



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MONITOROVÁNÍ PROCESU FDM TISKU

MONITORING OF FDM PRINTING PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Hynek Rafaja

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Hynek Rafaja
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Monitorování procesu FDM tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk založený na principu nanášení roztaveného drátu (FDM - Fused Deposition modeling) patří v současné době nejrozšířenějším. Tištěné díly obvykle dosahují rozměrové chyby 1 až 2 milimetry. U této technologie se často setkáváme s chybami tisku. Ty mohou být způsobeny uživatelem (nevhodné nastavení tiskárny, nebo nevhodná příprava dat), nebo tiskárnou samotnou. Mezi nejběžnější problémy patří přerušení tisku, odlepení tištěného dílu od podstavy, deformace tvaru nebo zborcení stavby v místě chybně nastavených podpor. Aktuálním trendem je zvyšování přesnosti a spolehlivosti tisku na základě monitorování tiskového procesu. Na tuto problematiku je zaměřena diplomová práce.

Typ práce: vývojová - konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je vývoj monitorovacího systému k FDM tiskárnám, který zajistí identifikaci vybraných problémových stavů během procesu 3D tisku.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikace možností monitorování FDM tisku,
- návrh koncepčních přídavných modulů,
- realizace vybraného řešení,
- experimentální ověření a ekonomické zhodnocení realizovaného řešení .

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:


GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HEOTTER. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co., 2016. ISBN 978-1-56990-583-8.

COOPER, Kenneth G. Rapid Prototyping Technology: Selection and Application. January 9. Florida, USA: CRC Press, 2001. ISBN 978-0-203-91079-5

MILLER, Frederic P., John MCBREWSTER, John a MCBREWSTER. Fused Deposition Modeling [online]. VDM Publishing, 2010 [cit. 2017-10-27]. ISBN 978-613-1-72765-8. Dostupné z: <https://www.morebooks.de/store/gb/book/fused-deposition-modeling/isbn/978-613-1-72765-8>

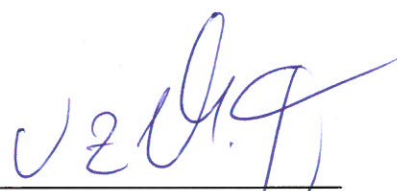
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu





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

ABSTRAKT

Cílem této práce je vývoj monitorovacího systému pro 3D tisk metodou Fused Deposition Modeling, který bude schopný identifikovat chybové stavy vzniklé při tisku. Při řešení byly identifikovány potřebné chybové stavy. Poté došlo k naprogramování algoritmu, který pomocí kritéria identifikuje daný chybový stav. Výsledný Hardware pro monitorování byl implementován do tiskárny a experimentálně ověřen. Byl vytvořen systém, který dokáže identifikovat chybové stavy s přesností 94,7 %. Hlavním přínosem této práce je automatická identifikace chybových stavů, která v případě nutnosti zastaví tisk. To vede ke zmenšení zmetkovitosti a šetření výrobních nákladů. Do budoucna by software mohl při identifikaci chybového stavu automaticky upravit parametry tisku. Tím by došlo k zamezení nebo úplnému odstranění chybového stavu bez zásahu uživatele.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aditivní technologie, online monitorování, 3D tisk, FDM

ABSTRACT

The target of this work is the development of a monitoring system for 3D printing by the Fused Deposition Modeling method, which will be able to identify printing error conditions. During the solving process the needed error conditions were identified. Then, an algorithm was programmed to identify the error condition using the criterion. The resulting Monitoring Hardware was implemented in the printer and experimentally verified. A system has been developed that can identify error conditions with an accuracy of 94.7%. The main benefit of this work is the automatic identification of error conditions that stop printing if necessary. This leads to a reduction in scrap and cost savings. In the future, the software could automatically adjust the print parameters when identifying an error condition. This would prevent or completely eliminate the error condition without user intervention.

KEYWORDS

Additive manufacturing, online monitoring, 3D print, FDM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RAFAJA, Hynek. *Monitorování procesu FDM tisku*. Brno, 2018. 71 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval paní Ing. Anetě Zatočilové Ph.D. za cenné rady a ochotu při vedení mého diplomového projektu. Dále bych rád poděkoval své přítelkyni, rodině, přátelům za motivaci a podporu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Anety Zatočilové Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

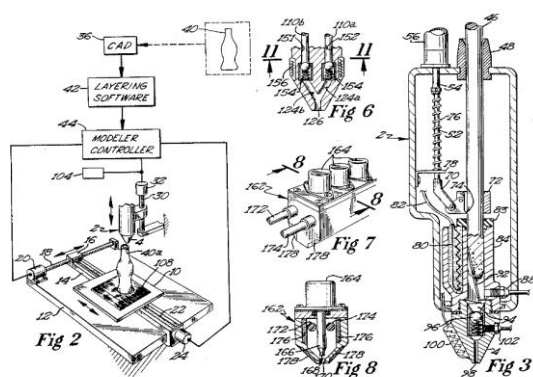
1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Přehled používaných metod pro aditivní výrobu z plastu	14
2.1.1	Stereolitografie (SLA)	14
2.1.2	Selective Laser Sintering (SLS)	14
2.1.3	Laminated Object Manufacturing (LOM)	14
2.1.4	Fused Deposition Modeling (FDM)	15
2.2	Spolehlivost FDM tisku	16
2.3	Současná řešení monitorování FDM tisku	17
2.3.1	Online Real-Time Quality Monitoring in Additive Manufacturing Processes Using Heterogeneous Sensors [14]	17
2.3.2	Monitorování pomocí digitálních mikroskopů	19
2.3.3	Monitorování trysky vibračními senzory	21
2.3.4	Monitorování tisku pomocí ultrazvuku	21
2.3.5	Monitorování trysky a pracovního prostoru termokamerami	22
2.3.6	Monitorování kamerovým systémem	23
2.3.7	Komerčně používané metody	24
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	25
3.1	Analýza problému	25
3.2	Cíl práce	28
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	29
4.1	Monitorování pomocí laserového skenování	29
4.1.1	Laserové skenování	29
4.1.2	Automatická kalibrace pracovní desky	31
4.2	Monitorování polohy trysky pomocí enkodérů	31
4.3	Monitorování vibračními senzory	33
4.4	Monitorování pomocí kamer	34
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	36
5.1	Aparatura pro monitorování	37
5.2	Realizace modulu monitorování pomocí laserového skenování	39
5.2.1	Laserové skenování	39

5.2.2	Automatická kalibrace pracovní desky	45
5.3	Realizace modulu pro monitorování polohy trysky pomocí enkodérů	47
5.4	Realizace modulu pro monitorování vibračními senzory	49
5.5	Experimentální ověření	55
5.5.1	Modul monitorování pomocí laserového skenování	55
5.5.2	Modul pro monitorování polohy trysky pomocí enkodérů	58
5.5.3	Modul pro monitorování vibračními senzory	58
6	DISKUZE	60
6.1	Modul monitorování pomocí laserového skenování	60
6.2	Modul pro monitorování polohy trysky pomocí enkodérů	61
6.3	Modul pro monitorování vibračními senzory	62
6.4	Zhodnocení použitého hardwaru a softwaru	63
6.5	Ekonomické zhodnocení	63
7	ZÁVĚR	64
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	67
9.1	Použité zkratky	67
9.2	Použité symboly	67
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	68
11	SEZNAM TABULEK	70
12	SEZNAM PŘÍLOH	71

1 ÚVOD

Stále častěji využívanější technologií výroby je v současné době aditivní výroba [1]. Dříve se metody 3D tisku používaly zcela zřídka, převážně pro výrobu prototypů. Postupem času se úroveň přesnosti a kvality vyrobených součástí zlepšila, což se projevilo především v širším spektru využití.

Metody 3D tisku umožňují výrobu tvarově složitých prvků. Tvorba začíná modelem součásti, která je následně pomocí vhodného programu rozložena na jednotlivé vrstvy po určitém kroku, a tyto vrstvy jsou následně ukládány jedna na druhou, až vznikne kompletní model [2]. Zvolením vhodných parametrů tisku můžeme mnohdy šetřit výrobní náklady oproti konvenčním metodám. Může také dojít k redukci hmotnosti součástí volbou správné výplně. Mechanické vlastnosti dílů zhotovených metodou Fused Deposition Modeling (FDM) se podobají mechanickým vlastnostem dílů vyrobených konvenčně dostupnými metodami. V dnešní době máme k dispozici více druhů materiálů (plasty a jejich modifikace nebo kovy a jejich slitiny) [3]. Nejrozšířenější metodu 3D tisku, která využívá plastových materiálů ke tvorbě modelu, patří metoda Fused Deposition Modeling. Princip této metody spočívá v ohřevu materiálu ve formě plastového drátu a jeho následné vytlačování přes tryčku.



obr. 1-1 Schéma metody FDM – Patent US 5121329 [10]

U metody FDM se často setkáváme s chybami v tisku, jako jsou například rozměrová přesnost, odtržení tisku od podložky, přerušování tisku atd. [3]. Chyby závisí na vlastnostech tiskárny, materiálu a parametrech tisku. Současným trendem je monitorování průběhu FDM tisku za pomoci senzorů. Studie zabývající se touto problematikou sledují vznikající chyby a umožňují jejich minimalizaci v reálném čase.

Tato diplomová práce se zabývá sledováním chyb u FDM procesu a metod pro monitorování tohoto procesu v reálném čase. Cílem je konstrukce zařízení pro monitorování FDM procesu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Aditivní výroba je známá také jako 3D tisk, která umožňuje tvorbu tvarově složitých modelů [4]. Proces začíná přípravou 3D dat. 3D model (obvykle ve formátu STL) je rozložen do jednotlivých vrstev za použití dané výšky kroku. Poté jsou vrstvy nanášeny jedna na druhou, dokud nevznikne výsledný model.

2.1 Přehled používaných metod pro aditivní výrobu z plastu

2.1.1 Stereolitografie (SLA)

Metoda, která využívá ke tvorbě 3D objektů vytvrzování fotopolymeru [5, 6]. Fotopolymer (pryskyřice) je nejčastěji v tekuté formě, je na určitých místech ozařován UV zářením různých vlnových délek, tím dochází k postupnému vytvrzování. Vytvrzena je vždy jen jedna vrstva a postupným skládáním vzniká výsledný model.

2.1.2 Selective Laser Sintering (SLS)

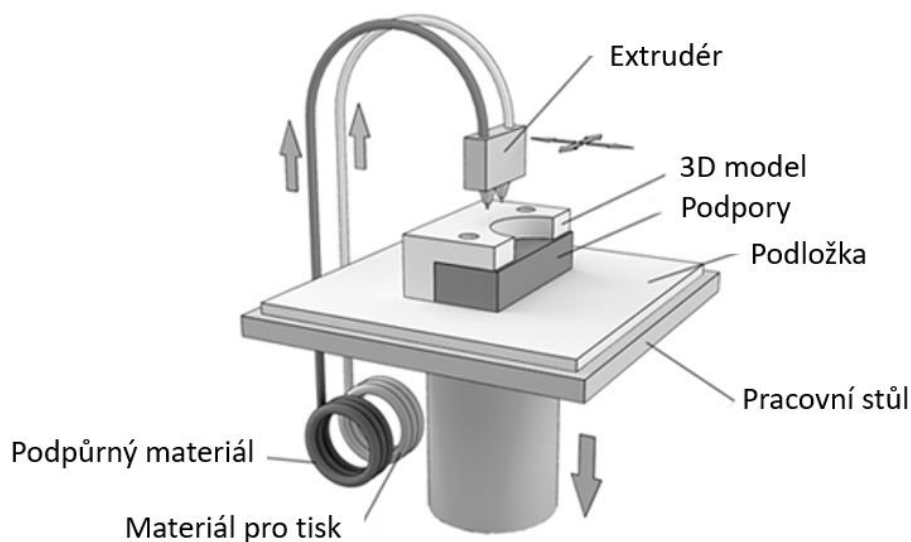
Metoda, která je založena na vytvrzování prášku (materiál může být plast nebo také kov) [6, 7]. Laser osvítí vrstvu prášku, tím dojde k zahřátí prášku nad teplotu skelného přechodu použitého plastu. Následně dojde k přeměně v pevnou strukturu. Vrstvy jsou ukládány na sebe a postupným zapékáním jednotlivých vrstev dojde ke tvorbě výsledného modelu.

2.1.3 Laminated Object Manufacturing (LOM)

U této metody je materiál ve formě tenké vrstvy plastu nebo papíru pokládán do tiskového prostoru a vyřezáván nožem nebo laserem do požadovaného tvaru [6,8]. Jednotlivé vrstvy jsou spojovány lepidlem

2.1.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

Metoda FDM patří mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější metody 3D tisku [4, 8]. Jiné označení pro tuto metodu je Fused Filament Fabrication (FFF). Princip spočívá v roztavení materiálu a následné vytlačování přes trysku. Plastový materiál ve formě struny, která je navinutá na cívku a podávána do tiskové hlavy, je zahřívána (roztavena) na teplotu vyšší jak teplota skelného přechodu použitého plastu [9]. Poté je ukládán do jednotlivých vrstev na podložku. Tato podložka je vyhřívána, aby bylo zamezeno rychlému ochlazení. Po dokončení vrstvy se celá podložka posune o výšku jednoho kroku a začne se nanášet další vrstva. Pro tuto metodu existuje mnoho různých materiálů. Například plasty (ABS, PLA, PETG) nebo plasty s příměsí kovových nebo dřevěných pilin. Tisková hlava je nejčastěji tvořena jednou tryskou, dochází k tisku jednoho materiálu. Pro tisk dvou materiálů je tisková hlava osazena dvěma tryskami, lze tisknout dva materiály současně. Můžeme tisknout například výsledný model z jednoho materiálu a podpory z materiálu odlišného. Existují také tiskárny, které umožňují tisk čtyř různých materiálů najednou, to lze využít například v design průmyslu. Výroba modelu je ovlivněna mnoho faktory, co se týče vlastností tiskárny a parametrů tisku. Parametry tisku nastavujeme při tvorbě g-codu, což je programový kód, obsahující povely pro tiskárnu. G-kód řídí rychlosti tisku, polohu trysky, teploty trysky, podložky aj. Výhodou této technologie je jednoduchost, spolehlivost, tvorba složitých modelů.



obr. 2-1 Metoda FDM [10]

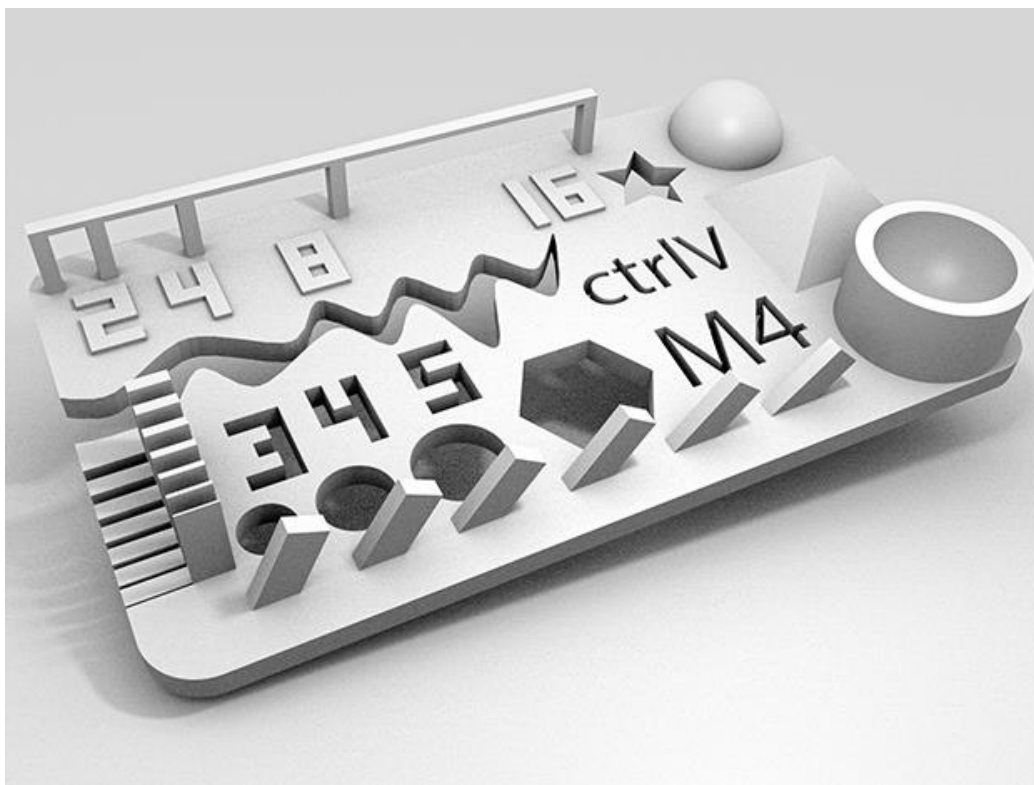
2.2 Spolehlivost FDM tisku

Po vypršení patentů, převážně od firmy Stratasys, se 3D tiskárny staly dostupnějšími, a to hlavně po finanční stránce [11]. Existuje mnoho druhů 3D tiskáren, které se liší v konstrukci, použití, ceně atd. Tyto tiskárny můžeme přirovnat k výrobním strojům. Může se jednat o amatérské nebo profesionální použití. Tak jako u každého stroje dochází během výroby ke vzniku chyb. Chyby může mít za následek hardware nebo software (přehled nejčastějších chyb v příloze č. 1). Hovoříme tedy o spolehlivosti FDM tisku.

Spolehlivost

Spolehlivost je vlastnost stroje, která umožňuje plnit jeho funkci ve stanovené toleranci při dodržení pracovních podmínek a požadované životnosti stroje [12]. Se spolehlivostí také souvisí bezporuchovost, bezpečnost, funkčnost, udržovatelnost atd. Spolehlivost vyhodnocujeme pomocí testů a experimentů. U spolehlivosti systému (strojů) můžeme započítat vnější a vnitřní vlivy.

Každoročně vychází srovnání nových tiskáren (americký web Make: [13]), kde se určují faktory jako spolehlivost, kvalita výroby atd. Tyto věci se určují experimentálně za použití testů a různých testovacích výtisků. Testovací výtisky slouží také ke kalibraci tiskárny. Na obr. 2-2 je zobrazen testovací výtisk, obsahující např. převisy, tisk různých uhlů atd.



obr. 2-2 Testovací výtisk [12]

2.3 Současná řešení monitorování FDM tisku

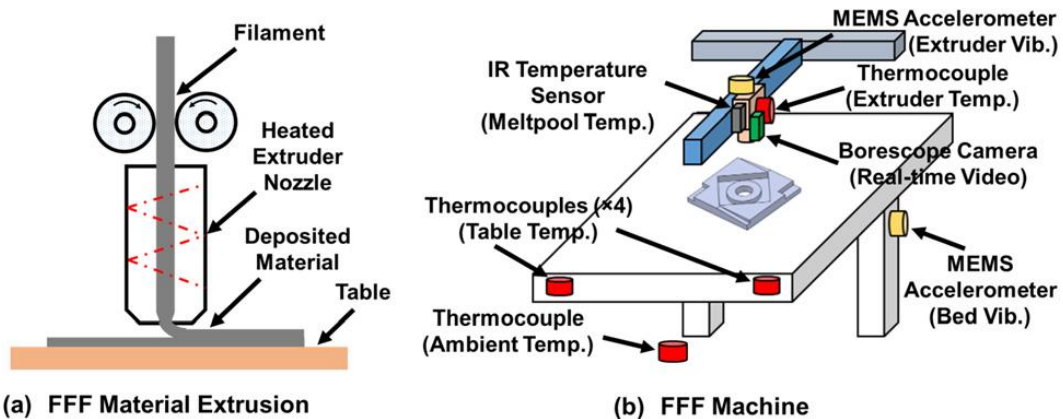
Metoda FDM umožňuje výrobu komplexních součástí. Při výrobě dochází ke vzniku chyb, které ovlivňují mechanické vlastnosti a rozměrovou přesnost [3]. Stroje využívající tuto metodu většinou postrádají senzory pro monitorování. Vědecké články zabývající se touto problematikou popisují přístupy monitorování v reálném čase pomocí senzorů [14–18]. Využitím senzorů dostaneme informace o stavu stroje a stavu výrobku. Výsledkem je zpětná vazba, díky které může dojít ke změně parametrů výroby. To může mít za následek zlepšení mechanických vlastností, snížení zmetkovitosti, snížení výrobních nákladů. Následující kapitola je zaměřena na metody monitorování FDM metody v reálném čase.

2.3.1 Online Real-Time Quality Monitoring in Additive Manufacturing Processes Using Heterogeneous Sensors [14]

Cílem je identifikovat poruchové režimy v procesech aditivní výroby se zaměřením na metodu FFF (jiné označení metody FDM) [14]. Článek rovněž popisuje návrh vlastního měřicího systému skládajícího se ze čtyř druhů senzorů pro zkoumání různých aspektů procesu FFF (termočlánky, akcelerometry, IR bezkontaktní snímač teploty a kameru) v reálném čase.

