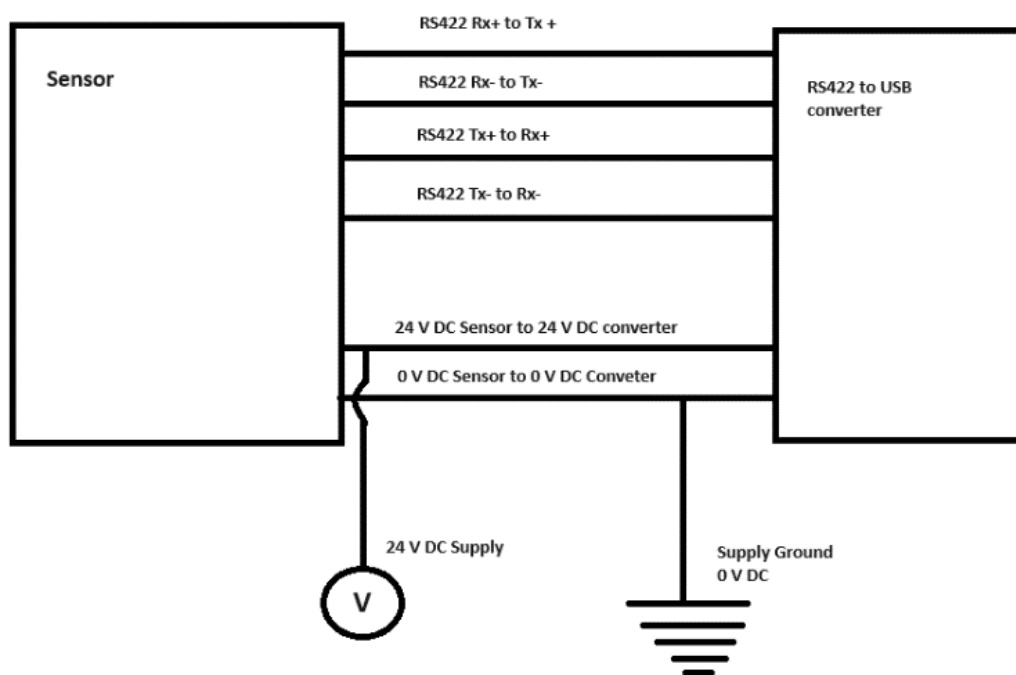
Figur 4. Bild på fysisk anslutning av sensorns kablar i IF2030

Därefter anslöts konverterern IF2030 med ABB kontrollenheten med hjälp av nätverkskablar. IF2030 har två RJ45 uttag där ett ansluts till en switch i ABB kontrollenheten. Det andra kan till exempel anslutas till en laptop för konfiguration. Konfigurationen innebär att mjukvara lagras i sensorn, konverterern och ABB kontrollenheten med inställningar för vilken data som ska skickas till kontrollenheten

och hur denna data ska användas. Det har visat sig vara mycket krångligare än den fysiska kopplingen.

5.2. Anslutning av sensor till laptop via USB konverterare

Det har också använts en USB konverter som bara kan anslutas om IF2030 avlägsnas. Den har inga nätverksuttag utan ett USB uttag och ger åtkomst till ett webbgränssnitt för enkel konfiguration av själva sensorn. I detta webbgränssnitt finns det många inställningar och det går att läsa in mätvärdena direkt till en laptop. Det hade även varit möjligt att konfigurera sensorn via ASCII koder, men det visade sig vara avsevärt mer komplicerat än att använda USB konverter från Micro-Epsilon.¹ Här följer en figur som visar hur USB enheten har anslutits. Det visade sig dock vara bäst att inte ändra fabriksinställningarna i webbgränssnittet. Det var alltså onödigt att ansluta kretsen i figur 5 nedan.



