



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

KONSTRUKCE KONCOVÉHO EFEKTORU ROBOTA S MOŽNOSTÍ AUTOMATICKÉ VÝMĚNY NÁSTROJE

DESIGN OF ROBOT END EFFECTOR WITH AUTOMATIC TOOL EXCHANGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Jirges

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Radek Jirges**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukce koncového efektoru robota s možností automatické výměny nástroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem a realizací koncového efektoru robota s možností automatické výměny nástroje, který bude sloužit k ovládní zařízení s dotykovým displejem.

Cíle diplomové práce:

1. Návrh a realizace koncového efektoru – Smart stylus kompatibilního s rezistivními i kapacitními obrazovkami. Smart stylus bude schopný rozpoznat sílu při dotyku. Práce bude obsahovat návrh mechanické konstrukce, návrh potřebné elektroniky včetně návrhu DPS, kompletní programovou část s komunikací přes sériové rozhraní a realizaci funkčního prototypu.
2. Návrh konstrukce automatické výměny nástrojů koncového efektoru robota.

Seznam doporučené literatury:

MONKMAN, G. J., HESSE, S., STEINMANN, R. SCHUNK, H. Robot Grippers. Wiley-VCH Verlag, 2007. 463 s. ISBN 978-3527406197

SICILIANO, B., KHATIB, O. Springer Handbook of Robotics. Springer-Verlag New York, Inc., 2008. 1611 s. ISBN 978-3-540-23957-4

VALÁŠEK, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995

GREPL, R.: Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics, BEN, 2007

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této práce bylo vytvořit koncový efektor malého robota pro ovládání zařízení s dotykovým displejem. Efektor musí s robotem komunikovat po sériové lince a dávat mu zpětnou vazbu o velikosti přítlaku na displej. Dalším požadavkem byla možnost automatické výměny nástroje. Měření přítlaku, zpracování signálu ze senzoru a komunikaci s robotem zde zajišťuje vlastní elektronika na bázi procesoru řady STM32 a piezorezistivní senzor. Mechanismus výměny nástroje byl odvozen od řešení velkých průmyslových robotů, ale značně přizpůsoben konkrétní aplikaci. Výsledkem této práce je funkční prototyp stylusu pro dotykové obrazovky, který poskytuje informaci o síle na displej a možnost jeho automatické výměny. Hlavním přínosem tohoto řešení je možnost v průběhu testu vyměnit efektor za model se dvěma, nebo více hroty pro testování rozhraní ovládaných gesty, což je v dnešní době nepostradatelná vlastnost.

Abstract

The goal of this thesis was to design an end effector for a small robot for testing of devices with a touchscreen. The effector has to communicate with the robot via serial interface and provide feedback about used downforce. Another requirement was possibility of automatic tool change. Measuring of downforce, signal processing, and communication with robot ensures custom electronics based on STM32 microprocessor and piezoresistive sensor. The mechanism of tool change was inspired by the system used with industrial robots but customized for this application. The result of this thesis is a functional prototype of a stylus for devices with a touchscreen which provides feedback about the downforce on display and possibility of automatic tool change. The main benefit of this solution is the possibility of changing the tool for the one with one or more styluses for testing gesture-based interface what is indispensable in these days.

Klíčová slova

Robot, stylus, koncový efektor, elektronika, mikroprocesor, sériová linka, 3D tisk, frézování

Keywords

Robot, stylus, end effector, electronics, microprocessor, serial interface, 3D printing, milling

Citace

JIRGES, Radek. *Konstrukce koncového efektoru robota s možností automatické výměny nástroje*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Konstrukce koncového efektoru robota s možností automatické výměny nástroje* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Krejčího, Ph.D., s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

.....
Radek Jirges
26. června 2020

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Petrovi Krejčí, Ph.D., za vedení mé diplomové práce. Poděkování patří také kolegům v týmu, kteří svými připomínkami přispěli k dokončení.

Obsah

1 Úvod	3
2 Analýza problému	4
3 Řešení dostupná na trhu	5
3.1 Systémy pro testování zařízení s dotykovým displejem	5
3.1.1 Zhodnocení systémů pro testování zařízení s dotykovým displejem	7
3.2 Automatická výměna nástroje	8
3.2.1 Upínač	8
3.2.2 Zhodnocení dostupných upínačů	11
3.2.3 Zásobník nástrojů	11
3.2.4 Zhodnocení dostupných zásobníků nástrojů	12
4 Návrh koncového efektoru	13
4.1 Konstrukce stylusu	13
4.2 Návrh elektroniky pro Smart stylus	19
4.2.1 Procesor STM32	19
4.2.2 Senzor pro měření síly	21
4.2.3 Ostatní prvky elektroniky	22
5 Software pro měření a komunikaci	28
5.1 Popis systému	28
5.2 STM32CubeMX	30
5.3 Implementace protokolu Dynamixel	30
6 Automatická výměna nástroje	33
6.1 Upínač nástroje	33
6.2 Zajištění spoje	34
6.3 Zásobník nástrojů	35
7 Praktická realizace	38
8 Zhodnocení	43
8.1 Smart stylus	43
8.2 Automatická výměna nástroje	43
8.3 Zásobník nástrojů	44
9 Závěr	45

Literatura	46
A Elektronické přílohy	52

Kapitola 1

Úvod

Dnes už se nemusíme ve výrobě a jiných odvětvích průmyslu spoléhat pouze na lidskou sílu a smysly. Již mnoho let se lidstvo zabývá tím, jak si práci ulehčit, zrychlit, zlevnit, a také jak kontrolovat výstupy. Důležitou součástí jsou roboty a jedním takovým je robot, který místo lidí testuje vestavěné systémy, konkrétně kancelářské tiskárny.

Dnes se znovu nacházíme v době, kdy dochází k velkému přesunu pracovních pozic. Až 50 % pracovních činností je teoreticky možné automatizovat s využitím současných technologií. [10] Svůj podíl na trhu se snaží získat i firma Y Soft, jejíž hlavním produktem je software pro správu tisku. Právě zde vzniká robot, jehož ambicí je nahradit lidskou práci tou strojovou. Jedná se o robotické rameno vlastní konstrukce, které se skládá ze servomotorů spojených plechovými výpalky. Jeho rozměry jsou tedy spíše menší, vhodné do kancelářského prostředí, kde nepůsobí žádné nebezpečí i díky adekvátní dynamice.

Rameno je připevněno k fotografickému stativu a nad ním je kamera. Ta snímá obrazovku testovaného zařízení a její okolí, kde se často nachází také mechanická tlačítka. Zachycený obraz je porovnáván se známými snímky z databáze. Díky tomu je možné vyhodnotit správné chování softwaru. Případné chyby systém zdokumentuje a zapíše do výsledného reportu z testu. Ke klikání na displej se používá hrot s gumovou koncovkou potaženou vodivou tkaninou, která dokáže obsloužit jak rezistivní, tak kapacitní displeje. Od stylusu však není žádná zpětná vazba, takže není možné určit, zda je při nepovedeném kliknutí chyba v kalibraci robota, nebo v testovaném zařízení.

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce efektoru, který bude schopný poskytnout robotu zpětnou vazbu. Takový efektor umožní měřit sílu, kterou působí na displej, což se může hodit pro testování grafických zařízení, u kterých na síle závisí tloušťka čáry a podobně. Další důležitou vlastností je možnost měřit rychlost odezvy testovaného objektu, jelikož je znám přesný čas dotyku. Pro testování mechanických tlačítek je ale někdy vhodné využít jiný typ efektoru u kterého třeba ani není nutná zpětná vazba. Naopak pro testování grafického rozhraní s ovládáním pomocí gest je nutné zvolit stylus s minimálně dvěma hroty. Dalším bodem této práce je návrh systému pro automatickou výměnu nástroje. Vyměnit efektor ručně by sice bylo snadné, ale sráželo by to schopnost robota vše ovládat na dálku. Typickým příkladem je, že člověk, který s robotem potřebuje otestovat konkrétní zařízení se nachází v úplně jiném městě než samotný robot s tiskárnou.

Kapitola 2

Analýza problému

Testování je důležitá část vývoje každého softwaru. Některé typy programů je možné ověřit testovacím skriptem, ale u vestavěných systémů je situace o poznání horší. V případě, že bychom chtěli takový systém testovat bez specializovaného hardwaru, musel by být emulován, z čehož vlastně plyne, že by se testoval jiný systém, než je reálně nasazen. Tím pádem hrozí riziko, že jeho chování bude odlišné.

Cílem této práce je navrhnout a vytvořit koncový efektor pro již existujícího robota, kterému poskytne zpětnou vazbu o prováděném dotyku na displej.

Dílčí cíle, které povedou k úspěšné realizaci diplomové práce jsou následující:

- Navrhnout koncový efektor robota, který bude schopný detekovat dotyk a případně měřit jeho sílu. Dále bude schopný komunikovat se systémem robota.
- Pro koncový efektor navrhnout elektroniku, která umožní komunikaci s robotem po sériové lince. Elektronika bude mít také na starosti měření síly dotyku.
- Navrženou elektroniku naprogramovat pro měření a komunikaci.
- Navrhnout upínač, který umožní automatickou výměnu nástroje.
- Realizovat prototyp celého zařízení Smart stylus.
- Otestovat základní funkcionalitu koncového efektoru a upínače.

Tento robot je využíván pro testování kancelářských tiskáren s dotykovým displejem. Systém robota je velmi rozsáhlý a pracuje na něm celý tým lidí, přičemž vlastní hardware je pouze dílčí částí. Pohon robotického ramene tvoří servomotory, které jsou řízeny přes sériové rozhraní. Výsledný produkt této práce tedy musí respektovat současný stav. To znamená, že komunikace s robotem bude probíhat na stejném protokolu, jako komunikují motory, rozměry efektoru musí korespondovat s rozměry ramene a podobně. Součástí zadání je také požadavek na automatickou výměnu nástroje, což rozšíří možnosti testování i na zařízení s mechanickými tlačítky a ovladači, při použití vhodných efektorů.

Kapitola 3

Řešení dostupná na trhu

Tato kapitola mapuje systémy pro testování zařízení s dotykovým displejem, která jsou dostupná na trhu. Tento průzkum slouží jako inspirace pro vlastní vývoj. Některé konstrukční prvky je možné výhodně převzít do vlastního řešení.

3.1 Systémy pro testování zařízení s dotykovým displejem

Na trhu je možné nalézt systémy firem, které se věnují obdobnému problému, testování zařízení s grafickým rozhraním. Každý systém je ale orientovaný trochu jiným směrem a proto jsou zde uvedeny příklady systémů, které mají rysy blízké tomu ve firmě Y Soft.

Prvním příkladem je nástroj Matt od firmy Rinf tech, viz. obrázek 3.1. Jedná se o zařízení, které na první pohled připomíná 3D tiskárnu typu delta. Disponuje třemi stupni volnosti. Pro testování pojme testovaný objekt velikosti chytrého telefonu nebo tabletu. Jeho konstrukce umožňuje velmi přesné polyby efektoru, což je výhoda pro obsluhu malých ikon. Na druhou stranu není univerzální pro zařízení s většími rozměry, které nemá jak otestovat, kvůli použité konstrukci. Dokáže obsloužit jak displeje, tak mechanická tlačítka. Jeho efektor může používat dva hroty najednou, takže podporuje i multi-touch. Pro testování jsou k dispozici i dvě kamery a počítačové vidění, které spolupracuje se zpětnou vazbou od efektorů. [19]



Obrázek 3.1: Nástroj Matt pro automatické testování zařízení s dotykovým displejem. [19]

Dalším příkladem je systém TOUCH od firmy OptoFidelity, viz obrázek 3.2. Mechanickou konstrukci tvoří stůl s portálem, na kterém je upevněný koncový efektor. Tato platforma opět disponuje třemi stupni volnosti. Jedná se o řešení, které je určeno spíše pro menší zařízení do velikosti laptopu. Tento systém umožňuje výměnu nástroje. Pohyb hrotů je realizován pomocí elektromagnetických aktuátorů. Podporuje testování gest jako je zvětšení, rotace nebo posunutí. Disponuje kamerou pro snímání obrazu. Pro vyhodnocení testu poskytuje report o přesnosti doteku, velikosti posuvu a další. Mezi nevýhody patří neschopnost testovat velká zařízení, která se nevejdou pod portál. [11]



Obrázek 3.2: Zařízení firmy OptoFidelity s názvem TOUCH pro testování zařízení s dotykovým displejem. [11]

Kolaborativní robot Panda na obrázku 3.3 od firmy WiredWorkers je svou konstrukcí nejvhodnější pro testování velkých zařízení, jako jsou kancelářské tiskárny, jelikož se jedná o klasický kloubový manipulátor. Díky svému provedení dokáže obsloužit zařízení s velkými rozměry a libovolným natočením displeje. Robot ovšem nedisponuje rozpoznáním obrazu, ani zpětnou vazbou od stylusu. Kvůli tomu je obtížné automaticky vyhodnotit výsledky testu. Výměna nástroje je možná, ale musí ji provést obsluha. Místo stylusu je možné osadit chapadlo. Stylus s více hroty v nabídce ale chybí, takže není možné testovat grafická rozhraní s podporou gest. Další nevýhodou je poměrně vysoká cena těchto kolaborativních robotů. [23]



Obrázek 3.3: Kolaborativní robot Panda od firmy WiredWorkers pro testování i velkých zařízení s dotykovým displejem. [23]

3.1.1 Zhodnocení systémů pro testování zařízení s dotykovým displejem

Je vidět, že většina systémů je navrhována především pro testování mobilních telefonů, tabletů a dalších menších zařízení, která je možné umístit pod portál stoje, nebo do přípravku, ke kterému je umístěn i testovací systém. Některá řešení podporují výměnu nástroje, poskytují zpětnou vazbu od efektoru a zvládají multi-touch. Zpravidla se ale jedná o systémy schopné testovat pouze menší zařízení. Průmyslové roboty, které by dokázaly pokrýt značné rozměry a variabilní umístění displeje na kancelářských tiskárnách tyto možnosti nemají. Jejich nevýhodou je také vysoká cena.

Kvůli tomu byl zkonstruován malý kloubový manipulátor, znázorněný na obrázku 3.4. Tento manipulátor je možné připojit k téměř libovolnému zařízení a náklady na jeho výrobu zbytečně nezvyšují cenu kompletního systému. Do této chvíle však trpěl stejnými neduhy jako řešení jiných výrobců a nebyl schopen poskytnout zpětnou vazbu od stylusu, nebo použít jiný nástroj, než pevný stylus s koncovkou pro dotyková pera. Tento robot využívá kameru ke snímání testované obrazovky a díky zpracování obrazu dokáže rozpoznat správný průběh testu. Případné chyby poté zdokumentuje, včetně fotografie vadné obrazovky a kompletní přehled o výsledcích testu sestaví do reportu.



Obrázek 3.4: Robotické rameno pro testování zařízení s dotykovým displejem od firmy Y Soft.

3.2 Automatická výměna nástroje

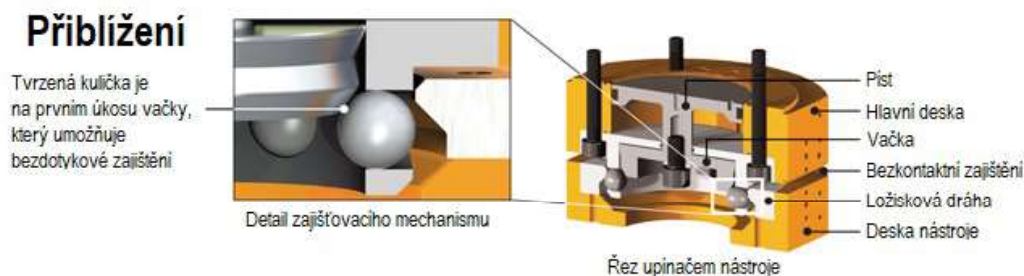
Automatická výměna nástroje je klíčová vlastnost pro testování objektů, které obsahují displej, ale také mechanická tlačítka, případně kodéry, které mohou sloužit pro nastavení hlasitosti. Nástroj Matt, viz. obrázek 3.1, od firmy Rinf tech má efektor, který obsahuje dva hroty a podle potřeby umí jeden vysunout. Při klasickém klikání je aktivní pouze jeden hrot a v případě nutnosti multi-touch je vysunut i druhý. Klasickou výměnu nástroje ale toto řešení nepodporuje, což vyplývá ze sortimentu testovaných objektů, který se skládá převážně z mobilních telefonů.