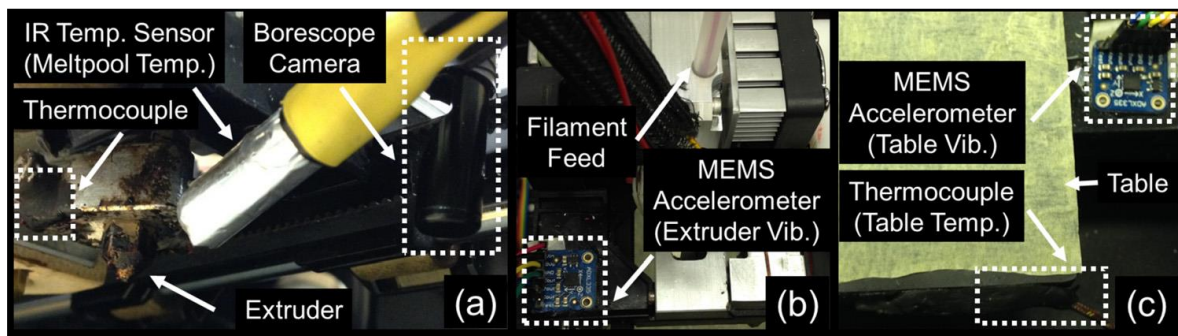
První část se zaměřuje na měření dat. Tato data jsou zaznamenávána pomocí Arduino Mega 2560 (termočlánky a vibrační senzory), s výjimkou IR snímačů. Získáno bylo 14 kanálů dat snímačů včetně video záznamu (kanály byly synchronizovány se vzorkovací frekvencí 2.5 Hz). Pro vizualizaci a porovnávání je použit Matlab. Data jsou závislá na teplotě extrudéru, poměru rychlosti posuvu extrudéru ku průtoku materiálu a kvalitě povrchu v závislosti na tloušťce vrstvy. Po měření je vytvořena knihovna chyb. Pomocí kamery si můžeme proces tisku přehrát a vzniklé chyby můžeme přiřadit data, při kterých byla tato chyba naměřena obr. 2-5. Kde jsou přiřazeny 3 stádia tisku (normální proces, abnormální proces, selhání tisku), které ovlivňují různé teploty. Obdobně se data přiřazují u ostatních měřených parametrů.

Poté se druhá část zaměřuje na ověření předchozího měření. Na reálném tisku se ověřuje monitorování probíhající výroby a schopnost odhalení vznikající chyby. Při vzniku chyby by mělo dojít ke změně parametrů tisku a následnému zamezení této chyby v reálném čase.

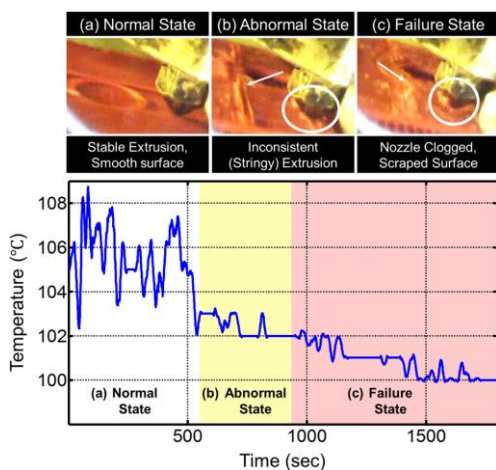


obr. 2-3 (a) Schéma metody FFF, (b) Schéma metody FFF vybaveno několika senzory pro měření [14]

obr. 2-4 popisuje umístění senzorů, (a) bezkontaktní IR teplotní čidlo pro měření teploty extrudéru a kamera pro zachycení extrudéru včetně termočlánku v reálném čase, (b) akcelerometr zachycující vibrace extrudéru, (c) akcelerometr pro měření vibrací podložky a termočlánek pro měření teploty podložky [14].



obr. 2-4 Senzorové pole pro snímání metody FFF [14]

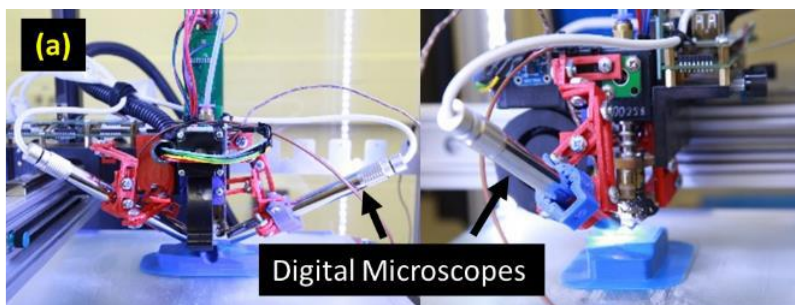


obr. 2-5 Přiřazení sledovaných procesních stavů k vyhodnoceným datům. [14]

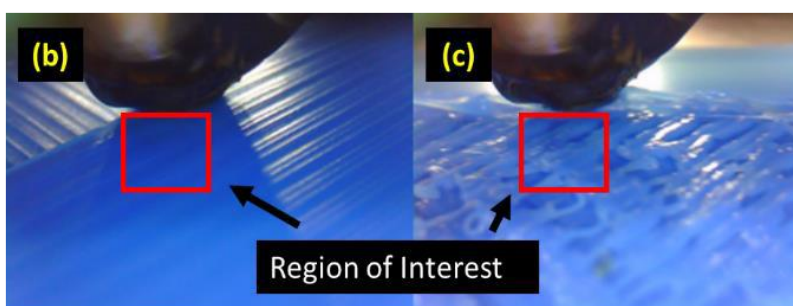
Zavedením monitorovacího systému pomocí senzorů lze získávat informace ohledně teploty podložky, extrudéru, materiálu, měření vibrací podložky a extrudéru v reálném čase [14]. Vstupní proměnné jsou korelovány (výška vrstvy, teplota extrudéru, poměr rychlosti nanášení ku průtoku materiálu) v závislosti na drsnosti povrchu vyráběného dílu. Monitorování procesu FFF v reálném čase, vede k identifikaci zamezení selhání výroby. Například lze zamezit ucpaní trysky se spolehlivostí a přesností na 85 %.

2.3.2 Monitorování pomocí digitálních mikroskopů

Hlavním cílem této studie je vyvinout monitorovací systém pro FDM proces, který je založený na analýze obrazu a zpětnovazební kontrole v reálném čase [15]. Systém se skládá ze dvou digitálních mikroskopů s rozlišením 640 x 480 pixelů (vysokou vzorkovací frekvencí), které jsou připevněny na extruder po stranách se sklonem 45°.



obr. 2-6 Upevnění digitálních mikroskopů na extrudér [15]



obr. 2-7 Snímaná oblast tisku (b) bez defektů, (c) s defekty [15]

Proces monitorování je řízen PID regulátorem a vstupní parametr je posuv vytlačovaného materiálu. Dva hlavní zkoumané defekty jsou pod extruze a nad extruze. Oblast snímání obrazu je omezena na prostor v blízkém okolí trysky viz. obr. 2-7 b, c [15]. Analýza obrazu je založena na klasifikaci obrazu vektorových texturních prvků. Obraz je nejprve převeden do stupňů šedi, poté každý pixel reprezentuje binární číslo, následně se pixely porovnávají mezi sebou. Data pro vyhodnocování lze získat jak online tak i offline přístupem. Z naměřených dat jsou odvozeny konstanty, dle kterých je následně nastaven PID regulátor, který slouží pro kontrolu v reálném čase.

Porovnávací kritérium: [15]

$$G(i, j : \Delta r, \Delta c,) = \frac{1}{(M-\Delta c)(N-\Delta r)} \sum_{m=1}^{M-\Delta c} \sum_{n=1}^{N-\Delta r} g \quad (1)$$

$$g = \begin{cases} 1 & \text{if } I(m, n) = i \text{ and } I(m + \Delta r, n + \Delta c) = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Kde:

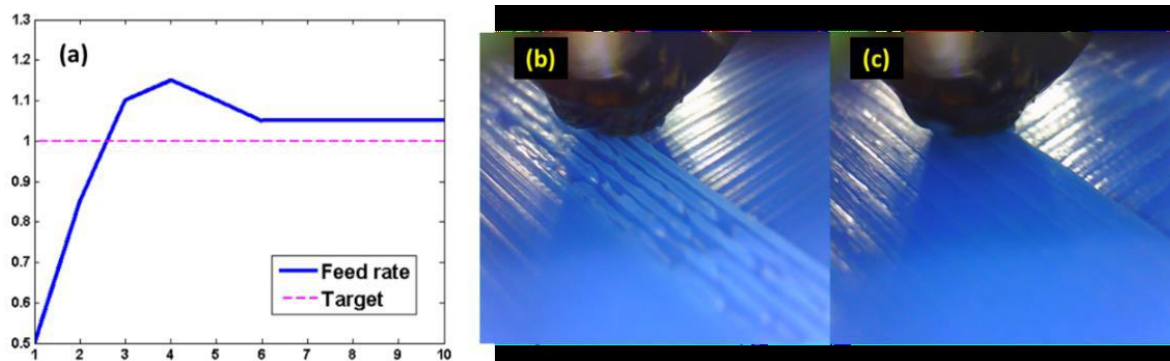
I Oblast

M,N Rozměr oblasti

G Prvek definován četností kombinace dvou pixelů

i,j Intenzita pixelů

$\Delta r, \Delta c$ Prostorová vzdálenost



obr. 2-8 Zkoušky monitorovacího systému [15]

Studie je provedena na tiskárně Hyrel System 30M [15]. Testovací tisk je spuštěn s posuvem vytlačování 100 % (obr. 2-8 c, normální stav) a následně je posuv úmyslně změněn (obr. 2-8 b, chybový stav) na 50 % (tj. 50 % chyba). Po cca 6 - ti vrstvách je tisk pomocí zpětné vazby vrácen do normálu. Pro vyhodnocování je použit PID regulátor. Ze studie dále vyplývá, že použití dvou digitálních mikroskopů je nedostačující. V tomto případě by použití IR kamer vedlo ke zlepšení výsledků. Mikroskopy jsou také nevhodně umístěny, snímají pouze okolní oblast trysky, a to pouze v jednom směru.

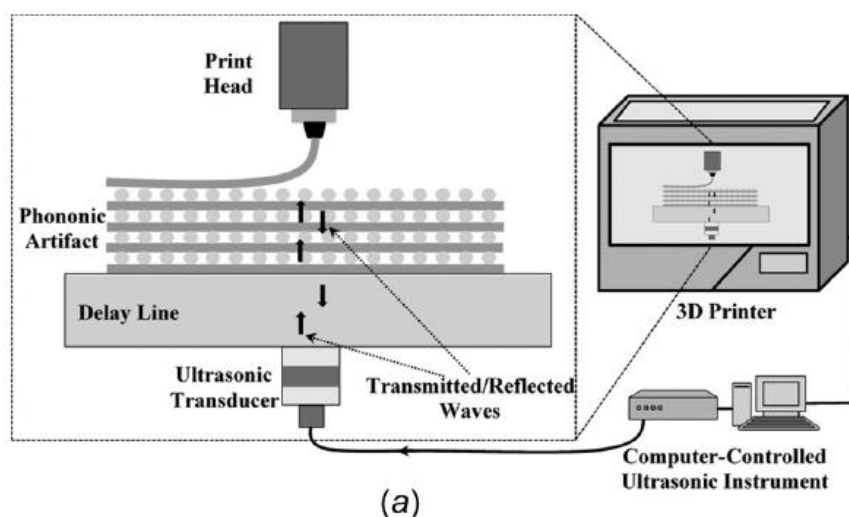
2.3.3 Monitorování trysky vibračními senzory

Zanášení trysky je jednou z nejvýznamnějších chyb u současných tiskáren využívajících FDM proces. Existují tři hlavní příčiny, proč se trysky ucpávají, například přítomnost cizího tělesa, přehřátí materiálu nebo chybějící místo pro vytlačování [16]. Pro monitorování trysky můžeme použít akcelerometr, který snímá vibrace trysky. V tomto případě snímá akcelerometr (Bruel and Kjaer 4393) vibrace vzniklé při tisku [16]. Vibrace převážně závisí na posuvu vytlačovaného materiálu. Metoda se také opírá o dynamický model, který simuluje ucpání trysky. Z tohoto modelu byla stanovena frekvence, která odpovídá ucpané trysce. Výpočty probíhaly v programu Matlab. Dynamický model byl vytvořen pro několik průměrů trysky. Frekvence odpovídající ucpání trysky byla následně experimentálně ověřena. Dále byl tento model otestován na reálných situacích. Pro měření frekvenci vibrací byla použita aparatura Hewlett-Packard 35670a.

Experimentální výsledky ukázaly, že navrhovaný model může relativně přesně předpovídat ucpání trysky. Především záleželo na uchycení extruderu k tiskárně, umístění snímače, rychlosti posuvu vytlačování a průměru trysky.

2.3.4 Monitorování tisku pomocí ultrazvuku

Metoda je založena na snímání objektu pomocí ultrazvukových vln [17]. Monitorování v tomto případě můžeme provozovat v reálném čase, ale také již na hotovém výrobku. Použití ultrazvukových vln vede k nedestruktivnímu snímání součástí.



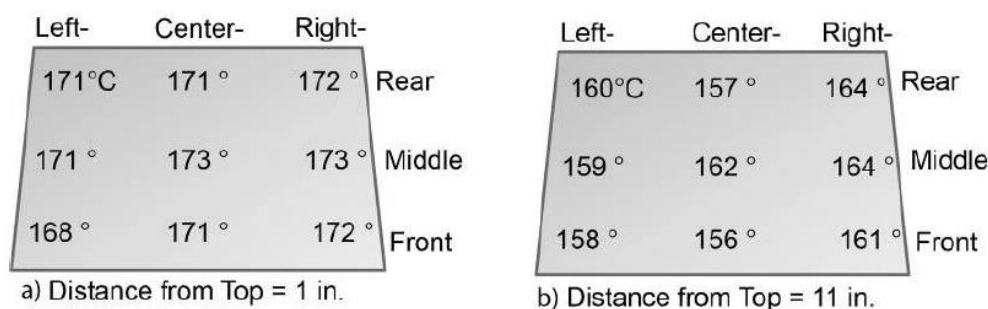
obr. 2-9 Schéma metody využívající ultrazvuk [17]

Pomocí ultrazvuku jsou snímány jednotlivé vrstvy v celém objektu [17]. Byla použita aparatura (ATT, Pharmacoustics Technologies, LLC, Potsdam, NY), která dokáže fungovat v režimu ultrazvuku, ale také v režimu pulsního echa. Pomocí LabView byly jednotlivé snímané vrstvy uloženy, následně nahrány do programu Matlab a porovnány s původní geometrií modelu. Následně byly vzorky zkoumány pod optickým mikroskopem (BXFM-ILHSPU, Olympus). Pomocí porovnání naměřených dat a reálných vzorků došlo k identifikaci frekvencí odpovídajícím daným defektům. Toto snímání dokáže odhalit povrchové defekty i vnitřní defekty.

Popřípadě špatně spečené vrstvy. Hlavní výhody současného přístupu sledování jsou následující: je neinvazivní vůči výrobku, kvalita tisku je sledována v reálném čase (lze použít pro monitorování v reálném čase se zpětnou vazbou). Může být použita k detekci geometrických defektů a nesrovnalostí, ale také pro detekci vnitřní struktury a mechanických vlastností součástí. Současná práce je pouze koncepce, proto byla v práci uvedena pouze omezená sada údajů.

2.3.5 Monitorování trysky a pracovního prostoru termokamerami

Tiskárny za chodu pracují s vysokými teplotami. Pracovní teplota trysky je od 230-260 °C pracovní teplota podložky je v rozmezích od 80-110 °C (platí pro materiál ABS, většina materiálů má doporučené teploty pro tisk [3]). Tyto teploty jsou snímány pomocí termistorů. U podložky dochází zahřívání velké pracovní plochy [18]. Teploty podložky se tedy mohou lišit, na krajích a uprostřed mohou být odlišné. Infračervená kamera (IR) dokáže monitorovat rozložení teplot na povrchu objektu s relativně dobrou přesností. Snímáním tiskové plochy můžeme monitorovat rozložení teplot v průběhu tisku obr. 2-10. Upevněním IR kamery na extruder lze zaznamenávat teploty vytlačovaného materiálu a jeho následné ochlazování, ke kterému dochází při kontaktu s níže uloženou vrstvou.



obr. 2-10 a) rozložení teplot ve vzdálenosti 1 palce od podložky, b) rozložení teplot ve vzdálenosti 11 palců od podložky [18]



obr. 2-11 Příklady snímání trysky IR kamerou, vlevo vrstva pokládána na podložku, vpravo vytlačování materiálu skrze trysku [18, 19]

Studie zabývající se monitorováním průběhu teplot pomocí IR kamery poukazuje na několik výsledků [18]. Teploty tiskového prostoru jsou odlišné. Maximální teplotní rozdíl byl naměřen 28 °C. Monitorování IR kamerou v průběhu tisku umožňuje detekci teplotních gradientů, které mohou vést k deformacím objektu. Snímáním trysky pomocí IR kamery bylo zjištěno, že konstrukce trysky má vliv na vytlačování a teplotu materiálu. I malá konstrukční modifikace trysky má velký vliv na teplotu extruze. Všechna měření probíhala v reálném čase, avšak při tisku nebyla použita žádná zpětnovazební regulace.

2.3.6 Monitorování kamerovým systémem

Metoda analyzující nízkonákladovou formu monitorování pomocí průmyslových USB-kamer [20]. Princip monitorování spočívá v porovnávání obrazu. Vyráběný objekt je vyfocen kamerou, obraz je následně upraven (odstranění pozadí, převedení do vhodného formátu). Poté je z 3D dat vyhotovený obrys objektu. Tyto dva obrazy jsou poté porovnány v Matlabu, dle zadané přesnosti dojde k vyhodnocení. Kamery mají rozlišení 640x480, velikost pixelu je 6 μm , ohnisková vzdálenost 16,6 mm. Snímání kamerami je dvojího typu, první metoda využívá jednu kameru k analýze tvaru objektu. Druhý přístup využívá dvě kamery, lze tedy porovnávat výšku nebo šířku objektu.

Přístupy monitorování byly testovány jednotlivě. Největší přesnost odhalení chyby při tisku, měly tyto přístupy, pokud se použily dohromady [20]. Při tisku se po „n“ vrstvách zjistil tvar daného objektu, pokud se tvar lišil o méně než 5 %, nebyl tisk přerušen. Toto vyhodnocení trvalo cca do 10 s. Poté se pomocí dvou kamer zjišťovala výška a šířka daného objektu, při dodržení odchylky odpovídající méně než 5 %, tisk pokračoval. Vyhodnocení pomocí dvojice kamer bylo pro výpočet náročnější.

Výsledkem je přesný systém pro monitorování chyb, který dokáže od ostatních systému monitorovat více druhů chyb (např. ucpaná tryska), ale také dokáže podrobněji monitorovat nepřesné vrstvy [20]. Testování probíhalo na více materiálech, odlišných barev i tvarů. Do budoucna by bylo možné zkrácení početních intervalů zjednodušením výpočtu.

2.3.7 Komerčně používané metody

Krokové motorky s enkodérem

Pro polohování trysky se u 3D tiskárny používají krokové motorky. Tryska se pohybuje ve 3 osách. Každá osa je polohována jedním krokovým motorkem. Krokový motorek je řízen počtem kroků a směrem, kterým se má o tyto kroky posunout. Pokud dojde k tzv. odskoku vrstev, tisková hlava se neposune na dané místo. Krokový motorek tedy nevykoná dostatečný počet kroků. Přidáním rotačního enkodéru (rotační inkrementální snímání) na krokový motorek, můžeme dostat informace o jeho aktuální poloze [21]. Enkodér je snímač, který snímá otáčky a směr krokového motoru.

Tyto informace o poloze lze uplatnit při zpětnovazebné regulaci. Ustepper je platforma pro krokové motorky obsahující enkodér a programovatelný mikrořadič. Enkodér je rotační 12 – ti bitový, což umožňuje snímat polohu v 4096 krocích (rozlišení 0.088°) [22]. Vyhodnocení polohy probíhá přímo v programovatelném mikrořadiči po propojení s ovládací kartou tiskárny (platforma je kompatibilní s kartou Arduino). Využití najdeme u ovládání a snímání polohy krokového motoru. Toto lze především aplikovat u zpětnovazební regulaci tisku a pro zamezení odskoku vrstev.

Laserový scanner

Tiskárny od firmy MarkForger jsou osazeny laserovým senzorem vzdálenosti [1]. Tento senzor má rozlišení (přesnost) $1\mu\text{m}$ v ose Z a $50\mu\text{m}$ v rovině XY. Dokáže tedy oskenovat tištěnou vrstvu (plochu) a převést ji do programu na 2D data. Poté vyhodnotí rozměrové odchylky vyráběného dílu oproti navrženému modelu pomocí softwaru Eiger. Tyto tiskárny jsou také vybaveny krokovými motorky s enkodéry. Díky těmto sensorům tiskárna dokáže tiskárna vyhodnocovat rozměrovou přesnost dílů během tisku, tím se ale prodlouží výrobní čas. Pomocí enkodéru je zamezeno přeskokům jednotlivých vrstev.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

V současné době je na trhu velké množství tzv. domácích tiskáren za nízkou pořizovací cenu (do 20 tis. Kč) [23, 24]. Tyto tiskárny se často prodávají jako modulární, běžně nemívají zakrytování tiskového prostoru a řízení je řešeno nejčastěji pomocí Arduino Mega 2560 (v kombinaci s shieldem Ramps 1.4). U domácích tiskáren se setkáváme častěji s poruchovými stavy než u tiskáren profesionálních [1, 25, 26]. Chyby tisku bývají způsobeny jednak samotným konstrukčním řešením tiskárny (např. tiskový prostor není vyhříván), rychlejším opotřebením komponent, nebo také lidským faktorem. Můžeme je rozdělit na chyby způsobené hardwarem, softwarem a vlastnostmi materiálu. Mezi hardwarové chyby patří např. odskok materiálu, vibrace při tisku, špatná přilnavost atd. Softwarové chyby jsou způsobeny především nastavením tisku, hovoříme o pod a nad extruze, díry a mezery při tisku, malé prvky se netisknou atd. Mezi chyby způsobené materiálem můžeme zařadit: ucpání trysky, oddělení vrstev, kapky, hrudky atd. Přehled nejčastějších chyb, jejich příčin a odstranění jsou v příloze č. 1 k této práci.