Figur 5. Anslutning Sensor till USB konverterare

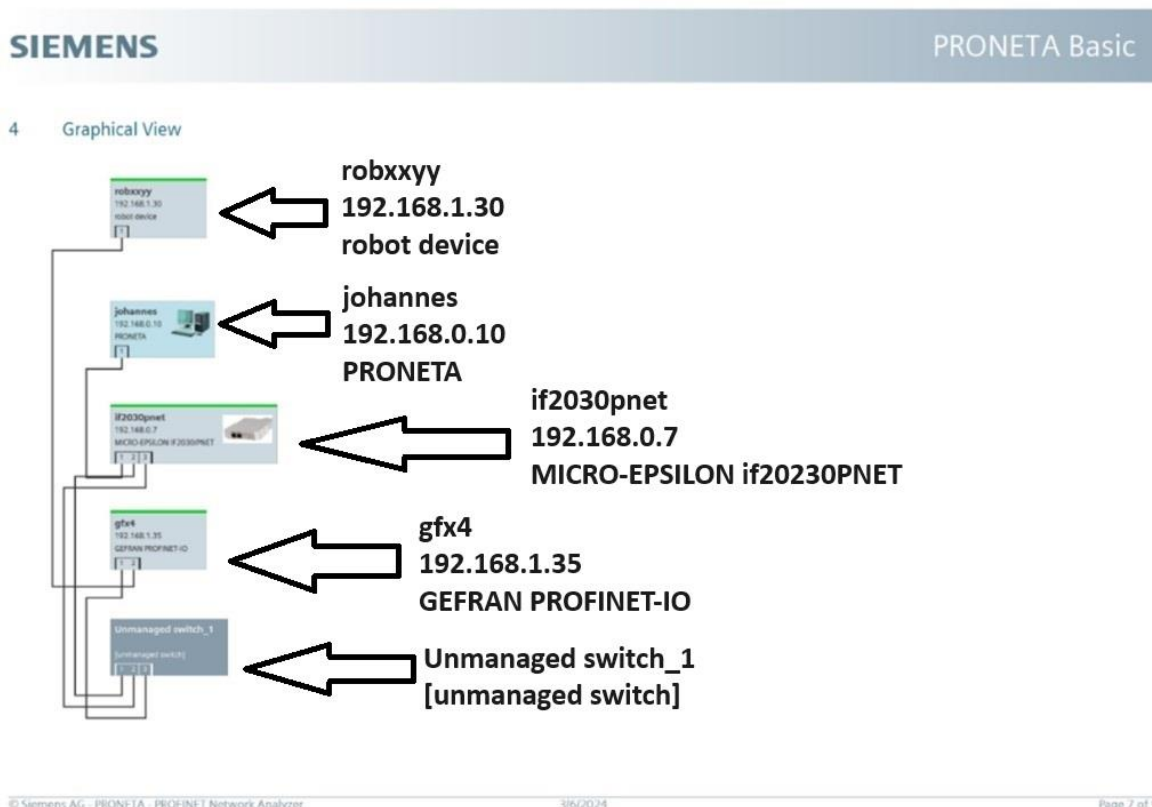
¹ Micro-Epsilon IF2001 konverterar från RS422 till USB.

5.3. Praktiska utmaningar

En utmaning med konfigurationen visade sig vara att alla instruktionsböcker om Profinet ger förklaringar för hur man applicerar inställningar i ett program som heter Totally Integrated Automation Portal (TIA portal) [19]. Det är ett program som inte fungerar i ABB kontrollenheten utan normalt används i Siemens PLC system [11]. PLC står för Programmable Logic Controller på engelska, alltså Programmerbar logisk kontrollenhet.

Siemens har tagit fram Profinet och visar i första hand hur data kan skickas till kontrollenheter från deras eget företag. Det går dock att ansluta Profinet till ABB:s kontrollenheter och konfigurera överföringen av data i deras program Robotstudio.

Ett program från Siemens användes för att visa att IF2030 anslöt till ABB kontrollenheten. I figur 6 syns det hur det såg ut innan mjukvaru-konfigurationen.



Figur 6. Micro-Epsilon IF2030 ansluten till ABB IRC5 kontrollenhet

Här är "robxyy" ABB kontrollenheten IRC5 och "gfx4" är en Profinet enhet med RJ45 uttag som IF2030 är ansluten till.

5.4. Konfiguration av sensorn och IF2030 i Robotstudio

För att se till att kontrollenheten anslöt till sensorn så installerades GDSML filen som sensortillverkaren tillhandahöll i RobotStudio. Eftersom IF2030 syns när nätverket skannas i RobotStudio så gick det att skicka denna fil med inställningarna till IF2030. Sedan valdes en 16 bit ingång i kontrollenheten som angivet tidigare [15].

Därefter gick det att lägga till en (virtuell) analog Profinet ingång i kontrollenheten enligt anvisningar från ABB [16], men det fungerade inte som tänkt. Signalen hade rätt namn men fel amplitud, det stod fel siffra i mottagaren helt enkelt. Detta tog lång tid att lösa. Även skalan blev fel, mätvärdet ökade mer än dubbelt så fort som i verkligheten. För att se hur många millimeter mätvärdet ändrade sig i verkligheten flyttades extruderns spets 100 mm i höjled och värdet jämfördes med siffran som kom fram till den analoga ingången.

För att lösa detta krävdes en litteraturstudie om RobotStudio parametrar. Till slut användes en manual från ABB [20] som förklarade ord som ABB hade använt i sina email med instruktioner. Det ledde till en fungerande konfiguration som beskrivs under rubriken resultat. ABB begärde att sensorn visar värdet 0 när extruderns spets är 100 mm ovanför ytan som ska mätas ut.

5.5. Praktiska steg i inställning av TCP

När kontrollenheten väl fick in rätt värden var det möjligt att gå vidare med nästa steg: att ställa in TCP. För att få till denna inställning, beskriven i delen metod, krävdes samarbete med flera anställda på RISE och ABB.

Första steget var att ta reda på var ytans ideala höjd befann sig i robotarmens koordinatsystem. För att göra det kördes robotarmen ner till ytan och denna höjd sattes till noll i ett så kallat arbetsobjekt som kallades sensorplan. Detta fick göras på minst tre punkter eftersom ytan både hade ojämnheter och var aningen vinklad.

Nästa steg var att programmera in en sensor-TCP som var minus hundra vid ytan eftersom den skulle vara 0 när extruderns spets var 100 mm ovanför ytan. Även detta fick göras vid flera punkter, minst tre punkter. När Robotarmen vinklades så mycket som möjligt åt tre håll från TCP-punkten så kunde ytans vinkel och andra parametrar beräknas automatiskt av Robotstudio [17].