Řešení Touch na obrázku 3.2 k výměně nástroje přistupuje svým způsobem a to tak, že mění pouze koncovku. Nejedná se tedy o výměnu nástroje v pravém slova smyslu, jelikož efektor zůstává stejný, ale mění se pouze hrot stylusu podle konkrétní potřeby. Nicméně zásobník pro náhradní hroty je velmi podobný zásobníkům používaným u cnc frézek.

3.2.1 Upínač

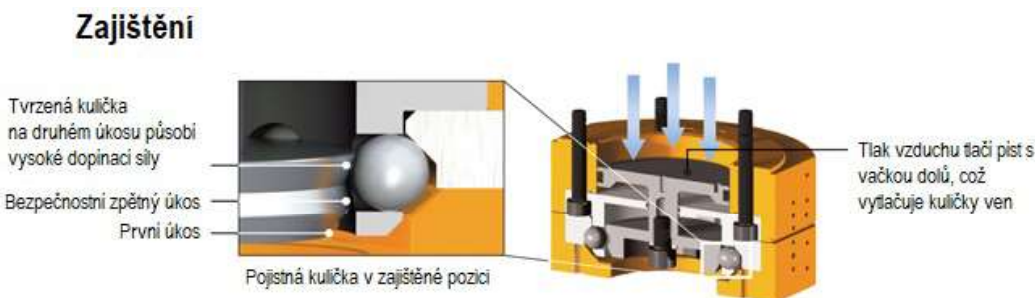
S automatickou výměnou nástroje úzce souvisí konstrukce upínače. Tento díl má dvě funkce. První z nich robustní a přesné spojení robota a efektoru. Tou druhou pak spojení elektrických rozvodů, případně těch pneumatických. Elektrické vodiče často slouží pro přenos signálů od senzorů, nebo naopak k elektrickým aktuátorům. Stlačený vzduch se využívá zejména pro zajištění upínače proti rozpojení. Toto řešení má výborný poměr hmotnosti

a výkonu. Některé efekторы na stlačený vzduch používají pro pohon aktuátorů různých chapadel. Na obrázku 3.5 je vidět systém upínače od firmy ATI. Tato firma vyrábí celou škálu upínačů, které se liší především velikostí, ale jejich princip bývá podobný. Princip činnosti je nejvíce patrný z obrázku. Část upínače na robotu obsahuje čepy, které zamezí pohybu v osách x , z a rotaci kolem podélné osy. Uprostřed upínače se nachází píst ovládaný tlakovým vzduchem. Ten se stará o pevné spojení obou částí.



Obrázek 3.5: Průmyslový upínač od firmy ATI s pneumatickým aktuátorem. [2]

Drážka na dílu robota má tvar V a zkosenou hranu pro snadný náběh, viz. obrázek 3.6. V těle je po obvodu několik otvorů pro kuličky. Díl nástroje má opět V drážku, tentokrát na vnitřním obvodu těla. Jakmile dojde ke spojení obou částí, otvory s kuličkami a drážka v těle dílu nástroje jsou ve stejné rovině. Poté začne působit tlak vzduchu na píst a vlivem jeho geometrie jsou kuličky částečně vytlačeny do drážky nástroje. Tím zajistí oba díly. Při provozním tlaku je vlivem geometrie drážky na pístu vytvářen tlak na kuličky a tím dochází k vymezení vůle spoje. V případě ztráty tlaku v systému poté kulička vytlačí píst o něco výš a dostane se do nejnižšího místa drážky na pístu, poté už nemá kam dále ustoupit a oba díly zůstávají i nadále bezpečně spojeny, pouze vznikne malá vůle. To ale není problém, jelikož se již nejedná o provozní stav systému. Pro odjištění je potřeba vytvořit tlak v komoře pod pístem a ten vytáhnout nahoru tak, že mohou kuličky zajet zpátky v jejich otvoru.



Obrázek 3.6: Průmyslový upínač od firmy ATI s pneumatickým aktuátorem. [2]

Jiným příkladem systému upínání je Smartshift od firmy Smartshift robotics, znázorněný na obrázku 3.7. Tento model je možné využít pro automatický i manuální způsob výměny. Elektrické spojení je zde řešeno pomocí pružinových kontaktů podobně jako u dalších modelů. Nicméně tento je zajímavý použitou geometrií, jelikož využívá rybinovou drážku, jejíž tvarové plochy nejsou rovnoběžné, ale svírají spolu jistý úhel. To přináší toleranci vůči přesnosti navedení při spojování obou částí a právě tato vlastnost byla od našeho upínače vyžadována. Neméně zajímavou částí je systém zajištění. Využívá velmi elegantní a jednoduché řešení čepu předpjatého pružinou, který zapadne do otvoru v protikus. K čepu je připevněn bílý talíř. Jakmile je nástroj vsunut do zásobníku, talíř zapadne do vidlice, viz. obrázek 3.8, která je na čepu a vlivem působící síly vykoná rotační pohyb, talíř stáhne dolů i s čepem a dojde k odjištění mechanismu. Velikou výhodou je provedení nezávislé na tlakovém vzduchu, motoru, nebo jakémkoli jiném přídavném zařízení pro ovládání zajišťování. Nevýhodou může být nutnost větší síly robota.



Obrázek 3.7: Průmyslový upínač od firmy Smartshift robotics s rybinovou drážkou. [15]



Obrázek 3.8: Držák nástrojů od firmy Smartshift robotics s automatickým povolením nástroje. [15]

3.2.2 Zhodnocení dostupných upínačů

Pro využití se Smart stylusem bude nutné navrhnout vlastní řešení, jelikož na trhu není dostupné žádné, které by splňovalo rozměrové požadavky a nevyžadovalo k obsluze stlačený vzduch. Z upínače Smartshift, viz. obrázek 3.7, je možné převzít myšlenku tvarového spoje, který je schopný fungovat i ve spojení s méně přesným manipulátorem. Stlačený vzduch k ovládní upínače není možné využít, protože robot jím nedisponuje. Stejně tak nelze převzít mechanismus Smartshift, protože vyžaduje vyšší ovládací sílu. Ovládní upínače bude pravděpodobně zajišťovat servomotor umístěný mimo vlastní rameno a efektor, aby nezvyšoval hmotnost systému, což by mělo negativní vliv na přesnost a dynamiku robota.

3.2.3 Zásobník nástrojů

Zásobníky nástrojů na velkých průmyslových zařízeních, jako jsou CNC obráběcí centra, často tvoří značnou část stroje. Mnohdy pojmu velké množství nástrojů, což se dále liší podle jejich konstrukce. Menší stroje mívají zásobníky pevné o několika pozicích, viz. obrázek 3.9. Jedná se v podstatě o lištu s otvory, přičemž každý otvor je opatřen mechanismem pro pojištění nástroje proti vypadnutí. V tomto případě není možné, aby byl zásobník úplně krytý, protože obráběcí, nebo jiný stroj musí být schopen se dostat ke každé pozici. V případě, že není instalováno nějaké pomocné zařízení si musí nástroj sám vyměnit. Díl, který přímo drží nástroj bývá vyrobený ze silonu. Silon je totiž velmi odolný materiál, ale je měkčí, než materiál upínače nástroje, takže nehrozí poškrábání, nebo jiné poškození.



Obrázek 3.9: Pevný zásobník nástrojů cnc frézky. [16]

Dalším typem zásobníku, který se používá u obráběcích center, je pohyblivý zásobník, viz. obrázek 3.10. Obráběcí centra jsou z pravidla kompletně zakrytá a to včetně zmíněného zásobníku. K němu bývá přístup ze zadní části stroje. Pokud je potřeba vyměnit používaný nástroj, hlava stroje vždy zajede na stejné místo. Zásobník je pohyblivý a nástroj, který bude použit je předem připravený na pozici, odkud jej vezme pomocné rameno a během jednoho úkonu vymění za dosavadní nástroj. Jedná se tedy o jakýsi oběžný pás, kde jsou pozice umístěny po jeho obvodu. Tímto systémem je možné dosáhnout vysoké rychlosti výměny a také je snazší vyřešit zakrytí stroje. Tyto zásobníky dosahují vysoké kapacity nástrojů, což zvyšuje produktivitu stroje a není nutné přerušovat práci na složitém obrobku kvůli chybějícímu nástroji. Tyto zásobníky se tedy využívají převážně ve výrobcích s vysokou mírou automatizace a schopností zpracovat širokou škálu obrobků. Obrázek pohyblivého zásobníku je níže.



Obrázek 3.10: Posuvný zásobník nástrojů obráběcího centra. [4]

3.2.4 Zhodnocení dostupných zásobníků nástrojů

Jednodušší stroje využívají pevné zásobníky, které se vyznačují snadnou konstrukcí. Jejich nevýhodou je omezené množství nástrojů. To je dané rozměry konkrétního stroje. Obráběcí centra využívají pohyblivé zásobníky, které pojmu větší množství nástrojů. Na druhou stranu mají složitější konstrukci. Zásobník nástrojů bude pro potřeby prototypu pevný s pozicemi pro základní nástroje. Pohyblivý zásobník s větší kapacitou může najít uplatnění až bude systém odladěn a budou jasné definované způsoby testování.

Kapitola 4

Návrh koncového efektoru

Koncový efektor robota musí zvládnout detekovat dotyk na displej a určit jeho sílu. Dále musí komunikovat s robotem přes sériovou linku. Jeho rozměry by neměly přesáhnou pomyslný kvádr 40 mm × 40 mm × 80 mm. Maximální síla, pro kterou bude měřící navržen je 7 N. Maximální hmotnost není přímo určena. Veškeré komponenty by ale měly být navrženy co možná nejlépe.

Koncový efektor se skládá z řetězce měření síly, elektroniky a upínače.

4.1 Konstrukce stylusu

Při návrhu konceptu celého zařízení bylo nutné vycházet z požadavků pro danou aplikaci. Robot, pro který je stylus navrhován byl od začátku vyvíjen na míru s co nejjednodušší konstrukcí. Je složen ze čtyř servomotorů Dynamixel XM430-W210-R, které jsou spojeny výpalky z nerezového plechu tloušťky 1.5 mm a dohromady tvoří tělo robota. Celek je smontován pomocí šroubů. Pohon první osy je připevněn opět pomocí plechového ohybku k fotografickému stativu. Předností tohoto řešení je vysoká variabilita nastavení polohy robota, která je vyžadována kvůli rozmanitosti testovaných zařízení. Robot tedy neoplývá přílišnou tuhostí a přesností. Jelikož je stylus tím úplně posledním článkem na rameni, jeho hmotnost přímo a velmi zásadním způsobem ovlivňuje dynamiku a přesnost celého robota. V tomto konkrétním případě je právě hmotnost skutečně kritickým parametrem. Pohon byl navrhován pro koncový efektor tvořený pouze malým plastovým výtiskem o hmotnosti několika málo gramů, jehož součástí je již pouze komerční gumová koncovka, potažená vodivou tkaninou, vhodná pro ovládání dotykových displejů. Pro nové řešení bude klíčové vhodně zvolit použité materiály. Stejně tak i design musí být maximálně funkční a jednoduchý, bez zbytečných prvků. Tyto podmínky si žádaly navrhovat celý produkt od začátku jako celek. Nebylo možné přistoupit k jednotlivým částem izolovaně a na závěr je nějakým způsobem spojit. Po celou dobu byl brán zřetel na velikost a tvar desky plošných spojů, umístění a princip mechanismu výměny efektoru a elektrické spojení, které musí být taktéž automaticky rozpojitelné. Kvůli tomu, jak na sebe jednotlivé části navazují a vzájemně se ovlivňují, bylo zapotřebí několik iterací každého dílu, než bylo dosaženo prvního funkčního prototypu.

Řešení jiných výrobců většinou připomínají CNC portálové stroje, kde se na stůl položí testované zařízení a nad ním se pohybuje masivní portál se zařízením pro ovládání dotykového displeje, případně i hardwarových tlačítek. To bývá vyrobené kompletně z kovu, často při použití přesného lineárního vedení. Jsou to řešení vhodná pro testování malých zařízení,

kteřá se vejdou pod portál stroje a jejich obsluha stylusem probíhá z vrchu. Typickým případem jsou mobilní telefony a tablety. Robot většinou nemá zpětnou vazbu o provedeném kliknutí a ani optická kontrola nebývá implementována. V našem případě se testují zpravidla tiskárny, které se velmi liší jak tvarem samotného těla, tak tvarem, umístěním a natočením displeje. Mimo displej bývají tiskárny vybaveny i mechanickými tlačítky, které je nutné taktéž obsloužit. Stejně tak je potřeba mít řešení, které lze přidat k tiskárně, protože manipulace s těžkým strojem není praktická. Tiskárny bývají umístěny v kancelářích v přímé blízkosti lidí. Z toho důvodu je využita koncepce vlastního kloubového manipulátoru, která je velmi flexibilní v obsluze nejrůznějších poloh.

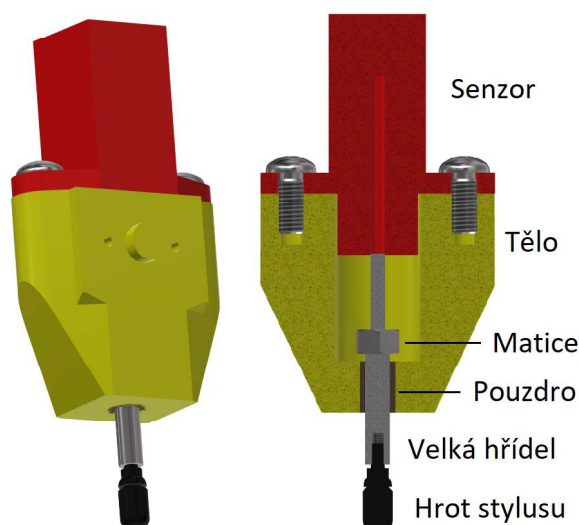
Zásadním bodem návrhu, od kterého se celá konstrukce odvíjí je volba senzoru pro snímání síly. Prvním nápadem, který se také otestoval, byl lineární potenciometr. Jedná se o obdobu klasického potenciometru, jehož dráha ale není kruhová, nýbrž lineární. Lineární potenciometr má několik výhod. Jeho konstrukce již obsahuje posuvnou hřídelku, ke které se snadno přidá nástavec, na který je možné přidělat hrot stylusu. Zároveň má přiměřeně dlouhý chod, takže není nutné jej dále přizpůsobovat. Při využití potenciometru není možné přímo měřit sílu, ale pouze elektrické napětí na vstupu AD převodníku. To ale není velký problém. Stačí změřit tuhost pružiny, která je v něm nainstalována, například pomocí přesné váhy. Měření by probíhalo asi takto: Potenciometrem působíme na váhu tak, že je hřídelka plně zasunuta a odečteme hmotnost. Tu vydělíme gravitačním zrychlením g a získáme sílu. Změříme délku chodu hřídelky a dosadíme do vzorce:

$$k = F/x \tag{4.1}$$

kde k je tuhost pružiny [N/m], F je působící síla [N] a x je dráha hřídelky [m]. Při tomto měření je potřeba dát pozor, abychom potenciometr nezmačkli moc, protože by se hřídelka zastavila o doraz a měření by bylo zkreslené. Jelikož nám ale nejde o vysokou přesnost v absolutní hodnotě síly, ale spíše její změnu, toto orientační měření by bylo možné využít. Jakmile je určena tuhost pružiny, tak se z měřeného napětí dá určit síla. Rozsah měření potenciometru je 0 V až vstupní napětí. Tomu přímo úměrně odpovídá hodnota 0 až 1023, protože v mikrokontroléru je 10bitový AD převodník. Výstupu z převodníku přímo úměrně odpovídá míra zasunutí hřídelky. Tuto vzdálenost již stačí dosadit do vzorce uvedeného výše a tím určit působící sílu.