Chyby tisku jsou nežádoucí odchylky od normálního tiskového procesu. Předpokladem k vyřešení chybových stavů je jejich včasná identifikace, kvalifikace, a komplexní analýza v souvislostech. Identifikace chyb tisku může být řešena pomocí monitorovacího systému. Monitorovat je možné například rychlost vytlačování, teploty tisku, výšku tisku, povrch jednotlivé vrstvy atd. Získaná data jsou porovnána s nastavenými hodnotami. Pokud dojde k překročení limitní hodnoty pro daný parametr, jsou možné dva scénáře. Tím jednodušším je pozastavení tisku a upozornění uživatele na tento stav např. přes mobilní síť. Druhým scénářem je přímo automatické přenastavení tiskových parametrů na základě aktuálního stavu a pokračování v tisku. Zpětnovazebné řízení tiskárny s monitorovacím systémem je ideálním řešením eliminace nejčastějších chyb tisku. Tato práce je zaměřena pouze na proces monitorování chyb tisku.

Na základě analýzy současného stavu poznání byly zjištěny následující možnosti monitorování tisku, které jsou z hlediska ceny vhodné pro implementaci do domácích tiskáren:

Monitorování digitálními mikroskopy - kap. 2.3.2

Jedná se o monitorování FDM tisku pomocí dvou digitálních mikroskopů, kterými se následně vyhodnocujeme množství naneseného materiálu [15]. Tím mohou být odstraněny chyby spojené s vytlačováním materiálu. Hovoříme o nad a pod extruzi, tedy o nedostatečném nebo přebytečném množství materiálu. Příčinou této chyby jsou spojeny se chybným podáváním materiálu, průměrem materiálu nebo chybným nastavením funkce „flow rate“ (regulace množství vytlačovaného materiálu). Pomocí PID regulace můžeme měnit parametry vytlačování v reálném čase. Metoda vhodná pro identifikaci a zamezení nad a pod extruze.

Monitorování vibračními senzory - kap. 2.3.3

Monitorováním vibrací je možné identifikovat chyby spojené s ucpáváním trysky [16]. Měřením frekvence například pomocí akcelerometru lze rozeznat, jestli dochází k „normálnímu“ vytlačování materiálu. Při odhalení ucpání trysky může být pomocí komunikace mezi měřicí kartou akcelerometru a řídicí kartou tiskárny tisk pozastaven. Do budoucna by bylo možné rozeznávat další problémové stavy, jako přicpání trysky a tím nedostatečné množství materiálu, které je vytlačováno při tisku.

Monitorování ultrazvukem - kap. 2.3.4

Využitím ultrazvuku můžeme odhalit chyby spojené s přilnavostí materiálu (oddělení vrstev) a vnitřní defekty (např. mezery v materiálu). Chyby závisí především na vlastnostech materiálu [17]. Chyby lze monitorovat v reálném čase nebo vyhodnocovat data po úplném dokončení tisku. Avšak autoři článku neuvádí žádnou změnu parametrů v závislosti na zjištěných chybách.

Monitorování kamerovým systémem - kap. 2.3.6

Jedná se o metodu, která umožňuje využít USB kamery a porovnávání obrazu [20]. Pomocí kamer a vhodného algoritmu lze na rozdíl od ostatních přístupů monitorovat více chyb vznikajících u FDM tisku např.: rozměrové odchylky, vytlačování materiálu, oddělování vrstev. Systém dokáže přesně rozeznat rozdíly v geometrii mezi skutečným dílem a 3D daty

Monitorování polohy trysky pomocí enkodérů

Použitá metoda se začíná používat na komerčně vyráběných tiskárnách. Enkodery monitorují krokové motory (polohu trysky) v daném směru. Touto metodou lze odstranit chyby spojené s odskokem vrstvy [21, 22]. Příčiny dané chyby jsou spojené s mechanickými a elektronickými problémy během pohybu trysky. Pomocí enkodéru lze snímat danou polohu a v případě problému polohu upravit.

Monitorování pomocí laserového skenování

Laserové skenování je od roku 2017 implementované v tiskárně Markforged X7 od společnosti Markforged. Umožňuje monitorování množství nanášeného materiálu (ve směru Z) a vyhodnocování rozměrové přesnosti v rovině XY [1]. Během tisku dojde po „n“ vrstvě ke skenování tištěného modelu a porovnání dat s ideálním modelem. Tiskárna Markforged X7 umožňuje vyhodnocení dat během tisku nebo po dokončení tisku. Data musí být po dokončení tisku vyhodnocena uživatelem.

Pomocí laserového skenování a následného vyhodnocování nanášeného materiálu v ose Z lze identifikovat následující chyby tisku (popis chyb viz příloha č. 1):

- Oddělení vrstev
- Přerušená extruze tisku
- Vlnění rohů
- Kroucení
- Rozměrová přesnost
- Odlepení od podložky

Zmíněné poznatky budou využity k navržení, sestavení a ověření vlastních monitorovacích modulů.

3.2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je navržení, sestavení a ověření monitorovacích modulů, které budou sloužit k identifikaci nejběžnějších chyb FDM 3D tisku. Jednotlivé moduly budou koncipovány tak, aby cenově i koncepčně byly vhodné k implementaci do běžných domácích tiskáren. Z toho důvodu bude jejich řízení řešeno nezávisle na řídicí kartě tiskárny. Základními komponenty jednotlivých modulů budou senzory a měřící karta. Karta pro řízení tiskárny a měřící karta budou spojeny pomocí sériové komunikace. Tím bude možné při identifikaci chybového stavu neprodleně tisk pozastavit. Na základě analýzy současného stavu poznání byl k realizaci zvolen modul pro monitorování rozměrové přesnosti, vibrací, a polohy trysky. Byl také vytvořen koncepční modul pro monitorování pomocí kamer, avšak hardware pro tento modul se liší od ostatních modulů, a proto nebyl vybrán pro realizaci. Monitorování vibrací a polohy trysky bude probíhat nepřetržitě v reálném čase. Monitorování rozměrové přesnosti pomocí laserového skenování bude probíhat vždy po vytisknutí „n“ vrstvy. Pro ověření funkčnosti, spolehlivosti a univerzálnosti vytvořeného modulu bude v závěru práce provedena série testů.

Dílčí cíle diplomové práce:

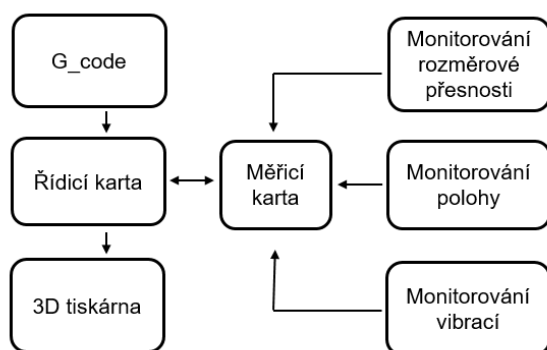
- Koncepční řešení monitorovacích modulů.
- Konstrukční úpravy testovací FDM tiskárny.
- Konstrukční řešení modulů pro monitorování.
- Návrh Hardwaru pro monitorovací moduly.
- Návrh Softwaru pro monitorovací moduly.
- Realizace modulů a implementace monitorovacího systému na FDM tiskárnu.
- Experimentální ověření, testování.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Koncepční návrhy pro monitorování jednotlivých uzlů budou navrženy na RepRap FDM tiskárně. Tyto jednotlivé moduly pro monitorování budou zkonstruovány tak, aby se mohly použít na jakékoli FDM tiskárně bez zasažení do původního hardwaru a softwaru. Jedná se tedy o doplňkové moduly, které pracují samostatně.

Tiskárna využívá řídicí desku, která řídí pohyb jednotlivých os (X, Y, Z). Pro monitorování bude použita deska Arduino Mega 2560, která je plně kompatibilní s řídicí deskou tiskárny. Tyto desky budou spolu propojeny, aby bylo možné v případě defektu zastavit tisk.

Na následujícím schématu (obr. 4-1) je zobrazen návrh zapojení řídicí a měřicí karty, která bude obsahovat jednotlivé monitorovací moduly.



obr. 4-1 Schéma tisku a monitorování

4.1 Monitorování pomocí laserového skenování

Monitorování rozměrové přesnosti bude obsahovat laser. Ten bude sloužit pro vyhodnocování vyrobených (vytištěných) rozměrů. Vyhodnocování bude probíhat v daných intervalech.

Z důvodů, že pracovní deska tiskárny není vždy v rovině oproti trysce a mohlo by tak docházet k nerovnoměrnému tisku (rovina tisku by mohla být pod úhlem), je součástí tohoto modulu navržena automatická kalibrace. Tato kalibrace bude probíhat před každým tiskem a zajistí vhodnou rovinu pro tisk a následné laserové skenování.

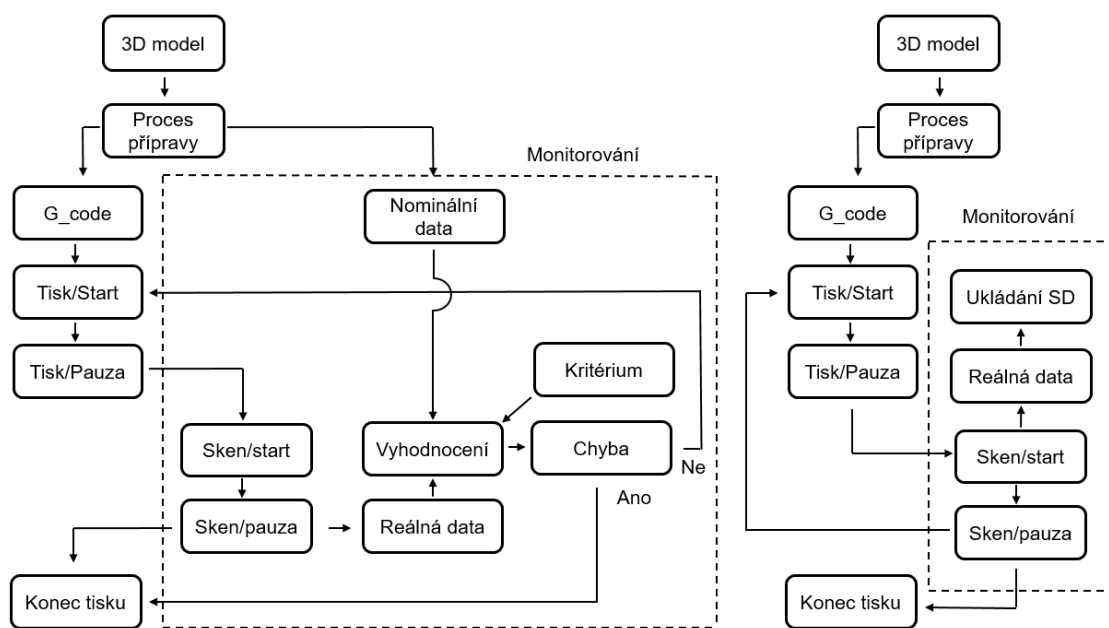
4.1.1 Laserové skenování

Laserové skenování bude probíhat v předem definovaných intervalech, po vytištění stanoveného počtu vrstev. Po dokončení tisku, „n“ vrstvy bude tisk vhodně přeruš

(pozastaven) a dojde k výměně extrudéru za laserový modul. Pomocí tohoto modulu bude naskenovaná daná vrstva dle vhodně vybrané trajektorie pro skenování. Po naskenování budou data uložena na SD kartu. Díky tomuto kroku bude možné data porovnávat i po dokončení tisku. Data budou moci být vyhodnocena i v průběhu následujícího tisku, který bude po „skenování“ opět pokračovat. Porovnávání dat bude probíhat oproti CAD modelu.

Na obr. 4-2 je algoritmus, ve kterém je popsán koncept laserového skenování. To začíná 3D modelem, z něhož jsou následně připravena data pro tisk a pomocí vhodného softwaru je vytvořen G-code. V případě laserové skenování, dojde k nastavení jednotlivých parametrů (počet skenovaných vrstev, rychlost laseru atd.) a data se poté vloží do g-codu (trajektorie laseru). Ten ve výsledku řídí jak samotný tisk, tak i laserové skenování. Následně je definováno kritérium pro porovnávání jednotlivých skenů (odchylky atd.). Tabulka 4-1 odkazuje na uvažované lasery pro monitorovací modul.

V této práci byly navrženy dva způsoby laserového skenování a následného vyhodnocování – viz algoritmy na obr. 4-2. Algoritmus vlevo měří body během tisku a zároveň je porovnává mezi CAD modelem a reálnými výsledky (naměřené hodnoty budou také uloženy). Při překročení předem stanovené odchylky dojde k zastavení tisku. Tato varianta vyhodnocování slouží převážně k porovnání přídatku materiálu v ose Z. Algoritmus vpravo měří body během tisku, ty se ukládají na SD kartu. Po tisku je možné z těchto dat vyhodnotit skutečné rozměry objektu (např. šířka objektu).



obr. 4-2 Algoritmy pro laserové skenování

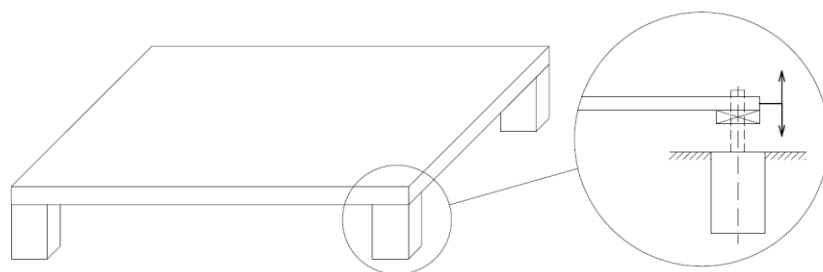
Laser by měl být schopný měřit s přesností $\pm 0,1$ mm, s minimální rozlišovací schopností 0,1 mm, aby bylo možné detekovat chybějící materiál o výšce alespoň 0,2 mm (výška jedné vrstvy).

tab. 4-1 Návrhy laseru [27–30]

Název	Typ	Přesnost	Cena (Kč)
Baumer CH-8501	Bodový	$\pm 0,1$ mm	1 500,00
Arduino Laser	Bodový	4 %	500,00

4.1.2 Automatická kalibrace pracovní desky

Před každým tiskem musí být správně nastavena výška mezi pracovní deskou a tryskou. Pokud je tato výška chybně nastavena, může dojít ke zborcení tisku nebo špatnému přilnutí první vrstvy. Tím je tisk degradován hned od samého počátku. Pomocí automatické kalibrace pracovní desky lze těmto problémům předejít. Mnoho tiskáren používá softwarovou kalibraci. Tato kalibrace zajistí vyplnění nadbytečné nebo nerovnoměrné mezery mezi modelem a pracovní deskou materiálem. Druhý přístup posune (natočí) celý model vůči podložce. Tyto přístupy nejsou vhodné v kombinaci s monitorováním tiskového procesu pomocí skenování, které bylo popsáno v kapitole 4.1.1. Z toho důvodu byla navržena hardwarová kalibrace pracovní desky. Pracovní deska bude osazena mikro krokovými motorky (viz. obr. 4-3). Pomocí těchto motorků bude možné nastavit správnou výšku mezi tryskou a pracovní deskou. Výška bude měřena senzorem vzdálenosti umístěným na extrudéru. Vzdálenost bude měřena v kalibračních bodech (u každého motorku). Celý proces bude automatický a bude se provádět před každým tiskem.



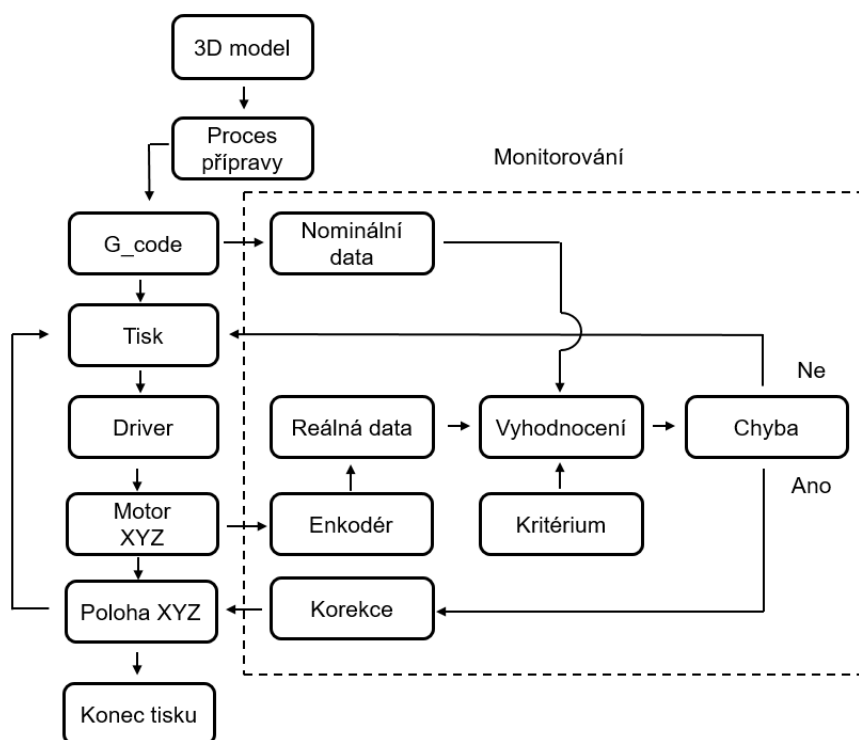
obr. 4-3 Schéma automatické kalibrace

4.2 Monitorování polohy trysky pomocí enkodérů

Tiskárna využívá pro pohyb trysky (extrudéru) krokové motory. Informace o poloze jsou obsaženy v G-codu. Častou chybou při tisku je posunutí vrstev. Tryska se nenachází ve správné poloze (posunutí polohy oproti G-codu). K tomu dochází, pokud krokový motor „ztratí krok“ – chyba způsobená elektronikou tiskárny nebo pokud tryska (extrudér) zavádí o model, cizí těleso – mechanická chyba. Pro monitorování polohy trysky jsou navrženy

enkodéry. Enkodér dokáže snímat počet otáček a směr, kterým se motor otočil. Porovnání aktuální polohy daného motoru a polohy dle G-codu bude možné zjistit, zda se tryska nachází na správném místě. Popřípadě bude možné tuto polohu upravit (dorovnat).

Následující schéma znázorňuje návrh implementace zpětnovazebné korekce pro monitorování polohy trysky za použití enkodérů. Vstupními daty pro korekci je poloha dle G-codu. Ta je porovnávána s aktuální polohou trysky. Tab. 4-2 obsahuje návrhy enkodérů k implementaci do konstrukčního řešení.



obr. 4-4 Algoritmus pro monitorování enkodéry

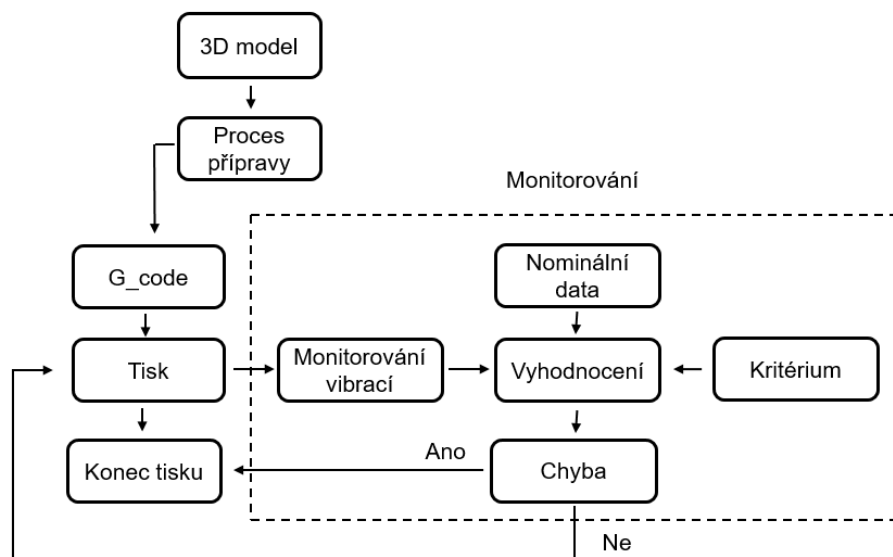
Enkodér by měl mít rozlišení minimálně 1,8 °na jeden krok (hodnota pulzu při pootočení o jednu polohu). Což odpovídá jednomu „kroku“ krokového motoru při 200 krocích na jednu otáčku.

tab. 4-2 Návrhy enkodéru [21, 28][21, 30]

Název	Rozlišení	Kontakt	Rozdělení	Cena (Kč)
Enkodér 400p/R	0,9 °	Mechanický	Inkrementální	600,00
uStepper S-lite	0,088 °	Bezkontaktní	Absolutní	950,00

4.3 Monitorování vibračními senzory

Stav ucpaní trysky je charakteristický rázy/vibracemi extrudéru. Implementací vhodného senzoru vibrací bude možné tento nežádoucí stav včas rozeznat. Na obr. 4-4 je algoritmus, znázorňující měření vibrací v průběhu procesu tisku. Řešení bylo navrženo tak, že nijak nezasahuje do procesu tisku. Tabulka 4-3 obsahuje navržené senzory pro měření vibrací.