Sedan kördes extruderns spets ner till ytan igen så tätt som möjligt och så jämfördes värdet som sensorn visade med värdet som TCP visade. Både gav värdet minus hundra, men det fanns en liten avvikelse som var svår att förklara. Till slut ändrades ett värde i sensorns konfiguration som kallas "Minimum logical value" från -174 till -175. Då verkade sensorn alltid visa ett värde som var mindre än 0,2mm mer än vad TCP visade. Detta var inom den tolerans som ABB och RISE hade begärt. Se mer om detta i avsnittet

Resultat. Det var dock svårt att veta om tillräckligt många punkter på ytan hade använts för att jämföra sensor- och TCP-värdet i höjded.

För att ange för roboten var lasern träffar ytan i sidled användes en vanlig måttstock för att detta bedömdes vara mindre känsligt.

Det visade sig att TCP koden innehöll information om extruderns vikt och tyngdpunkt eftersom robotarmen måste veta hur tung last den ska lyfta för att kontrollera sina servomotorer. Servomotorerna måste ha exakt rätt vridmoment för att flytta sensorn tillräckligt noggrant. Extrudern är oftast monterad, därför angavs extruderns värden så att den inte måste monteras av när sensorn ska mäta ut ytan. Det hade varit idealt om TCP: n även fungerade med fräsen monterad i stället för extrudern.

5.6. Inställningar för praktisk användning av sensorn

Nu var det möjligt att testa att mäta ytans ojämnheter med hjälp av sensorn, först i Robotstudios simulator och sedan i verkligheten. Programmet som ABB använder borde i teorin fungera även med den ovanstående konfigurationen.

Tyvärr uppstod två nya problem. I simulatormen flyttade sig robotarmen till fel punkter, och när programmet skulle köras i verkligheten kom det felmeddelanden. Dessa felmeddelanden angav att programmet som skulle starta inte fanns i kontrollenhetens minne.

För att få simuleringen att fungera hölls ett möte med ABB. Efter några smärre justeringar flyttade sig laserstrålen till rätt punkter. Felet var i första hand att arbetsbordet var på fel plats i förhållande till robotarmen, i simuleringen.

Sedan gällde det att få till mätningen av samma del av arbetsytan i verkligheten. För att få till det installerade ABB tre avsnitt av RAPID kod som saknades i 3DP så att mätningen kunde påbörjas. Även här mätte robotarmen upp fel punkter, till exempel punkter någon centimeter utanför arbetsytan. Efter justeringar av arbetsytans position i robotarmens virtuella koordinatsystem så syntes det dock att robotarmen sensorn mätte på rätt punkter. Mätvärdena lagrades i en fil som används vid framtida tredimensionella utskrifter.

Slutligen gällde det att använda mätningen av denna del av arbetsytan för att printa någonting och se om det första lagret på det som printades fäste bättre än utan sensorn. Det visade sig vara smidigt att använda menyn i 3DP för göra detta.

6 Resultat

Genomförandet av detta arbete gav ett resultat som kan delas upp i flera delar.

1. En pinkonfiguration för kopplingen mellan sensorn och IF2030.
2. En mjukvarukonfiguration av IF2030 och kontrollenheten IRC5 så den kan ta emot sensorns värden och omvandla dem till mm.
3. En TCP inställning för att sensorn ska flyttas till exakt rätt punkter och mäta ytans höjdvikelse.
4. Inställningar i Robotstudio som gör att det går att utföra mätningen av höjdprofilen på valfri del av ytan.
5. Inställningar i Robotstudio som gör att mätvärdena används för att printa tredimensionella modeller med hänsyn till utmätta ojämnheter.

6.1. Resultaterande anslutning av sensorn till kontrollenheten

Det var möjligt att ansluta sensorn till IF2030 i enlighet med pinkonfigurationen som beskrevs i delen Metod och som visas i figur 4 i delen Genomförande. Mjukvarukonfigurationen av IF2030 gick till som beskrivet tidigare och ledde fram till att mätvärdena från sensorn kom fram utan förlust av binära data till kontrollenheten.

I kontrollenheten IRC5 togs 16 bytes av binära tal emot från sensorn och omvandlades till mm. Om höjden på arbetsytan avvek från den ideala höjden så angavs detta skalenligt och med god mätnoggrannhet.

Den fungerande konfigurationen av kontrollenhetens ingång ser ut så här:

```
-Name "aiZvalue_3DP" -SignalType "AI"\
-Device "IF2030PNET_pn_16_Bytes_Input" -Label "3DP internal"\
-DeviceMap "0-15" -Access "All" -Default -175 -EncType "UNSIGNED"\
-MaxLog 325 -MaxPhys 500 -MaxPhysLimit 500 -MaxBitVal 64887 -MinLog -175\
-MinBitVal 643 -Size 16
```

Här betyder "aiZvalue_3DP" namnet på denna analoga variabel som signalen ska skickas till [18, s.70]. IF2030 skickar 16 byte till ingången "IF2030_pn_16_Bytes_Input". 16 byte motsvarar 65 520 bit. Typen av data är UNSIGNED, alltså de innehåller inga negativa tal.