Do této chvíle se zdá lineární potenciometr jako ideální řešení, ale ukázalo se, že pružina v něm je příliš tuhá a je potřeba poměrně značná síla pro odtržení do zdvihu, což by mohlo způsobit v reálném provozu problém. Dalším problémem byl hrubý chod hřídelky, při kterém bylo cítit přejíždění závitů potenciometru. Od tohoto řešení se tedy ustoupilo z důvodu nedostatečné citlivosti.

Pro testování bylo potřeba senzor připevnit k robotu, nebo testovací stoličce, proto bylo navrženo tělo, viz. obrázek efektoru 4.1. Zároveň není možné na displeji klikat přímo ostrou kovovou hřídelkou, nýbrž hrotem stylusu, který bylo také nutné připevnit. Hrot je zakončen vnějším závitem M2,5x0,35 o délce 4 mm. nejdříve byla vyrobena hliníková hřídelka, která má jeden vnitřní závit, do kterého se umístí hrot a na druhé straně vnější závit M5. Hřídelka se pohybuje v kluzném pouzdře s teflonovou úpravou třecí plochy pro hladký chod. Na vnějším závitě je našroubována matice, která brání hřídelce proti vypadnutí dolů. Shora na ni tlačí hřídelka potenciometru. Celou tuto sestavu drží v celku plastové tělo, ve kterém je zalisováno pouzdro a nahoře je přišroubován senzor. Jedna boční plocha je také přizpůsobena k přišroubování na poslední díl robotického ramena. Plastové tělo bylo vytisknuto na 3D tiskárně. Jednoduchý test spočíval v ručním klikání efektozem na displej a pozorováním odezvy displeje.



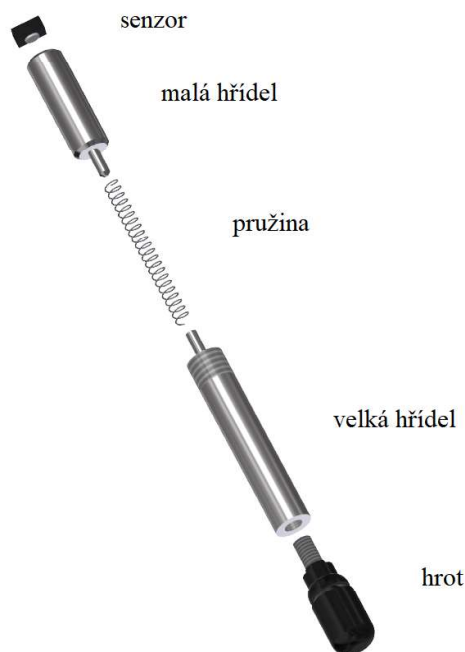
Obrázek 4.1: Stylus s lineárním potenciometrem.

Dalším typem senzoru, který připadal v úvahu byl piezorezistivní senzor, konkrétně od firmy ALPS. Jedná se o piezorezistivní můstek na membráně. Jeho odpor se mění v závislosti na zatížení, které působí na membránu. Tento typ senzoru se vyznačuje velice příznivou velikostí, která bývá podle typu v řádech milimetrů. Další výhodou je vysoká citlivost, senzor dokáže detekovat zatížení o velikosti 1g. Životnost takového senzoru je až milion cyklů, při dodržení zatížení v povoleném rozsahu, což je při průmyslovém využití velmi důležité. Jeho tělo je zároveň navrženo tak, že při použití nadměrného zatížení se působící těleso zastaví o jeho výstupky, které vydrží až 200 N. Díky tomu je obtížné při běžném provozu senzor zničit. Tento typ senzoru se také využívá v dotykových perech pro tablety a podobnou elektroniku. Pohony robota umí měřit procházející proud, takže by bylo možné detekovat nadměrnou sílu, ale tato kontrola by musela být implementována do systému robota.

Jeho drobnou nevýhodou proti lineárnímu potenciometru je nutnost použít operační zesilovač, což komplikuje návrh elektroniky a vyžaduje více místa na desce plošných spojů. Další nevýhodou, která přímo vyplývá z principu měření je, že jeho membrána se deformuje v rozsahu pouze asi 0.2 mm, kdežto pohyb hrotu stylusu je žádoucí mít v rozsahu asi jeden až dva centimetry. Výhody ale převážily a proto se tento senzor ujal jako základní stavební kámen celého systému.

Následně bylo nutné zkonstruovat systém, který převede požadovaný chod hrotu na menší chod senzoru. Pro tento úkol se nabízelo využít pákový mechanismus, který by ovšem musel být velmi přesný a jistou limitaci by mohly způsobit jeho zástavbové rozměry. Další možností bylo využití pružiny s adekvátními rozměry a tuhostí. Hrot působí na pružinu, která se deformuje a sílu přenáší na senzor, ale pouze s velikostí pohybu, jaká odpovídá tuhosti membrány senzoru. Tato varianta se nakonec u prototypu využila. Následně bylo třeba zajistit lineární pohyb hrotu pro dotyk s displejem. Průmyslová lineární vedení by se teoreticky přímo nabízela, nicméně jsou pro naše účely příliš masivní a rozměrné. Z toho důvodu se přistoupilo k návrhu vlastního řešení. Jelikož nebylo potřeba řešit natočení kolem svislé osy stylusu, protože hrot je symetrický podél svislé osy a jeho rotace nemá vliv

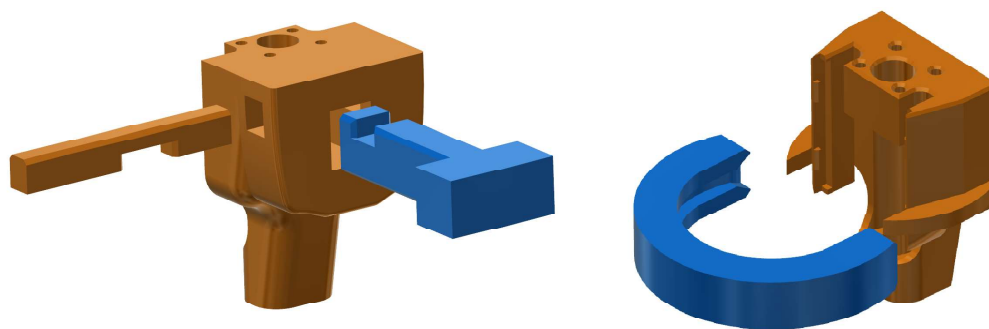
na dotyk, tak se využila hřídelka a kluzné pouzdro s teflonovou úpravou třecí plochy, viz. obrázek 4.2. Tento systém by měl zajistit hladký chod a díky své jednoduchosti také spolehlivost. Na výrobu hřídelky byl využit hliník, zejména pro snadnou dostupnost, zpracování a dostačující mechanické vlastnosti. V průběhu konstrukce celého systému bylo potřeba brát v potaz zejména potřebu co nejnižší hmotnosti. V budoucnu a případné sériové výrobě je možné použít i jiný materiál. Na obrázku níže je vidět mechanická část měřícího řetězce.



Obrázek 4.2: Řetězec přenosu síly z hrotu stylusu na piezorezistivní senzor.

Spodní konec velké hřídele je opatřen vnitřním závitem M2,5x0,35, který slouží pro uchycení pružné vodivé koncovky stylusu pro obsluhu displeje. Na druhém konci je vnější závit M5, který spolu s nízkou maticí slouží jako doraz proti vypadnutí hřídelky z uložení. Také se jím dá nastavit předpětí pružiny. Dále se na této straně nachází tenký čep, který slouží jako vodítko pro pružinu, aby se neohýbala. Protože není možný přímý kontakt pružiny na senzor, byla do řetězce přenosu síly přidána malá hřídelka, která má na starost přenos síly z pružiny na senzor. Dále zajišťuje nezbytnou souosost působící síly a působíště na senzoru. To je přímo vyžadováno v technickém listu senzoru, aby nedocházelo k chybě měření, například vlivem rozložení síly do těla senzoru. I tato hřídel je uložena ve vlastním kluzném pouzdru s teflonovou úpravou třecí plochy, aby nedocházelo k nadměrným ztrátám třením. Rozměry jednotlivých částí byly voleny jednoduše podle požadovaného chodu koncového bodu a kupovaných součástí. To znamená, že bylo vybráno pouzdro s vhodným průměrem, do kterého se vejde tělo senzoru a délkou, u které se již předpokládalo dobré směrové vedení. Dále byla vybrána z katalogu pružina s vhodnou tuhostí a délkou, která koresponduje s požadovaným chodem. Při prvních pokusech bylo zvoleno několik pružin s různými parametry a na základě testování byla určena ta nejvhodnější. V tuto chvíli nešlo o přesné výpočty, jako spíše o pocit, aby dotyky stylusu připomínaly ty lidské.

Celý tento řetězec sloužící k přenosu osově síly z konce nástroje na senzor, bylo nutné obalit tělem, které plní zároveň funkci nosiče elektroniky, systému výměny nástroje a systému pro uchycení efektoru v zásobníku nástrojů. Design těla prošel několika vývojovými fázemi, viz. první verze efektoru na obrázku 4.3. Základní rozměry byly od začátku dané řetězcem přenosu síly, ale samotný tvar je ovlivňován tvarem a velikostí desky plošných spojů, která se v průběhu několikrát změnila, například kvůli použití jiného procesoru, nebo jiné metody elektrického spojení robota a nástroje. Dalším faktorem, který má zásadní vliv na tvar těla je systém upínání nástroje a zásobníku, které také prošly několika vývojovými fázemi.

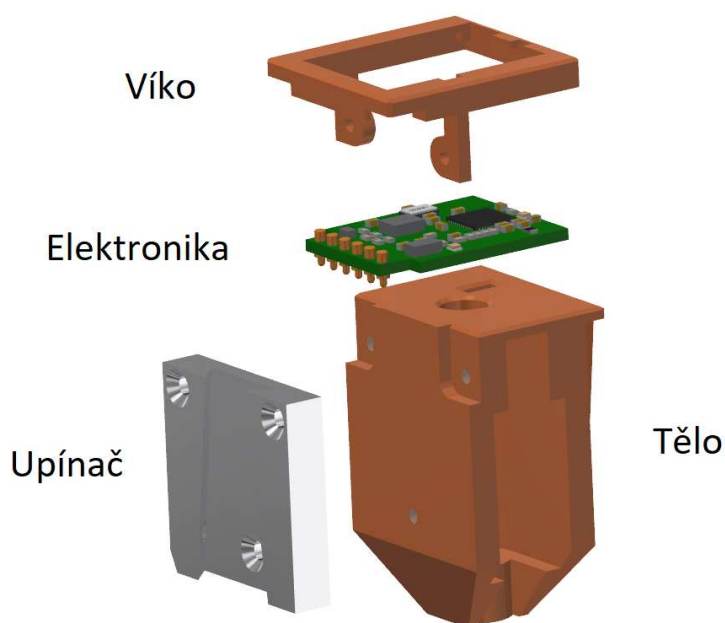


Obrázek 4.3: První verze systému upínání a zásobníku nástrojů.

Základním předpokladem pro design byl fakt, že tento díl bude vytvořený pomocí 3D tisku plastu. Tato technologie výroby odbourala překážky konvenční výroby tvarově složitých dílů. Tím pádem bylo možné tělo maximálně přizpůsobit daným požadavkům. Zpočátku se zdálo, že bude možné do těla integrovat i systém výměny nástrojů, nicméně se ukázalo, že lepší variantou je kovový mechanismus, viz. obrázek 6.1. Především kvůli mechanické odolnosti a přesnosti spojení s minimální vůlí po zajištění. Prvek umožňující uchycení v zásobníku nakonec zůstal součástí plastového výtisku, jelikož na něj nejsou kladeny takové nároky. Pro spojení kovového vodícího pouzdra a plastového těla se nabízel několik variant, například lepení, nebo lisování. U prototypu, viz. obrázek 4.1, bylo využito tepelných vlastností plastu a pouzdro bylo nahřáto na teplotu měknutí materiálu a následně zalisováno. Tento spoj má pro dané použití dostatečné mechanické vlastnosti i rozměrovou přesnost. Velikost přesahu otvoru v plastovém těle byla zvolena na základě testů, jelikož 3D tiskárny typu FDM nedisponují dostatečnou přesností, aby bylo možné spoj navrhnout výpočtem.

Poslední prototyp, který vznikl během psaní práce je na obrázku 4.4. Deska plošných spojů, obr. 4.11, je zde umístěna nahoře, protože na její spodní straně je zároveň senzor, který je v ose kluzného pouzdra. Na čelní ploše je rybinová drážka pro uchycení v zásobníku nástrojů. Proti ní je rovná plocha s otvory, které slouží pro přišroubování kovového dílu upínače a zároveň víka elektroniky. Šrouby mají metrický závit a šroubují se přímo do plastu. Jedná se o jednoduchou a osvědčenou metodu, která je vhodná pro aplikace, kde se nepředpokládá časté rozebírání. Při první montáži si šroub prořízne závit. Díra má tedy menší průměr, než je průměr šroubu přes závit. Tímto způsobem vznikne samojistný spoj, protože se plast při šroubování nataví a závit šroubu obalí. Při častější demontáži by se

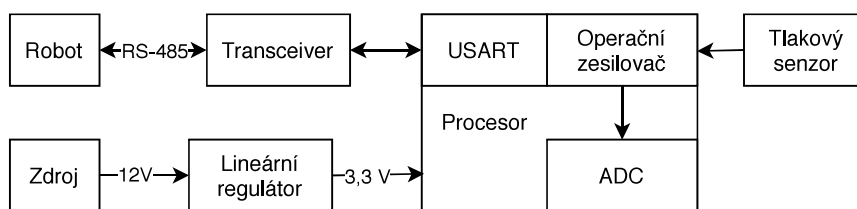
ovšem vlivem tepla vznikajícího třením a také mechanickým otěrem plast zdeformoval a závit by nebyl spolehlivý. Elektronika je shora kryta víkem, které ji zároveň drží ve správné pozici. Vrchní plocha těla je hladká, deska plošných spojů se vloží do víka a tato sestava je poté k tělu připevněna šrouby, které drží upínač. Toto řešení je velmi elegantní, protože nejsou potřeba další spojovací prvky a konstrukce tak zůstává maximálně čistá. Z vnější strany pak nejsou žádné šrouby vidět. Víko musí elektroniku držet přesně a pevně, jelikož elektrické spojení mezi nástrojem a robotem je realizováno pomocí pružných kontaktů, které vždy musí dosednout na plošky protikusů na robotu. Zároveň víko musí vydržet sílu od stlačených kontaktů při zajištění nástroje. Kvůli testování a nutnosti připojení programovacích konektorů k desce plošných spojů má prototypové víko uprostřed otvor. Pro reálné nasazení se tento otvor nevažuje, aby byla elektronika chráněna proti vniknutí cizího předmětu. Viditelné budou pouze LED diody, které indikují stav.



Obrázek 4.4: Tělo koncového efektoru s elektronikou a částí upínače.

4.2 Návrh elektroniky pro Smart stylus

Na schématu 4.5 je vidět propojení základních celků elektroniky.



Obrázek 4.5: Blokové schéma navrhované elektroniky.

Elektronika bude sloužit pro účely měření síly a komunikaci se systémem, tomu odpovídá základní koncepce a výběr jednotlivých součástek. Základem celé elektroniky je procesor, který musí zvládnout získávat data z měřícího řetězce a podporovat komunikaci po sériové lince, viz. 4.5. Na elektroniku již v tomto případě nejsou kladeny další speciální požadavky. Vedlejší funkcí je indikace stavu, například prostřednictvím LED diod. Ty mohou signalizovat probíhající komunikaci nebo měření.