obr. 4-5 Algoritmus pro monitorování vibrací

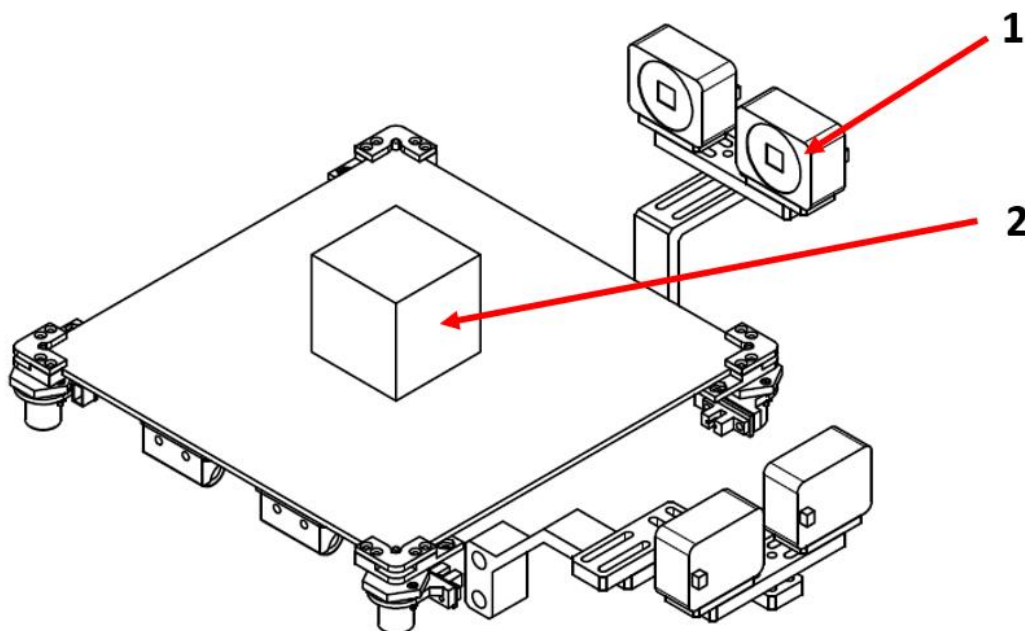
Senzor vibrací by být schopen měřit frekvenci vibrací od 1 do 500 Hz, což odpovídá spektru frekvencí v průběhu tisku.

tab. 4-3 Návrhy senzorů vibrací [28, 30–32]

Název	Typ	Rozsah (Hz)	Cena (Kč)
Arduino GY-521	IO	1-500	150,00
Bruel & Kjaer 4393	Piezo	0,1-16 500	3 000,00

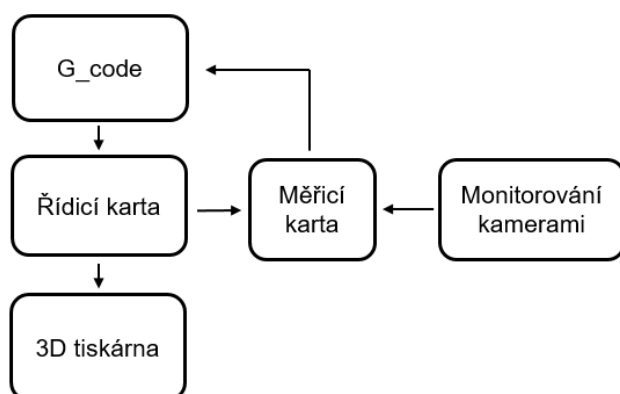
4.4 Monitorování pomocí kamer

Monitorování pomocí kamer lze oproti ostatním metodám monitorovat více parametrů najednou. Rozpoznáním obrazu je možné monitorovat tvar tisknutého objektu, nebo také výšku a šířku objektu.



obr. 4-6 Tisková plocha s kamerami

3D tiskárna může pracovat bez jakýchkoli větších úprav. Kamery jsou přes Raspberry Pi spojeny s počítačem. Po vytištění „n“ vrstvy se spustí fotografování. Během něj je tisk pozastaven. Po vytvoření fotografií probíhá zpracování obrazu. Pomocí jedné kamery lze analyzovat tvar objektu a tento tvar je porovnán s CAD modelem. Variantou se dvěma kamerami lze porovnávat rozměry objektu (výška, šířka, hloubka).



obr. 4-7 Schéma tisku a monitorování kamerami

Použití jedné kamery

Výhody:

- Kratší výpočetní čas (méně než 10 s)
- Náročnost na software
- Cena (jedna kamera v daném směru)

Nevýhody:

- Přesnost
- Neúplné rozpoznání tvaru

Použití dvou kamer

Výhody:

- Přesnost
- Rozeznání rozměrů (výška, šířka)
- Rozeznání mezer mezi vrstvami

Nevýhody:

- Cena (dvě kamery v daném směru)
- Náročnost na software
- Delší výpočet

Pro optimální použití monitorování pomocí kamer, je vhodné obě varianty zkombinovat do jedné. První varianta rychleji analyzuje chybu při rozpoznání tvaru, během pokračujícího tisku se poté dopočítávají ostatní rozměry, které jsou pořízeny pomocí varianty obsahující dvě kamery (viz. kapitola 2.3.6). Kamera by měla mít minimální rozlišení 0,2 mm / Pixel, aby bylo možné rozlišit jednu vrstvu tisku (většinou 0.2 mm) při monitorované ploše 100x100 mm.

tab. 4-4 Návrhy kamer [28, 33, 34]

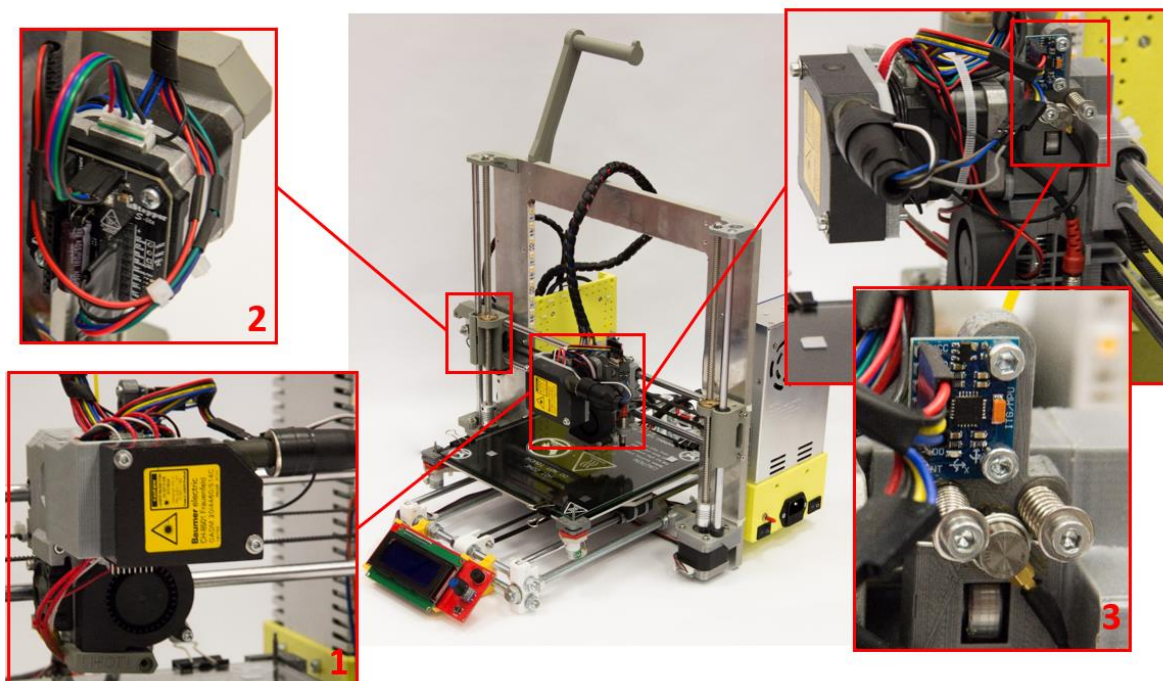
Název:	Typ	Rozlišení	Cena (Kč)
Firefly MV 1394 a	Průmyslová USB	640x480 (60 FPS)	5 000,00
MDvision 5MP	USB	640x480 (30 FPS)	1 000,00

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Navržený monitorovací systém se skládá ze tří monitorovacích modulů. Jedná se o monitorování pomocí laserového skenování, monitorování trysky pomocí enkodérů a monitorování vibračními senzory. Laserové skenování je výhodné pro identifikaci více chyb (chyby spojené s materiálem atd.), i když při tisku nedojde k identifikaci chyby, získá uživatel informace o průběhu tisku (nanesený materiál) z uložených dat po laserovém skenování. Použití enkodérů je snadné, levné a má schopnost zamezit přeskokům vrstev, což může vést k úspoře materiálu. Monitorováním vibrací nijak nezasahuje do průběhu tisku. Implementace metody je snadná a rychlá. Metoda dokáže identifikovat časté chyby spojené s vytlačováním materiálu (ucpaná tryska, špatná extruze), tudíž lze ušetřit výrobní náklady.

Dílčí kroky:

- Konstrukce a sestavení testovací FDM RepRap tiskárny.
- Navržení hardwaru (Karty, senzory...)
- Úpravy softwaru pro ovládání tiskárny.
- Navržení softwaru pro monitorovací moduly.
- Konstrukční řešení monitorovacích modulů.
- Implementace modulů na tiskárnu.
- Propojení modulů a tiskárny.
- Experimentální ověření.
- Ekonomické zhodnocení.



obr. 5-1 FDM tiskárna obsahující monitorovací moduly.

5.1 Aparatura pro monitorování

Tiskárna

Pro monitorování byla použita FDM tiskárna. Jedná se o klasickou tiskárnu pohybující se v kartézském souřadném systému, která byla vyrobena a upravena pro použití jednotlivých monitorovacích modulů. Tiskárnu ovládá karta Trigorilla, jde o upravenou kartu Arduino Mega 2560 a shiely ramps 1.4. Pro ovládání tiskárny byl zvolen software Marlin 1.1.9, který je uživatelský dostupný a dobře ovladatelný.

Skener ATOS

Pro posouzení přesnosti monitorování pomocí laserového skenování byl použit optický skener ATOS III Triplexscan. Použita byla optika se zorným polem $60 \times 45 \times 35 \text{ m} \cdot \text{s}^3$ s rozlišením 0,017 (vzdálenost dvou pixelů). Objekt byl umístěn na rotačním stole. Bylo použito manuální skenování. Vyhodnocení bylo provedeno v programu GOM Inspect Professional. Výsledky ověření přesnosti laserového skenování jsou popsány na str. 45.

DEWE 50 USB2-8

Pro komparaci výsledků měření vibrací pomocí navrženého modulu byla použita aparatura DEWE 50 USB2-8 a akcelerometrem Bruel & Kjaer 4393. Parametry senzoru jsou v datasheetu viz příloha č. 16. Pro vyhodnocení dat byl použit software DEWEsoft. Díky tomuto měření a následujícímu vyhodnocení byly získány referenční hodnoty pro vyhodnocování na ověřené aparatuře. (viz str. 50).

Měřicí karta a senzory

Kvůli obsazenosti karty tiskárny a nezasahování do řídicího softwaru, byla pro měření použita další karta Arduino 2560 (Datasheet viz příloha č. 3). Tato karta slouží jako měřicí karta pro dané monitorovací moduly (pro rychlejší vyhodnocování byla pro každý modul použita jedna měřicí karta). Tyto karty dokážou vzájemně komunikovat a může se jich zapojit několik za sebe. Komunikace těchto desek může probíhat dvěma způsoby. První způsob je přes linku I2C. Komunikace po této lince probíhá po celou dobu (od zapnutí po vypnutí desek), je tedy vhodná pro vzdálené ovládání tiskárny v průběhu tisku, především pro povely jako pozastavení nebo zrušení tisku. Druhý způsob komunikace je přes Uart (Rx, Tx). Tato komunikace se používá převážně pro programování karty. Může se však použít i v případě vzájemné komunikace mezi kartami.

Komunikace I2c: [30]

Touto metodou lze zapojit více karet Arduino mezi sebou. Jedna karta má vždy pozici hlavní karty (Master). Ostatní karty jsou v pozici vedlejší (Slave), každá karta má svou fyzickou adresu, která je nutná pro komunikaci těchto karet mezi sebou. Komunikace probíhá vždy po vyvolání příkazu mezi kartami, poté dojde k zahájení komunikace, dokud není ukončena.

- Master => Slave: Hlavní karta si vždy zavolá potřebnou kartu, poté je navázána komunikace.
- Slave => Master: Vedlejší karta vyvolá příkaz pro komunikaci s hlavní kartou, poté hlavní karta naváže komunikaci s vedlejší kartou.

Pomocí této komunikace se dají také propojit různé moduly (displej, hodiny, senzory pro měření atd.) s Arduino kartami.

Komunikace Uart: [30]

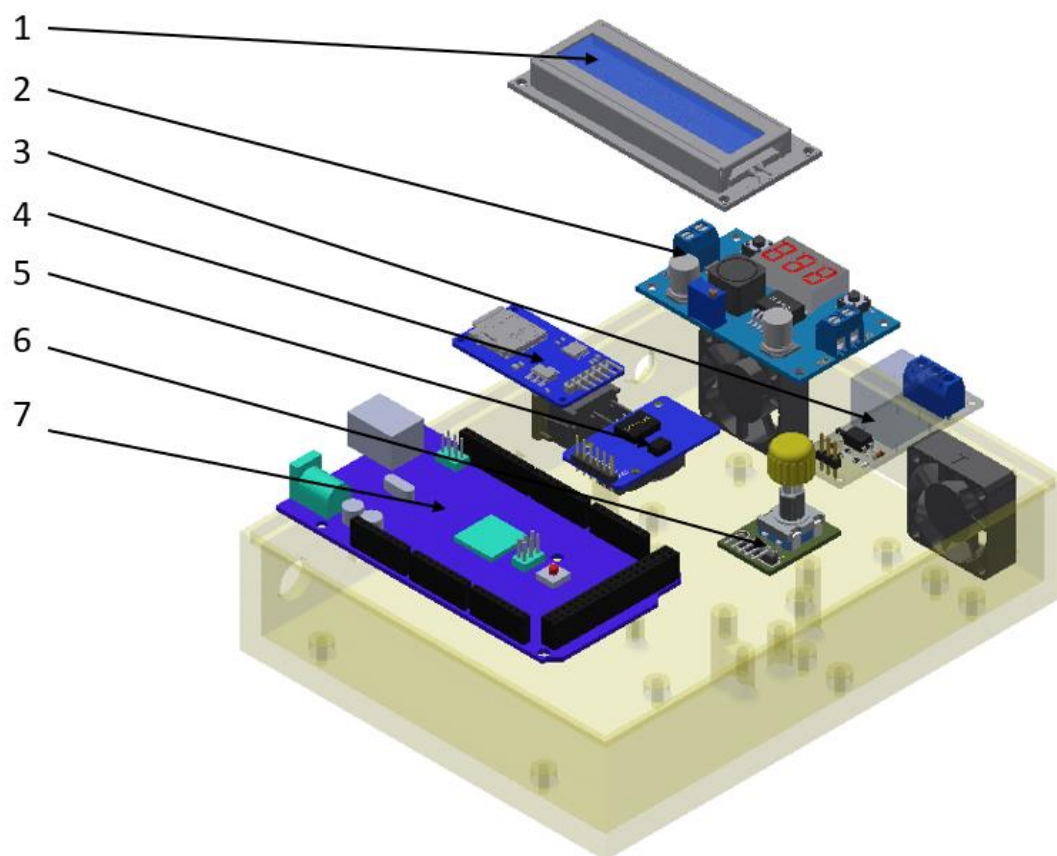
Touto metodou můžeme propojit dvě karty Arduino mezi sebou pomocí pinů Rx (přímá příkazy) a Tx (odesílá příkazy). Na rozdíl od předchozí metody není jedna karta hlavní. Karty komunikují mezi sebou neustále a jsou na stejné úrovni, a proto nemusí dojít k vyvolání komunikace.

Dalším použitým druhem komunikace může být komunikace „pin to pin“. Jedná se pouze o propojení dvou karet, kdy jeden pin (vstup) slouží pro čtení pinu (výstupu) z druhé karty. K vykonání příkazu dojde vždy po přečtení digitální „1“ nebo „0“ (napěťová hodnota pinu LOW nebo HIGH). Takto lze dosáhnout například rychlého vypnutí a zapnutí laseru.

Nevýhoda Arduino desek je, že nepracují „real time“. Zadané příkazy jsou nahrány do mezipaměti a provádějí se vždy několik kroků dopředu. Dojde-li k příkazu pozastavení tiskárny, nezastaví se okamžitě, ale až po vykonání posledního příkazu z mezipaměti. Tato nevýhoda by měla být zanedbatelnou pro aplikaci monitorování.

Návrh hardwaru monitorovacího modulu

Navržený hardware pro monitorování byl uložený do měřicího boxu. Tento box obsahuje veškerou elektroniku. Jsou zde umístěny i ventilátory pro chlazení elektroniky. Na obr. 5-2 je zobrazen hardware, 1 – displej, 2 – stabilizátor napětí, 3 – relé, 4 – slot pro SD kartu, 5 – modul hodin RTC, 6 – enkodér pro ovládání displeje, 7 – měřicí karta Arduino Mega 2560. Tento hardware je stejný pro jednotlivé monitorovací moduly. Liší se pouze senzory pro měření. Popis zapojení je lépe popsán v kapitole pro jednotlivé monitorovací moduly. Schémata zapojení jednotlivých modulů jsou v příloze č. 5, 18.



obr. 5-2 Návrh hardwaru pro monitorování

5.2 Realizace modulu monitorování pomocí laserového skenování

Tato kapitola zahrnuje dva moduly použité pro monitorování rozměrové přesnosti. Jedná se o laserové skenování a automatickou kalibraci pracovní desky. Automatická kalibrace je důležitá před samotným tiskem k vyrovnání pracovní podložky. Je nezbytná především z hlediska tisku, ale také z hlediska samotného skenování.

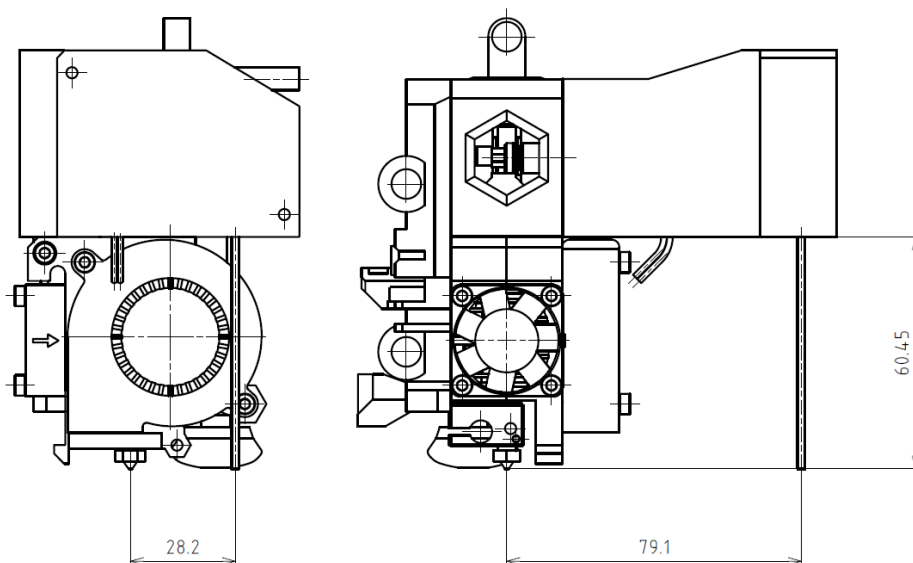
5.2.1 Laserové skenování

Konstrukce a volba komponent

Pro monitorování rozměrové přesnosti je použita metoda laserového skenování. Pro skenování byl zvolen senzor Baumer CH-8501 (OADM 20I4460/S14C) (datasheet laseru viz příloha č. 4).

Parametry laseru: měřená vzdálenost 30-130 mm (výstup – napětí (V)), napájení 12-28 V, rozlišení 0,05-0,1 mm, vlnová délka 650 nm, lineární chyba 0,03-0,22 mm [29]. Tento laser byl zvolen kvůli rozlišení 0,05 mm a lineární odchylkou $\pm 0,1$ mm při měření v pracovní vzdálenosti 60 mm [29].

Laser byl připevněn na extrudér, aby se mohl pohybovat v osách X, Y, Z. Laser byl uchycen v horní části extrudéru, aby byla dodržena pracovní výška (vzdálenost) dle datasheetu. Při konstrukci a uchycení laseru na extruder vznikl offset (posunutí) v osách X, Y, Z vůči trysce (viz obr. 5-3). Při tvorbě skenovací trajektorie vůči trajektorii tisku bylo s tímto offsetem počítáno.