Sensorn skickar mätvärdena som bits mellan 643 och 64 887. Det innebär att det skickas totalt 65 520 bit men de första 643 och de sista 633 används som buffert av sensorn [13, s.86–87]. Dessa överförs till fysiska tal som inte används i denna kontext (MaxPhys och MinPhys).

Däremot används de logiska värdena [20, s.336–343]. Här konverteras mätvärden från binära tal till millimeter. Eftersom sensorn har 500mm räckvidd valdes först Maxlog 500

och Minlog 0 ut men det gav ett konstant mätfel på 75mm. Dessutom vill ABB att kontrollenheten ska ta emot värdet 0 när sensorn är 100mm från arbetsplattan vars ojämnheter ska mätas upp. Detta gör att en offset på 100mm krävs. Därför valdes minus 175 ut som minsta värdet och 500 minus 175 ut som högsta värdet (alltså 325). Då uppfylldes villkoret från ABB samtidigt som mätfelet på 75mm korrigerades. I praktiken överskreds sensorns räckvidd när extruderns spets är 176mm från bottenplattans yta.

För att kontrollera att skalan blev rätt flyttades spetsen på extrudern 100 m uppåt och nedåt. Då ändrades även värdet som mottagaren tog emot med 100.

6.2. Resultaterande inställning av TCP

Det var möjligt att ställa in TCP på ett sådant sätt att laserpunkten på arbetsytan flyttade sig till de punkter den skulle. Dock gav sensorn alltid ett mätvärde som var ungefär 0,2mm högre än avståndet mellan sensorn och arbetsytan i robotarmens virtuella koordinatsystem. Denna TCP kan bara användas om extrudern är ansluten till robotarmen för att extruderns vikt påverkar hur mycket kraft robotarmen ska använda för att flytta sig.

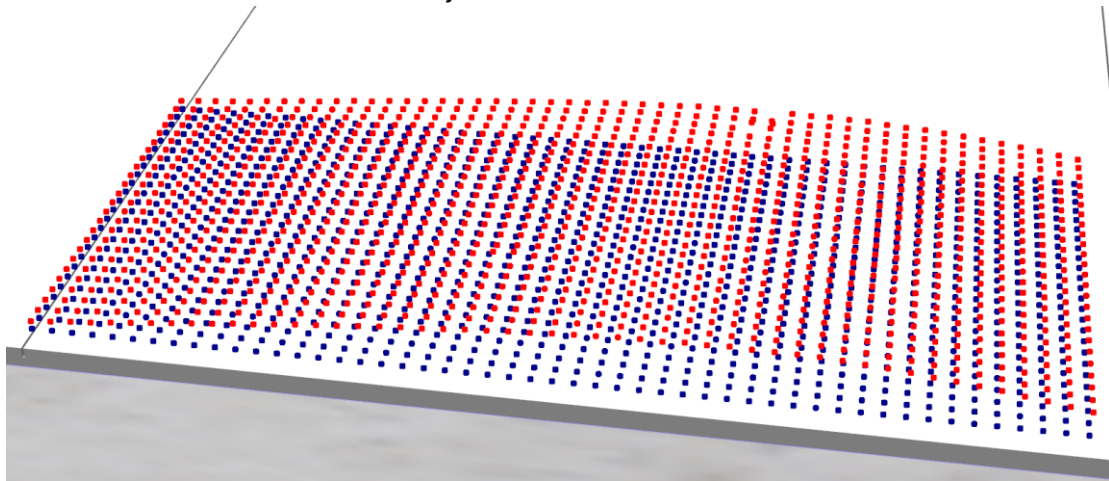
6.3. Utvärdering av sensorns förmåga att mäta ytans höjd

För att utvärdera om systemet kan mäta höjden på ojämnheter i ytan på ett korrekt sätt lades en plastskiva på ytan med bräddor under och vikter på sidorna, se figur 7. Det gav ett gupp på ca 60mm enligt mätning med måttstock. En mätning av ytan med sensorn gav även den en höjd på 60,21mm. Se simuleringen av ytan i figur 8.



Figur 7. Test-yta för utmätning.

Här syns plastskivan med 60mm höjd som lades ut på 3D-skrivarens arbetsyta för att testa om sensorn kan mäta dess höjd korrekt.