První prototyp, obr. 4.1, vznikl na základě lineárního rezistoru jako senzoru síly, ale jak už bylo řečeno, od této varianty bylo upuštěno a využil se piezorezistivní senzor. Lineární rezistor by byl jednoduchý na implementaci ale jeho rozměry a hmotnost neodpovídali představám o elegantním výrobku minimálních rozměrů. Dalším problémem byla potřeba příliš velké síly pro jeho stlačení. Jeho chod by musel být upraven dalším mechanismem, což by konstrukci zkomplikovalo a opět by se zvýšila hmotnost. Při návrhu elektroniky bylo třeba uvažovat zejména tři hlavní předpoklady:

- piezorezistivní senzor jako snímač síly,
- mikroprocesor řady STM32,
- komunikace po sériové lince.

Od těchto základních bodů poté byly odvozeny ostatní nutné prvky, jako třeba operační zesilovač pro senzor, transceiver pro komunikaci a podobně. Rozměry desky plošných spojů a její tvar se měnil v závislosti na jejím umístění a také mechanismu elektrického spojení robota a nástroje. Také u senzoru se uvažovala varianta, kdy by byl umístěn na vlastní malé desce. Tím by se zabránilo zkreslení měření při případné deformaci desky během přitahování nástroje, které by mohlo způsobit i deformaci senzoru. Nevýhodou tohoto řešení by byly větší zástavbové rozměry a riziko dalších přechodových odporů na pájeném spoji mezi deskami. Nakonec se uplatnila varianta senzoru umístěného na spodní straně hlavní desky. To přineslo komplikaci při pájení oboustranné desky, ale výhody v podobě menších rozměrů a spolehlivější spoj mezi senzorem a operačním zesilovačem převážily drobné komplikace při výrobě.

4.2.1 Procesor STM32

V průběhu vývoje elektroniky vzniklo vícero verzí s různými mikroprocesory. Ne tak kvůli vlastnostem, které ovlivňují použití pro účel Smart stylusu, ale hlavně z důvodu, že se hledal vhodný model, který by mohl být použit ve všech aplikacích, které celý systém robota

zahrnuje. Jinak by se zbytečně rozrůstal seznam skladových zásob. Jako základ byl použit procesor z řady STM32. Tyto procesory disponují dostatečným výkonem, širokou paletou periférií a v neposlední řadě také značnou uživatelskou přívětivostí. Toto jsou důvody všeobecné oblíbenosti dané rodiny. Procesory STM je možné programovat pomocí prostředí Atollic Studio, které je vyvíjeno ve spolupráci s firmou STMicroelectronics, nicméně se dají využít i jiná prostředí, jako například Microsoft Visual Studio, kde je ale nutné využít doplněk VisualGDB pro programování vestavěných zařízení. Metody programování těchto procesorů jsou v podstatě tři. První je CMSIS. Jedná se asi o nejpracnější způsob, jelikož spočívá přímo v zapisování a čtení registrů. S tím souvisí nutnost neustálé kontroly funkce jednotlivých bitů v technickém listu. Své uplatnění může nalézt v projektech vázaných především na hardware, kde se pracuje s perifériemi procesoru. Druhou možností je využití LL API, neboli nízkourovňových knihoven. Tato metoda je velmi vhodná pro práci s perifériemi, protože umožňuje využít všechny jejich možnosti i přes to, že již není třeba pracovat přímo s registry. Nevýhodou je složitější migrace programu na jiný procesor. Poslední variantou jsou HAL API (High Abstraction Layer), neboli vysokoúrovňové knihovny. Práce s nimi je nejrychlejší, protože není třeba pracovat s perifériemi tak podrobně, na druhou stranu ale není možné využít jejich plný potenciál. Takovýto program se dá nejspíše z uvedených možností transformovat pro jiný procesor. Každý programátor, který pracuje s procesory STM32 si může vybrat způsob, jakým k programování přistoupí podle aktuální situace, což je určitě další výhodou této řady. [6]

Požadavky na procesor:

- ADC,
- vestavěný operační zesilovač,
- USART s podporou rychlosti 2 Mbit/s,
- budič externího krystalu,
- debugovací rozhraní,
- DMA.

Na základě těchto požadavků a dalších, díky kterým obtojí i v ostatních aplikacích potřebných pro systém robota byl vybrán model STM32G473CEUx. Tyto procesory obsahují jádro arm, což jsou jádra s architekturou pro zmenšený instrukční set vhodná pro nejrůznější uplatnění. Firma ARM Holdings vyvinula tuto architekturu a pod licenci ji prodává dalším firmám, které na ní staví vlastní produkty. Procesory s touto architekturou obvykle vyžadují méně tranzistorů, než ty s architekturou pro komplexní instrukční set. To snižuje cenu výrobku i spotřebu energie. Tyto vlastnosti je předurčují pro aplikace v různých vestavěných systémech, i těch napájených z akumulátorů. Vybraný model disponuje 32 bit jádrem M4 s frekvencí až 170 MHz a podporou plovoucí desetinné čárky. Je možné ho napájet napětím v rozsahu od 1.71 do 3.6 V. Disponuje flash pamětí o velikosti 512 kB. Důležitým parametrem je podpora externího budiče, který je nezbytný pro komunikaci na vysokých rychlostech, jelikož zvyšuje přesnost hodin procesoru. Zde byl využit krystal s frekvencí 16 MHz. Tento procesor obsahuje také operační zesilovač, který by teoreticky bylo možné použít pro zesílení signálu ze senzoru. V technickém listu senzoru je ale doporučený konkrétní zesilovač, který by měl být využit, aby se zabránilo případným problémům s nedostatečnou přesností. Klíčovým prvkem pro měření je AD převodník. Procesor obsahuje pět 12bitových AD převodníků s rychlostí převodu 0.25 μ s. [18]

Pro komunikaci s robotem je využito rozhraní USART, viz. obrázek 4.5. Jedná se o rozhraní pro asynchronní sériovou komunikaci. Poskytuje řízení CTS (Clear to send) a RTS (Request to send) signálů, které se využívají v standardu RS-485. Pomocí těchto signálů se řídí provoz na lince, aby nedocházelo k vysílání z více zdrojů najednou. Pro určité aplikace se může hodit automatická detekce baud rate. Když neznáme přesnou hodnotu, procesor sám pozná, na jaké rychlosti komunikace probíhá. [18]

4.2.2 Senzor pro měření síly

V první verzi efektoru byl použit lineární rezistor, u kterého byla změřena tuhost pružiny, kterou obsahuje a z měřeného odporu, neboli polohy koncového bodu byla určena působící síla. Tento senzor byl ale v dalších verzích nahrazen piezorezistivním senzorem z důvodu jeho značné velikosti a nedostatečné citlivosti.

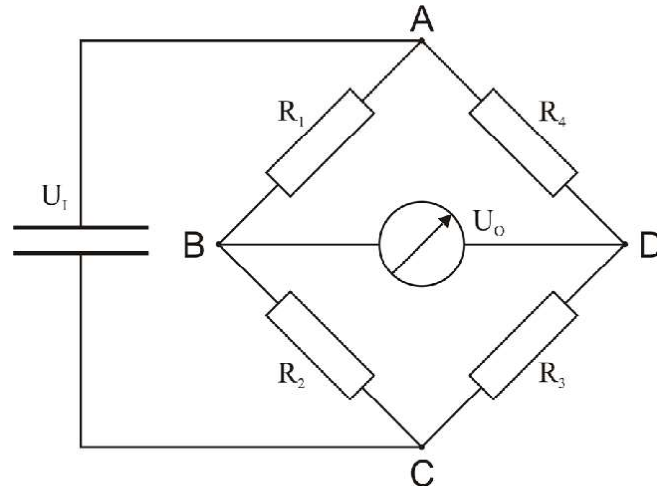
Nejedná se o piezo senzor, který pracuje na principu piezoelektrického jevu. Piezo senzory také umí měřit pouze změny působení na krystal, protože při dlouhodobém působení se výstupní napětí zmenšuje. Piezorezistivní tenzometry jsou nejpoužívanějším typem tlakových senzorů. Pro jejich činnost je nutné napájení, což zvyšuje energetické nároky systému, ale je možné pomocí nich měřit absolutní tlak i přetlak. Základním principem piezorezistivního senzoru je využití tenzometru vyrobeného z vodivého materiálu, který mění svůj odpor v závislosti na zatížení.

Na změně odporu vodiče se podílejí tři hlavní složky:

- odpor vodiče závisí na jeho délce, když se natahuje, tak odpor roste,
- prodloužení vodiče způsobí zmenšení jeho průřezu, což opět zvyšuje odpor,
- některé materiály mění svůj vnitřní odpor v případě, že jsou natahovány.

Poslední bod, piezorezistivní efekt, se u různých materiálů velmi liší. U kovových tenzometrů má dominantní vliv na velikost jejich odporu změna geometrie, naopak u polovodičů, například křemíku, má piezorezistivní efekt řádově větší účinek, než změna geometrie. Charakteristika měřicího elementu může být upravena přísadami, které tento efekt podporují. Na druhou stranu přísady také zvyšují citlivost na teplotě. Jednotlivé piezorezistivní elementy bývají napařeny na pružnou membránu, kde dohromady tvoří Wheatstoneův můstek. [3]

Wheatstoneův můstek, obr. 4.6, je elektrický obvod sloužící pro měření odporu a jeho malých změn, respektive převádí malé změny velikosti jednotlivých odporů na velké změny výstupního napětí. Skládá se ze čtyř rezistorů. Napájecí napětí je přivedeno do uzlů A a C, zatímco výstupní napětí je měřeno mezi body B a D. Můstek se skládá ze dvou větví, na obrázku 4.6 první větev z rezistorů R_1 a R_2 a druhá větev R_3 a R_4 . Tyto větve jsou v podstatě děliče napětí. V případě, že je most vyvážen, mezi body B a D neteče žádný proud a napětí mezi nimi je nulové. Tím pádem i odpory R_2 a R_3 se musí rovnat. [13]



Obrázek 4.6: Wheatsonuv můstek využitý v piezo senzoru. [22]

Bylo nutné zvolit senzor s odpovídajícím rozsahem pro testování displejů. Zadání vyhovělo více typů, ale použit byl model HSPAR004A od firmy ALPS, který je přímo navržený pro aplikaci v dotykových perech pro chytré telefony a tablety. Tam se ovšem využívá montovaný inverzně, to znamená, že ve výchozím stavu na něj působí síla od předpnuté pružiny a na výstupu vykazuje maximální napětí. Při dotyku pera na displej je pružina přetlačována a napětí na výstupu se zmenšuje. Takový způsob má smysl zejména jako ochrana před zničením při použití nadměrné síly uživatele na dotykové pero. Taková montáž by ale v případě Smart stylusu byla náročná na místo a přidala do konstrukce několik dalších elementů, protože by se musel převést požadovaný rozsah pohybu koncového bodu na malý krok senzoru. Robot také nemá takovou sílu, aby mohl senzor zničit. Proto byla zvolena klasická varianta. Senzor vykazuje přesnost 0.01 N a nemění své vlastnosti ani po jednom milionu cyklů. Je tedy vhodný i pro průmyslové aplikace s vysokými počty opakování. Jeho konstrukce je zároveň navržena tak, že v případě použití síly větší než 8 N, což je jeho maximální hodnota, kterou dokáže změřit, a zároveň menší než 55 N, se těleso působící sílu zarazí o tělo senzoru a ten není zničen. Podle technického listu by měl být zapojen s operačním zesilovačem AD623. V jedné verzi elektroniky bylo toto zapojení využito, zařízení vykazovalo dobré chování, ale v aktuální verzi byl využit operační zesilovač integrovaný přímo v procesoru, především jako úspora finanční a prostorová. Dosahované výsledky jsou i tak naprosto dostačující. [1]

4.2.3 Ostatní prvky elektroniky

Důležitým prvkem celého návrhu je komunikace s robotem. Ta je realizována pomocí standardu sériové komunikace RS-485. Roku 1983 sdružení Electronic Industries Association (EIA) schválilo nový standard pro přenos, od kterého se předpokládalo široké rozšíření napříč oblastmi průmyslu, medicínských a spotřebitelských aplikací. Výsledkem tohoto schválení byl návod pro inženýry pro návrh spolehlivého přenosu dat. Na rozdíl od ostatních rozhraní, které definují mechanickou, funkční i elektrickou specifikaci, RS-485 popisuje pouze elektrické parametry. Zejména pak elektrické charakteristiky ovladačů a přijímačů, které mohou být použity pro tvorbu linky s více uzly.[9]

Mezi charakteristické prvky patří:

- jediný 5 V zdroj stačí pro obsluhu celé linky,
- běžný rozsah sběrnice -7 V až 12 V ,
- maximální přenosová rychlost 10 Mbit s^{-1} na vzdálenost 12 m ,
- největší přípustná délka vodičů je 1220 m při rychlosti 100 kbit s^{-1} ,
- na jednu linku může být připojeno až 32 zařízení.

RS-485 byl navržen pro zapojení ve sběrnicové topologii. Je možné zapojení jak poloduplexní, tak plně duplexní. U poloduplexního stačí použít dva vodiče, ale je nutné řídit směr přenosu dat u všech uzlů zároveň, aby nedošlo k situaci, že v jeden okamžik vysílá více než jeden uzel. To by vedlo k zničení doručované informace. Toto řízení musí být zajištěno protokolem. Plně duplexní zapojení vyžaduje čtyři vodiče a transceiver¹ s odděleným vysílačem a přijímačem. Plně duplexní zapojení umožňuje současné vysílání i přijímání dat. [21]

Zde byl využit transceiver SN65HVD11D. Obvod se využívá pro převod napěťových úrovní procesoru na napěťové úrovni RS485. To znamená, že z 12 V úrovně, kterou využívá RS485 zprávu převede na úroveň 3.3 V pro UART. Pro svou činnost vyžaduje napětí 3.3 V a na pinech, ke kterým je připojena sběrnice je také ochrana proti elektrostatickému výboji až do 16 kV . Toto chrání součástku proti zničení, ale také proti postupné degradaci malými výboji, které by ji přímo nezničily, ale mohly by změnit charakteristiky součástky. Na pinech sběrnice je také ochrana proti zkratu. Nejvyšší napětí, které je možné připojit na piny sběrnice je 12 V . Dokáže pracovat na rychlosti až 10 Mbit s^{-1} . Celkem obsahuje 8 pinů. Součástka zvládá pouze poloduplexní komunikaci. To znamená, že je možné v jeden okamžik pouze vysílat, nebo přijímat, ne však zároveň jako u plně duplexní komunikace. Směr komunikace se může měnit podle potřeby prostřednictvím příkazů RTS a CTS. [20]

Vysílač vytváří diferenciální výstup, jehož úrovně se liší minimálně o 1.5 V , zatímco přijímač zvládne zpracovat signál, jehož úrovně se liší pouze o 200 mV . Tento rozdíl zajišťuje dostatečnou robustnost systému i přes degradaci signálu způsobenou přenosem vodiči a přes konektory. Tato vlastnost činí RS-485 vhodným standardem pro nasazení v aplikacích s dlouhým dosahem a v prostředí se šumem. Pro přenos se využívají vodiče typu kroucená dvojlinka. Případný šum se tak přičte k oběma signálům stejně, což ho eliminuje právě díky tomu, že jsou diferenciální. Při návrhu desky plošných spojů je vhodné dodržet vzdálenost mezi signálovými cestami co nejmenší a zachovat u nich stejnou délku. [21]

Dále se na DPS nachází externí krystal s frekvencí 16 MHz , který slouží pro zlepšení přesnosti kmitočtu procesoru. To je zde nezbytné kvůli komunikaci na rychlosti 2 Mbit/s .

Následuje programovací/debugovací konektor a LED diody. Jedna pro indikaci napájení, druhá připojená na programovatelný pin, podle potřeby bude sloužit jako dioda indikující stav systému.