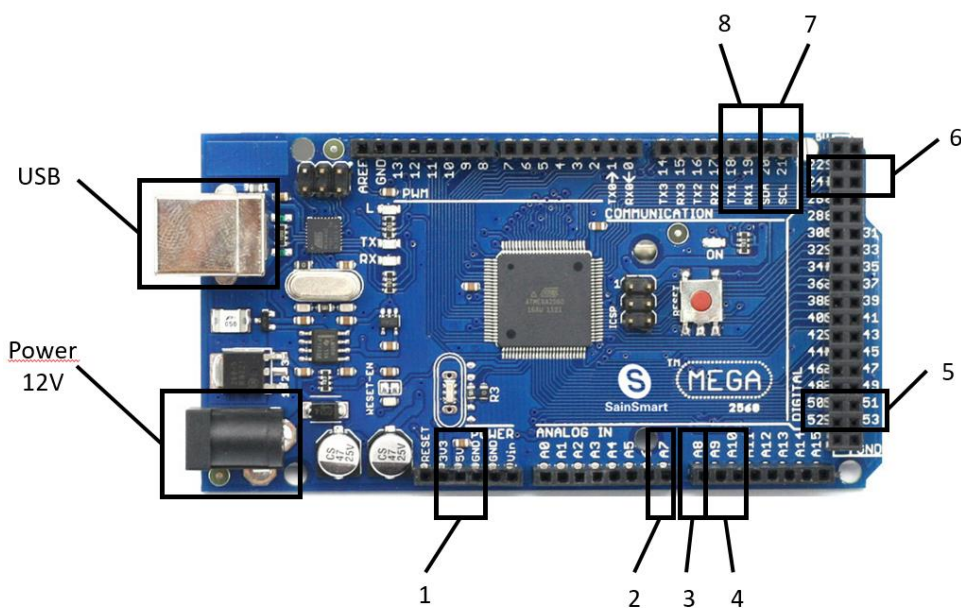
obr. 5-3 Extrudér s laserem

tab. 5-1 Cena Hardwaru pro laserové skenování [28]

Název	Pořizovací cena (Kč)	Web
Arduino Mega 2560	250,00	eBay.com
Arduino MicroSD modul	23,00	eBay.com
Arduino RTC (hodiny modul)	29,50	eBay.com
Arduino modul DC-DC	50,00	eBay.com
Arduino display	55,50	eBay.com
Micro SD 16 GB	110,50	eBay.com
Arduino relé	26,50	eBay.com
Braumer CH-8501 (OADM20I4460/S14C)	2 060,00	eBay.com
Celkem:	2 605,00	

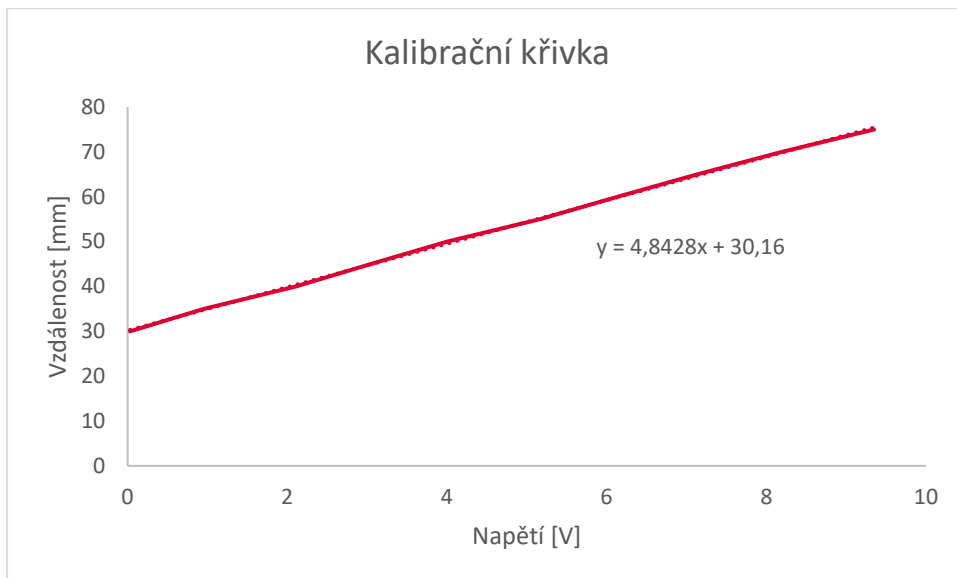
Zapojení

Pro řízení tiskárny byla použita karta Trigorilla, jedná se o upravenou kartu Arduino 2560 a shield Ramps 1.4. Pro laserové skenování byla použita měřicí karta Arduino 2560 (viz obr 5-4). Zapojení laseru je zobrazeno na schématu viz příloha č.5. Napájecí napětí laseru je 12 V (shoduje se s napájením tiskárny). Laser je zapojen přes relé (obr. 5-4 (2)). Měření vzdálenosti probíhá měřením napětí na výstupu laseru (0-10 V) obr. 5-4 (3) a přepočtem na vzdálenost (viz kalibrace a kalibrační křivka). Měřicí karta byla propojena s kartou tiskárny. Komunikace byla provedena pomocí tří pinů (obr. 5-4 (4)). Při inicializaci prvního pinu dojde ke spuštění programu pro měření laserem. Druhý pin slouží k pozastavení laserového skenování a třetí pin slouží k pozastavení tisku při identifikaci chyby (obr. 5-4 (6)). Toto propojení se ukázalo jako nejrychlejší pro danou variantu z hlediska zkrácení skenovacích časů. Napájení bylo zajištěno pomocí 12V zdroje (obr. 5-4 (Power)), měřicí karta a laser byly zapojeny přes stabilizátor, který stabilizuje napětí, aby nedošlo ke spálení laseru. Zapojení dále obsahuje modul pro zapisování a čtení z SD karty (obr. 5-4 (5)). Modul s hodinami slouží pro zapisování času (obr. 5-4 (7-I2c)). Modul s displejem slouží pro zobrazování hodnot (obr. 5-4 (7-I2c)). Napájení pro moduly (SD karty atd.) obr. 5-4(1).



obr. 5-4 Měřicí karta - zapojení pro laserové skenování

Výstupem laseru je napětí, toto napětí bylo pomocí kalibrační křivky převedeno na vzdálenost. Rovnice této křivky slouží k převodu daného napětí na danou vzdálenost pomocí konstant. Poté jsou eliminovány chyby měření a dochází k přesným výsledkům. Kalibrace probíhá měřením přesných vzdáleností. Dle odečtených napětí na výstupu laseru je následně zhotovena kalibrační křivka (obr. 5-5).

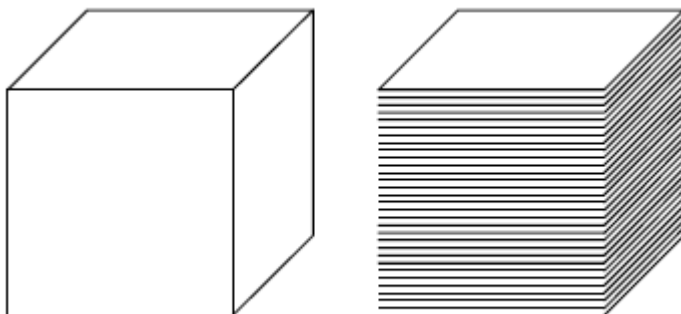


obr. 5-5 Kalibrační křivka pro kalibraci laseru

Trajektorie skenování – G-code

G-code je tzv. řídicí kód, který slouží pro řízení tiskárny [35]. Tento kód je generován ve sliceru (program pro přípravu dat k tisku). V příloze č.6 jsou popsány standardní funkce G_codu, které jsou následně obohaceny a funkce pro laserové skenování.

Tvorba G-codu a trajektorií pro skenování probíhá v programu Grashoper (součást programu Rhinoceros). Po nahrání STL modelu a definování parametrů pro tisk (teplota, rychlosti atd...) je model „rozřezán“ na jednotlivé vrstvy a jsou vygenerovány trajektorie pro tisk. Dalším důležitým krokem je definice parametrů pro skenování a následné vygenerování trajektorií pro skenování (příklad G-codu viz příloha č. 6). Tyto trajektorie jsou poté vloženy mezi řídicí kód, aby mohlo dojít ke skenování vrstvy až po jejím vytisknutí. Při skenování dané trajektorie je tisk pozastaven, dokud nedojde k ukončení skenování a pokračování v tisku. Během této doby je pozastavena retrakce (vytlačování) materiálu, ale i tak dochází k vyhřívání extruderu i vyhřívání tiskové podložky.



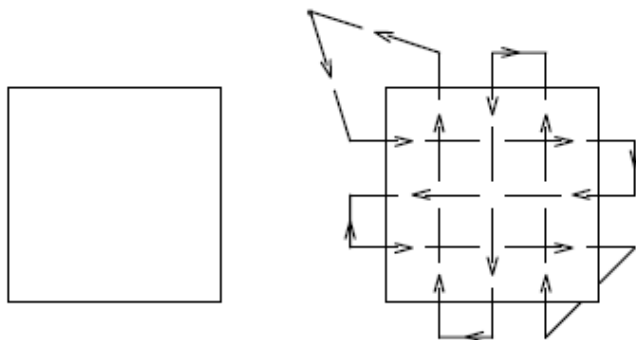
obr. 5-6 Ukázka rozložení na jednotlivé vrstvy

Trajektorie pro laserové skenování jsou dvojího typu dle vybraného typu skenování. V prvním případě jde o přeměření vytlačovaného materiálu (výška v ose Z). Trajektorie pro laserové skenování je tedy stejná jako trajektorie pro tisk, je pouze posunuta o ofset v ose XY. Tento ofset je dán umístěním laseru vůči trysce a extrudéru. Na obr. 5-7 vlevo je tisk tří vrstev, následné oskenování trajektorie (uprostřed) a pokračování v tisku vpravo.



obr. 5-7 Schéma tisku a skenování var. 1

V druhém případě jde o monitorování rozměrové přesnosti V rovině XY je tedy použito „šrafování“. Na obr. 5-8 vlevo je vidět obrys tištěného objektu. Trajektorie skenování je na obrázku vpravo.



obr. 5-8 Schéma tisku a skenování var. 2

Software pro měření a vyhodnocování dat

Laserové skenování probíhá vždy po dokončení dané vrstvy, a je vyvolání příkazem z řídicí karty tiskárny pomocí komunikace (viz předchozí kapitola). Dále bylo rozděleno na dvě varianty.

Po spuštění programu pro měřicí kartu byly z SD karty načteny hodnoty pro laserové skenování. První hodnota obsahuje výšku laseru vůči podložce. Tuto hodnotu je potřeba před každým monitorováním přeměřit - zkalibrovat. Druhá hodnota je dovolená odchylka mezi materiálem a CAD modelem (postup stanovení dovolených odchylek viz str. 45). Při měření jsou měřená data ukládána na SD kartu, aby bylo možné je vyhodnocovat i po průběhu tisku.

První varianta monitoruje (měří) výšku nanášeného materiálu v ose Z. Trajektorie skenování jsou shodné s trajektoriemi tisku. Vyhodnocování odchylek mezi reálným a CAD modelem dochází v průběhu tisku, ihned po laserovém skenování. Pokud dojde k překročení kritéria

je tisk okamžitě zastaven (Stanovení kritéria viz str. 45). Software viz příloha č. 7.

Druhá varianta měří také výšku materiálu v ose Z, avšak trajektorie pro skenování jsou odlišné (viz předchozí kapitola). Data jsou ukládána na SD kartu, nedochází k žádnému vyhodnocování během tisku. Po tisku jsou data vyhodnocena a z naměřených bodů, rychlosti skenování, skenovacích časů, jsou vyhodnoceny rozměry v rovině XY. Software viz příloha č. 8.

Popis laserového skenování

V následujících krocích je popis, pro použití modulu pro monitorování pomocí laserového skenování.

1. Krok: Příprava dat na tisk, nastavení parametrů pro skenování.
2. Krok: Uložení na SD kartu informace pro laserové skenování (vzdálenost laseru od podložky, dovolená odchylka atd.)
3. Krok: Zapnutí tiskárny, modulu pro laserové skenování (při prvním zapnutí propojení tiskárny a modulu)
4. Krok: Spuštění tisku.
5. Krok: Dokončení tisku.
6. Krok: V případě nutnosti vyhodnocení dat po tisku.

Stanovení kritérií pro měření a vyhodnocování

Přesnost laserového skenování byla ověřena pomocí optického skeneru ATOS Triplescan od společnosti GOM. Test byl proveden na zkušebním vzorku, který byl v prvním kroku oskenován pomocí modulu laserového skenování a poté oskenován skenerem ATOS. Před skenováním byl skener ATOS zkalibrován. Díky jeho vysoké přesnosti (viz kapitola - použitá aparatura) jsou data ze skeneru brána jako nominální data pro stanovení přesnosti laserového skenování.

Na obr. 5-9 je průběh skenování optickou metodou (skener ATOS), průběh skenování laserem. Z grafu vyplývá, že laser je schopen měřit s přesností $\pm 0,1$ mm v Ose Z. Hodnoty naměřené laserem jsou v tolerančním poli stanoveném pro porovnání. Při porovnání se ukázalo, že chyba při měření modulem je 4 %. Přesnost laserového skenování v rovině XY byla stanovena na $\pm 0,4$ mm (započítáním ostatních vlivů – viz [29]).

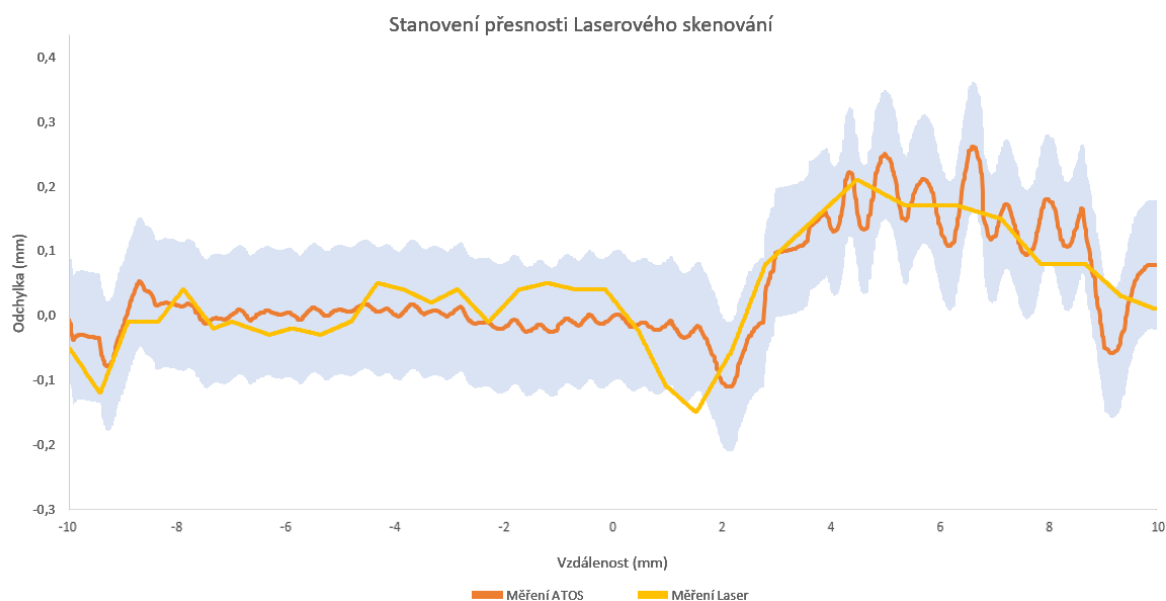
Pro identifikaci chyby při tisku bylo vytvořeno kritérium. Toto kritérium spočívá v překročení dovolené odchylky, a to více jak v „n“ případech. Při testech byla stanovena dovolená odchylka $\pm 0,2$.

tab. 5-2 Srovnání skenování metodou nejmenších čtverců

Plocha pod křivkou GOM	Plocha pod křivkou Laser
0,25 mm ²	0,36 mm ²

tab. 5-3 Základní parametry modulu

Parametry modulu Laserové skenování	
Minimální rozlišení modulu	0,05 mm
Přesnost v ose Z	$\pm 0,1$ mm
Přesnost v rovině XY	$\pm 0,4$ mm
Vzorkovací frekvence modulu	25 Hz



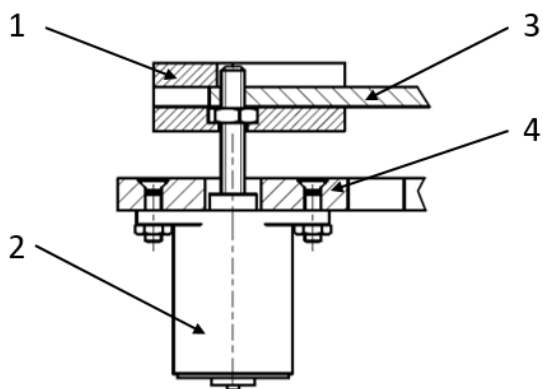
obr. 5-9 Srovnání měření

5.2.2 Automatická kalibrace pracovní desky

Konstrukce a volba komponent

Automatická kalibrace byla řešena „hardwarově“ pomocí čtyř mikro krokových motorů, na kterých byla umístěna pracovní deska. Funkce pro automatickou kalibraci byla do programu vložena jako „G“ funkce a byla vyvolána před každým tiskem, aby se podložka mohla vyrovnat do roviny.

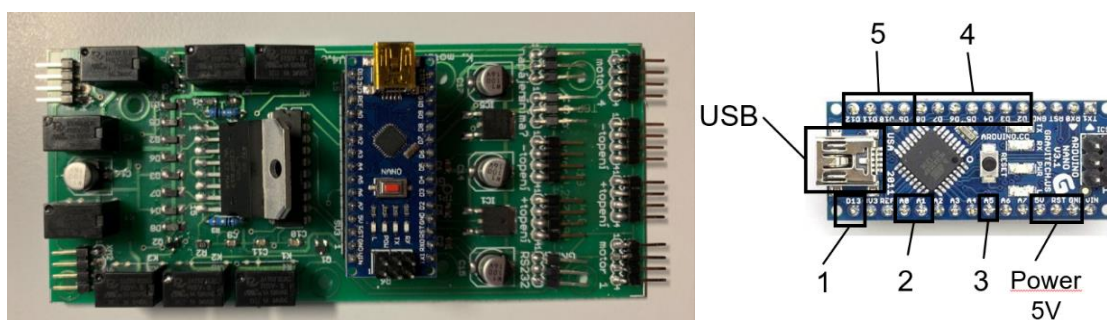
Osa Y se pohybuje po lineárních ložiscích na lineárním vedení. Lineární ložiska jsou uložena v konstrukci (obr. 5-10 (4)), která slouží pro zajištění a polohování pracovní desky (obr. 5-10 (3)). Pracovní deska je ke konstrukci přichycena pomocí krokových motorů (obr. 5-10 (2)). Hřídel těchto motorů je tvořena závitem M3, pomocí něhož je možné s deskou pohybovat v potřebném směru. Byl zvolený krokový motor (15BY) s převodovkou, který umožňuje pohybovat s pracovní deskou 0,01 mm na otáčku [28].



obr. 5-10 Schéma uložení motoru pro kalibraci desky

Zapojení

Pro zapojení tohoto modulu byla vyrobena PCB deska (obr. 5-11 - vlevo), která je osazena komponentami: Arduino Nano (řídící deska pro tuto variantu), Driver (pro řízení mikro krokových motorů), čidlo pro měření vzdálenosti (indukční, kapacitní dle použití). Varianta neobsahuje end stopy (koncová čidla). Deska měří proud procházející motorem. Pokud se zvětší proud (deska dojde do krajní polohy), driver odpojí motor. Zapojení komponent do Arduina Nano je na obr. 5-11 vpravo, komunikace s kartou tiskárny (1-2), měření vzdálenosti (3), driver (4), krokové motory (5). Schéma zapojení je popsáno v příloze č. 12.



obr. 5-11 Řídící deska pro automatickou kalibraci (vlevo), zapojení řídicí karty (vpravo)

tab. 5-4 Cena Hardwaru pro automatickou kalibraci [28, 36]

Název	Požizovací cena (Kč)	Web
Arduino Nano	63,00	eBay.com
PCB deska	400,00	jlpcb.com
Krokový motor 15BY (4 ks)	600,00	eBay.com
Indukční čidlo	222,00	eBay.com
Celkem:	1 285,00	

Software pro automatickou kalibraci pracovní desky

Pro automatickou kalibraci byla vytvořena funkce „G 39“, vyvoláním této funkce v řídicí kartě tiskárny se spustí proces kalibrace. Kalibrace probíhá pomocí pěti kalibračních bodů (střed, čtyři krajní polohy). Na konci tohoto procesu je automaticky vyrovnána pracovní deska a připravena k tisku.

Řídicí deska tiskárny a karta pro automatickou kalibraci (Arduino Nano – příloha č. 9) spolu komunikují pomocí sériové linky (Uart - Rx, Tx (obr. 5-11 vpravo (2))). Karta tiskárny posílá po sériové lince příkazy, tyto příkazy poté vykonává Arduino Nano. Ukázalo se, že karta tiskárny je tak zahlcená softwarem, že nezvládá „čist“ sériovou komunikaci. Proto byl tento proces zjednodušen. Karta tiskárny po zadání příkazu „čeká“, dokud se příkaz nevykoná a Arduino Nano nepošle kartě impuls, který inicializuje k pokračování v procesu. Tento impuls je pouze změnou z „0“ na „1“ (obr. 5-11 vpravo (1)). Celý popis komunikace, kalibrace a řízení je lépe popsán v příloze č. 10 (Software viz příloha č. 11).

V následujících krocích je popis průběhu automatické kalibrace. Tento průběh se vykonává automaticky.

1. Krok: Po zapnutí automatické kalibrace tiskárna dojede do krajní polohy.
2. Krok: Následně sjede pracovní deska do krajní polohy.
3. Krok: Poté tisková hlava s čidlem najede na první kalibrační bod (středový).
4. Krok: Deska jede automaticky nahoru, dokud nesečne čidlo vzdálenosti.
5. Krok: Po sepnutí čidla se deska vrátí o 1 mm zpět dolů.
6. Krok: Následně tisková hlava dojede na druhý kalibrační bod. V tomto bodě jede krokový motor směrem nahoru, dokud nedojde k sepnutí čidla.
7. Krok: Postupně se zkalibrují další body.
8. Krok: Po úspěšné kalibraci se tiskárna vrátí zpět do krajní polohy.

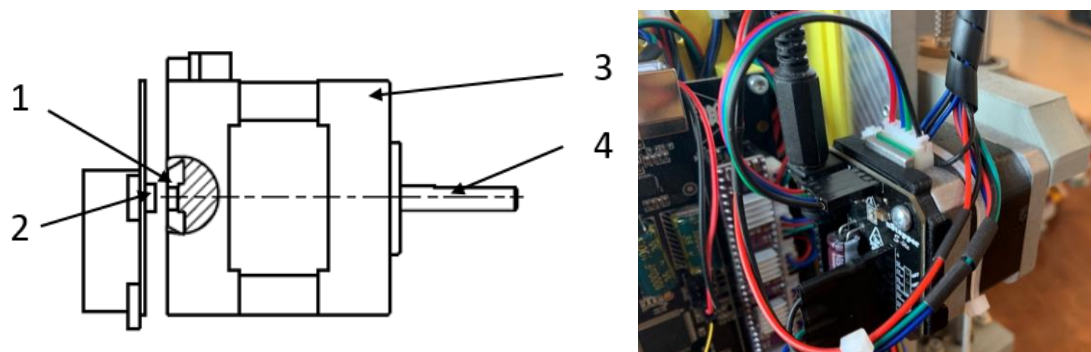
5.3 Realizace modulu pro monitorování polohy trysky pomocí enkodérů

Monitorování polohy trysky probíhá nepřetržitě v průběhu tisku bez jakéhokoli zásahu do softwaru. To umožňuje monitorování polohy trysky v reálném čase. Tiskárna se pohybuje v souřadném systému X, Y, Z pomocí krokových motorků.