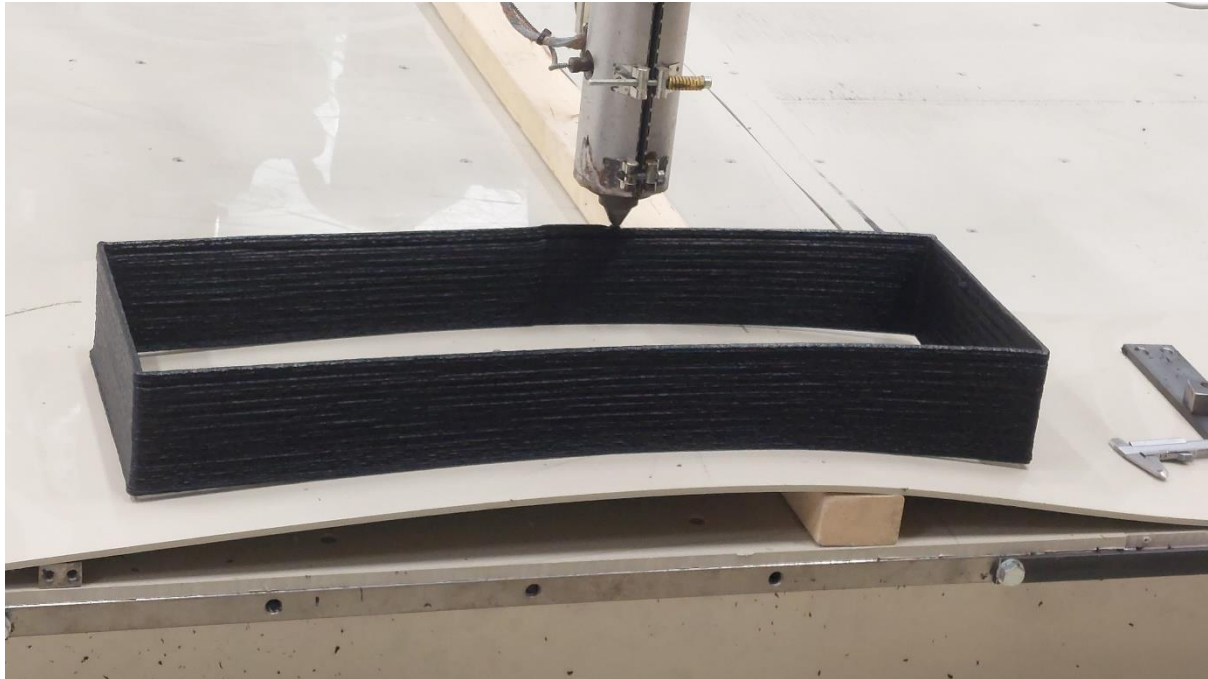


Figur 8. *Simulering av höjdprofil på plastskiva.* De blå prickarna representerar den ideala höjden medan de röda prickarna representerar den verkliga höjden.

Här i figur 8 syns simuleringen av plastskivan som den ser ut i Robotstudio. Höjdprofilen följer den verkliga skivans höjdprofil på ett korrekt sätt och den maximala höjden stämmer ungefär överens med höjden som mättes upp med måttstock, alltså 60 mm. Två av de röda punkterna vid övre kanten visar ett mindre mätfel.

6.4. Resultande 3D modeller vid användning av sensors mätning

Det slutgiltiga steget är att printa något på denna välvda yta och se att det första lagret med plast följer plastskivans höjdprofil. Två olika tredimensionella modeller har skrivits ut. Den första var en vanlig rektangel där sidorna fick en fördefinierad höjd. Se figur 9.



Figur 9. Låda med plan ovansida på kurvad yta.

Här syns det att lådans undersida följer plastskivans höjdprofil och att ovansidan på lådan blir mycket rakare. Det blev inställt i printprogrammet i Robotstudio att det översta lagret ska vara plant. Att lådan släpper lite på kanterna beror inte på mätningen utan på vanliga misstag i inställningen av printprogrammet, enligt RISE [4].

Nästa steg var att printa texten RISE med 12cm höjd på samma plastskiva. Här användes en ny mätning av plastskivans höjd med fler mätpunkter för att öka noggrannheten. Det gav resultatet som syns i figur 10.



Figur 10. Utskrift av RISE på välvd yta.

Denna utskrift var tänkt att få en välvd ovansida med samma höjdprofil som undersidan. Så blev det. Utskriften har relativt hög noggrannhet och den bredare foten bidrar till bättre vidhäftning. Extrudern har alltså följt plastskivans höjdprofil och applicerat plast på ett sådant sätt att första lagret blev nästan jämntjockt och följer plastskivans höjdprofil.

6.5. Analys av småfel i RISE-utskriftens kvalitet

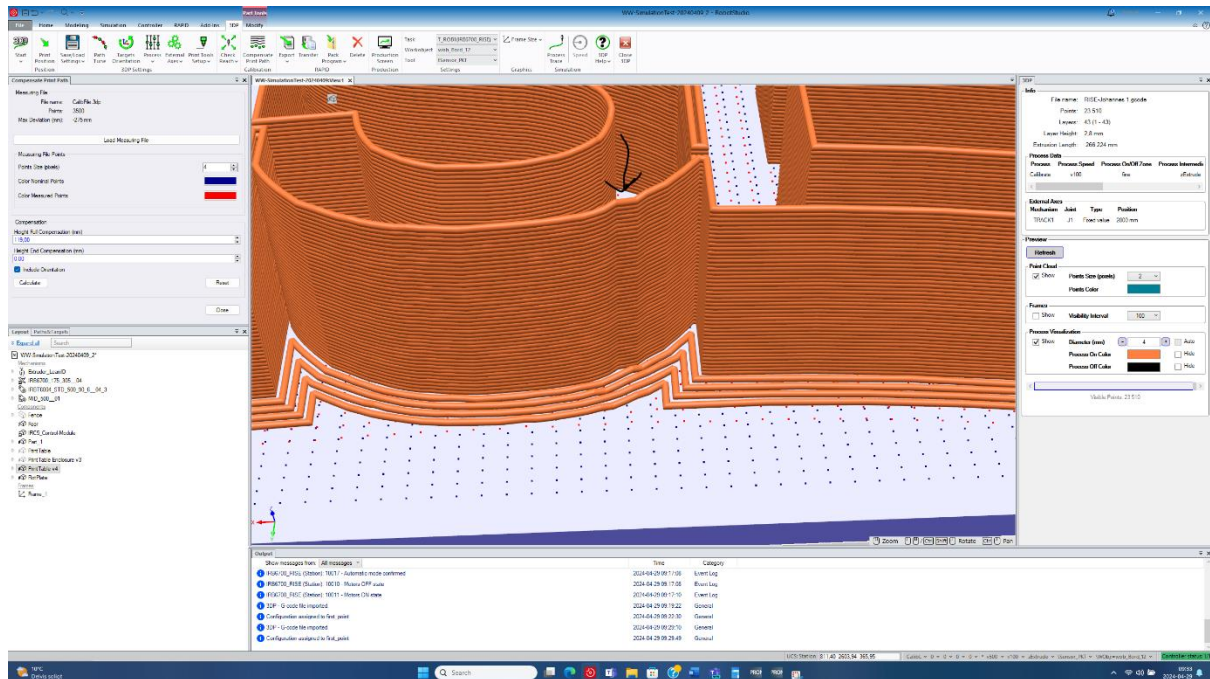
Det finns dock några fel som visar att lösningen måste optimeras. Det finns grovheter i utskriften av foten och tre gupp i S:ets yta som inte fanns med i CAD ritningen. Ett av dessa syns i Figur 11 nedan.