¹Tranceiver je vysílač a přijímač integrovaný společně v jednom pouzdře.

Pro regulaci napájecího napětí je využit regulátor L78L33ACUTR. Tento lineární regulátor má za úkol snížit napájecí napětí z 12 V na 3.3 V, které je využito pro napájení procesoru a dalších součástek, viz. obrázek 4.5. Vhodnější pro tento účel by bylo použít spínaný regulátor, který je daleko efektivnější pro snížení napětí. Lineární regulátor však nezabírá tolik místa jako spínaný regulátor se všemi dalšími potřebnými součástkami. Plošný spoj stylusu musí být co nejmenší, takže díky lineárnímu regulátoru se ušetří místo. Nevýhodou zůstává, že lineární regulátor musí zmařit nadbytečnou energii vlastním zahříváním. Celkový odebíraný proud součástek ale bude maximálně v řádu desítek mA, takže vyzařovaný výkon regulátor snadno uchládí. [17]

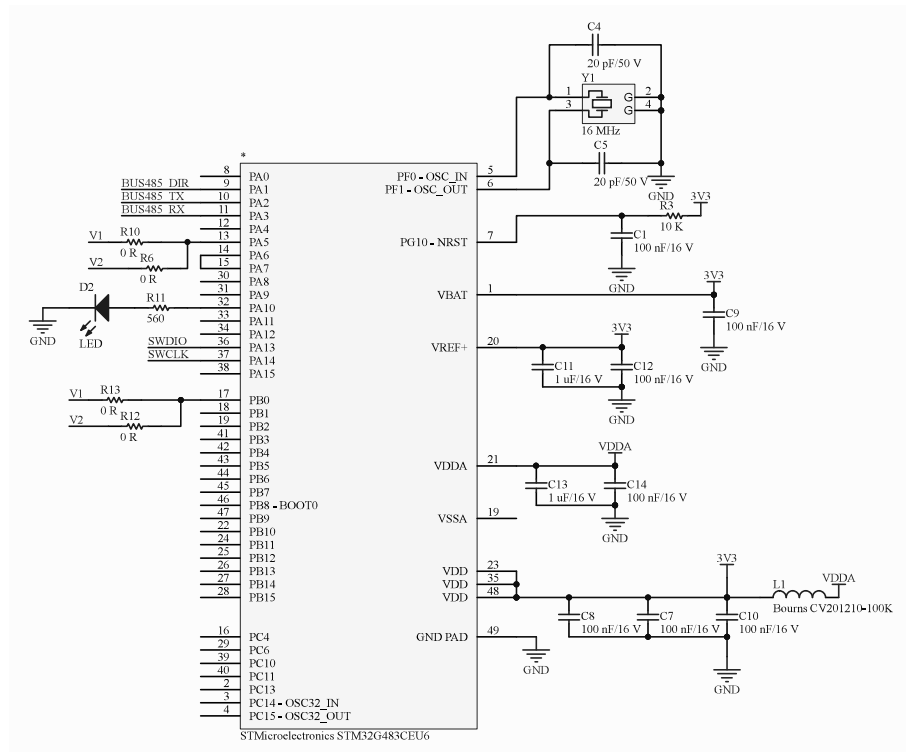
Jako problém se zpočátku jevil elektrické spojení mezi robotem a nástrojem, které by bylo spolehlivé a umožňovalo automatickou výměnu nástroje. Klasické konektory typu samec-samice v různých podobách nepřípadaly v úvahu kvůli požadavku na velmi přesnou manipulaci a mnohdy i značnou sílu potřebnou pro spojení konektoru. Ani jednu z těchto podmínek není možné použitým robotem docílit.

Následně přišly v úvahu tzv. pogo-piny, viz. obrázek 4.7. Jedná se o pružné kontakty s pohyblivou částí, která je předpjatá pružinou. Tyto konektory nejsou tolik náchylné na přesnost spoje díky tomu, že hlavní část konektoru dosedá na pokovenou plošku na druhé DPS. Tato ploška je vždy o něco větší než hlava pružného kontaktu. Další výbornou vlastností je i značná rozmanitost možných vzdáleností mezi deskou robota a nástroje, jelikož pohyblivý kontakt má chod 1.4 mm a nezáleží tak, jestli jsou od sebe 0.3 mm, nebo 1.3 mm. To velmi usnadňuje výrobu mechanismu výměny nástroje. Tyto kontakty se často využívají v automatizovaných testovacích jednotkách, kde slouží například pro programování procesoru. [7]

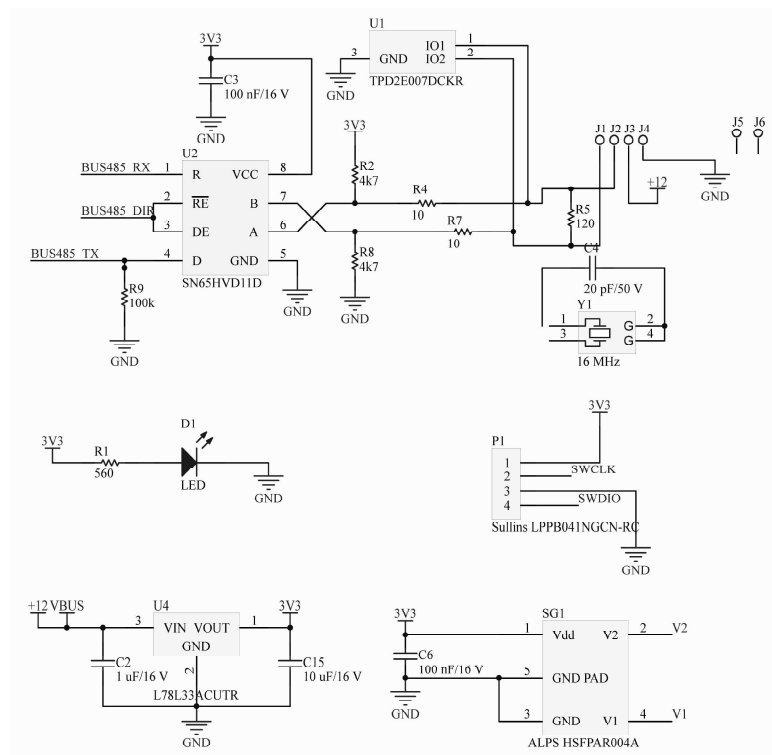


Obrázek 4.7: Pružný kontakt od firmy Harwin pro spojení nástroje a robota. [8]

Jakmile byly vybrány veškeré potřebné součástky, bylo možné přistoupit k návrhu samotné desky. Ten byl realizován v programu Circuit maker. Nejdříve bylo nutné nakreslit schéma zapojení, viz. obrázky 4.8 a 4.9. U většiny součástek se využilo doporučené zapojení, které je vždy přiloženo v technickém listu součástky. Tato doporučená zapojení obsahují i nezbytné kondenzátory, rezistory a případně další součástky, které jsou potřeba pro správnou funkci obvodu. Daná dílčí zapojení už je poté možné spojit do jednoho funkčního celku.



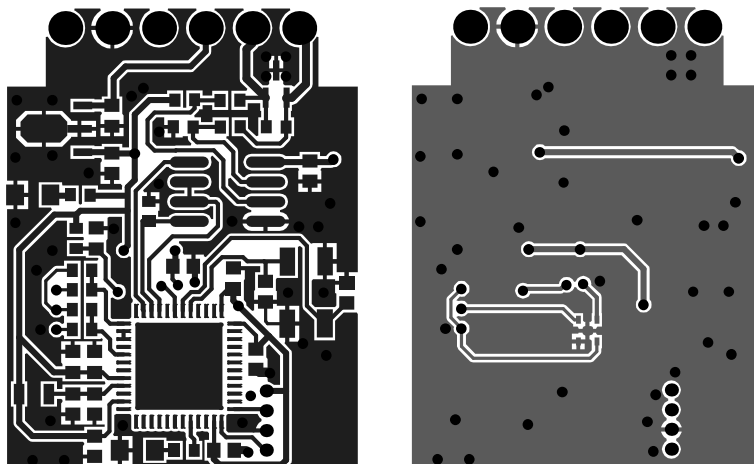
Obrázek 4.8: Schéma zapojení, část procesoru.



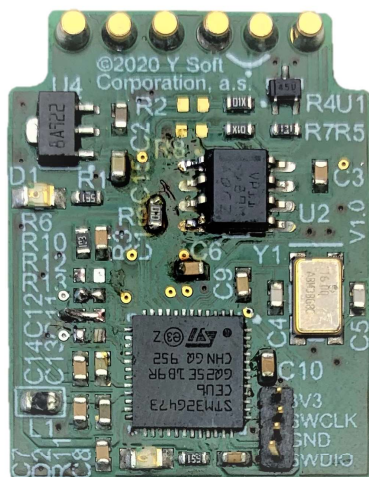
Obrázek 4.9: Schéma zapojení, měřicí řetězec a část pro komunikaci.

Následně je možné začít s návrhem desky plošných spojů, viz. obrázek 4.10. Nejdříve byl zvolen vhodný půdorys, který odpovídal plánovanému umístění na těle stylusu. Následně se na desku umístily velké součástky, jako je procesor nebo transceiver a regulátor napětí. Kolem nich se rozmístily součástky, u kterých je vhodné zachovat co nejmenší vzdálenost, jako jsou vyhlazovací kondenzátory. Postupně se pokračuje menšími součástkami a těmi, u kterých tolik nezáleží na poloze, jako jsou LED diody a podobně. Následně se všechny součástky propojily vhodně širokou cestou. Šířka cesty se určuje v závislosti na procházejícím proudu, proto jsou hlavní napájecí cesty nejširší. Cestu je potřeba dimenzovat tak, aby nebyla vystavována příliš vysoké zátěži, což by v krajním případě mohlo vést až k jejímu porušení a ztrátě elektrického spojení součástek. Nakonec se celé zapojení zkontroluje podle obecných pravidel pro návrh plošných spojů, aby například nevznikaly zemní smyčky. Dalším krokem je kontrola plošného spoje z hlediska výrobitelnosti, protože každý výrobce dokáže splnit jiné požadavky. Tato deska plošných spojů je oboustranná, protože bylo vhodné zespoda umístit senzor. To sice přinese drobné ztížení při osazování, ale bude ušetřeno místo a zachována jednoduchost návrhu. V sériové produkci se součástky osazují na automatických linkách, tento prototyp byl však osazen ručně. Při osazování se začíná těmi komplikovanými součástkami, jako je procesor. Pájení probíhá horkovzdušnou páječkou, protože je nutné zapájet i velký pad přímo pod procesorem. Následně se pod lupou zkontrolují krajní piny a případné nedokonalosti opraví hrotovou páječkou. Podobným způsobem se pájí i další velké součástky. Rezistory a kondenzátory je možné pájet i hrotovou mikropáječkou. Senzor se pájel jako poslední. Jeho montáž komplikoval fakt, že je umístěn z druhé strany desky a je nutné opět využít horkovzdušnou páječku, protože piny jsou umístěné zespoda součástky a její rozměry jsou pouze 2 x 1.6 mm. Práce musí být

rychlá a precizní, protože při příliš velkém prohrátí desky by odpadly součástky na vrchní straně desky. Seřízení linky pro spolehlivou výrobu je náročný proces, který se vyplatí až u velkých sérií. Na obrázku níže je vidět 3D model hotové elektroniky. [14]



Obrázek 4.10: Rozložení součástek a spojů na DPS.



Obrázek 4.11: Elektronika pro měření síly a komunikaci po sériové lince.

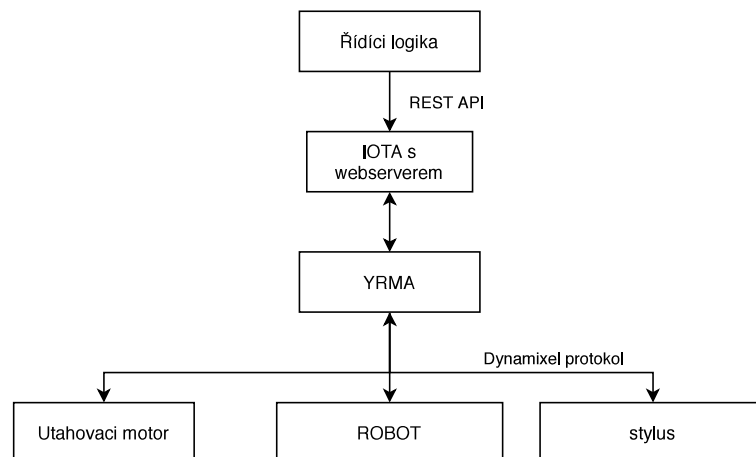
Kapitola 5

Software pro měření a komunikaci

5.1 Popis systému

Aby se dal produkt této práce považovat za Smart stylus, bylo nutné ho oživit, aby nezůstal jen stavebnicí několika součástek z různých materiálů. Stejně jako je deska plošných spojů unikátní přímo pro dané použití, tak i programová část vznikla na míru. Efektor musí zvládnout v podstatě dvě věci. První je detekovat dotyk a případně sílu vyvinutou hrotem na displej nebo tlačítko. Tou druhou je schopnost komunikace s robotem po sériové lince, to znamená zprávy přijímat a odesílat. Robotické rameno je tvořeno několika motory Dynamixel. Jedná se o servomotory, které jsou ovládány prostřednictvím zpráv zapsaných do paketů, které se pohybují po sériové lince o standardu RS-485. Pakety jsou definovány protokolem, který byl vyvinut přímo pro tyto účely firmou Dynamixel a mají jasně danou strukturu. Efektor se nabízí připojit do systému motorů. Proto elektronika umožňuje připojení k sériové lince přes standard RS-485. Záměr je takový, aby se Smart stylus pro řídicí elektroniku robota tvářil jako další motor s tím rozdílem, že nebude přijímat instrukce o poloze, ale odesílat měřená data ze senzoru. Proto je potřeba implementovat protokol od firmy Dynamixel a využít vhodné instrukce ke komunikaci se stylusem.

Pro přehlednost je na diagramu níže vyobrazeno schéma systému.



Obrázek 5.1: Diagram systému robota.

Řídící logikou se v plném rozsahu myslí celý systém robota, včetně všech databází, počítačovým rozpoznáním obrazu a podobně. Nicméně pro tento demonstrativní příklad, dokud není Smart stylus integrován do celého systému, je řídicí logikou myšlen skript v jazyce Powershell, který se skládá ze sekvence příkazů. Ty reprezentují jednotlivé body v prostoru, kterými má efektor projet. Tyto příkazy se postupně vykonávají a posílají na platformu IOTA. Robot následně koná požadovaný pohyb.

IOTA je platforma pro internet věcí navržená firmou Y Soft pro připojení vestavěných systémů k internetu. Běží na operačním systému linux a je na ni nainstalovaný webový server. Řídící elektronika YRM slouží k ovládní robotického ramene. Příkazy do skriptu jsou generovány pomocí grafického nástroje Swagger. Slouží pro dokumentaci a generování příkazů pro webové API. Z jednotlivých souřadnic konkrétního bodu v prostoru vytvoří `Invoke-RestMethod`. Ta poté posílá dotazy na webový server prostřednictvím REST API.

Dále příkaz putuje do elektroniky pro řízení robota YRM. IOTA s YRM komunikuje pomocí speciálního protokolu. Následně se již příkaz transformuje do podoby protokolu Dynamixel, pomocí kterého komunikuje s robotickým ramenem, utahovacím motorem a Smart stylusem. Na lince poslouchají všechna zařízení, ale paket zpracuje pouze uzel, u kterého se shoduje identifikační číslo. Jakmile Smart stylus detekuje požadavek na měření, příkaz vykoná a výsledek ve formě protokolu pošle zpět.

Programová část byla vytvořena ve vývojovém prostředí Visual Studio od firmy Microsoft. Součástí toho IDE je editor kódu. Dokáže zvýraznit syntaxi a IntelliSense umí automaticky dokončit například metody a funkce. Nezbytnou součástí je také debugger. Z důvodu, že Smart stylus je vestavěný systém, bylo třeba do vývojového prostředí přidat možnost jej programovat a debugovat, což samo o sobě neumí. Pro tento účel bylo zvoleno rozšíření VisualGDB.