Konstrukce a volba komponent

Na hřídeli krokového motorku je umístěn magnet (obr. 5-12 vlevo (1)), který se otáčí s hřídelí. Enkodér snímá magnetické pole a dokáže vyhodnotit, v jaké poloze se hřídel nachází. Algoritmus poté porovnává vstupní hodnoty (směr a krok) s hodnotami, které monitoruje enkodér. Pro monitorování byla použita platforma uSteppers s - lite. Jedná se

o desku obsahující rotační enkodér (12-ti bitový, 4096 kroků (rozlišení 0.088 ° [21]).



obr. 5-12 Schéma osazení enkodéru na krokový motor (vlevo), implementace enkodéru (vpravo)

tab. 5-5 Cena Hardwaru pro monitorování polohy trysky [21]

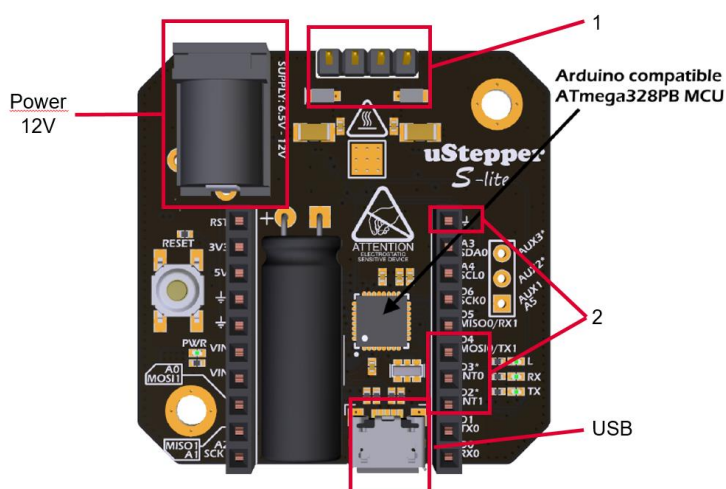
Název	Pořizovací cena (Kč)	Web
uSteppers S-lite (2ks)	950/ks	usteppers.com
Celkem:	1900	

Zapojení

Komunikace mezi řídicí deskou a platformou s enkodéry probíhá pomocí čtyř pinů (obr. 2-13 (2)). Jsou to tyto piny:

- Dir – Direction - jedná se o směr otáčení,
- Stp – Step - jedná se o počet kroků,
- En – Enable - jedná se o to, zda je motor zapnutý nebo vypnutý,
- GND – jedná se uzemnění.

Deska dále obsahuje čip (AT mega 328PB MCU). Pomocí tohoto čipu lze desku naprogramovat pro monitorování polohy trysky (obr. 5-13). Modul je napájen 12V.



obr. 5-13 Zapojení enkodéru

Software pro měření a vyhodnocování dat

Princip monitorování polohy trysky spočívá v porovnávání polohy dle G_codu a aktuální polohy. Aktuální poloha se odečítá z krokových motorků pomocí enkodéru. Enkodér je absolutní (nepotřebuje referenční otáčku na začátku měření). Teoretická poloha je získávána z G-codu (počet kroků, směr) a posílá se do měřicí desky pomocí komunikace. V případě, kdy dojde k odchylce mezi teoretickou a aktuální polohou, je poloha automaticky dorovnána.

Vyhodnocování zajišťuje PID regulátor. Jedná se o spojitý regulátor, ve kterém se nastavují hodnoty konstant P (Proporcionální složka – prostý zesilovač), I (Integrační složka – časová konstanta), D (Derivační složka). Byla nastavena regulační odchylka. Ideální nastavení se ukázalo jako $P = 1$, $I = 0,02$, $D = 0,006$ mm. Software viz příloha č. 14.

Popis monitorování polohy trysky

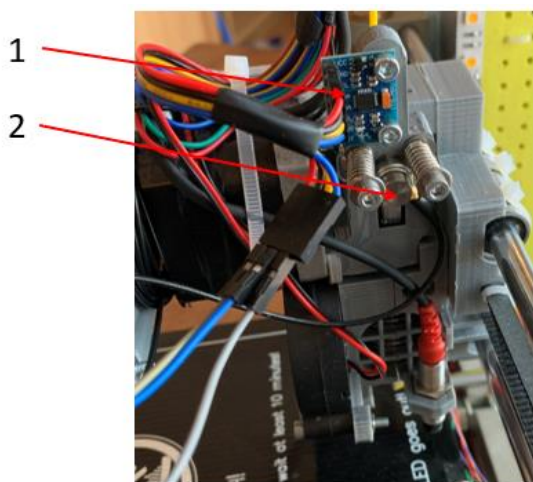
V následujících krocích je popis průběhu monitorování polohy trysky. Postup je nutné vykonat pouze při prvním použití.

1. Krok: Osazení krokového motoru enkodérem (enkodér, magnet).
2. Krok: Propojení motoru, enkodéru, karty tiskárny.
3. Krok: Nastavení konstant v kartě tiskárny, nastavení hodnot PID regulátoru.
4. Krok: Následuje automatická kontrola polohy trysky.

5.4 Realizace modulu pro monitorování vibračními senzory

Konstrukce a volba komponent

Použité senzory byly Arduino GY-521 (tříosý akcelerometr – příloha č. 15) a akcelerometr Bruel & Kjaer 4393 (viz příloha č. 16). Z článku (viz kap. 2), kde se autoři zabývali monitorováním vibrací a následnému vyhodnocování, vyplývá, že akcelerometr by měl být umístěn co nejbliž trysce. Při konstrukci a řešení umístění senzoru nebylo možné jej umístit v nejbližší možné vzdálenosti k trysce, kvůli vysokým teplotám při tisku. Arduino akcelerometr GY-521 je schopen odolávat teplotě cca do 60 °C, Bruel & Kjaer 4393 umožňuje odolat teplotě do cca 250°C. Tento akcelerometr vyhovuje účelům měření, avšak z důvodu složitosti zapojení byl použit pouze pro kalibraci a počáteční měření. Finální varianta modulu využívá akcelerometr Arduino GY-521, který je umístěn u podavače filamentu. Toto místo se ukázalo jako nejvhodnější z testovaných míst. Nejvíce se zde projevíly měřené vibrace při přeskokování „kolečka“ podavače, což měla za následek ucpaná tryska.



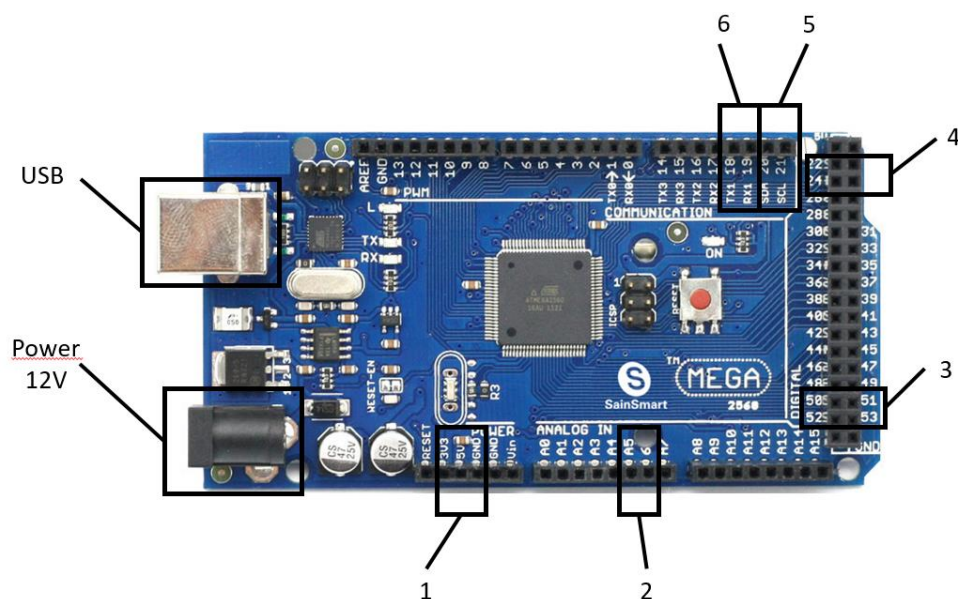
obr. 5-14 Umístění akcelerometrů, 1 - Arduino GY 521, 2- Bruel & Kjaer 4393

tab. 5-6 Cena Hardwaru pro monitorování vibrací [28]

Název	Požizovací cena (Kč)	Web
Arduino Mega 2560	250,00	eBay.com
Arduino MicroSD modul	23,00	eBay.com
Arduino RTC (hodiny modul)	29,50	eBay.com
Arduino modul DC-DC	50,00	eBay.com
Arduino display	55,50	eBay.com
Micro SD 16 GB	110,50	eBay.com
Arduino GY-521	20,00	eBay.com
Bruel & Kjaer 4393 (pouze pro kalibraci)	(300,00)	eBay.com
Celkem:	539,00	

Zapojení

Pro modul monitorování vibrací byla použita karta Arduino mega 2560. K této kartě byl připojen Akcelerometr GY-521 pomocí komunikace I2c a napájení (obr. 5-15 (1,5)). Tento modul obsahuje také 16-bitový procesor pro měření dat. Z tříosého akcelerometru bylo vyhodnocováno pouze zrychlení v jedné ose (ose Z – dle umístění). Toto bylo provedeno z důvodu pohybu extrudéru, tudíž ostatní osy snímaly parazitní zrychlení pohybu extrudéru. Arduino akcelerometr GY – 521 byl také zkalibrován na kalibračním stolku a hodnoty byly porovnány s akcelerometrem Bruel & Kjaer 4393. Modul monitorování vibrací dále obsahuje – modul SD karty (obr. 5-15 (3)), displej (obr. 5-15 (1, 5)), hodiny reálného času. Pro zastavení tisku, v případě identifikace chyby a rychlé zastavení tisku, byla měřicí karta propojená s kartou tiskárny pomocí dvou pinů (pin (LOW, HIGH), GND) – obr. 5-15 (2,4). Kompletní zapojení viz příloha č. 18.



obr. 5-15 Měřící karta – zapojení pro laserové skenování

Software pro měření a vyhodnocování vibrací

Měření vibrací probíhá nepřetržitě souběžně s procesem tisku. Software monitorování nijak nezasahuje do softwaru tiskárny. Měřící karta měří data vzorkovací frekvencí cca 585 Hz, v průběhu měření dochází k jejich vyhodnocování. Po překročení podmínky, která reprezentuje vzniklou chybu, byl proces tisku zastaven (viz následující kapitola). Měřená data mohou být v průběhu tisku ukládána na SD kartu nebo vypisování na displej. Pro dosažení co nejvyšší vzorkovací frekvence, která je závislá na softwaru a hardwaru modulu. Byl tento modul použit pouze pro měření a následné vyhodnocování vibrací (bez ukládání dat atd.). Pro měření dat a ověření funkčnosti modulu bylo použito vypisování dat na sériový monitor (Arduino – PC). Tím nedošlo k takovému omezení vzorkovací frekvence. Software viz příloha č. 17.

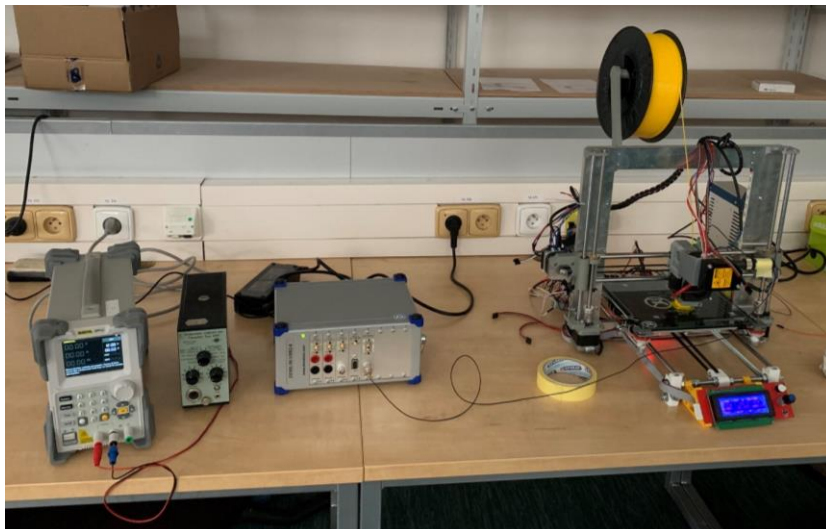
Popis monitorování vibračními senzory

V následujících krocích je popis průběhu monitorování vibračními senzory. Tento postup je nutné vykonat pouze při prvním použití.

1. Krok: Instalace akcelerometru na extrudér.
2. Krok: Propojení měřící karty a karty tiskárny.
3. Krok: Naměření referenčních hodnot a nastavení konstant (kritérium).
4. Krok: Následuje automatická kontrola měření vibrací při tisku. Při identifikaci chyby je tisk pozastaven.

Stanovení kritérií pro měření a vyhodnocování

Měření vibrací a následné testování modulu pro monitorování vibračními senzory probíhalo v laboratoři UK v Brně na aparatuře DEWE 50 USB (viz příloha č. 2). Aparatura pro měření obsahovala již zmíněný DEWE 50 USB2-8, který sloužil jako měřicí karta pro senzor Bruel & Kjaer 4393, data byla vyhodnocována pomocí programu DEWEsoft 7.1.1



obr. 5-16 Měření na aparatuře DEWE 50 USB

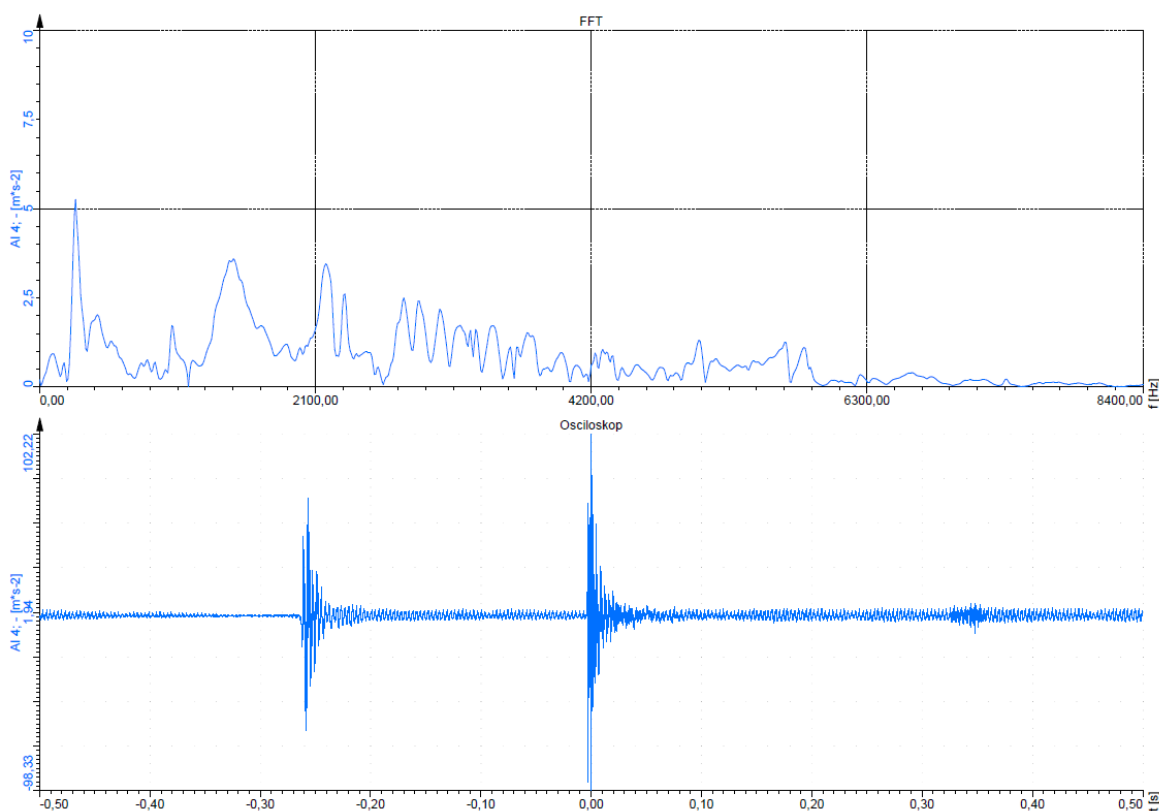
Nejprve byl senzor Bruel & Kjaer 4393 zkalibrován na kalibračním stolku. Následně byly měřeny vibrace na několika místech extrudéru. Ukázalo se, že nejlepší místo bylo v blízkosti podavače materiálu. Po zkalibrování senzoru Bruel & Kjaer 4393 byly naměřeny referenční hodnoty vibrací v módech tiskového procesu. Pomocí FFT (Fast Fourier Transformation) byly z vibrací určeny referenční frekvence při daném procesu. Následně byl změřen a nasimulován proces „ucpání“ trysky. Poté byl stejný postup použit u Arduino akcelerometru GY-521, první byl senzor zkalibrován na kalibračním stolku pomocí referenčních hodnot ze senzoru Bruel & Kjaer 4393. Software pro měření Arduino akcelerometrem byl vyladěn pro měření vibrací (úprava konstant pro měření, převod jednotek atd.) dle referenčních hodnot. Následně byl umístěn na tiskárnu a byly měřeny hodnoty na obou senzorech (Arduino GY-21, Bruel & Kjaer 4393). Toto měření probíhalo zejména pro kalibraci a ověření funkčnosti Arduino senzoru. Poté byla ověřena vzorkovací frekvence pro měření Arduinem, která musela být dvakrát vyšší než měřená frekvence vibrací. Ukázalo se, že podmínka pro vzorkování při měření byla splněna. Vzorkovací frekvence měřícího Arduina byla 585 Hz měřená frekvence byla 282 Hz.

V následující tab 5-9 je přehled frekvencí a intenzita vibrací v daném stavu tiskového procesu. Při chybě tisku vibrace vzrostly na frekvenci 283 Hz. Tato frekvence byla dominantní při tomto stavu.

tab. 5-7 Přehled frekvencí při jednotlivých procesech tisku (senzor Bruel & Kjaer 4393)

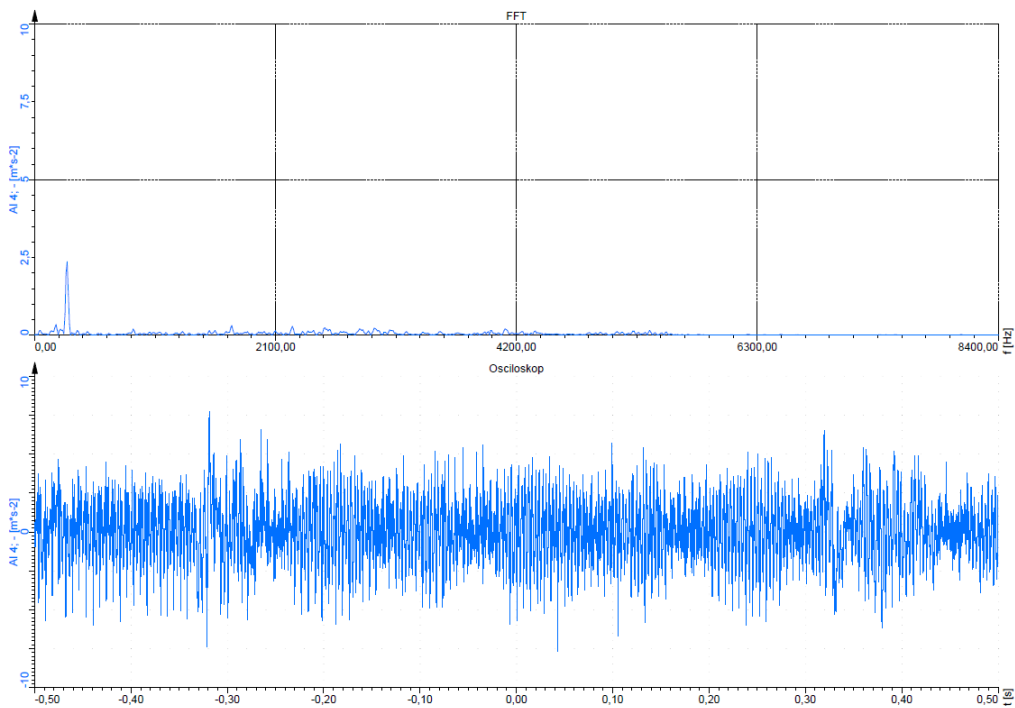
Proces	Dominantní frekvence Hz	Vibrace $m \cdot s^{-2}$
Klid – před tiskem	107	0,2
Vytlačování materiálu	292	1,25
Tisk	292	2,15
Chyba tisku	283	3,45

Na obr. 5-17 je zaznamenaná chyba tisku (přeskočení podavače) v průběhu měření. Z horního grafu můžeme vidět nárůst vibrací na dominantní frekvenci (první pík). Chyba tisku se projevila i nárůstem ostatních frekvencí. Ze spodního grafu můžeme vidět, že při chybě tisku vzrostla hodnota vibrací až na cca $100 m \cdot s^{-2}$ oproti normálním hodnotám při tisku (cca -6 až $6 m \cdot s^{-2}$). Pomocí těchto měření bylo vytvořeno kritérium pro zastavení tisku.



obr. 5-17 Simulace chyby při tisku (senzor Bruel & Kjaer 4393)

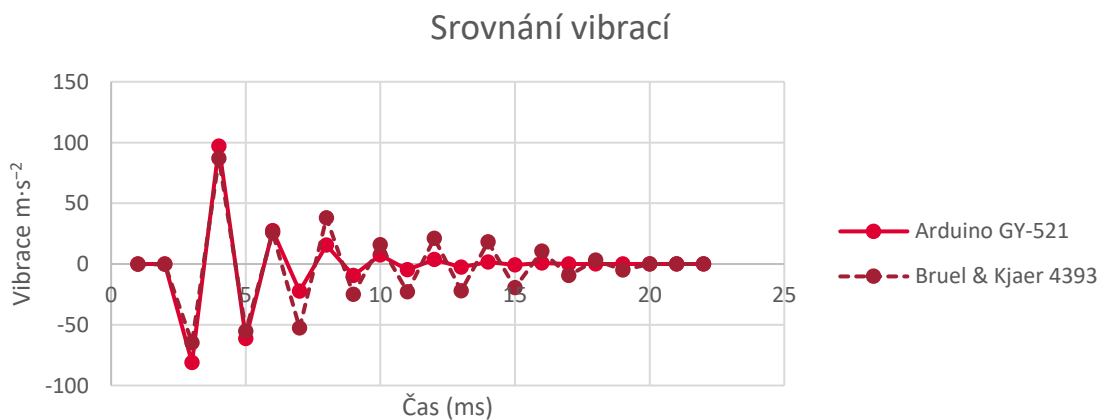
Na obr. 5-18 je znázorněn normální stav při tisku. Hodnota vibrací na dominantní frekvenci (292 Hz) odpovídá $2,3 m \cdot s^{-2}$. Hodnoty v celém spektru měření (obr. 5-18 spodní) jsou od $- m \cdot s^{-2}$ do $6 m \cdot s^{-2}$. Při měření Arduino akcelerometrem nebyla použita FFT z důvodu náročnosti na hardware. Byly tedy porovnávány hodnoty v celém spektru měřených frekvencí.



obr. 5-18 Průběh měření vibrací při tisku (senzor Bruel & Kjaer 4393)

Kritérium pro zastavení tisku při identifikaci ucpání trysky bylo zvoleno jako náhlý nárůst vibrací v průběhu tisku. K pozastavení tisku došlo při překročení nominálních hodnot (více jak $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Počet překročených hodnot musel být víc jak 10 a to v časovém intervalu pod 3 vteřiny od zaznamenání první překročené hodnoty. Tím bylo zamezeno občasným chybám při měření akcelerometrem GY-521.