Grovheterna i utskriften av första lagret av plast kan bero på att extruderns spets inte har konstant höjd över plastskivan. Hur snabbt plast kommer ut ur extrudern påverkas inte av sensorn eller ABB:s mjukvara, enligt instruktioner från ABB. Dessa avvikelser i första lagrets tjocklek är på drygt en millimeter och hindrar inte utskriften från att utföras.



Figur 11. Defekt i utskrift av RISE logga.

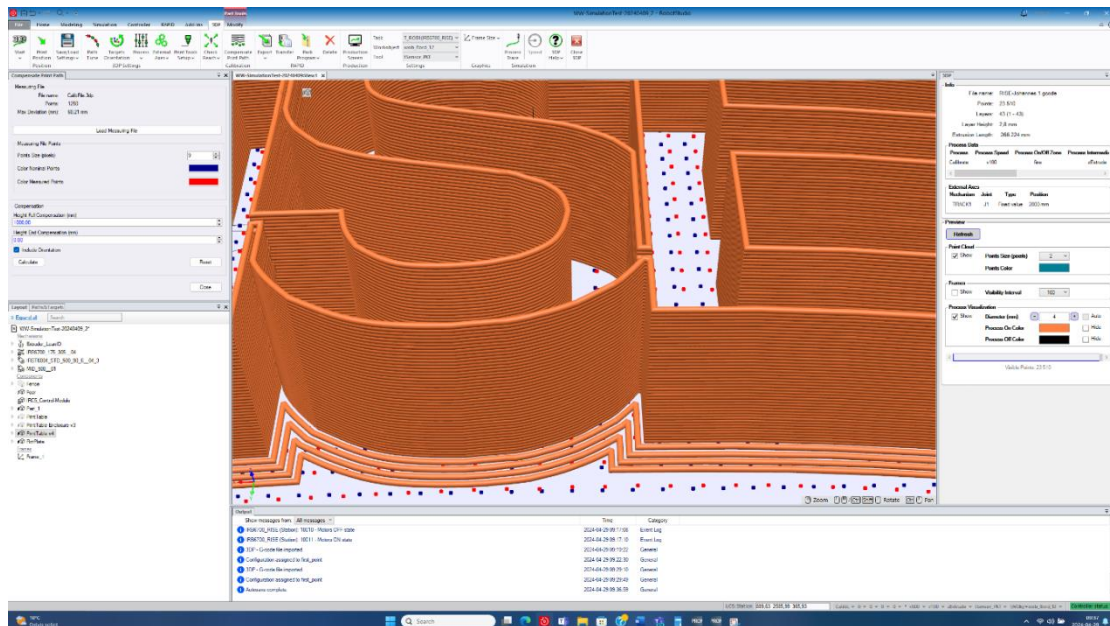
För att ta reda på vad de tre defekterna längre upp på S:et beror på studerades Robotstudio simuleringen av det som 3D-skrivaren blev instruerad at skriva ut. Se denna simulering i figur 12.



Figur 12. Defekt i instruktioner till 3D-skrivaren om vad den ska skriva ut.

Här framgår det tydligt att den defekt i nedre delen av S:et som finns med i den verkliga utskriften fanns med i instruktionerna till 3D-skrivaren inför utskriften. Därför skrev 3D-skrivaren ut det den blev instruerad att göra. Det går att visa på samma sätt att en av de andra två guppen i den verkliga utskriften också var instruerad av Robotstudio.

Om däremot mätningen av plastskivan med färre mätpunkter används så finns denna defekt inte med i Robotstudio simuleringen av instruktioner till 3D-skrivaren. Detta visas i figur 13.



Figur 13. Simulering av Utskrifts-instruktioner med färre mätningar av underlagets höjd.

Figur 13 visar att simuleringen av RISE loggan inte innehåller defekten i den undre delen av S:et om mätningen med färre mätpunkter används. Det går att visa att detta även gäller simuleringen av en av de övriga två guppen.