Pro komunikaci mezi mikrokontrolery a jejich okolím je možné využít různé metody, které se liší například rychlostí přenosu. Dále je potřeba rozlišit komunikaci jednosměrnou a obousměrnou. Obousměrná se dále rozlišuje na poloduplexní, kdy zařízení nemohou komunikovat navzájem současně, ale musí se střídát, a duplexní, při které je možná současná komunikace obou zařízení. Dalším parametrem, který může být pro určité aplikace klíčový je časová synchronizace. U synchronizované komunikace mají všechna zařízení hodinový signál z jednoho zdroje, což je velmi přesné a díky tomu je možné komunikovat na vyšších rychlostech, zároveň je menší pravděpodobnost ztráty dat. Druhou možností je komunikace nesynchronizovaná. V tom případě má každé zařízení vlastní zdroj hodinového signálu. Toto řešení může být méně přesné, ale na druhou stranu se ušetří jeden vodič. Smart stylus je připojen k robotu, který je řízen, potažmo jeho pohony, po sériové lince a cílem je, aby se stylus pro robota tvářil jako další motor. Je tedy nutné využít podobný systém. Jádrem Smart stylusu je procesor řady STM32, který je pro komunikaci vybaven periferií USART. Jedná se o rozhraní pro sériovou komunikaci zejména vestavěných systémů. USART je zkratka z anglického universal synchronous asynchronous receiver transmitter. Jak už z názvu vyplývá, může data vysílat i přijímat a fungovat jak v synchronním, tak asynchronním módu. Nicméně zvládá také mód SPI, čili serial peripheral interace, pro obsluhu nejrůznějších periferií jako jsou displeje a podobně. [18]

5.2 STM32CubeMX

Důležitým nástrojem při programování mikroprocesorů řady STM32 je grafický nástroj STM32CubeMX. Jedná se o nástroj, ve kterém je možné nakonfigurovat jednotlivé parametry procesoru a následně vygenerovat kód v jazyce C. Zde je možné nastavit frekvenci hodin v rozsahu, který procesor umožňuje. Nastavení hodin probíhá ve stromové struktuře, kde je možné zvlášť konfigurovat každou větev, tedy například pro časovače, systémové hodiny nebo USART. Poté je možné konfigurovat jednotlivé periferie a jednotlivé piny. V případě Smart stylusu je nastaveno debugování po sériové lince, využití krystalu pro přesnější hodiny, což je potřeba zejména pro spolehlivou komunikaci na vyšších rychlostech. Následně je nastaven ADC a operační zesilovač. Pro USART je nastaven asynchronní mód a hardware flow control, jelikož je využit transceiver pro převod na standard RS-485. To brání ztrátě dat při komunikaci ve chvíli, kdy přijímající zařízení nestíhá zpracovat veškeré byty. Jakmile toho zařízení zjistí daný problém, pošle vysílači příkaz, aby na určitou dobu přestal vysílat, než přijímač bude schopný přijmout další data. Při komunikaci po sériové lince jsou vysílač i přijímač nastaveny na stejnou rychlost, proto by se mohlo zdát, že tento problém nemůže nastat, nicméně pokud je zásobník dat v přijímači příliš malý a data z něj nejsou přesunuta k dalšímu zpracování před příchodem nových, o původní data přijdeme, protože jsou přepsána novými. S periferií USART pracující na frekvenci $2\,000\,000\text{ bit s}^{-1}$ se přímo nabízí využít periferii DMA, česky přímý přístup do paměti. Jedná se o funkci umožňující přímý přenos dat uvnitř paměti nebo mezi pamětí a periferiemi bez zásahu jádra procesoru. Většina periferií může být mapována na různé piny procesoru. Díky tomu je možné jejich rozmístění přizpůsobit poloze na plošném spoji. Velmi důležitým krokem při konfiguraci je volba LL API nebo HAL API. Podle toho program vygeneruje kód s příslušnými knihovnamí. Volba je v podstatě na každém programátorovi, někdy ale může záviset na specifickém využití periferií, které HAL API nedokáže realizovat. V tomto případě bylo využito právě HAL API pro své výhody v podobě rychlejší konfigurace a snadnější přenositelnosti mezi různými procesory, což bylo během vývoje několikrát využito.

5.3 Implementace protokolu Dynamixel

Periferie USART procesoru se nastaví v grafickém prostředí STM32CubeMX, které do projektu automaticky vygeneruje vrstvu HAL ovladačů. Jedná se v podstatě o API (application programming interface), pomocí kterých je možné spolupracovat s vyššími vrstvami programu. Výchozí nastavení pro naši aplikaci je asynchronní mód a rychlost $115\,200\text{ bit s}^{-1}$.

Pro přijímání dat na sériové lince je potřeba vytvořit zásobník, který bude plněn příchozími daty. Jakmile je zásobník naplněn, respektive přijde celá zpráva, tak je možné data přečíst a dále zpracovat. Detekci příchodu kompletní zprávy je možné vyřešit několika způsoby. V případě neměnné délky paketu by bylo možné pouze čekat na naplnění zásobníku, který by měl stejnou velikost jako paket a poté vyvolat přerušení. Nicméně v našem případě tento způsob nelze realizovat, protože paket je pokaždé jinak dlouhý. Zde najde uplatnění detekce klidu na lince, tzv. idle line detection. Jakmile je vyhodnocen stav, že se po sériové lince neposílají žádná data, tak se vyvolá přerušení a je možné příchozí data ze zásobníku přemístit k dalšímu zpracování. V principu jde o to, že určitý počet po sobě jdoucích oken je prázdných. Existují dvě verze protokolu, přičemž nyní je využita první ale u dalších verzí se již počítá s aplikací verze druhé. Protokol slouží pro komunikaci mezi dvěma zařízeními pomocí binárních dat, která jsou posílána v jednotlivých paketech. V rámci protokolu Dynamixel existují dvě varianty paketu. Jedná se o instrukční paket, který kontrolér posílá

motorům, potažmo stylusu, a statusový paket, který naopak posílá stylus zpátky kontroléru. Jelikož jsou všechna zařízení připojena k jedné lince, je nezbytné, aby každé mělo unikátní identifikační číslo. Díky tomu je možné posílat příkazy jednomu konkrétnímu zařízení a naopak v případě statusu paketu může kontrolér vyhodnotit, které zařízení daný statusu paket vyslalo. Jedná se o asynchronní komunikaci, kde jeden rámeček má 8 bitů, 1 stopbit a žádný paritní bit. Jedná se tedy poloduplexní komunikaci, takže není možné zároveň data vysílat a přijímat. Zatím co jedno zařízení vysílá, ostatní poslouchají a to včetně kontroléru. Pouze v případě, že posílá instrukční paket, tak se kontrolér přepne do vysílacího módu. Zařízení dokáží detekovat poruchu v přenosu v případě, že mezi jednotlivými byty je pauza větší než 100 ms. Jakmile je tento stav detekován, uzly čekají na header, neboli první okno následujícího paketu.

Jednotlivé byty jsou zapisovány v šestnáctkové soustavě. První dva byty jsou tzv. header. Tyto byty mají hodnotu 0xFF a značí začátek paketu. Začíná jimi každý paket. Následuje ID, který určí, jakému zařízení je zpráva směřována. Může nabývat hodnot 0x00 až 0xFD, neboli 0 až 253, což dává 254 možných unikátních ID. Speciálním případem je ID s hodnotou 254, což značí, že zpráva je určena pro všechna zařízení na lince. Následuje informace o délce paketu. Ta slouží pro výpočet kontrolního součtu. Další byte nese informaci o instrukci, která se má vykonat. Níže je vidět tabulka jednotlivých instrukcí.

Hodnota	Instrukce	Popis
0x01	Ping	Kontrola, jestli přijde paket k zařízení se stejným ID, jako je ID paketu
0x02	Čtení	Čtení dat ze zařízení
0x03	Zápis	Zápis dat do zařízení
0x04	Před zápis	Příprava instrukce, která se vykoná při příchodu instrukce Akce
0x05	Akce	Instrukce, která způsobí vykonání příkazu uvedeného jako Před zápis
0x06	Tovární reset	Instrukce, která přepíše ovládací tabulku do výchozího nastavení
0x08	Reboot	Instrukce pro restartování zařízení
0x83	Synchronizovaný zápis	Instrukce pro zápis na jednu adresu z vícero zařízení
0x92	Hromadné čtení	Instrukce pro zápis na různé adresy vícero zařízení najednou

Tabulka 5.1: Tabulka instrukcí protokolu Dynamixel [5]

Následují parametry, které upřesňují předchozí instrukce. Například pro instrukci zápis bude v parametru hodnota, která se má zapsat. Parametrů může být n , což je důvod pro rozdílnou délku každého paketu. Poslední informací v instrukčním panelu je kontrolní součet. Využívá se k detekci poruchy během přenosu informace. Tím, že přijímač spočítá kontrolní součet z příchozích dat a porovná s výsledkem vysílače, může zjistit poruchu v přenosu. Spočítá se jako doplněk součtu ID, délky paketu a jednotlivých parametrů.

$$kontrolnisoucet = \sim (ID + delkapaketu + parametr1 + parametr2 + \dots parametrN)$$

Odpovědí na instrukční paket je status paket. Jeho skladba je velmi podobná. První dva byty jsou tzv. header, neboli 0xFF a 0xFF. Následuje ID zařízení, které status paket vysílá a za ním je délka paketu. Na dalším místě je místo instrukce kód chyby. Jejich tabulka je opět níže.

Bit	Error	Popis
Bit 7	0	-
Bit 6	Chyba instrukce	V případě nedefinované instrukce, nebo instrukce Akce bez předchozí instrukce Před zápis
Bit 5	Přetížení	V případě nemožnosti ovládat dané zatížení pomocí nastaveného momentu
Bit 4	Chyba kontrolního součtu	V případě, že se vypočítaný kontrolní součet neshoduje s přijatým
Bit 3	Chyba rozsahu	V případě, že je instrukce mimo použitelný rozsah
Bit 2	Přehřívání	V případě, že je vnitřní teplota zařízení vyšší, než nastavená v kontrolní tabulce
Bit 1	Limit úhlu	V případě, že je cílová poloha mimo rozsah
Bit 0	Chyba vstupního napětí	V případě, že je použité napětí mimo rozsah zadaný v kontrolní tabulce

Tabulka 5.2: Tabulka chybových hlášek protokolu Dynamixel [5]

Praktická komunikace mezi stylusem a robotem probíhá tak, že robot pošle instrukční paket s ID stylusu. Instrukce je čtení, protože chce zjistit hodnotu síly, jakou hrot působí na displej. Stylus paket přijme, vyčte hodnotu z AD převodníku a zapíše ji do parametru statusu paketu, který pak odešle zpět.

Kapitola 6

Automatická výměna nástroje

6.1 Upínač nástroje

Tato kapitola popisuje návrh řešení systému pro automatickou výměnu nástroje robota pro testování zařízení s dotykovým displejem. Řešení pro průmyslové roboty se s hmotností nedostanou pod stovky gramů. To je způsobeno především požadavkem na vysokou robustnost, aby bylo možné na rameno připevnit manipulátor a přenášet břemena. V případě robota, jehož úkolem je ovládat displej a případně hardwarová tlačítka, se ovšem jedná o zbytečnou schopnost. Jejich design ve většině případů spočívá ve dvou a více čepech se zaoblenými konci, které pasují do přesných otvorů v druhém dílu, proto je nutné zajistit jejich sousost při spojování. Taková konstrukce se neobejde bez vysoké přesnosti robota.

Od začátku se počítalo s vlastní výrobou celého prototypu ve firemní dílně. Ta disponuje základním vybavením, ale také pásovou pilou, stojanovou vrtačkou a cnc frézou, na které je možné obrábět plasty, dřevo a měkké kovy. Nicméně i přes to bylo nutné přijít s řešením, které odpustí drobné nepřesnosti způsobené amatérskou výrobou. Výrobu by samozřejmě bylo možné zadat i externí firmě, ale bylo jasné, že první kus nebude zároveň finální. Z důvodu flexibilní reakce na vnášené změny konstrukce bylo vše vyráběno svépomocí. Tím byl ušetřen čas mezi výrobou jednotlivých iterací prototypu.

Jako materiál pro výrobu upínače byla zvolena slitina hliníku. Její mechanické vlastnosti vyhovovaly zadání na odolný spoj. Zároveň se vyznačuje nízkou hmotností a nezvyšuje tak zatížení manipulátoru nad únosnou mez. Tento materiál je také možné obrábět na zmíněné frézce.

Základní tvar byl inspirovaný upínačem Smartshift, viz. obrázek 3.7, který koresponduje zejména s nižší přesností použitého robota. Rozměry a geometrie byly přizpůsobeny již hotovému návrhu těla Smart stylusu. Důležité bylo vhodně zvolit rozměry drážky. Nakonec se ukázalo jako nejlepší řešení prozkoumat sortiment dostupných tvarových fréz pro výrobu rybinových drážek a z toho vycházet. Požadavek byl na co nejmenší frézu, aby bylo možné dosáhnout nízkého profilu upínače a celkově příznivých rozměrů. Jako nejvhodnější se ukázala úhlová čelní fréza ČSN22 2260 s průměrem 16 mm, vrcholovým úhlem 45° a délkou řezné části 4 mm. Výsledkem je tedy návrh upínače o čtvercovém půdorysu s délkou hrany 30 mm a výškou 6 mm pro část nástroje a 8.5 mm pro robota, viz. obrázek 6.1. Z toho 3.5 mm je vždy výška drážky. Ta je volena tak, aby na fríze zbyla výšková rezerva na řezné části. Tvarové části drážky svírají úhel 15° a v nejužším místě jsou vzdáleny právě 16 mm, jako je průměr frézy. Tyto rozměry byly zvoleny s ohledem na nutné umístění otvorů pro šrouby, kterými je díl připevněn k plastovému tělu stylusu a koncovému plechu robota. Úhel 15° je maximální možný, aby se drážka i s otvory pro šrouby vešla do daného půdorysu, zá-

roveň byla snaha mít tento úhel co největší. Čím ostřejší úhel je, tím je zařízení náchylnější na přesnost výroby. Tím je myšleno, že malá nepřesnost v rozteči tvarových ploch drážky způsobí velký rozdíl v tom, jak hluboko do sebe jednotlivé díly zapadnou, což by následně přinášelo komplikace pro systém zajištění a elektrického spojení.



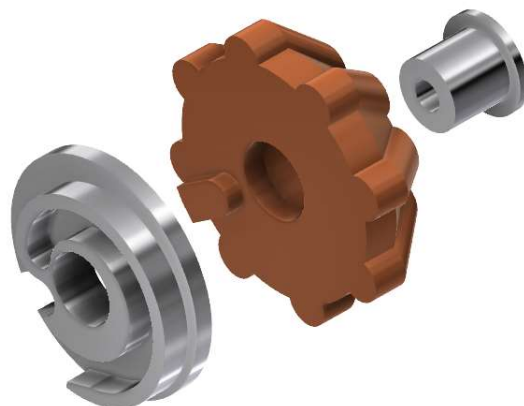
Obrázek 6.1: Návrh upínače pro Smart stylus.

6.2 Zajištění spoje

Na první pohled se zdál být ideální design Smartshift robotics, viz. 3.7, pro jeho jednoduchost a eleganci bez nutnosti speciálního aktuátoru pro zajištění spoje. Nicméně tento způsob by vyžadoval silnějšího robota. Z toho důvodu se takový systém zavrhl. Vývoj se tedy dále zaměřoval na systémy s aktuátorem určeným speciálně na zajištění spoje. Bohužel i tlakový vzduch musel jít stranou, protože u kancelářského robota se nepočítá s připojením na jeho rozvody a vlastní malý kompresor nepřipadal v úvahu z pochopitelných důvodů. Další možnosti jako elektromagnet, u kterých by zajištění správné funkce a spolehlivosti vyžadovalo na samostatnou práci byly také zavrženy. V podstatě zbývala pouze možnost využití servomotoru. S tím souviselo rozhodnutí, jestli využít jeho rotační pohyb, nebo jej převést na lineární. Vzniklo několik prototypů pomocí 3D tisku.