Na obr. 5-19 je vidět srovnání těchto senzorů v průběhu jednoho píku (chyby tisku). Z grafu je patrné, že při měření stejných hodnot vibrací je Arduino akcelerometr méně přesný. Také je u něho rychlejší útlum vibrací oproti senzoru Bruel & Kjaer 4393. Tyto nevýhody jsou z hlediska funkčnosti modulu zanedbatelné. Při měření vibrací je nutné rozeznat prudký nárůst vibrací, a to Arduino akcelerometr umožňuje.



obr. 5-19 Srovnání senzorů pro měření vibrací

5.5 Experimentální ověření

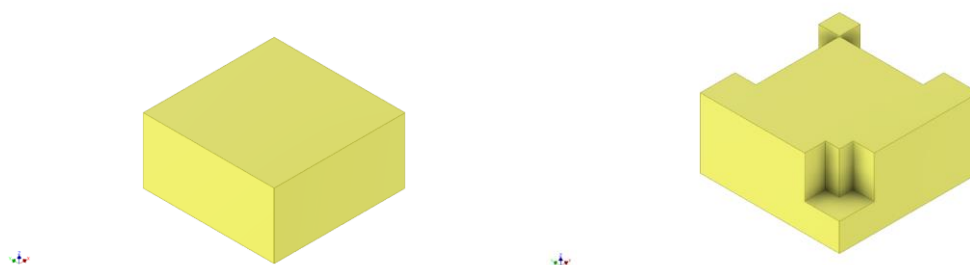
Po konstrukci jednotlivých modulů a následnému vyladění softwaru pro moduly následovalo experimentální ověření každého modulu. Byla provedena sada testů pro každý modul 5-10 testů.

5.5.1 Modul monitorování pomocí laserového skenování

Modul pro monitorování pomocí laserového skenování byl testován na zkušebních modelech. Var. 1 (monitorování materiálu v ose Z) byla testována na automatické rozpoznání chyby při tisku (chybějící materiál). Během var. 2 (monitorování rozměrové přesnosti) bylo testováno ověření přesnosti laserového skenování, při vyhodnocování rozměrů (např. šířka objektu).

Experimenty - Var. 1

Prvním testovacím modelem byla krychle o rozměrech 20 x 20 x 10 mm. Druhým testovacím modelem je stejná krychle 20 x 20 x 10 mm, ovšem se záměrně odebraným materiálem. Výška odebraného materiálu byla 2 mm (v každé vrstvě skenování). Tímto byla uměle vytvořena (nasimulována) chyba při tisku (obr. 5-20 vpravo). Parametry tisku a skenování jsou v tabulce. Kritérium pro identifikaci chyby bylo překročení dovolené odchylky a to při „n“ překročení.



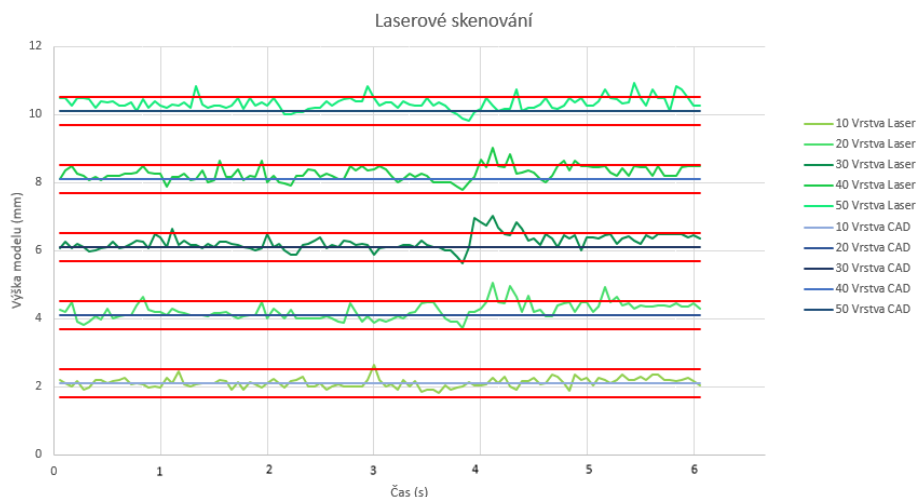
obr. 5-20 Testovací modely bez chyby (vlevo), s uměle vytvořenou chybou (vpravo)

tab. 5-8 Základní parametry pro test

Parametry tisku	Parametry skenování
Rychlost tisku 30 mm·s ⁻¹	Rychlost skenování 30 mm·s ⁻¹
Teplota 190/70 °C (PLA)	Skenování po 10 vrstvách (2 mm)
Průměr trysky 0.4 mm	Dovolená odchylka ± 0,2 mm
Výška vrstvy 0.2 mm	Počet stanovených překročení 8

Test – model 1

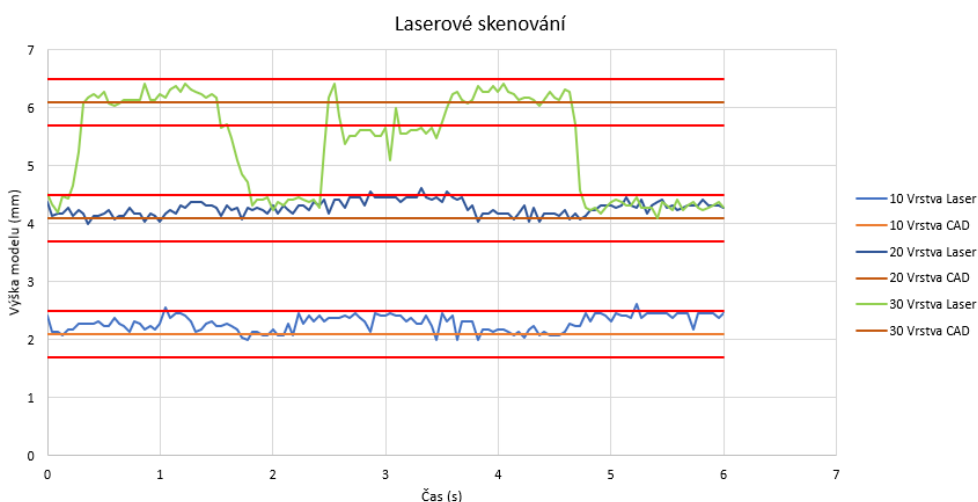
Na obr. 5-21 je znázorněno laserové skenování v průběhu tisku. Z jednotlivých skenů lze vyhodnotit, že množství nanášeného materiálu nepřekračuje dovolené odchytky. Ačkoli bylo identifikováno několik překročení v každé vrstvě, kritérium (viz parametry) pro identifikaci chyby tisku nebylo překročeno.



obr. 5-21 Průběh laserového skenování

Test – model 2

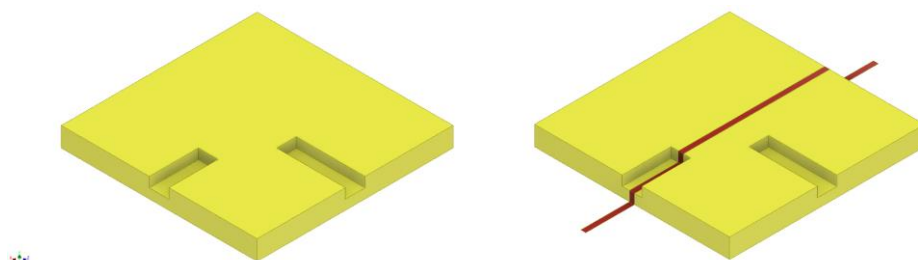
Na obr. 5-22 je znázorněno laserové skenování v průběhu tisku. Z grafu vyplývá, že nanášený materiál v 10 (výška modelu 2 mm) a 20 (výška modelu 4 mm) vrstvě tisku nepřekračuje stanovené odchytky. V 30 vrstvě tisku (výška modelu 6 mm) chybí značné množství materiálu, byl zde úmyslně odebrán materiál ve výšce 2 mm (nasimulována chyba tisku). Identifikováno bylo 85 hodnot překračující stanovenou odchytku. Kritérium bylo tedy překročeno a tisk byl pozastaven po dokončení skenování.



obr. 5-22 Průběh laserového skenování

Experimenty - Var. 2

Testovacím modelem pro tuto variantu byla krychle 20 x 20 x 2 mm, kde byla použita strategie skenování obr. 5-23 vpravo. Je zde znázorněna jednoduchá trajektorie pro naskenování profilu objektu.



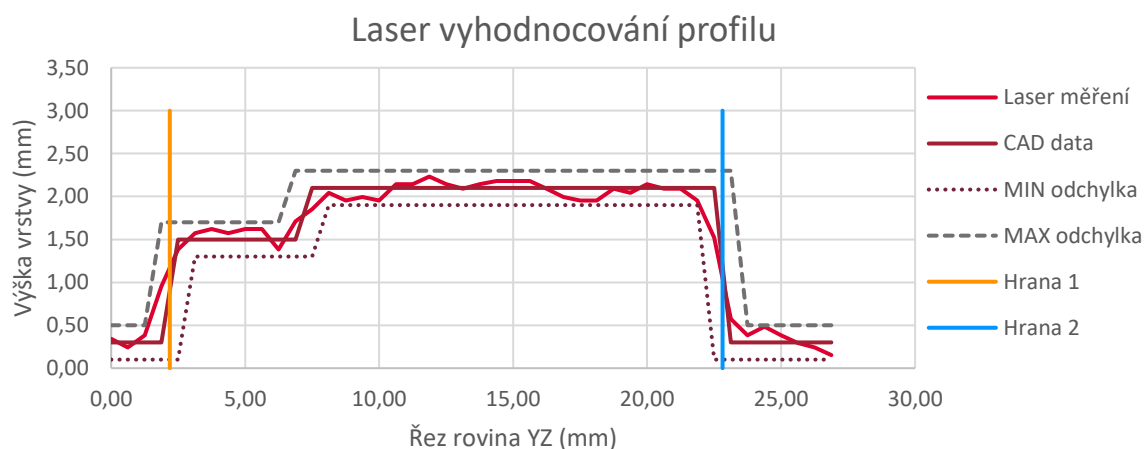
obr. 5-23 Testovací model vlevo, vpravo vyznačena skenovací trajektorie.

tab. 5-9 Základní parametry pro test

Parametry tisku	Parametry skenování
Rychlost tisku 30 mm·s ⁻¹	Rychlost skenování 15 mm·s ⁻¹
Teplota 190/70 °C (PLA)	Skenování po 10 vrstvách (2 mm) – Dokončení tisku
Průměr trysky 0.4 mm	
Výška vrstvy 0.2 mm	Dovolená odchylka ± 0,4 mm

Při tomto testování laserového skenování probíhalo monitorování výšky materiálu v ose Z. Data byla po tisku zpracována v PC. Pomocí rychlosti skenování naskenovaných dat byla dále vypočítána šířka objektu v rovině XY. Šířka objektu by měla odpovídat nominální hodnotě z CAD modelu.

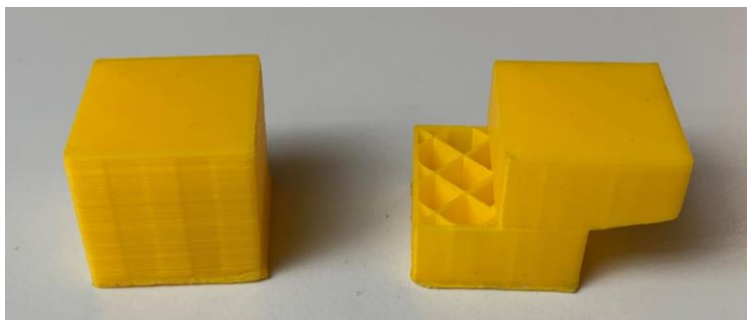
Na obr. 5-24 je znázorněn průběh laserového skenování profilu, ze kterého lze vidět, že materiál v ose Z nepřesáhl dovolené meze. Dále lze vypočítat šířku profilu, v tomto případě je šířka 20,59 mm (vzdálenost mezi hranami 1-2).



obr. 5-24 Vyhodnocení profilu

5.5.2 Modul pro monitorování polohy trysky pomocí enkodérů

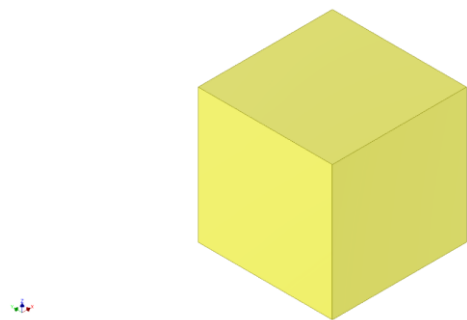
Schopnost monitorovacího modulu zabránit chybě přeskočení vrstev byla testována na modelu tvaru krychle (20 x 20 x 20 mm). Na obrázku 5-25 jsou díly, při jejichž tisku byla uměle simulována chyba. Vlevo je díl, u něhož nebyla chyba korigována. Vpravo je korektně vytištěný díl, u něhož byl monitorovací modul v provozu. Celkem bylo provedeno 5 testů. Ve všech případech došlo ke korekci polohy trysky a vytištění bezvadných dílů.



obr. 5-25 Srovnání úpravy polohy pomocí enkodérů

5.5.3 Modul pro monitorování vibračními senzory

Modul pro monitorování vibračními senzory byl testován na zkušebním modelu – viz obr. 5-26. Testování spočívalo jednak v měření vibrací pomocí Arduino akcelerometru GY-521, ale i schopnost modulu pozastavit tisk na základě stanovených kritérií. Byla úmyslně nasimulovaná chyba ucpání trysky. To způsobilo náhlé zvýšení vibrací při tisku.



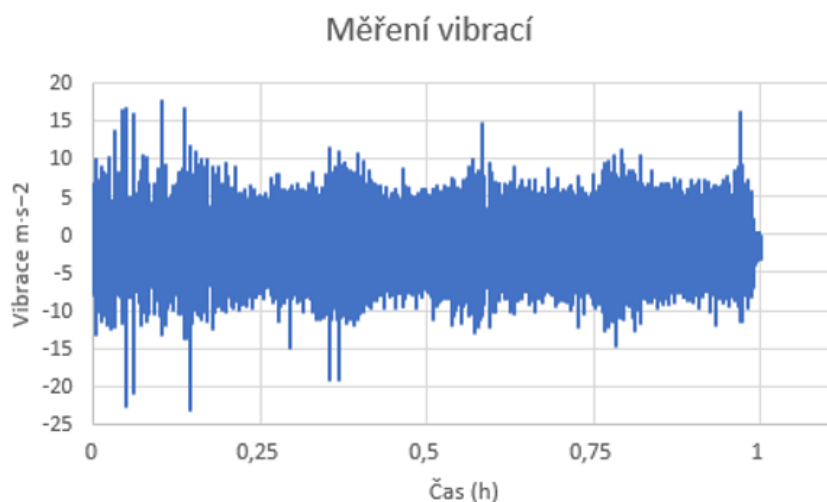
obr. 5-26 Testovací model vlevo

tab. 5-10 Základní parametry pro test

Parametry tisku	Kritérium pro testy
Rychlost tisku 30 mm·s ⁻¹	Překročení hodnoty vibrací 10 m·s ⁻²
Teplota 190/70 °C (PLA)	Počet identifikovaných hodno 10
Průměr trysky 0,4 mm	Časový interval 3 vteřiny
Výška vrstvy 0,2 mm	

Test model 1

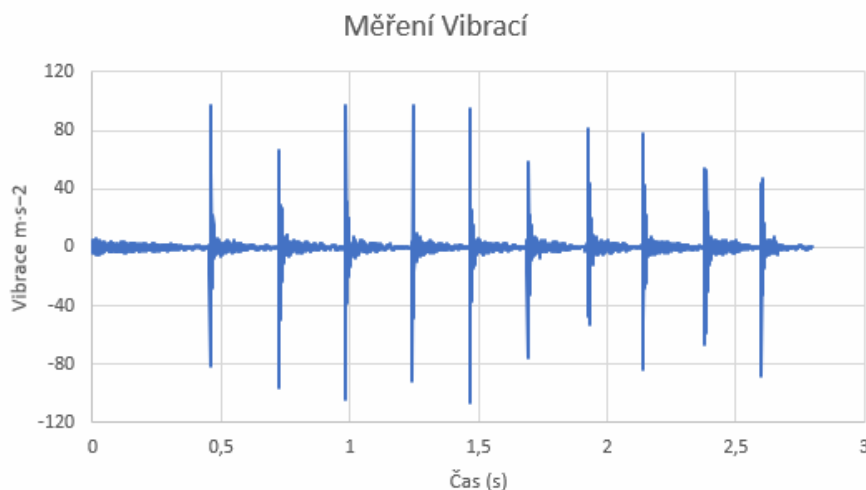
V prvních testech bylo vtištěno 5 modelů. Doba jednoho tisku byla cca 45-55 minut. Při těchto testech nedošlo k chybě při tisku.



obr. 5-27 Průběh vibrací při tisku

Test simulace chyby

Při testech, kdy byla úmyslně simulována chyba tisku. Byl tisk automaticky zastaven po-té co modul identifikoval chybu tisku. Při identifikaci bylo překročeno kritérium viz parametry. Průběh vibrací při chybovém stavu obr. 5-28.



obr. 5-28 Průběh vibrací – chyba tisku

6 DISKUZE

Diskuze obnáší zhodnocení výsledků jednotlivých monitorovacích modulů. Jedná se především o výhody a nevýhody těchto modulů s ohledem na konstrukci, hardware, software a cena.

6.1 Modul monitorování pomocí laserového skenování

Hlavní výhodou tohoto modulu je vyhodnocování přídatku materiálu (Var.1) v průběhu tiskového procesu. V případě nedostatku materiálu modul automaticky pozastaví tiskový proces. Z naměřených dat lze následným zpracováním po tisku získat rozměry objektu v rovině XY (Var. 2). Byla provedena série testů, výsledek testů je vyhodnocen v tab. 6-2. Při experimentálním ověření došlo ke shodě 95 % měřených výsledků. Software dokázal s úspěšností 100 % pozastavit tisk při překročení kritéria. Algoritmus je schopen identifikovat chyby spojené s nedostatkem materiálu, odlepení tisku od podložky a odlepení vrstev. Automatická kalibrace pracovní desky je schopná sama o sobě zajistit předcházení chybových stavů nastavením ideální výšky první vrstvy. Při testech byla ověřena stanovená přesnost při použití jednotlivých variant monitorování (viz tab. 6-1).

tab. 6-1 Přesnost modulu monitorování pomocí laserového skenování.

Přesnost Osa Z	Přesnost v rovině XY
± 0,1 mm	± 0,4 mm

tab. 6-2 Vyhodnocení testů – monitorování přídatku materiálu

Test	Počet skenů	Počet chybných stavů	Počet identifikovaných stavů
Normální stav	35	0	2
Chybový stav	15	15	15
Celkem:	50		

Při sérii testů, kdy bylo použito laserové skenování k monitorování rozměrů objektu, došlo k ověření přesnosti laseru v rovině XY (tab. 6-3), kdy hodnoty z modulu jsou v dovolených mezích ± 0,4 mm oproti hodnotám stanovených skenerem ATOS.