Slutsatser som dras av allt detta och svaret på frågeställningen presenteras i delen Slutsats.

7 Diskussion om möjliga framtida förbättringar

Det resultat som presenterades ovan får anses vara mycket bra, men det är tydligt att det går att optimera lösningen. Grovheterna i utskriften av foten visar att höjdprofilen på plastskivan i figur 7 inte följdes exakt av extrudern. Detta kan bero på flera olika saker:

- Mätresultaten är kanske inte alltid helt korrekta. Det kan exempelvis bero att vissa delar av plasten reflekterar laserstrålen från sensorn sämre än andra delar och att det finns små hål i plastskivan.
- Programmet som använder mätresultaten kanske inte har den noggrannhet som krävs för att hantera så stora avvikelser som 60 mm, det är i första hand gjort för att kompensera för små avvikelser på någon enstaka millimeter.
- Den offset på 175mm som beskrevs i delen Resultat hade kunnat ligga närmare TCP värdet än 0,2mm om decimaltal hade kunnat användas som Minimum logical value.

Därför vore det bra om många tester utfördes. Det går att testa hur väl sensorn mäter avståndet till olika typer av material och därefter ge förslag till förbättringar av själva sensorn till Micro-Epsilon. Det material som användes nu var en form av PLA, och det utvidgas inte så mycket när det blir varmt [4]. Det vore bra att testa om lösningen fortfarande funkar om plaster med större utvidgning används. Dessutom kanske det går att montera sensorn närmare ytan så att noggrannheten av mätningen förbättras.

En annan sak som kan testas är att printa olika geometriska former på olika sorters underlag för att hitta defekter kopplade till mätningen. Då kan förslag till förbättringar av programkoden skickas till ABB. Ett förslag kunde vara att Minimum logical value får vara ett decimaltal.

Eftersom det visade sig att mätningen med färre mätpunkter gav en bättre utskrift av texten RISE vore det bra att utreda om mätningen med fler mätpunkter misslyckades – eftersom den borde ha gett större mätnoggrannhet. Sedan kan många olika ytors höjdprofil mätas för att se om det generellt är bättre att mäta med fler eller färre mätpunkter och om det går att påverka vad som är bäst. ABB meddelade RISE internt att fler mätpunkter borde ge bättre tredimensionella utskrifter.

Det ideala skulle vara om många tester hade gjorts av mätningarnas repeterbarhet. Det skulle också vara bra att printa samma 3D-modell flera gånger både med sensorns hjälp och utan sensorns hjälp för att jämföra resultatet och dra mer ingående slutsatser. Det var inte möjligt på grund av tidsbrist.

Det fanns tre tydliga gupp i S:et vid utskriften av texten RISE. Två av dessa fanns också med i simuleringen av instruktionerna till 3D-skrivaren. Om däremot höjdmätningen med färre mätpunkter användes försvann dessa två gupp ur simuleringen. Därför måste mätningen med fler mätpunkter ha misslyckats eller ha lett till felaktiga beräkningar i Robotstudios mjukvara. Alltså borde utskriften av texten RISE sakna dessa två defekter om mätningen med färre mätpunkter används. Detta kan endast verifieras om texten

RISE skrivs ut igen med hjälp av mätningen med färre mätpunkter, men det var inte möjligt på grund av tidsbrist.

Eftersom det nu går att printa på 60mm stora ojämnheter kommer RISE utreda om det går att printa en 3D-modell på en tidigare 3D-modell [4].

8 Slutsats

Det är nu möjligt att dra slutsatser av resultatet på detta arbete och svara på frågeställningen.

Det går att se på mätningen av höjden på plastskivan att sensorn kan registrera att skivan är där och mäta höjden den har med relativt stor noggrannhet. Det går också att se att första lagret av plast vid utskriften av texten RISE följer plastskivans höjdprofil och att plasten stannar kvar på ytan, om även övriga inställningar för 3D-skrivaren är korrekta. Vid utskriften av lådan applicerades första lagret av plast på rätt punkter på plastskivan men lossnade vid kanterna bland annat för att det inte fanns någon bred fot.

Det är nu möjligt att printa på 60mm stora ojämnheter på ytan med relativt stor noggrannhet, medan en avvikelse på en mm kunde leda till en kasserad utskrift innan examensarbetet. Extrudern följer nu ojämnheternas kurvatur medan den alltid hade samma höjd över arbetsytan innan examensarbetet. Detta ger 3D-skrivaren ny funktionalitet och är klart bättre för miljön för att färre utskrifter måste kasseras eller återvinnas [4].

Första lagret av plast applicerades på rätt punkter och hade ungefär samma tjocklek överallt men det fanns en liten variation på första lagrets tjocklek. Detta berodde troligen på att avståndet mellan extruderns spets och plastskivan varierade med någon millimeter och att ABB:s mjukvara inte påverkar hur snabbt plast kommer ut ur extrudern [16]. Detta hindrar inte 3D-skrivaren från att printa högkvalitativa 3D-modeller, utan är en mindre optimeringsfråga [4].