Problémem se ukázalo být umístění motoru. Pokud by byl přímo na manipulátoru, následkem vyššího zatížení by se zhoršila dynamika a přesnost robota, kvůli tomu se rozvíjelo řešení s pohonem mimo upínač. Z navržených prototypů nejvíce vyhovoval tvar spirály na jednom dílu a čepu na druhém, za který se k sobě oba díly přitáhnou. Nakonec byla spirála umístěna na stranu manipulátoru, aby nemusela být vyráběna pro každý nástroj. Chod spirály je navržen s rozsahem 3.6 mm, což zajistí funkčnost systému i při výrobních nepřesnostech. Samotná spirála je vyrobena z hliníku kvůli dostatečné odolnosti. Na ni přiléhá výtisk z plastu, pomocí něž je přenášen moment z motoru. Oba tyto díly u sebe drží pomocí čepu, který zároveň slouží jako uložení pro spirálu, viz. 6.2. Jeho délka je navržena tak, aby bylo možné jej plně přitáhnout k tělu upínače a spirála zůstala volná, stejně tak na válcové ploše je uložení s vůlí. To už ale neplatí pro plastový díl, který má uložení s přesahem. Velikost přesahu byla zvolena experimentálně tak, aby se spirála otáčela s lehkým odporem, což zamezí samovolnému povolání, nebo pootočení při pohybu robota bez nástroje. Přenos momentu z plastového dílu na spirálu je řešen pomocí pera a drážky.

Plastový díl pro přenos momentu z motoru byl navržen s ohledem na přesnost robota a zároveň tak, aby pokryl většinu možných stavů natočení vůči protikusu, aby došlo k bezproblémovému spojení. Jeho základem je tedy komolý kužel, který zajistí postupné vystředění obou dílů. Po obvodu jsou rozmístěny výstupky válcového tvaru, které kopírují povrch kuželu. Ty zapadnou do protikusů, který je vlastně negativem. Díky válcovému tvaru do sebe díly mohou zapadnout i při ne ideální pozici, ale třeba trochu pootočené, nebo v případě, že díly nejsou souosé. Toto řešení nepokryje všechny situace, ale o zbytek se již postará software. Utahovací motor se může pomalu točit už během přiblížení robota, takže se oba kusy bez problému spojí.



Obrázek 6.2: Sestava zajišťovací spirály s tvarovým prvkem pro přenos momentu z motoru na spirálu.

6.3 Zásobník nástrojů

U našeho robota, pro kterého je celý systém vyvíjen se v budoucnu počítá s použitím tří nástrojů. Hlavní nástroj bude pravděpodobně Smart Stylus, díky jeho univerzálnímu použití, možností obsloužit jak dotykové displeje, tak některé typy hardwarových tlačítek. Ten bude v případě potřeby testování mobilních zařízení doplněn zdvojeným stylusem. Aplikace pracující na těchto zařízeních čím dál tím častěji mívají ovládání gesty, které je velmi rychlé a dokáže pokrýt mnoho funkcí. Nicméně ovládání gesty vyžaduje simulaci více dotykových bodů. Minimálním počtem jsou dva body pro základní gesta, jako je přiblížení a oddálení obrazovky. Z toho důvodu se předpokládá možnost nasadit další speciální stylus, který bude schopný tyto aplikace obsloužit. Současný robot ale vzhledem k jeho konstrukci není použitelný. Jelikož se jedná o robota se čtyřmi pohyblivými osami, bude nutné doplnit

minimálně další jednu, ale pro dokonalou funkci spíše dvě osy. Nyní se tedy nacházíme na jakémsi pomezí, protože se ve vývoji zohledňují i budoucí funkce, ale zároveň je potřeba produkt přizpůsobit současným podmínkám. S tím samozřejmě souvisí i konstrukce zásobníku nástrojů. Každá pozice musí být na pomyslné normále od první osy robota, a zároveň výměna nástroje může být realizována pouze pohyby od/k robotu, po kružnici se středem v první ose a nebo nahoru a dolů. Tím se nabízí tři možnosti rozložení zásobníku. První variantou jsou pozice nad sebou, druhou variantou jsou pozice v řadě za sebou a poslední možností je potom půlkruhový zásobník. V počítači byly zhotoveny návrhy všech uspořádání a po přihlédnutí k rozložení ostatního příslušenství robota bylo přistoupeno k první variantě.

Pozice zásobníku jsou tedy tři, viz. 6.3, což zajistí místo pro všechny předpokládané nástroje. V zadní části posledního dílu stojanu robota je upevněn držák na kameru, která snímá obraz na displeji. Jeden návrh spočíval v zakomponování zásobníku přímo do držáku na kameru, ale ne každý robot bude tento zásobník vyžadovat, takže se od něj upustilo. Zároveň konstrukce tohoto držáku je z překližkových výpalků, což by zástavbu komplikovalo. Dalším důvodem proti byla nejistá budoucnost této konstrukce pro držák kamery. Přistoupeno se tedy k návrhu zásobníku jako samostatného dílu. Který využije pouze plastovou část držáku kamery, tím pádem není problém udělat dvě verze plastového výtisku. Držák kamery musel být kvůli zásobníku posunut mimo osu robota. To nepřineslo žádné další problémy, jelikož na jeho konci je připevněna tzv. magic-arm, neboli ruka nastavitelná ve všech směrech. Díky tomu je možné i přes vychýlení držáku kameru nastavit přesně tak, jak je potřeba pro dokonalé snímání obrazovky.

Nástroje v zásobníku není potřeba nijak zvlášť fixovat. Pro jejich upevnění byl využit podobný systém jako pro upínání nástroje k robotu. Robot nástroj do zásobníku umístí pohybem shora dolů, čímž zároveň dojde k rozpojení nástroje a robota. U prototypu jsou jednotlivé pozice vytisknuté z plastu na 3D tiskárně, ale příští verze se počítá s výrobou z hliníku na cnc frézce pro větší odolnost celého systému. Pozice jsou následně přišroubovány k hliníkové stojně pomocí šroubů velikosti m3 se zápustnou hlavou. Stojna je vyrobena z hliníkové ploché tyče. Jsou do ní vyřezány závity pro upevnění pozic a také pro upevnění samotné stojny do plastového sdruženého držáku kamery a zásobníku. Zásobník bylo nutné umístit dostatečně daleko za robota, aby nedocházelo ke kontaktu ramene se zásobníkem a to zejména v klidové poloze robota. Plastový držák je k hlavnímu stojanu připevněn čtyřmi šrouby, přičemž osa jednoho z nich prochází zároveň stojnou zásobníku nástrojů. Aby bylo možné využít všechny šrouby se stejnou délkou. Do stojny byl vyfrézován otvor, který umožní montáž kratšího šroubu uvnitř plastového dílu.



Obrázek 6.3: Zásobník nástrojů se třemi pozicemi pro Smart stylus.

Uchycení nástroje probíhá přesně opačně, než jeho odložení. To znamená, že se robot připraví do polohy pod nástroj a pohybem vzhůru jej navede do tvarového spoje a vytáhne ze zásobníku. Následně se navede k utahovacímu zařízení a pootočením spirály nástroj zajistí proti vypadnutí.

Kapitola 7

Praktická realizace

Kompletní výroba prototypu probíhala svépomocí s využitím výrobních kapacit firemní dílny. Veškeré plastové díly byly vyrobeny na 3D tiskárně BE3D EDEE od firmy Y Soft, viz. 7.1. Jedná se o uzavřenou tiskárnu bez vyhřívané podložky schopnou tisknout pouze z materiálu PLA. Její tiskový prostor je 150x150x150 mm. Využívá trysku o průměru 0.4 mm, takže není příliš vhodná pro díly s jemnými detaily. Tiskne buď na skleněnou, nebo kovovou podložku s vrchní plastovou vrstvou. Na kovovou podložku není třeba aplikovat lepidlo, jako je tomu u skleněné. Tiskárna disponuje automatickou kalibrací, což koresponduje s její uzavřenou konstrukcí. Celkově je navržena pro využití ve školách a firmách, kde je potřeba zabránit vyjmutí modelu jiným uživatelem. Přístup je totiž umožněn pouze po zadání kódu, nebo přiložením karty. Zároveň je kladen velký důraz na uživatelskou přívětivost a snadnou obsluhu. Tiskové profily, tedy nastavení teploty trysky a rychlosti tisku jednotlivých částí, jsou přednastavené přímo ve sliceru. Uživatel je může upravovat podle svých zkušeností, ale pro většinu dílů vyhoví tři základní, které jsou odladěné na danou kombinaci tiskárny a materiálu.



Obrázek 7.1: 3D tiskárna BE3D EDEE od firmy Y Soft. [12]

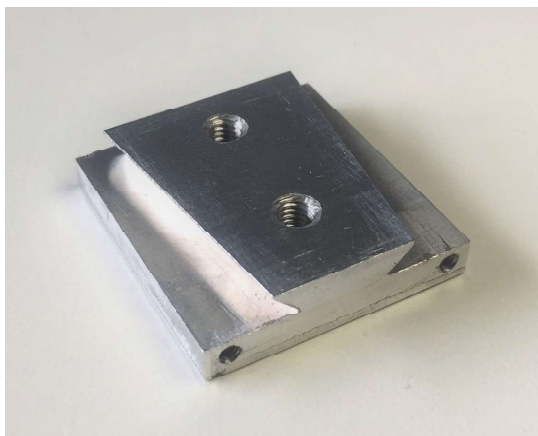
Kovové díly vznikaly obráběním na cnc frézce RM-MX70110 od firmy Konečný, viz. 7.2. Disponuje pracovní plochou 700x1100 mm, osa z má rozsah 180 mm. Vřeteno o výkonu 2.5 kW s frekvenčním měničem je dostatečné i pro frézování neželezných kovů, sendvičových materiálů jako je Dibond a samozřejmě i dřeva a překližky. Kuličkové šrouby pro pohon jednotlivých os mají přesnost IT7. Stůl obsahuje několik otvorů se závity, kam je možné připevnit upínky, nebo svěrák. Pro obrábění dílů prototypu byl na pracovní plochu pomocí upínek připevněn malý strojní svěrák. To se ukázalo je nejlepší realizovatelné řešení pro upnutí plochých hliníkových tyčí malého průřezu, které byly polotovarem většiny hliníkových dílů.



Obrázek 7.2: CNC frézka od firmy Konečný pro obrábění neželezných kovů.

Model z CAD programu je pro další zpracování nutné vyexportovat do formátu stl. Tento formát je standardem pro CAD/CAM systémy a 3D tisk. Nese informaci pouze o povrchu tělesa a ten převádí na trojúhelníkové plochy s využitím jednotkových normálových vektorů.

Výroba dílu master, viz. obrázek 7.3, byla komplikovaná z důvodu využití hned tří různých fréz, které bylo vždy nutné vyměnit mezi jednotlivými programy. Další úskalí spočívalo v použití nekvalitního svěráku, kterému se při dotažení zvedala jedna čelist, takže povrch materiálu nebyl rovnoběžný se stolem frézky. Proto bylo nutné upnutí provést s citem, jinak by po otočení obrobku problém s rovnoběžností jeho ploch. Po otočení bylo nutné zkalibrovat výšku nástroje, aby měl výsledný výrobek požadovanou tloušťku, jinak s frézováním plochy není žádný problém, protože tolik nezáleží na kalibraci nulového bodu v osách x a y . To je naopak kritický bod u předposlední operace, protože je tím dána poloha spodní kostky, ke které je upněna spirála, obr. 6.2.



Obrázek 7.3: Část upínače master vyrobená z hliníkové slitiny.

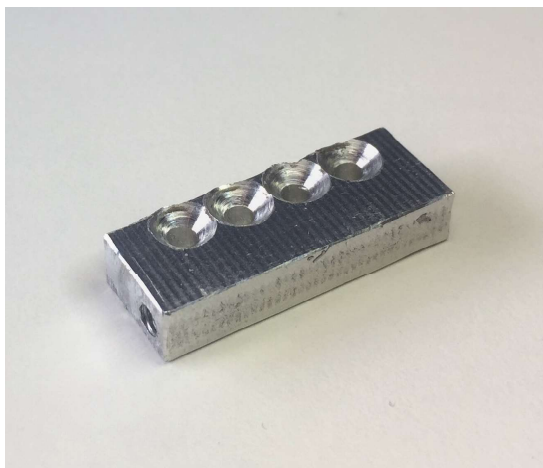
Program VCarve nedisponuje funkcí frézování tvarovými frézami pro výrobu rybinové drážky, takže bylo nutné improvizovat. Díky známým rozměrům drážky i tvarové frézy bylo možné určit dráhu středu nástroje. Tato trajektorie potom byla vytvořena v programu Autocad a importována do VCarve. Program pak byl nastaven jako klasické frézování kapsy čelní válcovou frézou s parametry vhodnými pro tvarovou frézu. Nejprve se vyráběl díl master, kde absolutní velikost drážky nehrála takovou roli. Důležité bylo zajistit přesné rozměry u dílu tool, viz. 7.4, aby do sebe oba správně zapadly. Tool byl ve svěráku upevněn takovým způsobem, aby bylo možné přiložit master a zkontrolovat jejich vzájemnou polohu při spojení. Kritickým parametrem v tomto případě totiž byla co nejpřesnější hloubka zasunutí obou dílů, aby dobře fungoval systém upínání.

I při výrobě dílu tool byl největší problém upnutí polotovaru, aby nedošlo k vychýlení čelistí svěráku. Frézování rybinové drážky bylo provedeno na několik průchodů nástroje, přičemž se po každém kontrolovala vůle s protikusem. Takto se postupně ubíral materiál, dokud do sebe díly master a tool nezapadly. U frézování otvoru pro čep bylo nutné dodržet vzdálenost od spodní hrany dílu, aby dobře fungoval systém upínání.



Obrázek 7.4: Část upínače tool vyrobená z hliníkové slitiny.

Následně byl frézován držák spirály, viz. 7.5. Zde bylo důležité dodržet vzdálenost otvorů od boční stěny, aby nevznikl schod mezi dílem master a držákem, protože by mohla spirála dříť. Z toho důvodu se u druhé verze držák o 0.5 mm rozšířil, takže vznikla vůle mezi spirálou a boční plochou dílu tool. Dodržení tolerance umístění otvoru se závitem pro upevnění spirály je potřeba především z důvodu, aby spolehlivě fungoval systém upínání.



Obrázek 7.5: Držák utahovací spirály vyrobený z hliníkové slitiny.

Uložení pro spirálu, obrázek 7.6, je rotační součást a proto by bylo vhodné jej vyrábět na soustruhu, kterým ale dílna nedisponuje. V tomto případě využití frézky nevedlo, i přes horší povrch ve srovnání se soustruhem. Uložení má dostatečnou vůli, aby nedocházelo k zadírání. Stejně tak není namáháno vysokými otáčkami a podobně. Nedokonalý povrch naopak může drobně přispět k pojistné funkci mechanismu tím, že se spirála nebude samovolně povolovat.



Obrázek 7.6: Uložení utahovací spirály vyrobené z hliníkové slitiny.

Posledním dílem vyráběným na frézce je samotná spirála, viz. 7.7. Jediná komplikace při výrobě byla při frézování její zadní plochy, jelikož nebylo možné ji dostatečně upnout. Byla upevněna přímo za obvod ve svěráku, takže bylo nutné použít adekvátní sílu, aby se samotná spirála nezdeformovala. Tomu byly přizpůsobeny i řezné podmínky, rychlost byla snížena asi na polovinu. Přesto povrch nebyl perfektní, což opět pomůže proti samovolnému povolování.