Nevýhodou tohoto modulu je prodloužení výrobních časů kvůli pozastavení tisku z důvodů skenování (tab. 6-4). Při 1 z 10 testů došlo ke špatnému spojení vrstev, to bylo způsobeno klesající teplotou materiálu kvůli působení okolních vlivů v průběhu skenování.

tab. 6-3 Vyhodnocení testů – monitorování rozměrů objektu

Test	CAD šířka (mm)	ATOS – reálná šířka (mm)	Skenovaná šířka (mm)	Rozdíl (mm)
1	20,00	20,25	20,62	0,37
2	20,00	20,23	20,59	0,36
3	20,00	20,21	20,60	0,39
4	20,00	20,28	20,65	0,37
5	20,00	20,22	20,60	0,38
Průměr	20,00	20,24	20,61	0,37

tab. 6-4 Prodloužení časů tisku

Tisk (minut)	Skenování (minut)	Celková doba (minut)	Prodloužení
50	6	56	12 %

Ke zlepšení přesnosti měření modulu by mohlo dojít při zvýšení tuhosti uložení laseru na extrudéru (zamezení kmitání) nebo snížením pracovní výšky (snížení lineární chyby měření). Tím by došlo k výraznému zásahu do tiskárny, což by ovšem bylo v rozporu s požadovanou jednoduchostí implementace modulu.

6.2 Modul pro monitorování polohy trysky pomocí enkodérů

Výhodou tohoto modulu je automatická úprava polohy trysky v případě, že by došlo k chybě v průběhu tiskového procesu (odskok vrstev). V tab. 6-5 je průběh experimentů. Bylo provedeno 5 testů a v každém testu bylo nasimulováno 5 chybových stavů. Při experimentálním ověření došlo k 92 % shodě měřených výsledků. Při identifikaci chybového stavu software dokázal s úspěšností 100 % korigovat polohu trysky. Tím došlo k zamezení zborcení tisku. Použitím platformy s uStepper S-lite došlo také k výraznému snížení hluku FDM tiskárny.

tab. 6-5 Zhodnocení testů – monitorování trysky pomocí enkodérů

Test	Simulace chybového stavu	Počet simulovaných stavů	Počet identifikovaných stavů	Počet korekcí polohy
1	Ano	5	5	5
2	Ano	5	4	4
3	Ano	5	5	5
4	Ano	5	5	5
5	Ano	5	4	4

6.3 Modul pro monitorování vibračními senzory

Hlavní výhodou tohoto řešení je jednoduchá implementace a vysoká schopnost identifikace chybového stavu při nízkých pořizovacích nákladech. Bylo provedeno 5 testů bez simulované chyby a 5 testů s chybou (ucpána tryska). Výsledek těchto testů je v tab. 6-6. Při testech došlo k 97 % shodě mezi simulovanými a identifikovanými chybovými stavy. Software dokázal s úspěšností 100 % pozastavit tisk při překročení kritéria. Algoritmus je schopen identifikovat chybu tisku, kdy dojde k ucpání trysky nebo k vydření filamentu. Chyba byla simulována v prvních 15 minutách tisku tím, že po její identifikaci došlo k zastavení tisku a tím k úspoře 3,75 hodiny tzv. tisku naprázdno. U tiskárny bez monitorovacího modulu by tiskárna pokračovala v procesu tisku, při kterém by ovšem nedocházelo k extruzi materiálu.

Arduino akcelerometr se ukázal jako vyhovující senzor pro měření vibrací. Použitím profesionálního senzoru (např. Bruel & Kjaer 4393) pro monitorovací modul by mohlo dojít k měření širšího frekvenčního pásma vibrací a tím by se zpřesnilo měření vibrací. To by ovšem mělo za následek navýšení pořizovací ceny z hlediska senzoru a nutnosti použít jinou měřící kartu.

tab. 6-6 Zhodnocení testů – Modul pro monitorování vibračními senzory

Test	Simulace chybového stavu tisku	Počet simulovaných stavů	Počet identifikovaných stavů	Kritérium	Tisk
1	Ne	0	0	Nesplněno	Dokončen
2	Ne	0	0	Nesplněno	Dokončen
3	Ne	0	0	Nesplněno	Dokončen
4	Ne	0	0	Nesplněno	Dokončen
5	Ne	0	0	Nesplněno	Dokončen
6	Ano	10	10	Splněno (10 identifikací)	Zrušen
7	Ano	10	10	Splněno (10 identifikací)	Zrušen
8	Ano	15	15	Splněno (10 identifikací)	Zrušen
9	Ano	15	14	Splněno (10 identifikací)	Zrušen
10	Ano	20	19	Splněno (10 identifikací)	Zrušen

6.4 Zhodnocení použitého hardwaru a softwaru

Měřicí karta Arduino Mega 2560 se prokázala jako vyhovující karta pro monitorování. Při monitorování byla pro každý modul použita vlastní měřicí karta. Navržený software byl vyladěn tak, aby obsahoval minimální množství výpočetní kapacity měřicí karty. Tím bylo dosaženo vyšší vzorkovací frekvence a zpřesnění měřených veličin.

Do budoucna bych navrhoval zvýšení výpočetní kapacity. Poté by bylo možné rozšířit jednotlivé softwary pro monitorování o další funkce. Například software pro laserové skenování by mohl automaticky vyhodnocovat rozměry objektu v reálném čase. V případě chybějícího materiálu by nemuselo docházet k zastavení tisku, ale mohly by být automaticky změněny parametry tisku (retrakce materiálu atd.). Software pro monitorování vibrací by mohl být obohacen o FFT analýzu v reálném čase. Tím by docházelo k rozlišování frekvence vibrací, tudíž by mohly být identifikovány další chybové stavy. Navýšení výpočetní kapacity by ovšem vedlo k vyšší pořizovací ceně.

6.5 Ekonomické zhodnocení

Použitá FDM tiskárna byla pořízena za 20 000 Kč. V tab. 6-7 je ekonomické srovnání ceny jednotlivých modulů oproti celkové ceně tiskárny. Pořizovací cena jednotlivých modulů nepřekračuje 13 % z celkové ceny tiskárny.

Z hlediska pořizovací ceny modulů a dosažených výsledků bych navrhoval rozšíření mezi „hobby“ uživatele 3D tisku. Mohlo by tak dojít k omezení zmetkovitosti a šetřením přírodních zdrojů v širším měřítku.

tab. 6-7 Ekonomické srovnání

Varianta	Pořizovací cena (Kč)	Zastoupení (%)
Monitorování pomocí laserového skenování	2 605,00	13,00
Automatická kalibrace	1 285,00	6,40
Monitorování polohy trysky pomocí enkodérů	1 900,00	9,50
Modul pro monitorování vibračními senzory	539,00	2,70
Celkem:	6 329,00	31,60

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá monitorováním procesu 3D tisku metodou Fused Deposition Modeling. Hlavním cílem práce byl vývoj monitorovacího systému pro FDM tiskárny, který dokáže rozpoznat vybrané problémové stavy během procesu 3D tisku.

V rešerši byly analyzovány známé chybové stavy (chyby) v procesu 3D tisku. Následně byla zpracována analýza teoretických i komerčně používaných metod pro monitorování. Poté byl navržen monitorovací systém, který se skládá ze tří modulů. Moduly lze použít samostatně nebo je lze kombinovat. Realizovány byly moduly pro monitorování pomocí laserového skenování, monitorování polohy trysky pomocí enkodérů a monitorování vibračními senzory. Realizace obsahovala konstrukční, hardwarové a softwarové řešení. Oproti teoretickým článkům, o které se tyto moduly opíraly, bylo do modulů vloženo softwarové kritérium. Tím docházelo k automatickému vyhodnocování měřených dat v reálném čase, v případě nutnosti systém automaticky zastavil tisk bez zásahu uživatele.

Následně byly funkční moduly implementovány a propojeny pomocí komunikace s FDM tiskárnou. Po implementaci byly moduly experimentálně ověřeny. Při experimentech došlo k 94,7 % úspěšně identifikovaných chybových stavů. Jednalo se o chyby tisku v podobě chybějícího materiálu, odskoku vrstev a ucpané trysky. Výstupem práce je funkční vzorek monitorovacího systému. Jednotlivé monitorovací moduly nepřesahují svou cenou 13 % z ceny použité FDM tiskárny. Moduly nijak nezasahují do hardwaru a softwaru FDM tiskárny. Implementace modulů je snadná a rychlá.

Hlavním přínosem této práce je automatická identifikace chybových stavů, která v případě nutnosti zastaví tisk. To vede ke zmenšení zmetkovitosti a šetření výrobních nákladů. Z dosažených výsledků je patrné, že algoritmus pro vyhodnocování má velký potenciál. Do budoucna by software mohl při identifikaci chybového stavu automaticky upravit parametry tisku. Tím by došlo k zamezení nebo úplnému odstranění chybového stavu bez zásahu uživatele.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *MarkForged*. USA, Boston: Mark Forged. 2018 [vid. 22. březen 2018]. Dostupné z: <https://markforged.com/x3/>
- [2] CRUMP, S Scott. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*
- [3] *Simplify3d*. USA: Copyright © 2019 Simplify3D. 2019 [vid. 22. březen 2018]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>
- [4] MORRIS, E D. *Additive Manufacturing /3D Printing*. 2014. ISBN 9781569905821.
- [5] *Makexyz*. Dostupné z: <https://www.makexyz.com/printer-services/process/SLA-3D-printing-services>
- [6] DIZON, John Ryan C., Alejandro H. ESPERA, Qiyi CHEN a Rigoberto C. ADVINCULA. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*. 2018, roč. 20, s. 44–67. ISSN 22148604.
- [7] *Livescience*. USA: Purch © 2019. 2019 [vid. 22. březen 2018]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [8] GEBHARDT, Andreas a Jan-steffen HÖTTER. *www.hanser-fachbuch.de (outside the Americas)*. nedatováno. ISBN 9781569905821.
- [9] COOPER, Kenneth G. *Rapid Prototyping Technology: Selection and Application*. 2001. ISBN 0824702611.
- [10] *Kylestetzrp*. 2008 [vid. 22. březen 2018]. Dostupné z: <https://kylestetzrp.wordpress.com/2009/05/20/fused-deposition-modeling-fdm/>
- [11] FOR, Method. Molinari 1991 - Sphiggurus.pdf. 1992, č. 19.
- [12] OSTRAVA, Univerzita, Fakulta STROJN, Helebrant FRANTI, Hrabec LADISLAV a Blata JAN. *FAKULTA STROJNÍ PROVOZ , DIAGNOSTIKA A ÚDRŽBA*. 2013. ISBN 9788024830285.
- [13] *Make*: USA: ©2004 - 2019 Maker Media. [vid. 24. leden 2019]. Dostupné z: <https://makezine.com/comparison/3dprinters/how-we-test/shootout/>
- [14] RAO, Prahalad K., Jia (Peter) LIU, David ROBERSON, Zhenyu (James) KONG a Christopher WILLIAMS. Online Real-Time Quality Monitoring in Additive Manufacturing Processes Using Heterogeneous Sensors. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015, roč. 137, č. 6, s. 061007. ISSN 1087-1357.
- [15] LIU, C., D. ROBERSON a Z.J. KONG. Textural Analysis-based Online Closed-Loop Quality Control for Additive Manufacturing Processes. *IISE Annual Conference*. 2017, č. August, s. 1127–1132.
- [16] TLEGENOV, Yedige, Yoke San WONG a Geok Soon HONG. A dynamic model for nozzle clog monitoring in fused deposition modelling. *Rapid Prototyping Journal*. 2017, roč. 23, č. 2, s. 391–400. ISSN 13552546.
- [17] XU, Xiaochi, Chaitanya Krishna Prasad VALLABH, Zachary James CLELAND a Cetin CETINKAYA. Phononic Crystal Artifacts for Real-Time In Situ Quality Monitoring in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017, roč. 139, č. 9, s. 091001. ISSN 1087-1357.

- [18] DINWIDDIE, Ralph B., Lonnie J. LOVE a John C. ROWE. Real-time process monitoring and temperature mapping of a 3D polymer printing process. 2013, roč. 8705, s. 87050L. ISSN 0277786X.
- [19] POLLARD, D., C. WARD, G. HERRMANN a J. ETCHES. Filament Temperature Dynamics in Fused Deposition Modelling and Outlook for Control. *Procedia Manufacturing*. 2017, roč. 11, č. June, s. 536–544. ISSN 23519789.
- [20] MANUFACTURING, Additive. Preprint: Nuchitprasitchai, S., Roggemann, M. & Pearce, J.M. Factors effecting real-time optical monitoring of fused filament 3D printing. 2017, roč. 2, č. 3, s. 133–149.
- [21] *UStepper*. Denmark: UStepper © 2019. 2019 [vid. 22. březen 2018]. Dostupné z: <http://www.ustepper.com/index/what-is-ustepper/>
- [22] *Kickstarter*. Brooklyn, USA: Kickstarter, PBC © 2019. 2019 [vid. 22. březen 2018]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/301805155/ustepper>
- [23] *Prusa Research*. Praha: Prusa Research s.r.o. 2019 [vid. 22. duben 2019]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz>
- [24] *3DFactory*. Ostrava: Copyright 2018 - 3dfactory.cz. 2018 [vid. 22. duben 2019]. Dostupné z: https://3dfactory.cz/produkt/anet_a8_stavebnice/
- [25] *Stratasys*. United States: Stratasys Ltd. © 2019. 2019 [vid. 22. duben 2019]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com>
- [26] *3DWiser*. Praha: Copyright 2019 3Dwiser. 2019 [vid. 22. duben 2019]. Dostupné z: https://eshop.3dwiser.com/3d-tiskarny/ultimaker-3/?gclid=EAIaIQobChMIp5Xh0brk4QIVhYjVCh2XXAmrEAQYASABEgLMMvD_BwE
- [27] Photoelectric sensors Distance sensors OADM 20I4460 / S14C Photoelectric sensors Distance sensors OADM 20I4460 / S14C. 2011, č. 50.
- [28] *EBay*. USA: Copyright © 1995-2019 eBay Inc. [vid. 27. duben 2019]. Dostupné z: <https://www.ebay.com>
- [29] *RS*. UK: © RS Components Ltd. 2019 [vid. 27. duben 2019]. Dostupné z: <https://uk.rs-online.com/web/p/photoelectric-sensors/3651651/>
- [30] *Arduino shop*. Havlíčkův Brod: © Copyright ECLIPSE s.r.o. 2019 [vid. 22. duben 2019]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz>
- [31] CHARGE, Piezoelectric a Accelerometer TYPES. P R O D U C T D ATA Piezoelectric Charge Accelerometer Types 4393 and 4393-V. nedatováno.
- [32] AVE, Borregas, Document NUMBER a Release DATE. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. 2012, roč. 1, č. 408.
- [33] *MD vision*. DHgate: Copyright Notice ©. 2019 [vid. 22. duben 2019]. Dostupné z: <https://www.dhgate.com/>
- [34] SENSOR, Imaging. Firefly MV ®. nedatováno, s. 44–45.
- [35] *Marlin*. USA: © 2019 GitHub, Inc. 2019 [vid. 7. květen 2019]. Dostupné z: <http://marlinfw.org/meta/gcode/>
- [36] *JLCPCB*. Guangdong, China: © 2018 JLCPCB.COM. 2018 [vid. 17. květen 2019]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Použité zkratky

CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FFT	Fast Fourier Transform
IO	Integrovaný Obvod
LOM	Laminated Object Manufacturing
PC	Computer
SD	Secure Digital
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering

9.2 Použité symboly

I	Oblast
M,N	Rozměr oblasti
G	Prvek definován četností kombinace dvou pixelů
i,j	Intenzita pixelů
$\Delta r, \Delta c$	Prostorová vzdálenost

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 1-1	Schéma metody FDM – Patent US 5121329 [10]	13
obr. 2-1	Metoda FDM [9]	15
obr. 2-2	Testovací výtisk [12].....	16
obr. 2-3	(a) Schéma metody FFF, (b) Schéma metody FFF vybaveno několika senzory pro měření [13].....	18
obr. 2-4	Senzorové pole pro snímání metody FFF [13].....	18
obr. 2-5	Přiřazení sledovaných procesních stavů k vyhodnoceným datům. [13]	18
obr. 2-6	Upevnění digitálních mikroskopů na extrudér [14]	19
obr. 2-7	Snímaná oblast tisku (b) bez defektů, (c) s defekty [14]	19
obr. 2-8	Zkoušky monitorovacího systému [14].....	20
obr. 2-9	Schéma metody využívající ultrazvuk [16]	21
obr. 2-10	a) rozložení teplot ve vzdálenosti 1 palce od podložky, b) rozložení teplot ve vzdálenosti 11 palců od podložky [17].....	22
obr. 2-11	Příklady snímání trysky IR kamerou, vlevo vrstva pokládána na podložku, vpravo vytlačování materiálu skrze trysku [17, 18]	23
obr. 4-1	Schéma tisku a monitorování	29
obr. 4-2	Algoritmy pro laserové skenování	30
obr. 4-3	Schéma automatické kalibrace	31
obr. 4-4	Algoritmus pro monitorování enkodéry.....	32
obr. 4-5	Algoritmus pro monitorování vibrací	33
obr. 4-6	Tisková plocha s kamerami.....	34
obr. 4-7	Schéma tisku a monitorování kamerami	34
obr. 5-1	FDM tiskárna obsahující monitorovací moduly.....	36
obr. 5-2	Návrh hardwaru pro monitorování	39
obr. 5-3	Extrudér s laserem	40
obr. 5-4	Měřicí karta - zapojení pro laserové skenování.....	41
obr. 5-5	Kalibrační křivka pro kalibraci laseru.....	42
obr. 5-6	Ukázka rozložení na jednotlivé vrstvy.....	42
obr. 5-7	Schéma tisku a skenování var. 1	43

obr. 5-8	Schéma tisku a skenování var. 2.....	43
obr. 5-9	Srovnání měření	45
obr. 5-10	Schéma uložení motoru pro kalibraci desky	46
obr. 5-11	Řídící deska pro automatickou kalibraci (vlevo), zapojení řídicí karty (vpravo)	46
obr. 5-12	Schéma osazení enkodéru na krokový motor (vlevo), implementace enkodéru (vpravo).....	48
obr. 5-13	Zapojení enkodéru	48
obr. 5-14	Umístění akcelerometrů, 1 - Arduino GY 521, 2- Bruel & Kjaer 4393.....	50
obr. 5-15	Měřicí karta – zapojení pro laserové skenování.....	51
obr. 5-16	Měření na aparatuře DEWE 50 USB.....	52
obr. 5-17	Simulace chyby při tisku (senzor Bruel & Kjaer 4393)	53
obr. 5-18	Průběh měření vibrací při tisku (senzor Bruel & Kjaer 4393).....	54
obr. 5-19	Srovnání senzorů pro měření vibrací.....	54
obr. 5-20	Testovací modely bez chyby (vlevo), s uměle vytvořenou chybou (vpravo) .	55
obr. 5-21	Průběh laserového skenování	56
obr. 5-22	Průběh laserového skenování	56
obr. 5-23	Testovací model vlevo, vpravo vyznačena skenovací trajektorie.	57
obr. 5-24	Vyhodnocení profilu	57
obr. 5-25	Srovnání úpravy polohy pomocí enkodérů.....	58
obr. 5-26	Testovací model vlevo	58
obr. 5-27	Průběh vibrací při tisku	59
obr. 5-28	Průběh vibrací – chyba tisku	59

11 SEZNAM TABULEK

tab. 4-1	Návrhy laseru [26–29].....	31
tab. 4-2	Návrhy enkodéru [27, 30][29, 30].....	32
tab. 4-3	Návrhy senzorů vibrací [27, 29, 31, 32].....	33
tab. 4-4	Návrhy kamer [27, 33, 34]	35
tab. 5-1	Cena Hardwaru pro laserové skenování [27].....	40
tab. 5-2	Srovnání skenování metodou nejmenších čtverců.....	44
tab. 5-4	Základní parametry modulu	45
tab. 5-6	Cena Hardwaru pro automatickou kalibraci [27, 36].....	46
tab. 5-7	Cena Hardwaru pro monitorování polohy trysky [20]	48
tab. 5-8	Cena Hardwaru pro monitorování vibrací [27]	50
tab. 5-9	Přehled frekvencí při jednotlivých procesech tisku (senzor Bruel & Kjaer 4393)	53
tab. 5-10	Základní parametry pro test	55
tab. 5-11	Základní parametry pro test	57
tab. 5-12	Základní parametry pro test	58
tab. 6-1	Přesnost modulu monitorování pomocí laserového skenování.	60
tab. 6-2	Vyhodnocení testů – monitorování přídavku materiálu.....	60
tab. 6-3	Vyhodnocení testů – monitorování rozměrů objektu	61
tab. 6-4	Prodloužení časů tisku.....	61
tab. 6-5	Zhodnocení testů – monitorování trysky pomocí enkodérů	61
tab. 6-6	Zhodnocení testů – Modul pro monitorování vibračními senzory	62
tab. 6-7	Ekonomické srovnání	63
tab. 12-1	Tabulka přílohy.....	71

12 SEZNAM PŘÍLOH

tab. 12-1 Tabulka přílohy

Číslo	Název
1	Chyby tisku
2	Dewe 50 USB2-8
3	Arduino Mega 2560
4	Laser Baumer CH8501
5	Zapojení Laserové skenování
6	G_code
7	Laser Software Var. 1
8	Laser Software Var. 2
9	Arduino Nano
10	G_code G39
11	Automatická kalibrace Software
12	Automatická kalibrace zapojení
13	uStepper S-lite
14	Enkodéry Software
15	Arduino GY-521
16	Bruel Kjaer 4393
17	Vibrace Software
18	Zapojení monitorování pomocí vibrací
19	Marlin Software
20	CAD data
21	G_cody testování