Svaret på frågeställningen är då följande:

- Extruderns spets kan följa ytans ojämnhet och applicera ett jämntjockt första lager av plast med en avvikelse på någon enstaka millimeter.
- Första lagret av plast får mycket bättre vidhäftning om sensorn används eftersom plasten inte skulle ha applicerats alls längst upp på ett gupp på 60mm om inte sensorn fanns med. Extrudern skulle ha kolliderat med foten av guppen och stannat av säkerhetsskäl, eller gått sönder. Samtidigt beror vidhäftningen även på helt andra faktorer som bredden på första lagret och andra inställningar som alltid görs vid utskrifter, med eller utan sensor.

9 Referenser

- [1] RISE, “Banbrytande framsteg inom robotstyrd 3D-printning | RISE,” Hämtat Maj. 1, 2024 [Online] Från: <https://www.ri.se/sv/berattelser/banbrytande-framsteg-inom-robotstyrd-3d-printning>
- [2] T. Hachimi, N. Naboulsi, F. Majid, R. Rhanim, I. Mrani, and H. Rhanim, “Design and Manufacturing of a 3D printer filaments extruder, ” *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, pp. 907–916, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.101>.
- [3] A. Bandyopadhyay and S. Bose, *Additive Manufacturing*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429466236>.
- [4] J. Johansson (Forskare RISE), “Projektbakgrund,” Maj. 2, 2024.
- [5] ABB, “IRC5 - Industrial Robot Controller,” <https://new.abb.com/>, 2024. Hämtat Maj. 3, 2024 Från: <https://new.abb.com/products/robotics/controllers/irc5-overview/irc5>.
- [6] X. Li, “G-Code Re-compilation and Optimization for Faster 3D Printing,” *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 104–116, Jan. 2022, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-95953-1_8.
- [7] Shawn Dietrich, “Introduction to ABB Robot Programming Language - Technical Articles,” *control.com*. Feb. 22, 2022. Hämtat April. 2, 2024 [Online]. Från: <https://control.com/technical-articles/introduction-to-abb-robot-programming-language/>.
- [8] Siemens AG, “Profinet,” p. 2, 2020, Hämtat: Apr. 10, 2024. [Online]. Från: [Profinet-slides-EN.pdf \(siemens.com\)](https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-networking/profinet/slides-en.pdf)
- [9] A. Marshall, “Noise Effects in Analog Systems,” *Synthesis lectures on digital circuits and systems*, pp. 109–117, Jan. 2009, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-79791-0_10.
- [10] W. Pastorius, “An Overview.” Hämtat: Apr. 23, 2024. [Online]. Från: https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/photogrammetrie/ressourcen/dateien/elearning/documents_content/elearn_triangulsensor?lang=en
- [11] Network Encyclopedia, “RS-422 - Network Encyclopedia,” *Network Encyclopedia*, Apr. 30, 2020. Hämtat Maj. 3, 2024, Från: <https://networkencyclopedia.com/rs-422/>
- [12] ABB, “3D Printing PowerPac,” *Robotics*, Mar. 14, 2024. Hämtat Maj. 3, 2024. [Online]. Från: <https://new.abb.com/products/robotics/software-and-digital/application-software/3d-printing-powerpac>

- [13] Micro-Epsilon, "Operating Instructions optoNCDT 1420." Hämtat: Apr. 23, 2024. [Online]. Från: <https://www.micro-epsilon.co.uk/fileadmin/download/manuals/man--optoNCDT-1420--en.pdf>
- [14] Micro-Epsilon, "MICRO-EPSILON IF2030/PNET OPERATING INSTRUCTIONS MANUAL." Hämtat: Apr. 23, 2024. [Online]. Från: <https://www.manualslib.com/manual/1658876/Micro-Epsilon-If2030-Pnet.html>
- [15] Micro-Epsilon, "IF203x Hardware Configuration – Settings.", Okt. 26, 2023, Hämtat Mars. 10, 2024, Från: Direkt kontakt Micro-Epsilon
- [16] A. Spaak (ABB), Privat kommunikation, Maj. 26, 2024
- [17] [Damond Goodwin](#), Juli 30, 2022, "How to Define the Tool Center Point (TCP) on a robot.", *Control Automation*, Hämtat April 24, 2024 Från: <https://control.com/technical-articles/how-to-define-the-tool-center-point-tcp-on-a-robot/>
- [18] ABB, "Application manual 3D Printing." Hämtat: Apr. 23, 2024. [Online]. Från: <https://library.e.abb.com/public/0c5a1e3d7cd64f7c9bfbbdb2a6aa9f4b/3HAC073941-001%20AM%203D%20printing-en.pdf?x-sign=FDDXxefoHe5thiOvzl6rVtwhdkifK+TEc81hQcsWeWlKxsm2UAjKwvdd4EHmc0m>
- [19] Siemens, "TIA Portal V17 Introduction," *Siemens.com*, 2021. Hämtat Maj. 2, 2024 [Online]. Från: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:578a7851-ae36-4d74-969f-ca77dbfdf8cc/Profinet-slides-EN>
- [20] ABB, "Technical reference manual System parameters." Hämtat: Apr. 26, 2024. [Online]. Från: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC050948-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

INSTITUTIONEN FÖR DATA OCH INFORMATIONSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA & GÖTEBORGS UNIVERSITET
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se
www.gu.se



GÖTEBORGS
UNIVERSITET



CHALMERS