Obrázek 7.7: Utahovací spirála pro zajištění upínače vyrobená z hliníkové slitiny.

Koncový plech robota, který drží Smart stylus je vyroben z nerezové oceli tloušťky 1.5 mm, stejně jako ostatní plechy robota. Nejdříve byl vypálen na laseru a poté ohnut na ohraňovacím lisu. Výroba toho dílu byla kvůli její náročnosti na strojní vybavení zadána externí firmě.

Kapitola 8

Zhodnocení

Systém robota v současné době není připraven na implementaci Smart stylusu a automatické výměny nástroje. Proto testování celého zařízení probíhalo odděleně na testovací stoličce. Jedná se o složitý systém, na kterém probíhá neustálý vývoj a jehož další směřování bude vést ke snazší implementaci stylusu, nicméně v době vyhotovení práce nebylo možné produkt otestovat v reálném nasazení.

8.1 Smart stylus

Výsledkem této práce je funkční prototyp koncového efektoru. Pro komunikaci se systémem je implementován protokol od firmy Dynamixel. Správná funkce byla ověřena pomocí testovacího paketu, který byl sestaven s příkazem pro vyčítání hodnot ze zařízení. Pomocí terminálu byl testovací paket odeslán do robota. Smart stylus detekoval paket se shodným identifikačním číslem a měřením určil aktuální sílu působící na senzor. Tuto hodnotu poté ve statusu paketu odeslal zpět systému. Paket bylo možné v terminálu zkontrolovat a provnat reálnou působící sílu s informací, která v něm byla zapsána. Obě hodnoty se se lišily v rozsahu 20 %, což je pro aktuální potřeby dostačující. Na chybě se podílí hřídelka stylusu s vysokou drsností povrchu, což je způsobeno obráběním v amatérských podmínkách. Tento problém eliminuje budoucí výroba v externí firmě, kde je možné dosáhnout vyšší kvality povrchu. Dalším faktorem, který může měření ovlivnit je samotná elektronika, jelikož součástky jsou vyrobené s určitou tolerancí. Je proto možné, že bude nutné každý výrobek kalibrovat, nebo přijít s řešením, které se bez ruční kalibrace obejde.

Požadavek na maximální sílu doteku 7 N byl splněn využitím senzoru s možností měřit až 8 N. Výsledné rozměry stylusu se také vešly do maximálních rozměrů pomyslného kvádru o rozměrech 40 mm × 40 mm × 80 mm. Konkrétní požadavek na nejvyšší přípustnou hmotnost nebyl stanoven, ale při testování se motory nepřehřívaly a robot stále dosahoval potřebné přesnosti. Z toho lze soudit, že přidaná hmotnost není pro robota problémem.

Pro interní účely firmy je možné k výrobě komponent využít technologie 3D tisku, ale pro budoucí nasazení bude nutné jednotlivé díly přizpůsobit sériové produkci.

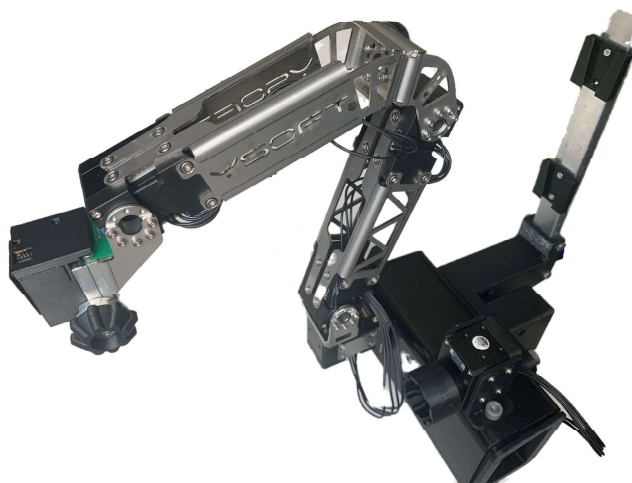
8.2 Automatická výměna nástroje

Výměna nástroje byla testována skriptem, který běžel ve smyčce a neustále opakoval výběr nástroje ze zásobníku, dotažení upínače, vzorové kliknutí, povolení upínače a opětovné odložení nástroje do zásobníku. Během chodu programu se nevyskytovaly chyby a výměna

probíhala bez vážnějších problémů. Tvarový prvek pro přenos momentu na utahovací spirálu fungoval spolehlivě a jeho geometrie zajistila spolehlivé navádění obou dílů do sebe.

8.3 Zásobník nástrojů

První změny vyžaduje zásobník nástrojů. Lůžka nástrojů zásobníku vyrobená na 3D tiskárně způsobují lehké zadrhávání při zvedání nástroje. Povrch každého plastového výtisku je do jisté míry zvlněný tím, jak tiskárna přidává vrstvy na sebe. Tyto vrstvy poté působí jako zuby. Do budoucna by určitě bylo vhodné povrch výtisku vyhladit, nebo celý díl vyrobit z kovu. Zásobník má také poměrně nevhodný tvar, jelikož pozice jsou příliš blízko nad sebou. Přes to je vrchní pozice pro rameno těžko dosažitelná, protože se pohybuje na hraně rozsahu. Pro budoucí nasazení bude nutné zásobník upravit na pohyblivý, který zároveň umožní zvýšit kapacitu.



Obrázek 8.1: Robot se Smart stylusem a možností automatické výměny nástroje.



Obrázek 8.2: Smart stylus s upínačem připevněným k robotickému ramenu.

Kapitola 9

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout koncový efektor pro robotické rameno, které slouží k testování zařízení s dotykovým displejem. Motivací pro vznik práce bylo dosavadní využívání stylusu bez zpětné vazby, což znemožnilo detekovat určité chyby při testování. Nejdříve byla navržena konstrukce koncového efektoru, která musela respektovat předpokládaný systém pro upínání nástroje a umístění elektroniky. Tělo bylo vyrobeno pomocí 3D tisku plastu. Pro přenos síly na senzor slouží sestava dvou hřídelek z hliníkové slitiny, mezi kterými je pružina.

Elektronika obsahuje pouze součástky nutné k měření síly, komunikaci a elektrickému spojení s robotem. díky tomu bylo možné tvar desky plošných spojů maximálně přizpůsobit jejímu umístění na těle efektoru. V softwarové části byl implementován protokol Dynamixel, který slouží ke komunikaci s robotem. Pomocí tohoto protokolu jsou řízeny i servomotory. Druhou částí je měření působící síly, k čemuž je využit operační zesilovač a AD převodník přímo v procesoru.

Pro upínač nástroje byl využit systém s rybinovou drážkou, který je tolerantní vůči drobným nepřesnostem při spojování obou dílů. To je klíčová vlastnost pro využití s daným robotem. Zajištění spoje má na starosti spirála, která zachytí čep na protikus, čímž vznikne pevné spojení. Ovládání spirály zajišťuje servomotor umístěný mimo robota. Zásobník nástrojů využívá obdobný systém jako upínač, ale jednotlivé pozice jsou pouze z plastu.

Cíle určené v zadání práce byly splněny, ale před nasazením do provozu bude nutné provést jisté změny konstrukce. Jako první bude upraven zásobník nástrojů, který má nevhodné rozměry a využití všech pozic je obtížné. Ostatní díly jsou ve stavu, kdy zvládnou další podrobnější testy, které budou souviset s integrací do celého systému robota. Po odladění systému bude další vývoj spočívat v nahrazení technologie 3D tisku jinou technologií, která bude vhodnější pro sériovou produkci.

Literatura

- [1] ALPSALPINE. *HSFPAR004A Datasheet*. 2. vyd. Březen 2019 [cit. 2020-4-27].
- [2] AUTOMATION, A. I. *Reliability, Safety, and Strength Realized in ATI's New Patent* [online]. ATI Industrial Automation, 2020 [cit. 2020-4-25]. Dostupné z: <https://www.ati-ia.com/company/NewsArticle.aspx?id=700132592>.
- [3] AVNET. *Piezoresistive pressure sensors* [online]. Avnet Abacus, 2020 [cit. 2020-4-15]. Dostupné z: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/piezoresistive-strain-gauge/>.
- [4] BROTHER INDUSTRIES. *TC-32BN QT/FT* [online]. Brother Industries [cit. 2020-3-27]. Dostupné z: <https://machinetool.global.brother/en-ap/tc32bn/feature/index.aspx>.
- [5] DAVID, WILL, S. a SOOKYUNG, S. *Protocol 1.0* [online]. Robotis, 2020 [cit. 2020-4-16]. Dostupné z: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/protocol1/>.
- [6] DUDKA, M. *Přístupy k programování STM32* [online]. Root.cz, 2017 [cit. 2020-4-6]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/pristupy-k-programovani-stm32/>.
- [7] HARWIN. *Technical Drawing / Datasheet - P70-10X.pdf* [online]. [cit. 2020-5-16]. Dostupné z: <https://cdn.harwin.com/pdfs/P70-10X.pdf>.
- [8] HARWIN. *P70-1010045R Individual SMT Spring Loaded Contact, Pogo Pin* [online]. Harwin, 2016 [cit. 2020-5-23]. Dostupné z: <https://www.harwin.com/products/P70-1010045R/>.
- [9] KUGELSTADT, T. *The RS-485 DesignGuide* [online]. únor 2006, 2016 [cit. 2020-4-10]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/s11a272c/s11a272c.pdf?ts=1592999996148&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [10] MANYIK, J., LUND, S., CHUI, M., BUGHIN, J., WOETZEL, J. et al. *Jobs lost, jobs gained: What the future of work will mean for jobs, skills, and wages* [online]. 2017 [cit. 2020-5-6]. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/jobs-lost-jobs-gained-what-the-future-of-work-will-mean-for-jobs-skills-and-wages#automation>.
- [11] OPTOFIDELITY. *OptoFidelity TOUCH* [online]. Optofidelity, 2020 [cit. 2020-3-24]. Dostupné z: <https://www.optofidelity.com/offering/products/touch#filter=video>.
- [12] PROTOTYPUM. *Y Soft BE3D Edee* [online]. Prototypum, 2016 [cit. 2020-6-18]. Dostupné z: <https://prototypum.cz/prace/ysoft-be3d-tiskarna/>.

- [13] REICHL, J. a VŠETIČKA, M. *Wheatstoneův můstek* [online]. Encyklopedie fyziky, 2014 [cit. 2020-4-18]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/1631-wheatstoneuv-mustek>.
- [14] ROBERTSON, C. T. *Printed Circuit Board Designer's Reference; Basics*. Prentice Hall, 2013. ISBN 978-0130674814.
- [15] ROBOTS, U. *Automatic and manual tool changer* [online]. Universal robots, 2020 [cit. 2020-3-22]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/plus/accessories/smartshift-automated-tool-changer/>.
- [16] SHOPBOT. *Automatic Tool Changer* [online]. ShopBot, 2006 [cit. 2020-3-27]. Dostupné z: <https://www.shopbottools.com/products/accessories/atc>.
- [17] STMICROELECTRONICS. *Positive voltage regulators* [online]. červen 2016, Rev 26 [cit. 2020-4-10]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/cd00000446-1795493.pdf>.
- [18] STMICROELECTRONICS. *Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, up to 512 KB Flash, 170 MHz / 213DMIPS, 128 KB SRAM, rich analog, math accelerator* [online]. říjen 2019, Rev 2 [cit. 2020-4-21]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/dm00528822-1799294.pdf>.
- [19] TECH, R. *Meet Matt, the ultimate touchscreen testing tool* [online]. Rinf tech, 2020 [cit. 2020-3-22]. Dostupné z: <https://www.mattrobot.ai/>.
- [20] TEXAS INSTRUMENTS. *SNx5HVD1x3.3-V RS-485 Transceivers datasheet* [online]. 2017 [cit. 2020-4-3]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75hvd12.pdf>.
- [21] TIŠNOVSKÝ, P. *Sběrnice RS-422, RS-423 a RS-485* [online]. Root.cz, 2008 [cit. 2020-5-2]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/sbernice-rs-422-rs-423-a-rs-485/>.
- [22] TOBIAS BEUTEL, S. B. a. C. B. *Analysis of a closed Wheatstone bridge consisting of doped piezo resistors*. 2011.
- [23] WIREDWORKERS. *Touchscreen device testing with the Franka Emika Panda* [online]. WiredWorkers, 2020 [cit. 2020-3-24]. Dostupné z: <https://wiredworkers.io/touchscreen-device-testing-with-a-cobot/>.

Seznam zkratek

ADC	Analog to digital converter.
API	Application programming interface.
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard.
CTS	Clear to send.
DMA	Direct memory access.
DPS	Deska plošných spojů.
FDM	Fused deposition modeling.
HAL	Hardware Abstraction Layer.
IDE	Integrated Development Environment.
LL	Low level.
REST	Representational state transfer.
RTS	Request to send.
SPI	Serial peripheral interface.
USART	Universal synchronous/asynchronous receiver transmitter.

Seznam obrázků

3.1	Nástroj Matt pro automatické testování zařízení s dotykovým displejem. [19]	5
3.2	Zařízení firmy OptoFidelity s názvem TOUCH pro testování zařízení s dotykovým displejem. [11]	6
3.3	Kolaborativní robot Panda od firmy WiredWorkers pro testování i velkých zařízení s dotykovým displejem. [23]	7
3.4	Robotické rameno pro testování zařízení s dotykovým displejem od firmy Y Soft.	8
3.5	Průmyslový upínač od firmy ATI s pneumatickým aktuátorem. [2]	9
3.6	Průmyslový upínač od firmy ATI s pneumatickým aktuátorem. [2]	9
3.7	Průmyslový upínač od firmy Smartshift robotics s rybinovou drážkou. [15]	10
3.8	Držák nástrojů od firmy Smartshift robotics s automatickým povolením nástroje. [15]	10
3.9	Pevný zásobník nástrojů cnc frézky. [16]	11
3.10	Posuvný zásobník nástrojů obráběcího centra. [4]	12
4.1	Stylus s lineárním potenciometrem.	15
4.2	Řetězec přenosu síly z hrotu stylusu na piezorezistivní senzor.	16
4.3	První verze systému upínání a zásobníku nástrojů.	17
4.4	Tělo koncového efektoru s elektronikou a částí upínače.	18
4.5	Blokové schéma navrhované elektroniky.	19
4.6	Wheatsonuv můstek využitý v piezo senzoru. [22]	22
4.7	Pružný kontakt od firmy Harwin pro spojení nástroje a robota. [8]	24
4.8	Schéma zapojení, část procesoru.	25
4.9	Schéma zapojení, měřící řetězec a část pro komunikaci.	26
4.10	Rozložení součástí a spojů na DPS.	27
4.11	Elektronika pro měření síly a komunikaci po sériové lince.	27
5.1	Diagram systému robota.	28
6.1	Návrh upínače pro Smart stylus.	34
6.2	Sestava zajišťovací spirály s tvarovým prvkem pro přenos momentu z motoru na spirálu.	35
6.3	Zásobník nástrojů se třemi pozicemi pro Smart stylus.	37
7.1	3D tiskárna BE3D EDEE od firmy Y Soft. [12]	38
7.2	CNC frézka od firmy Konečný pro obrábění neželezných kovů.	39
7.3	Část upínače master vyrobená z hliníkové slitiny.	40
7.4	Část upínače tool vyrobená z hliníkové slitiny.	41
7.5	Držák utahovací spirály vyrobený z hliníkové slitiny.	41

7.6	Uložení utahovací spirály vyrobené z hliníkové slitiny.	42
7.7	Utahovací spirála pro zajištění upínače vyrobená z hliníkové slitiny.	42
8.1	Robot se Smart stylusem a možností automatické výměny nástroje.	44
8.2	Smart stylus s upínačem připevněným k robotickému ramenu.	44

Seznam tabulek

5.1	Tabulka instrukcí protokolu Dynamixel [5]	31
5.2	Tabulka chybových hlášek protokolu Dynamixel [5]	32

Příloha A

Elektronické přílohy

- Zdrojové soubory DPS Smart stylus
- Zdrojové kódy Smart stylus